

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

MARIANE HAWERROTH

**UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTO MINERAL PARA REMOÇÃO DO
CORANTE BASAZOL *YELLOW 5G***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2020**

MARIANE HAWERROTH

**UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTO MINERAL PARA REMOÇÃO DO
CORANTE BASAZOL *YELLOW 5G***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do Departamento Acadêmico de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli.

Coorientadora: M.^a Lariana Negrão Beraldo de Almeida



PONTA GROSSA

2020



TERMO DE APROVAÇÃO

UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTO MINERAL PARA REMOÇÃO DO CORANTE BASAZOL *YELLOW*
5G

por

MARIANE HAWERROTH

Monografia apresentada no dia 14 de outubro de 2020 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Priscilla dos Santos Gaschi Leite
(UTFPR)

Prof. Dr. Cesar Augusto Canciam
(UTFPR)

Profa. Dra. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli
Orientadora

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

Dedico este trabalho a Deus, aos meus familiares e amigos por todo amor e apoio nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar, iluminar e dar forças.

Agradeço aos meus pais, José e Laurita, por todo amor, apoio, incentivo, paciência e também por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos. Sem vocês nada seria possível.

Aos meus irmãos Fernando e André por todo apoio e carinho.

Ao meu namorado Willian, por todo amor, auxílio e companheirismo.

A minha orientadora professora Dr^a. Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli, por todas as oportunidades e pela confiança depositada em mim neste período. Por toda generosidade em dividir seus conhecimentos e pelo exemplo de profissional, sou muito grata.

A minha co-orientadora Lariana Beraldo, por todas as sugestões durante a execução da pesquisa, pelo incentivo e por sua disponibilidade.

As minhas amigas, por me apoiarem durante todo o curso, pelo carinho e por tornarem esta jornada mais alegre.

A professora Dra. Priscilla dos Santos Gaschi Leite e ao professor Dr. César Augusto Canciam por comporem a banca examinadora e ajudarem a enriquecer o trabalho através de seus conhecimentos.

A professora Dra. Giane Gonçalves por disponibilizar os equipamentos necessários para realização da pesquisa.

A todos os professores pela dedicação e por todos os conhecimentos compartilhados.

A UTFPR pelo auxílio financeiro, pela concessão das instalações e materiais que possibilitaram a realização deste trabalho.

A todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão da minha graduação em Engenharia Química.

“A persistência é o caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

HAWERROTH, Mariane. **Utilização de subproduto mineral para remoção do corante Basazol Yellow 5G**. 2020. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

A indústria de embalagens é responsável pela produção de inúmeros produtos com as mais diferentes finalidades, incluindo as embalagens de polpa moldada. Este tipo de embalagem é muito utilizada para o acondicionamento e transporte de produtos, em especial, alimentos. Em geral, a fabricação deste produto utiliza uma grande quantidade de água em seus processos, principalmente nas etapas em que ocorre a preparação da massa. A não aderência completa do corante a massa do papel torna essa etapa uma das maiores causadoras de coloração do efluente, requisitando tratamento adequado. A adsorção é um método de tratamento que utiliza um material adsorvente sólido para remover alguma espécie em meio fluido. Este método pode ser utilizado para a remoção de corante de efluentes e possibilitar seu lançamento em condições adequadas. O subproduto mineral proveniente da detonação de rochas é produzido em grandes quantidades nas pedreiras e não possui finalidade completamente definida. Neste trabalho foi avaliada a capacidade do subproduto mineral de remover o corante Basazol Yellow 5G em solução aquosa e em efluente industrial a partir da análise de parâmetros operacionais e do teste cinético, e também a capacidade de dessorção. Os experimentos foram divididos em: preparo e caracterização do material adsorvente, testes operacionais, teste cinético, teste de dessorção e teste em efluente industrial. Visto que o material utilizado estava previamente peneirado, foi determinado que o diâmetro médio das partículas era de 0,038 mm. Por meio do pH_{pzc} 6,8 obteve-se que a remoção é favorecida por valores de pH mais básicos uma vez que o corante em estudo possui natureza catiônica. Os testes preliminares consistiram em determinar as condições de operação mais eficientes, sendo estas a temperatura de 30°C, agitação de 150 rpm e pH 13. O teste cinético foi realizado em triplicata e sistema em batelada. A análise cinética indicou um tempo de equilíbrio de 60 minutos com uma remoção de 93,58%. É válido destacar que nos primeiros 5 minutos a remoção do corante Basazol Yellow 5G foi superior a 80%. O modelo cinético de pseudossegunda ordem foi o que melhor ajustou-se aos dados experimentais. A baixa taxa de dessorção indicou a dificuldade de recuperação do corante e evidenciou uma possível ocorrência de adsorção química. O teste de efluente industrial apresentou uma remoção de 2,47% para pH natural do efluente e 12,94% para pH 13, demonstrando uma baixa eficiência, necessitando de maiores caracterizações do efluente devido sua elevada DQO. A partir dos resultados obtidos, foi possível verificar a eficiência e rapidez do subproduto em remover o corante Basazol Yellow 5G.

Palavras-chave: Pó de pedra. Basazol Yellow 5G. Adsorção. Águas residuais.

ABSTRACT

HAWERROTH, Mariane. **Use of mineral by-product to remove the dye Basazol Yellow 5G**. 2020. 62f. Graduation Work Bachelor Degree in Chemical Engineering – Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2020.

The packaging industry is responsible for the production of numerous products for the most different purposes, including molded pulp packaging. This type of packaging is widely used for packaging and transporting products, especially food. In general, the manufacture of this product uses a large amount of water in its processes, mainly in the stages in which the preparation of the dough occurs. The complete non-adherence of the dye to the paper mass makes this step one of the biggest causes of the effluent staining, requiring adequate treatment. Adsorption is a treatment method that uses a solid adsorbent material to remove some species in a fluid medium. This method can be used to remove dye from effluents and enable it to be released under suitable conditions. The mineral by-product from the detonation of rocks is produced in large quantities in quarries and has no fully defined purpose. In this work, the capacity of the mineral by-product to remove the Basazol *Yellow 5G* dye in aqueous solution and in industrial effluent was evaluated from the analysis of operational parameters and the kinetic test, as well as the desorption capacity. The experiments were divided into: preparation and characterization of the adsorbent material, operational tests, kinetic test, desorption test and industrial effluent test. Since the material used was previously sieved, it was determined that the average particle diameter was 0.038 mm. Through pH_{pcz} 6.8 it was obtained that the removal is favored by more basic pH values since the dye under study has a cationic nature. The preliminary tests consisted of determining the most efficient operating conditions, these being the temperature of 30°C, agitation of 150 rpm and pH 13. The kinetic test was carried out in triplicate and in a batch system. The kinetic analysis indicated an equilibrium time of 60 minutes with a removal of 93.58%. It is worth noting that in the first 5 minutes the removal of Basazol *Yellow 5G* was greater than 80%. The pseudo-second order kinetic model was the one that best fitted the experimental data. The low desorption rate indicated the difficulty of recovering the dye and evidenced a possible occurrence of chemical adsorption. The industrial effluent test showed a removal of 2,47% for natural pH of the effluent and 12,94% for pH 13, demonstrating a low efficiency, requiring greater characterization of the effluent due to its high COD. From the results obtained, it was possible to verify the efficiency and speed of the by-product in removing the dye Basazol *Yellow 5G*.

Keywords: Grit. Basazol *Yellow 5G*. Adsorption. Residual waters.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Quantidade de adsorvato na fase sólida (mg g ⁻¹)	$q = \frac{V(C_0 - C)}{m_s}$
Equação 2	Modelo de pseudoprimeira ordem de Lagergren	$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_{eq} - q_t)$
Equação 3	Forma não linearizada da Equação de Lagergren	$q_t = q_{eq} (1 - e^{-k_1 t})$
Equação 4	Forma linear da Equação de Lagergren	$\log(q_{eq} - q_t) = \log(q_{eq}) - \left(\frac{k_1}{2,303}\right)t$
Equação 5	Modelo de pseudossegunda ordem de Lagergren	$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_{eq} - q_t)$
Equação 6	Modelo de pseudossegunda ordem linearizado	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}} t$
Equação 7	Modelo cinético de Elovich	$\frac{dq_t}{dt} = \alpha e^{-\beta q_t}$
Equação 8	Equação linearizada de Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln(t)$
Equação 9	Quantidade de corante desorvida	$qed = \frac{Vel (Ced)}{msd}$
Equação 10	Porcentagem de desorção	$Pd = \left(\frac{qed}{eq}\right).100$
Equação 11	Curva de calibração experimental	$Abs = 0,0214C - 0,0377$

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Embalagens de polpa moldada.....	24
Figura 2 - Etapas da cinética de adsorção	28
Figura 3 - Pilhas de pó de pedra estocados em pedreira.	31
Figura 4 - Fluxograma dos procedimentos experimentais	33
Figura 5 - Subproduto mineral.....	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Teste de carga zero para o subproduto mineral.....	39
Gráfico 2 - Curva de calibração do corante Basazol <i>Yellow</i> 5G	40
Gráfico 3 - Espectro de absorção da solução de Corante Basazol <i>Yellow</i> 5G em concentração de 60 ppm e pH 1-2 com pico em 367 nm.	42
Gráfico 4 - Espectro de absorção da solução de Corante Basazol <i>Yellow</i> 5G em concentração de 60 ppm e pH 3 com pico em 407 nm.....	42
Gráfico 5 - Espectro de absorção da solução de Corante Basazol <i>Yellow</i> 5G em concentração de 60 ppm e pH 4-10 com pico em 413 nm.	43
Gráfico 6 - Espectro de absorção da solução de Corante Basazol <i>Yellow</i> 5G em concentração de 60 ppm e pH 11-13 com pico em 432 nm.	43
Gráfico 7 - Influência da temperatura na remoção do corante.....	44
Gráfico 8 - Influência da agitação na remoção do corante.	45
Gráfico 9 - Influência do pH na remoção do corante.	46
Gráfico 10 - Remoção de corante (%) versus tempo.....	47
Gráfico 11 - Modelo cinético de pseudoprimeira ordem ajustado aos dados experimentais.....	49
Gráfico 12 - Modelo cinético de pseudossegunda ordem ajustado aos dados experimentais.....	50
Gráfico 13 - Modelo cinético de Elovich ajustado aos dados experimentais	50
Gráfico 14 - Modelos cinéticos	51
Gráfico 15 - Comparativo de eluentes para o corante Basazol <i>Yellow</i> 5G.....	52
Gráfico 16 - Comparativo do espectro antes e após a adsorção com subproduto mineral para pH natural.....	53
Gráfico 17 - Comparativo do espectro antes e após a adsorção com subproduto mineral para pH 13.....	54

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Faturamento da produção de embalagens no Brasil	22
Tabela 2 - Influência do pH na banda de absorção	41
Tabela 3 - Percentual de remoção do corante Basazol <i>Yellow</i> 5G	48
Tabela 4 - Equações lineares para os modelos cinéticos	49
Tabela 5 - Modelos cinéticos.....	51

LISTAS DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos corantes em relação a aplicação	21
Quadro 2 - Propriedades físico-químicas do corante Basazol <i>Yellow</i> 5G	22

LISTA DE ABREVIATURAS

α	Taxa de adsorção inicial para a equação de Elovich ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$)
β	Constante de dessorção para a equação de Elovich (g mg^{-1})
C_0	Concentração inicial de adsorvato em solução (mg L^{-1})
C	Concentração de adsorvato em solução (mg L^{-1})
C_{eq}	Concentração de adsorvato no equilíbrio (mg L^{-1})
C_{ed}	Concentração de corante dessorvido na fase líquida (mg L^{-1})
K	Constante de velocidade de adsorção
k_1	Constante cinética do modelo pseudoprimeira ordem (min^{-1})
k_2	Constante cinética do modelo pseudossegunda ordem (min^{-1})
m_s	Massa de sorvente (g)
M_{sd}	Massa de adsorvente com corante (g)
pH	Potencial hidrogeniônico
P_d	Porcentagem de dessorção
q	Quantidade do soluto adsorvido (mg g^{-1})
q_{eq}	Quantidade de corante adsorvido no equilíbrio (mg g^{-1})
q_{max}	Quantidade máxima de adsorção em monocamada (mg g^{-1})
q_t	Quantidade de corante adsorvido em um tempo t (mg g^{-1})
rpm	Rotações por minuto
t	Tempo (min)
V	Volume da solução no sistema (L)
Vel	Volume de eluente (L)

LISTAS DE ACRONÔNIO

ABRE	Associação Brasileira de Embalagens
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

LISTAS DE SIGLAS

BRT	Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
HCl	Ácido clorídrico
NaOH	Hidróxido de sódio
nm	Nanômetros
OECD	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PSTA	Processo de Separação e Tecnologia Ambiental
PNDS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV-Vis	Ultravioleta visível
THD	Tempo de detenção hidráulica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo Geral.....	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 JUSTIFICATIVA.....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 CORANTES.....	20
2.1.1 Classificação dos Corantes	20
2.1.2 Corante Basazol <i>Yellow 5G</i>	21
2.2 INDÚSTRIA DE EMBALAGENS	22
2.2.1 Embalagens de Polpa Moldada	23
2.3 EFLUENTE INDUSTRIAL	24
2.3.1 Tratamento de Efluentes Industriais	25
2.4 ADSORÇÃO	26
2.5 CINÉTICA DE ADSORÇÃO	27
2.5.1 Modelo de pseudoprimeira ordem	29
2.5.2 Modelo de pseudossegunda ordem	29
2.5.3 Modelo Cinético de Elovich.....	30
2.6 SUBPRODUTO MINERAL.....	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 PREPARO DO ADSORVENTE.....	33
3.2 PONTO DE CARGA ZERO.....	34
3.3 PREPARO DAS SOLUÇÕES SINTÉTICAS.....	34
3.3.1. Curva de Calibração	35
3.4 TESTES PRELIMINARES	35
3.4.1 Teste de influência de pH na banda de absorção do corante	35
3.4.2 Teste de influência da temperatura no meio reacional	35
3.4.3 Teste de influência da agitação no meio reacional.....	36
3.4.4 Teste de influência do pH no meio reacional	36
3.5 TESTE CINÉTICO	37
3.6 TESTE DE DESSORÇÃO.....	37
3.7 TESTE EM EFLUENTE INDUSTRIAL	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39

4.1 PREPARO DO ADSORVENTE.....	39
4.2 PONTO DE CARGA ZERO.....	39
4.3 PREPARO DAS SOLUÇÕES SINTÉTICAS.....	40
4.3.1 Curva de Calibração	40
4.4 TESTES PRELIMINARES	41
4.4.1 Teste de influência do pH na banda de absorção	41
4.4.2 Teste de influência da temperatura no meio reacional	43
4.4.3 Teste de influência da agitação no meio reacional.....	44
4.4.4 Teste de influência do pH no meio reacional	45
4.5 TESTE CINÉTICO	47
4.5.1 Modelos Cinéticos	49
4.6 TESTE DE DESSORÇÃO.....	52
4.7 TESTE EM EFLUENTE INDUSTRIAL	53
5. CONCLUSÃO	55
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável baseia-se no suprimento das necessidades atuais sem prejudicar as gerações futuras, tornando-se tema de inúmeras discussões devido à crescente preocupação ambiental em torno dos recursos naturais disponíveis no planeta. A valorização e exigência para que as indústrias de bens de consumo possuam responsabilidade ambiental tornou-se item necessário para competição no mercado. Desta forma, certificações ISO 14000, resoluções do CONAMA, dentre outras legislações ambientais vigentes no Brasil, buscam regulamentar e definir padrões a serem seguidos a fim de assegurar a proteção do meio ambiente e o uso sustentável de recursos.

Dentro deste contexto, a indústria de embalagens destaca-se pela sua dimensão no cenário brasileiro e conseqüentemente, responsável por um consumo elevado de recursos naturais. Meio a este segmento, a indústria de embalagens de papel, em especial de polpa moldada, é responsável pela utilização de grande volume de água no seu processo produtivo, sobretudo nas etapas de preparação da massa, processo no qual ocorre o tingimento do papel e provoca as maiores modificações na qualidade da água. Sem o tratamento adequado, as conseqüências da contaminação de rios e lagos com corantes podem gerar, além de poluição visual, severos danos à fauna e flora do local de lançamento (SILVA, 2012).

A adsorção é um método de tratamento de efluente que é empregado um material adsorvente para remover alguma espécie presente em meio fluido, como por exemplo, o corante. Esta forma de tratamento possibilita o reuso da água e/ou posterior retorno da mesma a rios ou lagos. A utilização de adsorventes é atrativa devido as suas características, sobretudo se possuírem baixo custo, abundância e não necessitarem de pré-tratamento para uso (SILVA, 2019).

A utilização de subproduto mineral, também denominado pó de pedra ou pó de rocha, como um adsorvente pode ser uma alternativa para a destinação deste resíduo, visto que, o volume excedente deste pó ainda não possui direcionamento definido, exigindo assim estudos de novas utilizações, como já encontrado na literatura por Menossi (2004) em que utilizou o pó de pedra para a fabricação de areia artificial.

Coligar o tratamento de efluente industrial contendo corante Basazol *Yellow 5G* e a utilização de um resíduo industrial como o subproduto mineral está alinhado com

o conceito de desenvolvimento sustentável requisitado pela sociedade atual que está em processo de conscientização ambiental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a capacidade do subproduto mineral, também denominado como pó de pedra ou pó de rocha, na remoção do corante Basazol *Yellow* 5G em solução aquosa.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência do pH na banda de absorção e na remoção do corante Basazol *Yellow* 5G;
- Determinar as melhores condições de operação (temperatura, agitação e pH) do sistema formado entre o corante Basazol *Yellow* 5G e o subproduto mineral;
- Analisar os dados cinéticos do sistema em estudo;
- Determinar a capacidade de remoção do corante Basazol *Yellow* 5G pelo subproduto mineral em efluente sintético e industrial;
- Avaliar a capacidade de dessorção a partir de diferentes eluentes.

1.2 JUSTIFICATIVA

O efluente industrial advindo de indústrias que pigmentam seu produto possui inúmeros contaminantes, em especial o corante, que é causador de inúmeros problemas ambientais caso seja lançado diretamente no curso de água. No Brasil, existem leis que regulamentam o lançamento de efluentes em corpos de água receptores, dado pela resolução nº 430, de 13 de maio de 2011 do CONAMA, exigindo que o efluente industrial passe por tratamento adequado. Mesmo que atualmente as indústrias já realizem o tratamento, o processo de sorção a ser estudado no presente trabalho caracteriza-se por um método de menor custo e com uma menor complexidade de ser aplicado, principalmente pelo adsorvente utilizado ter um baixo valor agregado.

Além disso, o adsorvente testado (subproduto mineral) é considerado um resíduo no processo de extração de rochas e seu volume excedente demanda uma destinação correta, como determina a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010). Apesar de haverem estudos da utilização deste material para produção de areia industrial, como relatado por Menossi (2004), a grande quantidade gerada nas pedreiras inspira a necessidade de estudos sobre novas utilizações, sendo uma delas a aplicação como adsorvente.

A realização do presente trabalho está vinculado a linha de pesquisa de Sistema de Tratamento e Aproveitamento de Resíduos (STAR) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

Notou-se na literatura que há poucos estudos disponíveis que relacionam o uso do subproduto mineral para remoção do corante Basazol *Yellow 5G*, tornando-se uma oportunidade para realização de um trabalho inédito com possibilidade de aplicação industrial.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CORANTES

Os corantes são utilizados desde a antiguidade, com o registro em tecidos e hieróglifos egípcios datados de 2.500 anos a.C. Babilônia, Grécia, Roma são exemplos de civilizações antigas que também possuem registro de utilização de corantes, demonstrando sua importância desde os primórdios da civilização (ZOLLINGER, 1987). Estima-se que mais de 10 mil corantes sintéticos sejam produzidos em escala industrial (DALLAGO et al., 2005).

Os corantes são compostos químicos orgânicos que possuem a propriedade de absorver luz visível seletivamente, razão pela qual aparecem coloridos, devido à presença de grupos cromóforos tais como nitro, nitroso, azo e carbonila. A estabilidade da molécula do corante é diretamente associada à força de ligação química dos átomos componentes dos grupos cromóforos e auxocromos (KIMURA et al, 1999, p. 51).

As cores de um produto interferem diretamente na aparência, custo final e a aceitação pelos consumidores. Identificado como uma meio de chamar a atenção do público e proporcionar maiores vendas, os estudos sobre cores e métodos de coloração tem aumentado nos últimos anos (CROMEX, 2001).

Em relação aos corantes em papéis, o aumento do consumo de papel nos últimos anos alavancou a criação estratégias comerciais que incluem a utilização de cor nos diferentes usos, como em revistas, embalagens, *banners* e catálogos industriais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 2007).

As características necessárias para que um corante seja empregado em embalagens de papel, incluindo as embalagens de polpa moldada, são afinidade com o papel, resistência à luz, ser estável com a temperatura e umidade e não interferir em demais parâmetros do processo (VELOSO, 2012).

2.1.1 Classificação dos Corantes

A classificação dos corantes pode ocorrer com base em diferentes aspectos, como por exemplo, classes químicas, aplicação, origem, entre outros (VELOSO, 2012). O Quadro 1 retrata a coloração conforme a classificação por aplicação dos corantes, a qual é mais utilizada para fins industriais devido à dificuldade de nomenclatura associada a classificação por classes químicas.

Quadro 1 - Classificação dos corantes em relação a aplicação

CORANTES	APLICAÇÃO
Ácidos	Alimentos, couro, fibras naturais, fibras sintéticas, lã e papel.
Ao enxofre	Fibras naturais
Azóicos	Fibras naturais, fibras sintéticas
Básicos	Couro, fibras sintéticas, lã, madeira e papel
Diretos	Couro, fibras naturais, fibras artificiais e papel
Dispersos	Fibras artificiais e fibras sintéticas
Reativos	Couro, fibras naturais, fibras artificiais e papel

Fonte: adaptado de VELOSO (2012).

Em relação aos corantes básicos, também conhecidos como corantes catiônicos, estes apresentam uma diversificação de estruturas químicas em razão da substituição de seus anéis aromáticos (EREN et al., 2007). Este tipo de corante necessita de um íon positivo, geralmente cloridratos, aproximado dos átomos de nitrogênio (EL QADA et al., 2008; SALLEH et al., 2011). Os corantes básicos são encontrados em diversos corantes, como é o caso do corante Basazol *Yellow 5G*, cuja aplicação é designada para papel.

A maior problemática tratando-se de corantes é quando a degradação ocorre de maneira incompleta, o que pode propiciar a geração de substâncias com alta toxicidade ao homem e ao meio ambiente. Por este motivo, o estudo de meios de remoção desses corantes dos efluentes ganhou notoriedade perante a comunidade científica e dos órgãos ambientais que regulamentam as leis de descarte de substâncias que tem potencial nocivo ao meio aquático (ALMEIDA; CORSO, 2014).

2.1.2 Corante Basazol *Yellow 5G*

O corante utilizado neste trabalho foi o Basazol *Yellow 5G*, doado por uma empresa de embalagens de polpa moldada localizada na região dos Campos Gerais.

De acordo com a Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ), o corante Basazol *Yellow 5G* é classificado como um corante básico e para uso em papel. Além disso, contém ácido acético, ácido fórmico e 2-((4,6-bis(4-(2-(1-methylpyridinium-4-yl) vinyl) fenylamino) -1,3,5-triazin-2-yl) (2-hydroxietyl) amino) etanol dichlorid). No Quadro 2 estão contidas as informações sobre as propriedades físico-químicas do corante.

Quadro 2 - Propriedades físico-químicas do corante Basazol Yellow 5G

Propriedades Físico – Químicas	
Estado físico	Líquido
Cor	Amarelo esverdeado
Odor	Ácido acético
pH	1,0 – 3,0
Ponto de fusão	-11 °C
Ponto de ebulição	107 °C
Densidade (25°C)	1,14 g/cm ³
Solubilidade	Miscível

Fonte: Autoria própria (2020).

Sobre as informações ecológicas, a FISPQ (2017) disponibilizada pela BASF afirma que o corante em estudo possui elevada toxicidade para organismos aquáticos, além de ser “difícilmente biodegradável (segundo critérios OECD) e é facilmente eliminável da água”.

2.2 INDÚSTRIA DE EMBALAGENS

A indústria de embalagens demonstra-se em expansão nos últimos anos devido a algumas tendências do mundo globalizado e aumento da diversificação dos produtos existentes. Segundo a Associação Brasileira de Embalagens – ABRE (2019), o setor demonstrou um crescimento em 2019 de 7,6% em relação ao ano anterior, estimando-se um montante de R\$ 80,2 bilhões. Os dados do valor bruto de produção de 2015 até 2019 descritos na Tabela 1 evidenciam a tendência do crescimento deste setor.

Tabela 1 - Faturamento da produção de embalagens no Brasil

ANO	VALOR BRUTO DE PRODUÇÃO (Em bilhões de Reais)
2015	63,0
2016	66,8
2017	67,3
2018	75,3*
2019	80,2*

* Dados estimados

Fonte: ABRE (2020) extraído do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

A indústria de embalagens destaca-se por estar presente em uma grande gama de produtos utilizados no cotidiano das pessoas. Dentre os setores que utilizam estes

produtos, a indústria de alimentos é responsável pelo maior consumo do volume produzido de embalagens, seguido da indústria de bebidas, fumo, vestuário, calçados, produtos farmacêuticos, limpeza e cosméticos, eletrônicos e eletrodomésticos (ABRE, 2020).

Uma característica importante do ramos de embalagens é diversidade de materiais utilizados para produção, visando atender as necessidades do material a ser embalado, como atratividade, segurança para transporte, conservação, etc. Dentre os materiais utilizados, o plástico aparece como principal matéria-prima, representando 41% do total. Na sequência, o setor de embalagens de papel/cartão/papelão compõem uma parcela considerável de 30%. Outros setores de embalagens aparecem com uma menor contribuição, sendo eles os metais (19%), vidro (6%), testeis (3%) e madeira (1%) (ABRE, 2020).

As embalagem de papel caracterizam-se pelo preço, peso e resistência. Este tipo de material é considerado um indicador econômico visto que diversos produtos precisam ser embalados, seja por proteção ou para tornar o produto mais atrativo, tornando as embalagens um parâmetro de desempenho do setor industrial (MELLO, 2002).

De acordo com o Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas – BRT (2007), existem diversos tipos de papeis utilizados para confecção de embalagens, sendo eles o de papeis para embrulhos e embalagens leves, papeis para embalagens pesadas, papel ondulado o de polpa moldada. O efluente industrial utilizado no presente trabalho é proveniente de um indústria de embalagens de polpa moldada.

2.2.1 Embalagens de Polpa Moldada

Tecnicamente, as embalagens de polpa moldada são produzidas a partir de polpa celulósica ou de aparas de papel e moldadas no formado final desejado. A polpa é preparada por meio da mistura da celulose (em forma de papel), água e a agentes químicos para que então seja feito o processo de moldagem, originando assim embalagens ou bandejas para acondicionamento, transporte e proteção de alimentos, produtos frágeis, recipientes de vidro, produtos eletrônicos, entre outros (GRACH, 2006; MARTINEZ, 2013).



Figura 1 - Embalagens de polpa moldada
Fonte: ECOAMOS (2020).

Para produzir este tipo de embalagem, é necessário basicamente preparar a polpa, moldar o papel e secá-lo. A primeira etapa da fabricação de papel passa por diversos processos, incluindo o tingimento. Nessa operação são adicionados corantes à massa a fim de atingir a cor desejada do produto final (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 2007). Como consequência, nem todo corante é aderido às fibras do papel e são gerados efluentes coloridos que, quando reutilizados ou descartados, necessitam de tratamento adequado para cumprir as exigências ambientais e as condições para reuso na própria empresa.

2.3 EFLUENTE INDUSTRIAL

A origem dos efluentes da indústria de embalagens de papel está relacionada ao processo produtivo de forma integral devido a utilização de água na maioria das etapas (NETO, 2014). As características desse efluentes variam conforme o processo produtivo. Em geral, os efluentes industriais apresentam uma quantidade elevada de sólidos suspensos, temperatura elevada, pH com caráter oscilatório, altas concentrações de DQO (demanda química de oxigênio), compostos orgânicos clorados e surfactantes (HASSEMER, 2012).

As consequências da contaminação de rios e lagos com corantes podem gerar, além de poluição visual, severos danos à fauna e flora do local de lançamento. Os corantes causam preocupações ambientais em razão da sua absorção e reflexão da

luz solar na água, o que provoca interferência no crescimento de bactérias responsáveis pela degradação da matéria orgânica e de impurezas (SILVA, 2012).

A legislação brasileira é amparada pela Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011 do CONAMA, a qual:

[...] dispõe sobre condições, parâmetros, padrões e diretrizes para gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores, alterando parcialmente e complementando a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.

Segundo a Resolução nº 430/2011, para estar em condições de lançamento, o efluente deve apresentar pH entre 5 a 9, temperatura inferior a 40°C, no qual a temperatura do corpo receptor não deve ultrapassar 3°C no limite de zona de mistura, além de que a quantidade de materiais sedimentáveis não devem exceder em 1 mg/L em teste de 1 hora em cone *Inmhoff*.

2.3.1 Tratamento de Efluentes Industriais

A água residual gerada de processos industriais são um dos fatores que mais provocam preocupação ambiental nos setores de industriais. Os compostos presentes nos efluentes normalmente são de difícil tratamento e necessitam de alta energia e processamento para cumprir com as exigências feitas pelas leis ambientais. As substâncias de complexa deterioração são chamadas de compostos recalcitrantes ou refratários, os quais não são degradados por microrganismos que fazem parte de sistemas biológicos de tratamento. Pelo tempo de detenção hidráulica (TDH) usuais utilizados não ser suficiente, os compostos são lançados nos corpos hídricos receptores (DIAS, 2018).

Devido as altas concentrações e toxicidade, os corantes requerem uma maior atenção e prioridade no tratamento de efluentes industriais. Diversos métodos físicos e químicos são utilizados para o tratamento de efluentes contaminados com corantes. Os critérios considerados para a escolha do tratamento mais adequado são variados, destacando-se o conhecimento da origem, caracterização e volume de efluente, bem como quais os parâmetros de qualidade que devem ser atendidos pelo efluente final tratado (SANTOS *et al.*, 2006). As técnicas mais comuns são a adsorção, eletroquímica, precipitação química, ozonização, separação por membranas seletivas e processos biológicos (FREIRE, 2018).

A adsorção consiste num processo em que ocorre o contato de uma fase líquida ou gasosa com o adsorvente em fase sólida, o qual possui a capacidade de fixar uma ou mais espécies presentes inicialmente no fluido devido a ação de forças físicas ou ligações químicas (BORBA *et al.*, 2006). Quando ocorre o desprendimento de uma substância de uma interface entre uma superfície sólida e uma solução é denominado de dessorção (FREITAS, 2010).

A biossorção difere-se da adsorção principalmente pelo adsorvente empregado, que em geral provem de fontes naturais. Neste processo, o adsorvente denomina-se como biossorvente. Além disso, a biossorção pode reunir a junção de diferentes mecanismos de adsorção física, adsorção química, entre outros, o que configura a biossorção como um processo que pode ocorrer por mecanismo de adsorção (SILVA, 2019).

2.4 ADSORÇÃO

A adsorção caracteriza-se pela retenção seletiva de alguma espécie presente em um fluido (gás ou líquido) através do contato deste fluido com o adsorvente em fase sólida, movido pela diferença de concentração entre o adsorvato presente no fluido e a superfície do adsorvente. Considerando que o adsorvato concentra-se na superfície do adsorvente, o aumento da superfície disponível para a adsorção promove uma maior eficiência deste processo, motivo pelo qual materiais porosos são os mais utilizados como adsorventes (BORBA, *et al.*, 2006).

A natureza das forças presentes na relação entre o adsorvato e o adsorvente caracterizam o processo de adsorção de dois modos: fisiossorção e quimissorção. Na fisiossorção não há a formação ou rompimento das ligações químicas, o que acarreta na ausência de mudanças químicas no momento em que ocorre a adsorção. As forças de Van der Waals são responsáveis por reter a partícula na superfície do adsorvente. A quimissorção caracteriza-se pelas alterações químicas do adsorvato, como também pelas ligações químicas entre o adsorvato e a superfície do adsorvente, tornando-se um sistema único. Diferentemente da fisiossorção, este tipo de adsorção envolve a transferência ou partilha de elétrons entre os átomos ou moléculas de adsorvato e a superfície do material adsorvente, promovendo uma reação química (OLIVEIRA, 2012; NASCIMENTO, 2014).

Geralmente, a adsorção física precede a constituição de ligações químicas no processo de quimissorção. Além disso, a adsorção física é um processo reversível que não afeta as características da superfície ou o adsorvato mesmo após repetidos processos de adsorção e dessorção (PIETROBELLI, 2012).

A escolha do adsorvente adequado possui grande importância visto sua influência direta no mecanismo de ligação e a eficiência da adsorção, e conseqüentemente na viabilidade do processo. Um material adsorvente deve possuir alta área superficial e tamanho de poro, seletividade, estabilidade física e química, propriedades cinéticas e preferencialmente baixo custo (SILVA, 2019). Alguns exemplos de adsorventes com estas características são o carvão ativado, alumina ativada, zeólitas, entre outros (PIETROBELLI, 2012).

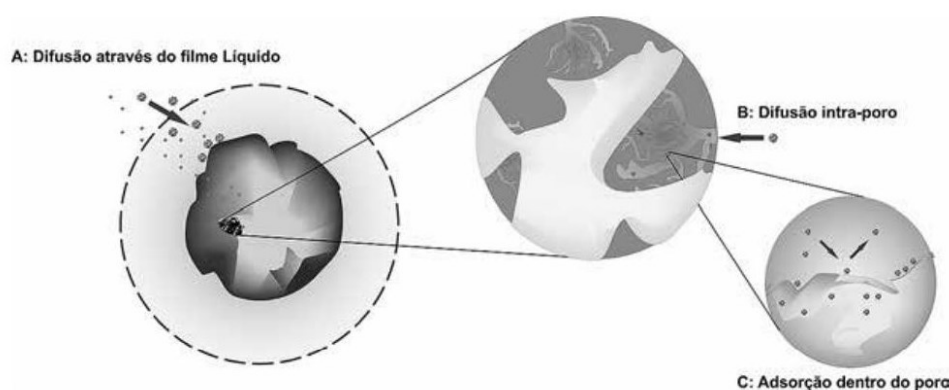
Os parâmetros que possuem influência na efetividade do adsorvente são o pH, concentração do material a ser removido, quantidade de material adsorvente, temperatura, ocorrência de pré-tratamento físico ou químico do material e tempo de contato entre a solução e o adsorvente (DA SILVA, 2014). É possível avaliar a eficiência dos processos de adsorção por meio da cinética e isotermas de adsorção, nas quais é possível representar a relação de equilíbrio entre concentração de sorbato na fase líquida e o do adsorvente (PIETROBELLI, 2012).

2.5 CINÉTICA DE ADSORÇÃO

O estudo da cinética de adsorção possui grande relevância por possibilitar a análise da interação entre o adsorvato e o adsorvente, além de identificar os parâmetros cinéticos de equilíbrio (SILVA, 2019). Dois elementos são importantes para avaliar a cinética de adsorção, sendo eles a velocidade com que a molécula de adsorvente consegue adsorver o adsorvato e o tempo de residência necessário para completar a adsorção (HONORIO, 2013).

Segundo Nascimento (2014), a cinética de adsorção é constituída por diferentes processos: transferência de massa externa (transferência do adsorvato da fase líquida para superfície externa da partícula adsorvente); difusão no poro (difusão do adsorvato no líquido para o interior dos poros do adsorvente); e difusão na superfície (difusão das partículas completamente adsorvidas na superfície do poro). Estas três etapas são exemplificadas na Figura 2.

Figura 2 - Etapas da cinética de adsorção



Fonte: Nascimento (2014).

Diversos fatores podem provocar interferência na velocidade de adsorção, destacando-se “a temperatura, pH, força iônica, concentração inicial de adsorvato, agitação, tamanho das partículas e distribuição do tamanho dos poros”, além da interação e o tempo de contato entre adsorvato-adsorvente (NASCIMENTO, 2014, p. 52). O tempo de contato é importante porque este fator indica o comportamento cinético da adsorção para um adsorvente numa determinada concentração inicial de adsorvato (NASCIMENTO, 2014).

Vários modelos cinéticos lineares são utilizados para examinar o mecanismo controlador do processo de adsorção, tais como reação química, controle da difusão e transferência de massa. Os modelos mais estudados são o de pseudoprimeira ordem e de pseudossegunda ordem, porém existem outros modelos cinéticos como o de Elovich e também o modelo de difusão intrapartícula (HONORIO, 2013). Com o ajuste dos modelos aos dados cinéticos experimentais encontrados é possível identificar o modelo que apresenta uma melhor descrição do sistema de adsorção estudado (SILVA, 2019). A fim de utilizar alguns destes modelos, primeiramente deve-se determinar a quantidade de adsorvato na fase sólida, dada pela Equação (1).

$$q = \frac{V(C_0 - C)}{m_s} \quad (1)$$

Em que:

q : quantidade de adsorvato na fase sólida (mg g^{-1});

V : volume da solução (L);

C_0 : concentração inicial de adsorvato em solução (mg L^{-1});

C : concentração de adsorvato em solução, (mg L^{-1});

m_s : massa de adsorvente (g).

2.5.1 Modelo de pseudoprimeira ordem

Descrito inicialmente por Lagergren em 1898, o modelo de pseudoprimeira ordem é baseado na capacidade de adsorção dos sólidos, além disso, foi o primeiro descrito para sistemas de adsorção líquido-sólido (NASCIMENTO, 2014).

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_{eq} - q_t) \quad (2)$$

Integrando a equação, considerando de $t = 0$ até $t = t$ e $q = 0$ até $q_t = q_t$, obtêm-se:

$$q_t = q_{eq} (1 - e^{-k_1 t}) \quad (3)$$

A equação linearizada descrita por Lagergren é dada pela Equação (4).

$$\log(q_{eq} - q_t) = \log(q_{eq}) - \left(\frac{k_1}{2,303}\right) t \quad (4)$$

Em que:

k_1 : constante da taxa de adsorção de pseudoprimeira ordem (min^{-1});

q_{eq} : quantidades adsorvidas por grama de adsorvente no equilíbrio (mg g^{-1});

q_t : quantidades adsorvidas por grama de adsorvente no tempo t (mg g^{-1}).

2.5.2 Modelo de pseudossegunda ordem

O modelo de pseudossegunda ordem apresenta taxa de adsorção dependente da quantidade da espécie química adsorvida na superfície do adsorvente e a quantidade adsorvida no estado de equilíbrio (DA SILVA, 2018). Este modelo é descrito conforme a Equação (5) (HO; MCKAY, 1999):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_{eq} - q_t) \quad (5)$$

Após integrar e linearizar a Equação (5) com as mesmas condições impostas a Equação (1), resulta na Equação (6).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}} t \quad (6)$$

Em que:

q_t : quantidade de adsorvato adsorvido (mg g^{-1}) no tempo (min^{-1});

k_2 : constante de velocidade de adsorção do modelo cinético pseudossegunda ordem ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$);

q_{eq} : quantidade de adsorvato adsorvido no equilíbrio (mg g^{-1}).

2.5.3 Modelo Cinético de Elovich

Inicialmente, a equação de Elovich foi desenvolvida para utilização em estudos cinéticos envolvendo gases na superfície de um sólido, entretanto, a equação também pode ser empregada para adsorção em meio líquido (NASCIMENTO, 2014).

O modelo baseia-se na Equação (7).

$$\frac{dq_t}{dt} = \alpha e^{-\beta q_t} \quad (7)$$

Integrando a Equação (7), obtém-se a Equação (8).

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln(t) \quad (8)$$

Em que:

α : taxa de adsorção inicial ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$);

β : constante de dessorção (mg g^{-1});

q_t : quantidade de corante adsorvido por quantidade de material adsorvente (mg g^{-1}) no tempo t ;

t : tempo.

2.6 SUBPRODUTO MINERAL

A indústria mineradora representa um papel importante na economia nacional, visto a aplicabilidade e utilização dos minérios em diversos produtos que fazem parte

do cotidiano da população. Entretanto, toneladas de resíduos sólidos arenosos são gerados diariamente em mineradoras de grande porte. Estima-se que para cada tonelada de minério, são produzidos cerca de 1,5 toneladas de resíduo arenoso (DA SILVA et al., 2011). Apesar da mineração contribuir para o desenvolvimento socioeconômico, esta atividade é responsável pela geração de uma grande quantidade de resíduos que resultam em diversos tipos de impactos ambientais.

Dentre os resíduos gerados por pedreiras, pode-se destacar o pó de pedra, designado neste trabalho como subproduto mineral. Segundo Sá (2006), o pó de pedra corresponde de 15 a 20% da produção da britagem. Porém, existem discordâncias de granulometria, origem e materiais pulverulentos que compõem este subproduto mineral. Para Andriolo (2005), o pó de pedra caracteriza-se como um agregado fino, com diâmetro de granulometria inferior a 0,075mm, composto por grãos irregulares advindos da extração de rochas.

Figura 3 - Pilhas de pó de pedra estocados em pedreira.



Fonte: Menossi (2004).

Diante disso, o subproduto mineral é considerado um rejeito oriundo da extração de britas, não possuindo uma destinação completamente definida. Este resíduo permanece estocado nos pátios das pedreiras formando grandes pilhas, ocasionando a alteração na paisagem e podendo gerar impactos ambientais como poeira, obstrução de canais de drenagem e assoreamento dos rios (MENOSSI et. al., 2010). Existem alguns estudos, como feito por Menossi (2004), no qual é almejado utilizar a pó de pedra como complemento ao uso da areia na elaboração de misturas

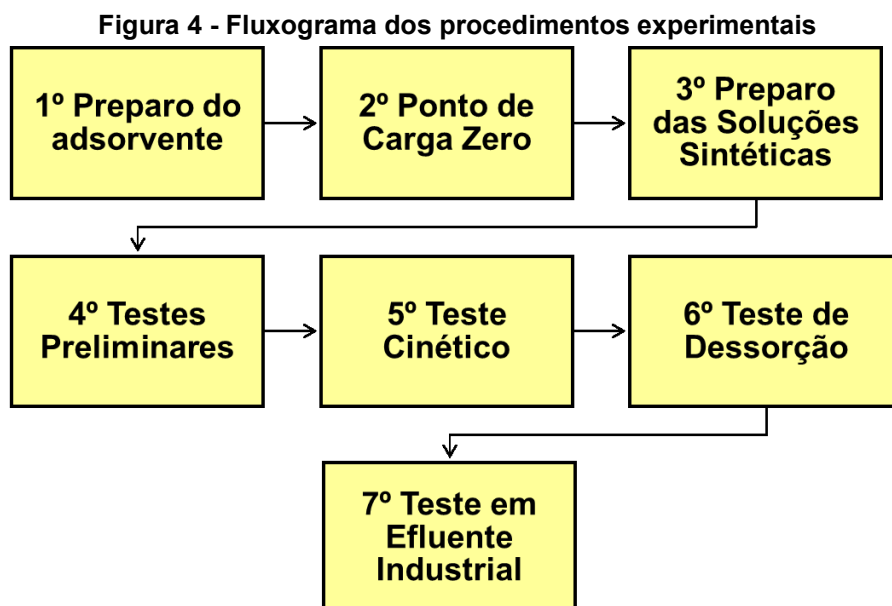
de concreto, também chamada de areia industrial. Entretanto, o volume de pó de pedra gerado nas pedreiras, normalmente é alto e necessita de outras utilizações.

A Política Nacional de Resíduos (PNRS) sólidos regulamenta, a partir da Lei nº 12.305, de 10 de agosto de 2010, que deve-se haver uma destinação ambiental adequada para os resíduos sólidos, buscando sua reutilização, reciclagem ou recuperação a fim de não causar danos à saúde pública e minimizar impactos ambientais. Além disso, dispõem sobre como deve ser feito a deposição de materiais, pautado em argumentos técnicos, caso não seja possível outra utilização.

O subproduto mineral a ser utilizado no presente trabalho é gerado a partir do processo de exploração de rocha ígnea intrusiva granítica (granito rosado) doado por uma empresa mineradora localizada na região dos Campos Gerais. A primeira etapa do processo é designada como lavra, na qual é realizada a fragmentação das rochas por meio de detonamento do solo com o auxílio de explosivos. O objetivo desta operação é a redução da dimensão do material de tal modo que seja possível realizar a operação de britagem. Na etapa de britagem, o processo é dividido em britagem primária, secundária e terciária, diferenciando pela diminuição da granulometria ao longo do processo, utilizando diferentes equipamentos e refino das peneiras (FIGUEIRA, 2010). O subproduto mineral é constituído pelo pó de pedra residual deste processo de detonamento e o produto residual do processo de britagem, correspondendo as partículas de menor granulometria que não apresentam tanta notoriedade na construção civil quanto aos outros produtos oriundos das pedreiras. Assim, devido as características porosas do subproduto mineral, este material foi testado como adsorvente para remoção do corante *Basazol Yellow 5G*.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será abordado a metodologia experimental empregada para remoção do corante *Basazol Yellow 5G* utilizando subproduto mineral. Os procedimentos utilizados baseiam-se em estudos realizados por Pietrobelli (2012) e Zanutto *et al.* (2015).



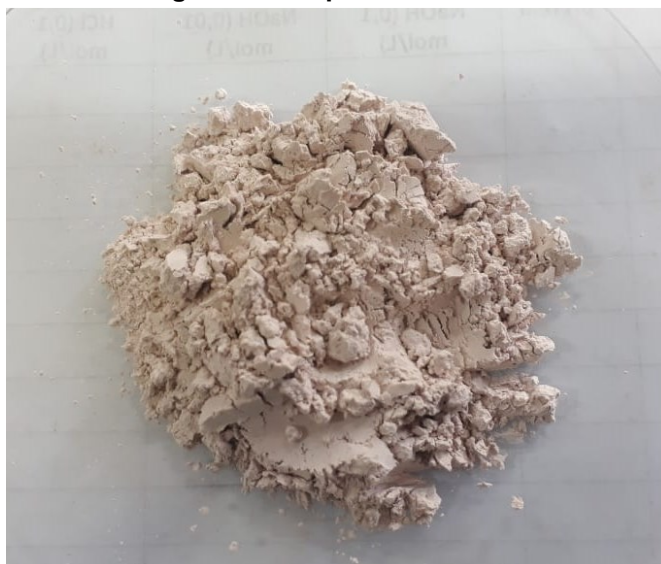
Fonte: Autoria própria (2020).

Para realização do estudo, foram utilizados os laboratórios Laboratório de Operações Unitárias, Laboratório de Química Instrumental e Laboratório de Processos de Separação e Tecnologia Ambiental (PSTA) localizados na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

3.1 PREPARO DO ADSORVENTE

Neste trabalho foi utilizado o subproduto mineral doado por uma empresa mineradora localizada na região dos Campos Gerais. Foi realizada a secagem do material a temperatura de 30°C em estufa com circulação e renovação de ar (SL 102 – SOLAB) para garantir a ausência de umidade. Utilizando o agitador eletromagnético com peneiras granulométricas redondas (Bertel – AAKER), o subproduto mineral foi peneirado por 10 minutos para caracterização da granulometria do material, visto que o mesmo já encontrava-se previamente peneirado.

Figura 5 - Subproduto mineral



Fonte: Aatoria própria (2020).

3.2 PONTO DE CARGA ZERO

O ponto de carga zero é utilizado como um indicativo do valor de pH em que a superfície do material apresenta carga eletricamente nula (DEOLIN, 2013). Em erlenmeyers de 125 mL, foram colocados 0,05 gramas de subproduto mineral e 25 mL de solução de NaCl 0,01 M com pH ajustado de 1 a 12. As amostras permaneceram em uma incubadora de agitação rotativa (Tecnal, TE-240), durante um período de 6 horas nas condições de 30°C e 150 rpm. Na sequência, foi realizado a leitura do pH das amostras.

3.3 PREPARO DAS SOLUÇÕES SINTÉTICAS

Para a realização dos experimentos, foram preparadas soluções aquosas de corante Basazol *Yellow* 5G por diluição em água destilada. O ajuste de pH foi realizado por meio de soluções concentradas de ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH). O espectrofotômetro UV-Vis (N6000) foi utilizado para avaliação da concentração do corante em estudo.

3.3.1. Curva de Calibração

A determinação do comprimento de onda em que o corante possui uma maior absorção de luz foi realizada através da leitura em espectrofotômetro UV-Vis (N6000) em modo varredura com comprimento de onda entre 300 e 800 nm.

Em razão da concentração não ser diretamente quantificada, foi determinado uma curva de calibração que mensura a concentração de adsorvato em função da absorbância obtida em leituras UV-Vis. Para isso, foram preparadas soluções de corante *Basazol Yellow 5G* com concentrações na faixa de 0 a 60 ppm (2,5; 5; 8; 10; 20; 30; 40; 50, 60), obtendo assim um gráfico que relaciona a absorbância em função da concentração.

3.4 TESTES PRELIMINARES

Os testes preliminares compreendem um conjunto de ensaios utilizados para determinar as melhores condições de operação do sistema em estudo para aplicação nos testes cinético, de dessorção e em efluente industrial.

3.4.1 Teste de influência de pH na banda de absorção do corante

O procedimento tem intuito de identificar a existência de deslocamento da banda de absorção, em razão da alteração da faixa de pH, por meio de leituras no espectrofotômetro UV-Vis.

As amostras foram preparadas em béqueres contendo 25mL da solução sintética de corante *Basazol Yellow 5G* com concentração de 60 ppm. O teste foi realizado em duplicata e o pH das amostras foi ajustado individualmente entre 1 a 13 (1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13) utilizando soluções concentradas de hidróxido de sódio (NaOH) e ácido clorídrico (HCl). As amostras permaneceram em repouso por 24 horas, e na sequência foram lidas no espectrofotômetro UV-Vis – N6000. A análise da influência do pH sobre a banda de absorção do corante foi realizada por meio da comparação dos valores de absorbância em relação ao valores obtidos na leitura das amostras no comprimento de onda determinado.

3.4.2 Teste de influência da temperatura no meio reacional

O teste de influência de temperatura no meio reacional teve como intuito de indicar a temperatura em que há uma melhor efetividade na remoção do corante pelo uso do subproduto mineral.

As amostras foram preparadas em erlenmeyers de 125 mL, contendo 0,05g de subproduto mineral e 25 mL de solução sintética do corante em estudo a uma concentração de 60 ppm. Foi utilizado pH 12 visto a natureza catiônica do corante. O teste foi realizado nas temperaturas de 30, 40 e 50°C, com duração de 6 horas e agitação de 150 rpm em incubadora de agitação rotativa (Tecnal, TE-240). O experimento foi realizado em triplicata.

3.4.3 Teste de influência da agitação no meio reacional

Neste teste foi verificado a velocidade de agitação em que há uma maior remoção do corante pelo adsorvente utilizado. Utilizando pH básico e temperatura que foi determinada no teste prévio, as amostras foram preparadas com 0,05 g de subproduto mineral e 25 mL de solução sintética de corante Basazol *Yellow* 5G de concentração 60 ppm. O experimento foi realizado em triplicata e utilizou a incubadora de agitação rotativa (Tecnal, TE-240) com uma agitação de 75 e 150 rpm durante 6 horas.

3.4.4 Teste de influência do pH no meio reacional

O teste de influência do pH foi utilizado para determinar a faixa de pH mais efetiva na remoção de corante utilizando o subproduto mineral, bem como para avaliar a influência deste parâmetro no processo de adsorção.

Para tal, as amostras foram preparadas com 0,05 g de subproduto mineral e 25 mL da solução sintética de corante (60 ppm), em erlenmeyers de 125 mL. As amostras foram realizadas em duplicata. Com soluções concentradas de HCl e NaOH, foi feito o ajuste do pH das amostras nas faixas de 1 a 13 (1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13). As amostras permaneceram em uma incubadora de agitação rotativa (Tecnal, TE-240), durante um período de 6 horas nas condições de temperatura e agitação determinada nos respectivos testes de influência. Finalizada esta etapa, as amostras foram centrifugadas por 10 minutos a 3000 rpm para realizar a leitura em espectrofotômetro UV-Vis. Com este teste, foi possível quantificar a concentração que

permaneceu na solução, determinando a taxa de remoção do corante Basazol *Yellow* 5G pelo subproduto mineral.

3.5 TESTE CINÉTICO

O teste cinético objetivou constatar qual o tempo necessário para que o corante Basazol *Yellow* 5G e o subproduto mineral consigam atingir o equilíbrio do sistema.

O experimento foi realizado em triplicata e consistiu em primeiramente adicionar 0,15 g de subproduto mineral a 25 mL da solução de corante Basazol *Yellow* 5G (60 ppm). O pH, temperatura e agitação foram ajustados conforme os dados fornecidos pelos respectivos testes preliminares.

Foram retiradas amostras em intervalos definidos de tempo até 2160 minutos (36 horas). Na sequência, estas amostras foram centrifugadas e lidas em espectrofotômetro UV-Vis, para determinação da concentração residual.

Os parâmetros foram obtidos pelo ajuste dos dados experimentais aos modelos: pseudoprimeira ordem, pseudossegunda ordem e Elovich.

3.6 TESTE DE DESSORÇÃO

O teste de dessorção foi utilizado para avaliar a possibilidade de recuperar o corante adsorvido. Para tal, foi utilizado o material adsorvente saturado resultante do teste cinético, o qual foi lavado com água destilada para retirada do excesso de corante e posteriormente seco a 30 °C. Foram utilizados diferentes eluentes, sendo eles HCl (pH 1 e 2), NaOH (pH de 6 e 7), água destilada (pH 5,5), água corrente (pH 5,5) e álcool etílico 50% (v/v) (pH 5,5). As amostras continham 0,15 g de subproduto mineral com corante adsorvido e 25 mL de solução eluente, e foram mantidas em contato por 6 horas nas condições de 150 rpm e 30°C. Na sequência foram centrifugadas por 10 minutos a 3000 rpm e lidas no espectrofotômetro UV – Vis.

Para determinar a quantidade de corante dessorvido (q_{ed}) e a porcentagem de dessorção (Pd) foram utilizadas as Equações (9) e (10) (SILVA, 2019).

$$q_{ed} = \frac{Vel(Ced)}{msd} \quad (9)$$

$$Pd = \left(\frac{q_{ed}}{q_e}\right).100 \quad (10)$$

Em que V_{el} é o volume de eluente (L), C_{ed} a concentração de corante dessorvido na fase líquida (mg L^{-1}), m_{sd} é a massa de adsorvente com corante (g) e q_e a quantidade de corante presente no material adsorvente no equilíbrio (mg g^{-1}).

3.7 TESTE EM EFLUENTE INDUSTRIAL

As condições de operação que apresentaram melhores resultados, vinculado aos dados cinéticos foram utilizados em teste para um efluente industrial oriundo de uma empresa do ramo de embalagens de papel da região dos Campos Gerais. Para efeito comparativo, foi realizado o teste com pH natural do efluente e com pH ajustado ao melhor resultado deste parâmetro encontrado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

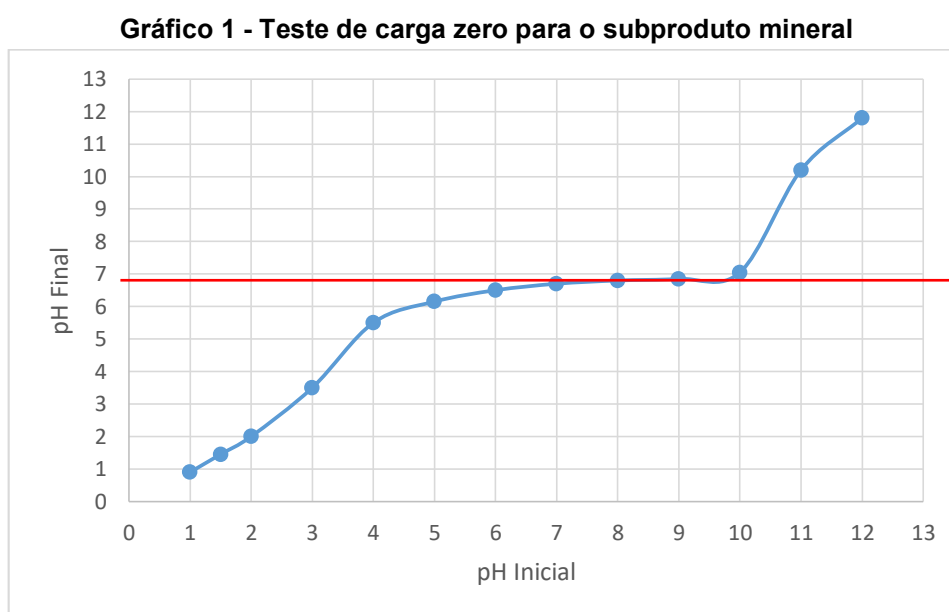
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir dos procedimentos abordados na metodologia em estudo.

4.1 PREPARO DO ADSORVENTE

Após secagem, durante 1 hora em estufa com circulação e renovação de ar, o subproduto mineral foi peneirado em peneiras granulométricas e, com este procedimento, foi possível determinar que o diâmetro volumétrico médio da partícula é de 0,038 mm (MESH 325 - 400), sendo esta a granulometria do material utilizada em todos os demais testes.

4.2 PONTO DE CARGA ZERO

Os resultados do ponto de carga zero são apresentados no Gráfico 1. O pH_{pcz} foi determinado a partir dos valores do pH final em função do pH inicial da solução.



Fonte: Autoria própria (2020).

Observa-se que o pH_{pcz} do subproduto mineral encontrado foi de 6,8. Visto que o Basazol *Yellow* 5G é um corante catiônico, a remoção do corante é favorecida por valores de pH acima do pH_{pcz} pois a superfície do material é carregada negativamente

e possui maior tendência de adsorver cátions (DEOLIN, 2013). Este fenômeno ocorre devido a atração eletrostática entre a carga na superfície do material e o grupo catiônico da solução (DEOLIN, 2013).

O ponto de carga zero (pH_{pcz}) é importante no processo de adsorção pois indica qual o pH da solução em que a superfície do material adsorvente pode apresentar carga neutra, positiva ou negativa (SILVA, 2019) e assim determinar qual pH será mais propício para a adsorção.

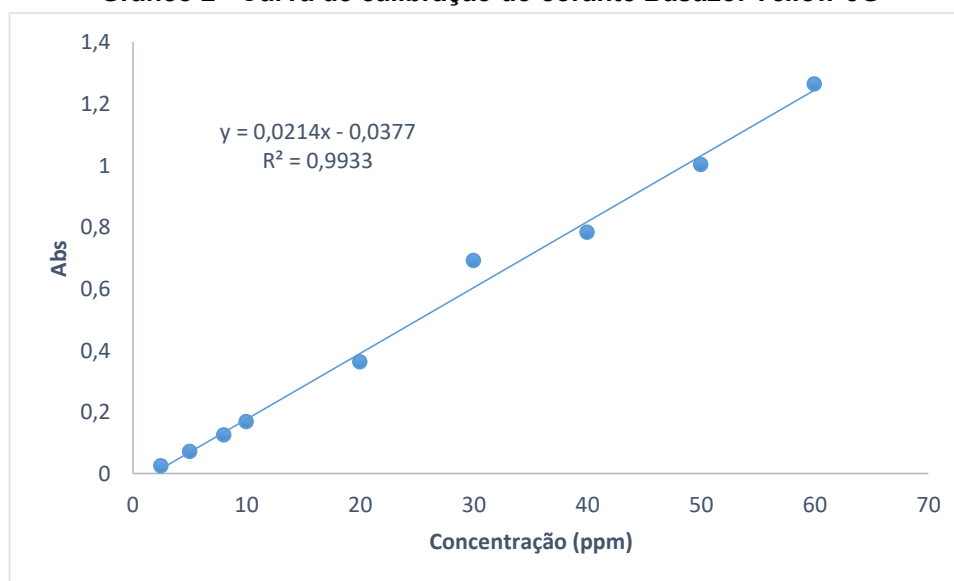
Portanto, valores de pH superiores a 6,8 são mais favoráveis a remoção do corante através do uso do subproduto mineral como adsorvente.

4.3 PREPARO DAS SOLUÇÕES SINTÉTICAS

4.3.1 Curva de Calibração

As soluções sintéticas do corante Basazol *Yellow* 5G em diferentes concentrações (entre 2,5 à 60 ppm) foram lidas no espectrofotômetro em modo varredura na faixa de 300 a 800 nm. Com os resultados obtidos, pode-se observar que o comprimento de onda que apresentou maior absorção de luz foi de 413 nm. Assim, foi construído o gráfico de absorbância *versus* concentração (ppm), conforme Gráfico 2.

Gráfico 2 - Curva de calibração do corante Basazol *Yellow* 5G



Fonte: Autoria própria (2020).

A abscissa representa a concentração em ppm e a ordenada a absorbância das soluções sintéticas. Com isso obtém-se a equação da reta que correlaciona os dados, representada pela Equação (11).

$$Abs = 0,0214C - 0,0377 \quad (11)$$

Em que Abs é a absorbância e C é a concentração das soluções (ppm). A equação é válida visto que o coeficiente de correlação (R^2) é próximo de 1, sendo então passível de utilização para determinar a concentração de corante nas soluções e amostras em estudo.

4.4 TESTES PRELIMINARES

4.4.1 Teste de influência do pH na banda de absorção

O teste de influência do pH na banda de adsorção consistiu em avaliar a interferência deste parâmetro no deslocamento na banda de adsorção do corante a partir de leituras em espectrofotômetro UV-Vis.

Os resultados obtidos para as diversas faixas em estudo estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Influência do pH na banda de absorção

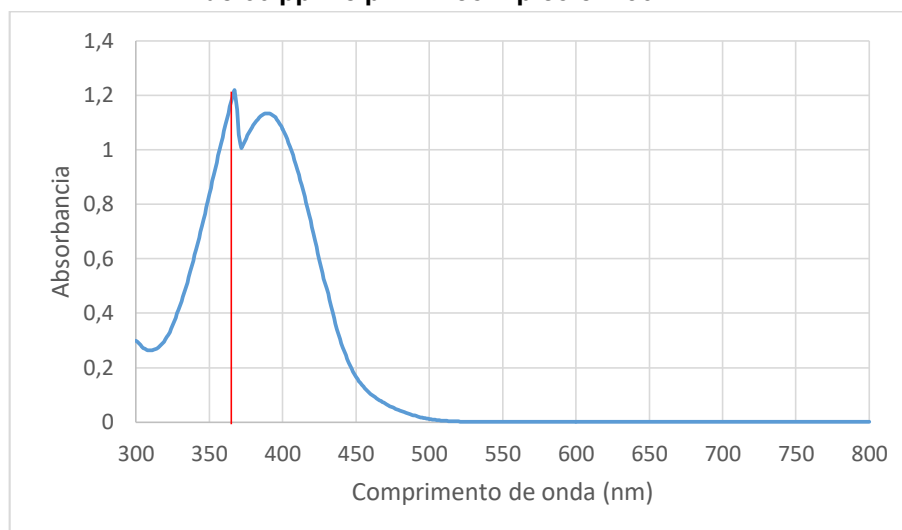
Faixa de pH	Comprimento de onda (nm)
1 – 2	367
3	407
4 – 10	413
11 – 13	432

Fonte: Autoria própria (2020).

Conforme observado na Tabela 2, houve diferença significativa entre as faixas de pH, alterando o comprimento de onda que possui maior absorção de luz. Isto ocorre devido a alteração da cor inicial da solução de corante conforme o ajuste de pH com adição de ácido clorídrico ou hidróxido de sódio.

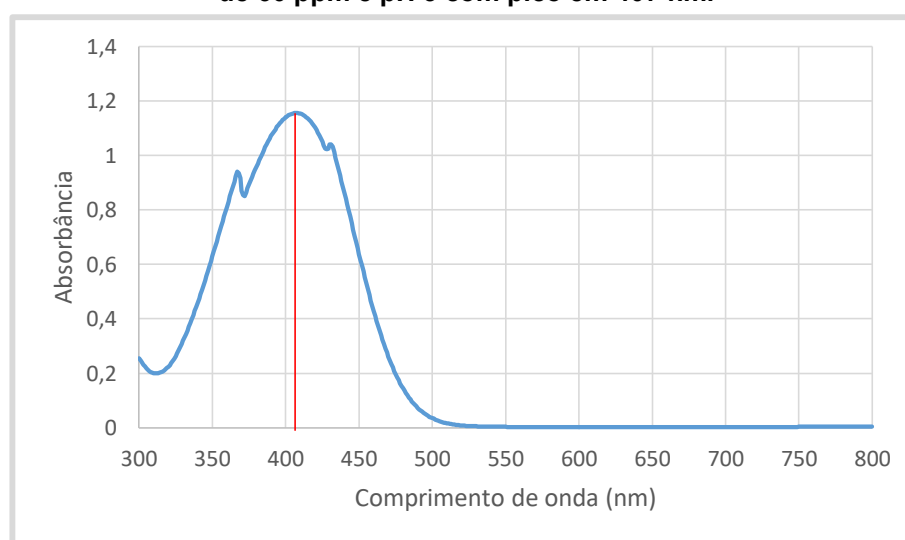
Por meio dos Gráficos 3, 4, 5 e 6 pode-se observar a diferença de absorbância entre as diferentes faixas de pH lidos no espectrofotômetro em modo varredura nos comprimento de onda de 300 a 800 nm.

Gráfico 3 - Espectro de absorção da solução de Corante Basazol Yellow 5G em concentração de 60 ppm e pH 1-2 com pico em 367 nm.



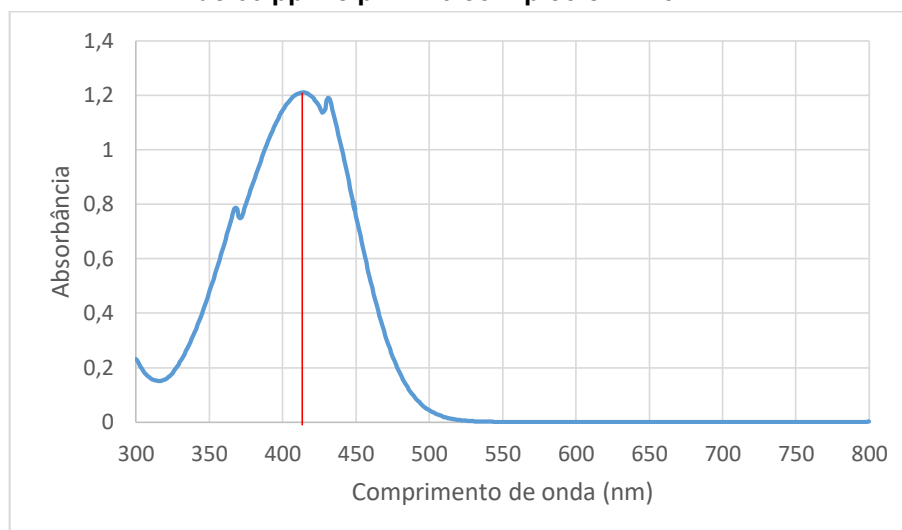
Fonte: Autoria própria (2020).

Gráfico 4 - Espectro de absorção da solução de Corante Basazol Yellow 5G em concentração de 60 ppm e pH 3 com pico em 407 nm.



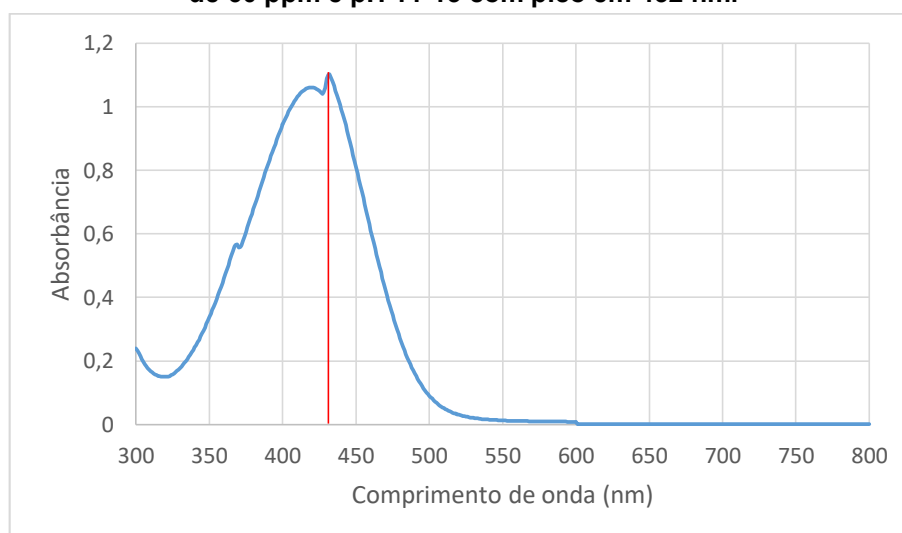
Fonte: Autoria própria (2020).

Gráfico 5 - Espectro de absorção da solução de Corante Basazol Yellow 5G em concentração de 60 ppm e pH 4-10 com pico em 413 nm.



Fonte: Autoria própria (2020).

Gráfico 6 - Espectro de absorção da solução de Corante Basazol Yellow 5G em concentração de 60 ppm e pH 11-13 com pico em 432 nm.



Fonte: Autoria própria (2020).

Portanto, para os demais testes foram aplicados os comprimentos de onda adequados para cada faixa de pH conforme os resultados descritos na Tabela 2.

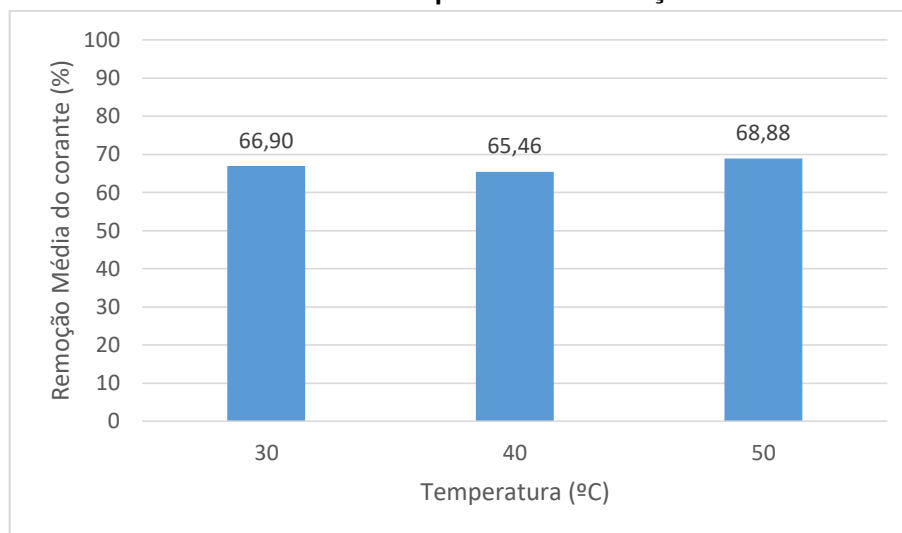
4.4.2 Teste de influência da temperatura no meio reacional

O teste de influência de temperatura permitiu avaliar a variação de remoção da solução de corante Basazol Yellow 5G com concentração de 60 ppm conforme a alteração das temperaturas avaliadas (30, 40 e 50°C).

A Equação (11) foi aplicada aos dados experimentais para determinar a porcentagem remanescente de corante na solução.

Os resultados obtidos estão descritos no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Influência da temperatura na remoção do corante.



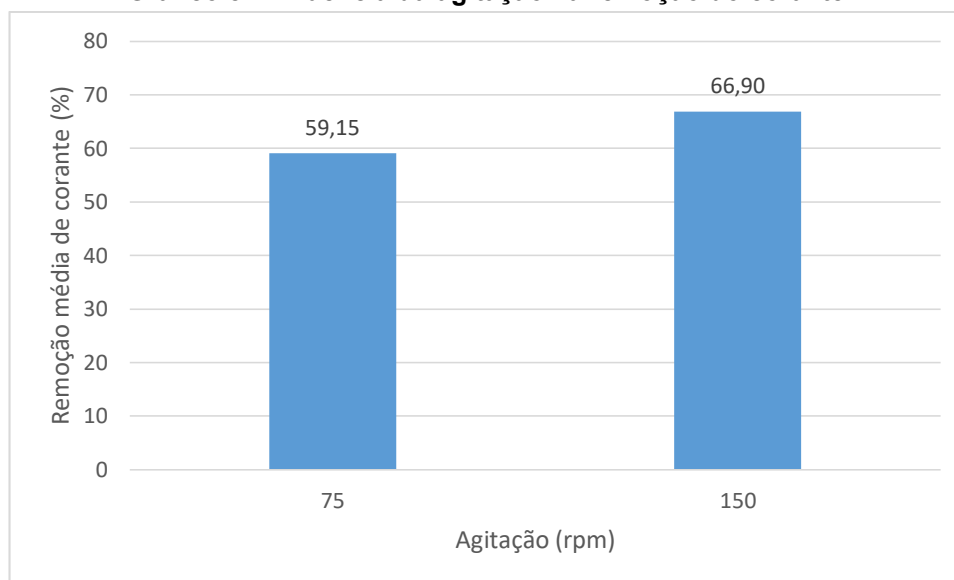
Fonte: Autoria própria (2020).

Analisando o Gráfico 7, nota-se que a porcentagem de remoção para temperatura de 50°C apresenta-se superior as demais, aumentando de 66,90% em 30°C para 68,88% em 50°C. Entretanto, considerando a legislação vigente para lançamento de efluente em corpos hídricos e que a diferença foi de aproximadamente 2%, seria necessário avaliar a viabilidade de implantação de um sistema que eleve a temperatura a 50°C em um cenário real para que tal diferença seja compensatória.

Portanto, foi definido que a temperatura ótima para realização dos experimentos para o presente trabalho como 30°C visto que esta apresentou resultados semelhantes as demais temperaturas avaliadas. Além disso, priorizou-se trabalhar com temperaturas mais próximas da temperatura ambiente, seja por custo econômico e também por ser tecnicamente mais prático.

4.4.3 Teste de influência da agitação no meio reacional

Outro parâmetro que pode influenciar na remoção é a agitação por conta do movimento oscilatório promover o maior contato entre o adsorvente e o material a ser adsorvido. Os resultados obtidos estão descritos no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Influência da agitação na remoção do corante.

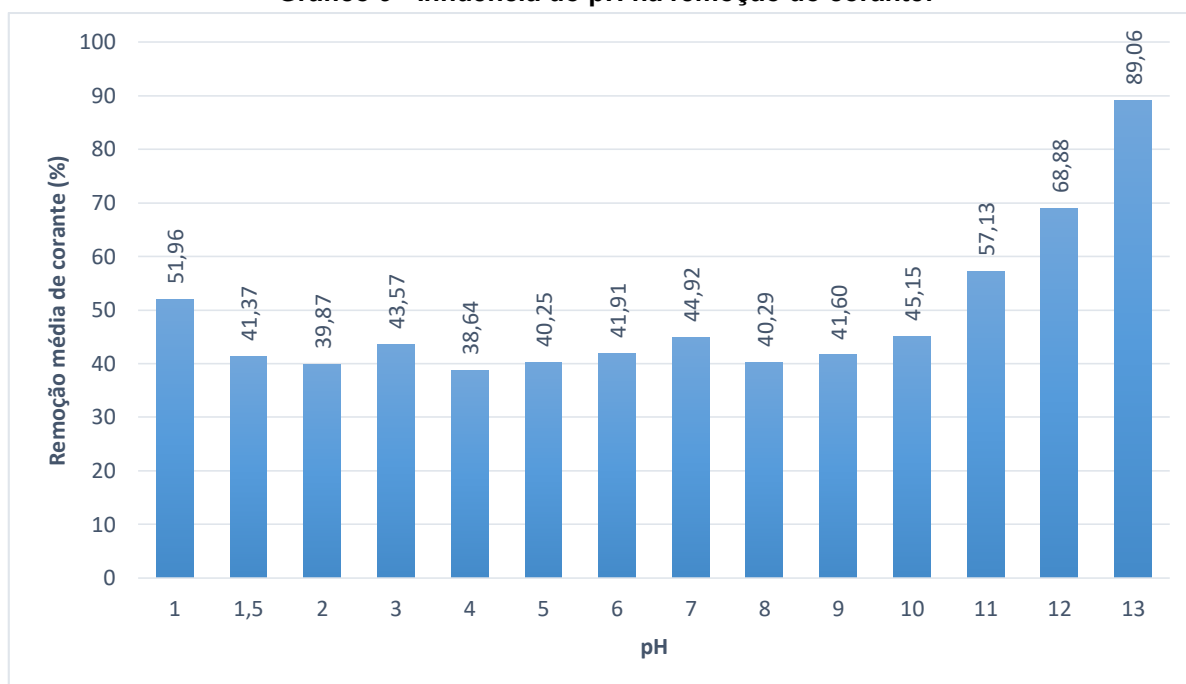
Fonte: Autoria própria (2020).

Observa-se no Gráfico 8 que a agitação a 150 rpm promove uma maior remoção de corante utilizando o subproduto mineral nas mesmas condições experimentais em comparação a de 75 rpm, apresentando uma taxa superior em aproximadamente 8%. A maior agitação promoveu maior contato com a área superficial e assim foi determinado que para o sistema estudado, a agitação de 150 rpm seria a condição ótima para o experimento.

4.1.4 Teste de influência do pH no meio reacional

Para quantificação da concentração de corante nas amostras, aplicou-se a Equação (11) e assim, pôde-se determinar a taxa de remoção pelo material adsorvente.

O percentual médio de corante removido em relação a cada pH testado está representado no Gráfico 9.

Gráfico 9 - Influência do pH na remoção do corante.

Fonte: Autoria própria (2020).

A partir dos resultados obtidos, percebe-se que valores de pH mais básicos apresentam maior remoção em comparação a pHs neutros e ácidos, apresentando crescente elevação a partir do pH 11 e atingindo o maior grau de remoção com pH 13.

O pH pode interferir na carga superficial do adsorvente e também na ionização das moléculas do material a ser adsorvido, sendo um parâmetro importante para controlar na remoção de corantes, passível de interferir de forma positiva ou negativa no processo (CRINI et. al., 2007).

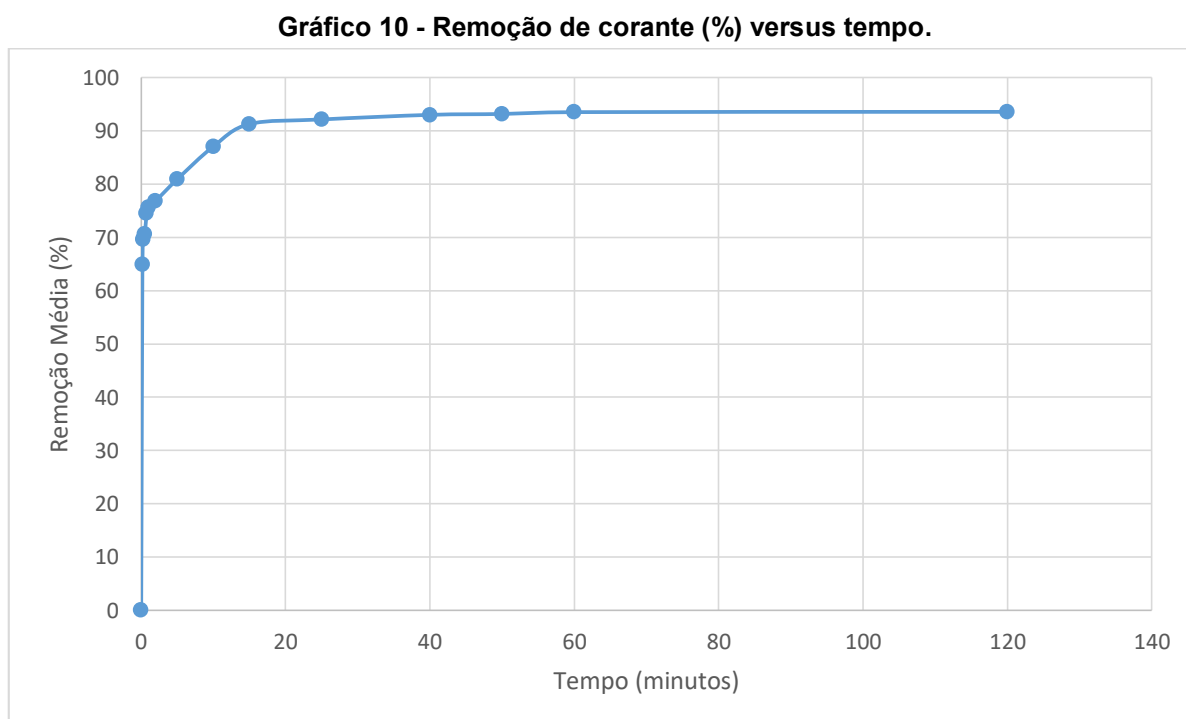
Pelas características catiônicas do corante em estudo e como apontado no teste de carga zero (seção 4.2), a superfície do material é carregada negativamente e por consequência, adsorve preferencialmente cátions. Este processo ocorre devido a atração eletrostática entre a carga gerada na superfície do material adsorvente e o grupo catiônico da solução (DEOLIN, 2013), favorecendo assim a remoção do corante Basazol *Yellow* 5G por meio do subproduto mineral, sendo a máxima remoção encontrada nas condições testadas de 89,06% para pH 13.

Nos estudos de Oliveira et.al. (2013) utilizando caulinita natural na remoção do corante catiônico Azul de Metileno e no de Roulia e Vassiliadis (2008) com bentonita na análise de adsorção de corantes catiônicos, ambos obtiveram maior eficiência de remoção em meios básicos.

Não foram realizados testes para o pH 14 devido a estabilização do pH em valores próximos do pH 13 mesmo com a adição de solução de NaOH concentrada, impossibilitando assim o experimento com este valor de pH. Deste modo, os demais testes foram realizados utilizando o pH 13, definido como condição mais favorável a adsorção.

4.5 TESTE CINÉTICO

O teste cinético visou determinar o tempo de equilíbrio do sistema. As condições de pH, agitação e temperatura utilizadas para este teste foram, respectivamente, pH 13, 150 rpm e 30°C. O Gráfico 10 e a Tabela 3 apresentam os resultados obtidos com este experimento, no qual se observa a porcentagem de remoção durante os 2160 minutos (36 horas) de reação.



Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 3 - Percentual de remoção do corante Basazol Yellow 5G

Tempo (min)	% REMOÇÃO
0	0
0,167	64,94
0,25	69,67
0,5	70,63
0,75	74,57
1	75,67
2	76,86
5	80,93
10	87,09
15	91,29
25	92,16
40	93,02
50	93,19
60	93,53

Fonte: Autoria própria (2020).

Considerando as informações contidas no Gráfico 10 e na Tabela 3, observa-se a rapidez em que ocorre a remoção nos primeiros instantes, sendo que em 5 minutos ocorre uma remoção de 80,93%. Já com 25 minutos, a remoção chega a 92,16%. Entretanto, o equilíbrio é atingido a partir de 60 minutos com uma remoção de 93,53% do corante Basazol Yellow 5G.

A partir dos resultados experimentais, nota-se uma sorção rápida no início, seguida de uma sorção lenta até atingir o período de equilíbrio. Tal comportamento é observado em trabalhos como de Muller (2019), no qual remove o azul de metileno utilizando serragem de pinus e de bambu em 20 e 60 minutos, respectivamente.

A cinética rápida é importante do ponto de vista industrial pois viabiliza o uso de reatores de volumes menores, promovendo a diminuição de custo operacional e alta eficiência (OFTER et. al., 2003). De acordo com Kyzas (2012), a cinética de adsorção acontece pela relação existente entre os sítios vazios na superfície do material adsorvente e o tempo. No início há uma maior quantidade de sítios vazios que estão disponíveis para serem preenchidos, e com o decorrer do tempo esta oferta diminui, gerando repulsão e dificultando o processo de adsorção.

4.5.1 Modelos Cinéticos

Os modelos cinéticos são utilizados para descrever a cinética de adsorção e determinar a taxa de adsorção. Aplicou-se os modelos cinéticos de pseudoprimeira ordem, pseudossegunda ordem e de Elovich aos dados experimentais a fim de determinar os respectivos parâmetros cinéticos e coeficientes de correlação.

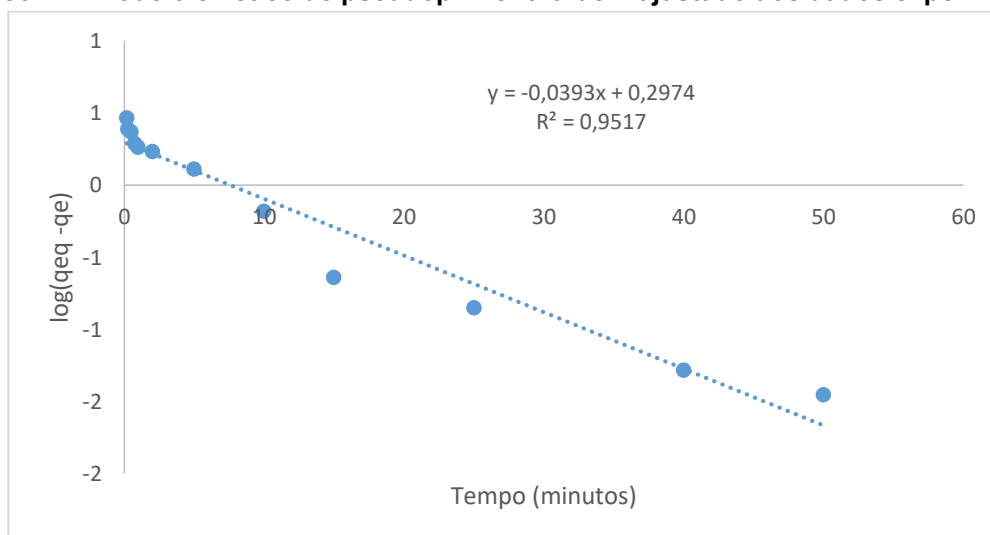
Na Tabela 4 estão representados os modelos cinéticos utilizados no presente trabalho e suas respectivas equações lineares, já mencionadas anteriormente no item 2.5, as quais foram usadas para obtenção dos dados cinéticos.

Tabela 4 - Equações lineares para os modelos cinéticos	
Modelo Cinético	Equação Linear
Pseudoprimeira Ordem	$\log(q_{eq} - q_t) = \log(q_{eq}) - \left(\frac{k_1}{2,303}\right)t$
Pseudossegunda Ordem	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_{eq}^2} + \frac{1}{q_{eq}}$
Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln(t)$

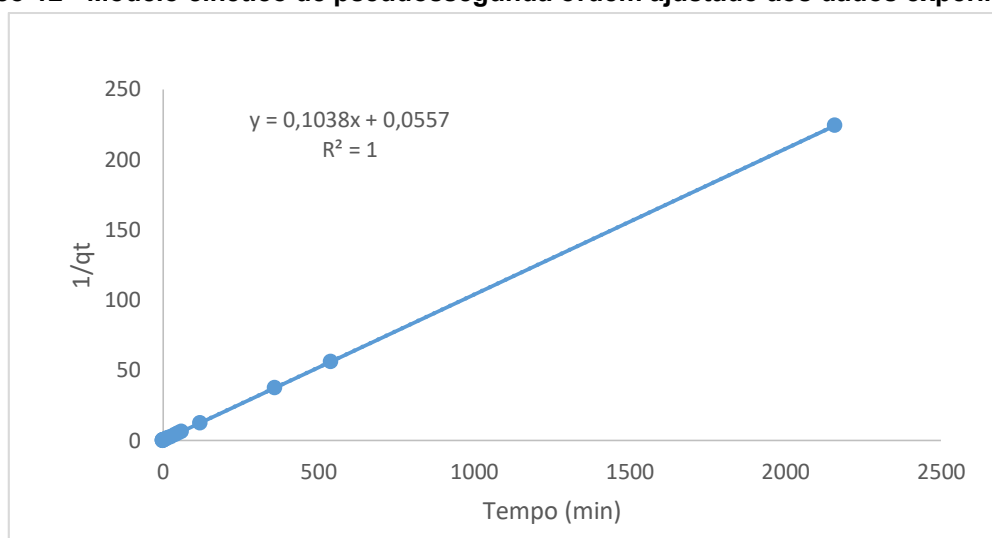
Fonte: Autoria própria (2020).

Os dados experimentais estão ajustados aos modelos cinéticos e são representados pelos Gráficos 11, 12 e 13 para os modelos de pseudoprimeira ordem, pseudossegunda ordem e Elovich respectivamente.

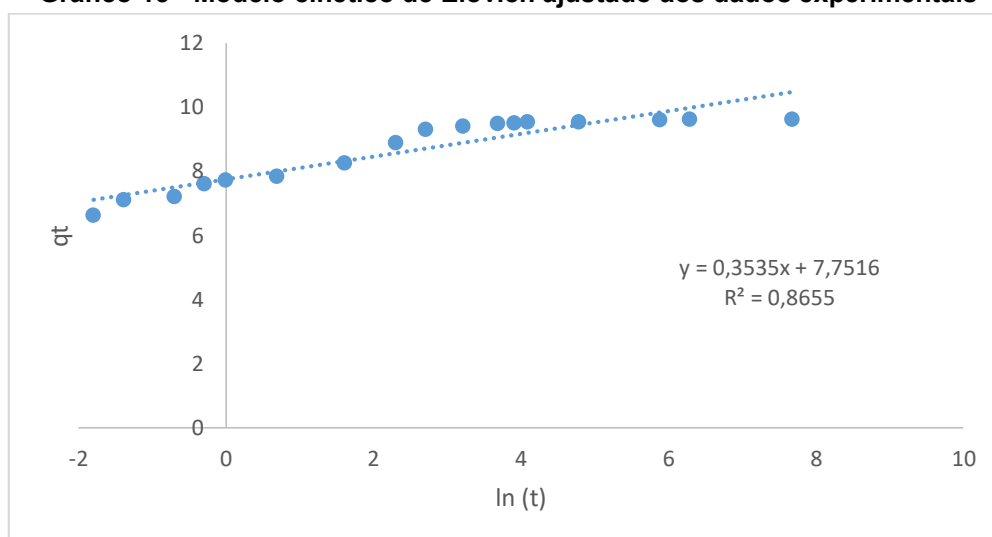
Gráfico 11 - Modelo cinético de pseudoprimeira ordem ajustado aos dados experimentais



Fonte: Autoria própria (2020).

Gráfico 12 - Modelo cinético de pseudossegunda ordem ajustado aos dados experimentais

Fonte: Autoria própria (2020).

Gráfico 13 - Modelo cinético de Elovich ajustado aos dados experimentais

Fonte: Autoria própria (2020).

A análise do modelo cinético que adequou-se melhor aos dados experimentais foi realizada a partir do comparativo entre os coeficientes de correlação (R^2).

Tabela 5 - Modelos cinéticos

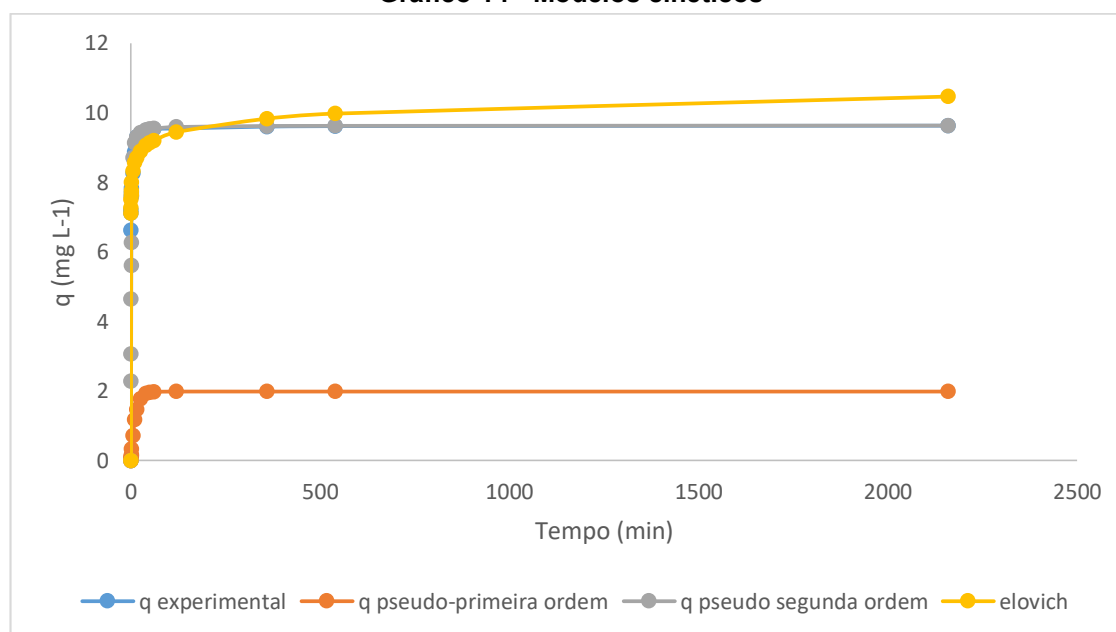
Modelo Cinético	Parâmetros	Coefficiente de Correlação (R ²)
Pseudoprimeira ordem	$q_{eq} = 1,9834 \text{ mg g}^{-1}$ $k_1 = 0,09028 \text{ min}^{-1}$	0,9517
Pseudossegunda ordem	$q_{eq} = 9,6339 \text{ mg g}^{-1}$ $k_2 = 0,1934 \text{ min}^{-1}$	1
Elovich	$\alpha = 1179426932,4166 \text{ mg g}^{-1} \text{ min}^{-1}$ $\beta = 2,8288 \text{ g mg}^{-1}$	0,8665

Fonte: Aatoria própria (2020).

Com base nos resultados obtidos, foi observado que dentre os modelos aplicados, o modelo de pseudossegunda ordem foi o que apresentou maior coeficiente de correlação (R²) e valores mais próximos aos dados experimentais. Isto também pode ser verificado pela proximidade do valor de $q_e = 9,6339 \text{ mg g}^{-1}$ ao valor experimental $q_e = 9,5405 \text{ mg g}^{-1}$.

O Gráfico 14 apresenta o comparativo entre os modelos cinéticos e os dados experimentais.

Gráfico 14 - Modelos cinéticos



Fonte: Aatoria própria (2020).

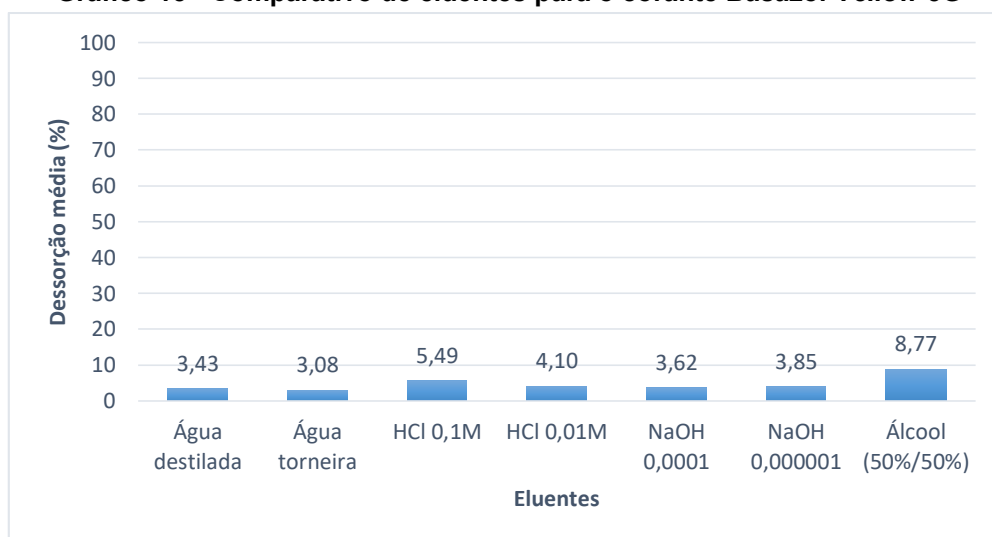
Notou-se a partir da análise do Gráfico 14 que os dados experimentais e o modelo de pseudossegunda ordem coincidem graficamente. De acordo com Ho e Mackay (1998), o modelo de pseudossegunda ordem pode indicar um processo de

sorção química ou quimiossorção através do compartilhamento de elétrons entre o sorvente e o sorvato. Entretanto, é necessário a realização de demais testes, como por exemplo o teste de equilíbrio e teste termodinâmico, para uma avaliação mais precisa do tipo de adsorção do sistema em estudo visto que os modelos cinéticos são provenientes de correlações empíricas.

4.6 TESTE DE DESSORÇÃO

O teste de dessorção consistiu em avaliar a capacidade de recuperação do corante Basazol Yellow 5G após a adsorção pelo subproduto mineral. A quantidade de corante equivalente foi de aproximadamente $9,54 \text{ mg g}^{-1}$. Os resultados referentes ao percentual de dessorção estão apresentados no Gráfico 15.

Gráfico 15 - Comparativo de eluentes para o corante Basazol Yellow 5G



Fonte: Autoria própria (2020).

Segundo Scheufele (2014), a utilização de eluentes com pH desfavorável a adsorção, ou seja, com valores menores do que o pH_{pcz} beneficia o processo de dessorção. A baixa dessorção para a solução de $\text{NaOH } 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ pode ser então atribuída a proximidade do pH da solução com o pH_{pcz} . Entretanto, os demais eluentes também obtiveram baixas taxas de dessorção, mesmo com valores de pH ácidos, o que reforça o indicio da ocorrência de adsorção química.

Dentre os eluentes testados, o álcool etílico 50% (v/v) foi o que obteve a maior taxa de dessorção, sendo esta de 8,77% ($q_{\text{ed}} = 0,84 \text{ mg g}^{-1}$). A hidrofobicidade dos solventes orgânicos favorece a competição por sítios da superfície do material

adsorvente, propiciando a dessorção. Aliado a isso, o baixo peso molecular deste tipo de solvente facilita a entrada nos poros do material (CARVALHO, 2013; LU, 2011).

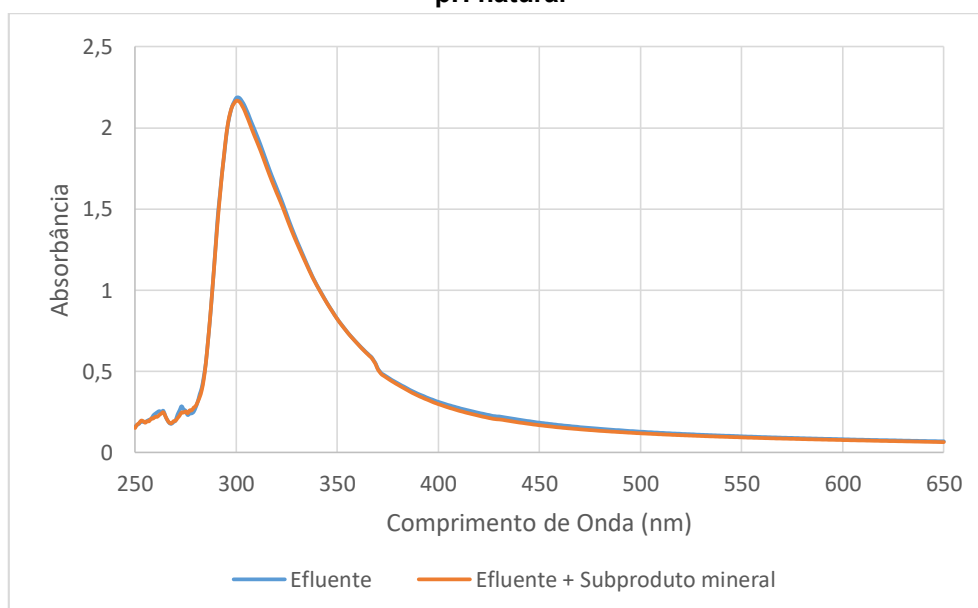
4.7 TESTE EM EFLUENTE INDUSTRIAL

O teste em efluente industrial (indústria de embalagens de papel) consistiu em analisar a capacidade do subproduto mineral de remover o corante Basazol Yellow 5G.

O teste foi realizado utilizando as melhores condições encontradas nos testes preliminares com solução sintética: temperatura de 30°C e agitação de 150 rpm por 6 horas. Em relação ao pH, foram testadas amostras com o pH natural do efluente (pH 5,4) e também com pH ajustado conforme resultado do teste de influência do pH na remoção (pH 13). A determinação do percentual de remoção do corante foi realizado a partir da integral das curvas obtidas pela espectrofotometria utilizando o *software* Origin 6.0.

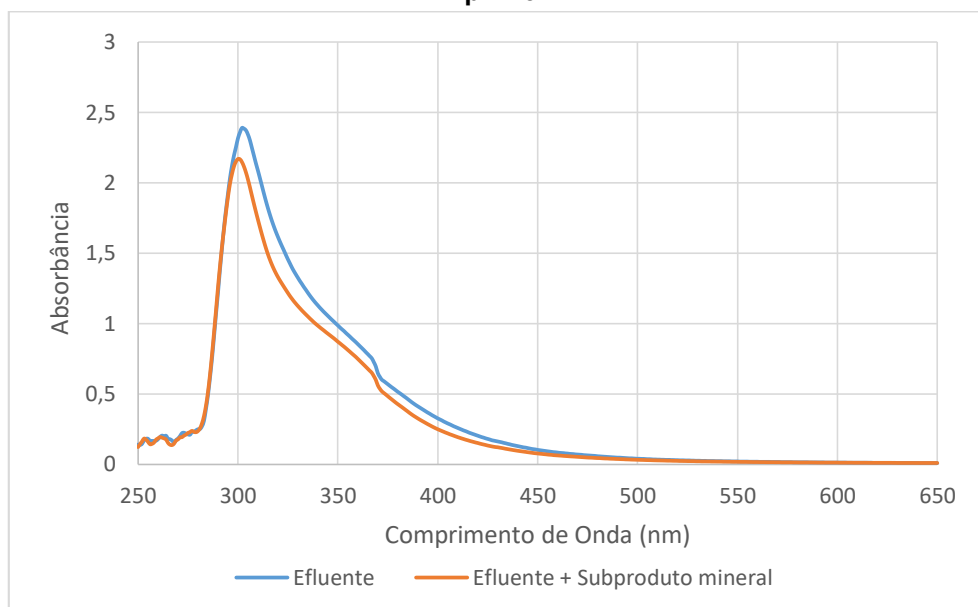
O Gráfico 16 e o Gráfico 17 apresentam o resultado comparativo entre as curvas antes e depois da adsorção com subproduto mineral para o pH natural e para o pH 13, respectivamente.

Gráfico 16 - Comparativo do espectro antes e após a adsorção com subproduto mineral para pH natural



Fonte: Autoria própria (2020).

Gráfico 17 - Comparativo do espectro antes e após a adsorção com subproduto mineral para pH 13



Fonte: Autoria própria (2020).

A remoção para o pH natural foi de 2,47%, enquanto para o pH 13 a remoção foi de 12,94%. Assim, notou-se que apesar da remoção em solução sintética ter sido elevada, em efluente industrial o subproduto mineral não apresentou os mesmos resultados.

A variabilidade da composição do efluente de uma indústria e a elevada DQO presente neste tipo de efluente são provavelmente alguns dos fatores responsáveis pela baixa remoção e conseqüentemente impedidores de um tratamento eficiente. Sendo assim, são necessários demais estudos para otimização dos demais parâmetros operacionais, como temperatura, agitação e quantidade de adsorvente, e uma análise mais aprofundada de possíveis interferentes presentes no efluente que reduzem a transferência de massa e conseqüentemente diminuem a eficiência da adsorção.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou a capacidade do subproduto mineral do tipo granito rosado na remoção do corante Basazol *Yellow* 5G em solução sintética e em efluente industrial. Visto que o corante em estudo possui natureza catiônica e como evidenciado pelo teste de carga zero, valores acima do pH_{pcz} podem tornar a superfície do material carregada negativamente e assim favoreceram a remoção do corante.

Os testes para determinação das condições operacionais mais favoráveis para o sistema em estudo evidenciaram que a temperatura não interfere de forma significativa na taxa de remoção. Entretanto, foi verificado que velocidades de rotação mais altas proporcionaram um maior contato entre o adsorvente e o adsorvato, e conseqüentemente o aumento da remoção do corante. Já o teste de pH apontou que o processo de remoção do corante Basazol *Yellow* 5G efetivamente ocorre de forma mais eficiente em meio básico, embasado nos resultados do teste de carga zero.

O teste cinético indicou um tempo de equilíbrio de 60 minutos com uma taxa de remoção de 93,53%. No entanto, a partir dos 5 primeiros minutos houve uma remoção superior de 80%, evidenciando a rapidez em que ocorre a adsorção do corante pelo subproduto mineral, demonstrando-se potencialmente indicado para aplicação industrial. O modelo cinético de pseudossegunda ordem foi o que ajustou-se melhor aos dados experimentais. Em relação ao teste de dessorção, foi observado a baixa taxa de recuperação do corante, indicando um possível caso de quimiossorção, como também evidenciado pela literatura referente ao modelo cinético que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais.

O teste em efluente industrial apresentou baixas taxas de remoção. Estes resultados podem ser decorrentes da interferência de outros componentes presentes no efluente que dificultaram a transferência de massa, e conseqüentemente, a adsorção do corante pelo subproduto mineral.

Portanto, a partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o subproduto mineral proveniente de rochas de granito rosado possui potencial de aplicação como adsorvente para remoção do corante Basazol *Yellow* 5G sob condições favoráveis. Entretanto, devido a composição variável de efluentes industriais, são necessários estudos mais aprofundados a respeito da caracterização do efluente e otimização dos parâmetros operacionais para aplicação no mesmo.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos no presente estudo, sugere-se:

- Realizar teste de equilíbrio e teste termodinâmico;
- Aplicar o subproduto mineral na remoção de metais pesados;
- Realizar estudos de otimização específicos para efluente industrial para utilização do subproduto mineral como material alternativo para o tratamento;

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. J. R.; CORSO, C. R. Comparative study of toxicity of azo dye Procion Red MX-5B following biosorption and biodegradation treatments with the fungi *Aspergillus niger* and *Aspergillus terreus*. **Chemosphere**, v. 112, p. 317–322, 2014.

ANDRIOLO, F. R. **Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipos de concreto. In: Seminário: O uso da fração fina da britagem.** II SUFFIB, São Paulo, 2005. **Anais**, São Paulo, EFUSP, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **História do papel no Mundo.** São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra/saibamais/historia/index.html>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS – ABRE 2019. **Dados do Setor.** Disponível em: <<https://www.abre.org.br/dados-do-setor/>>. Acesso em: 29 de julho de 2020.

BASF. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ):** Corante Basazol Yellow 5G (BASF). 2017.

BORBA, C. E., GUIARDELLO, R., SILVA, E. A., VEIT, M.T., TAVARES, C. R. G. Removal of nickel (II) ions from aqueous solution by biosorption in a fixed bed column: Experimental and theoretical breakthrough curves. **Biochemical Engineering Journal**, 30: 184-191, 2006.

BRASIL, Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Disponível em:< http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm>. Acesso em: 15 out. 2019.

BRASIL. Serviço Brasileiro de Normas Técnicas – BRT. **Dossiê Técnico, Produção de Embalagens de Papel**, 2007. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/>>. Acesso em: 28 de julho de 2020.

CARVALHO, D. S. **Estudo da dessorção seletiva do corante reativo em carvão ativado.** 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011 - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho.** Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 01. Out. 2019.

CRINI, G.; PEINDY, H. N.; GIMBERT, F.; ROBERT, C. Removal of C.I. Basic Green 4 (Malachite Green) from aqueous solutions by adsorption using cyclodextrin-based adsorbent: Kinetic and equilibrium studies. **Separation and Purification Technology**, v. 53, n. 1, p. 97-110, 15 fev. 2007.

CROMEX. **Os bastidores da cor**. São Paulo, 2001. Disponível em: <www.cromex.com.br/cromex_os_bastidores_da_cor.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2019.

DA SILVA, A. P. M.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. **Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração, 2011**. Disponível em <http://www.cidadessustentaveis.org.br/sites/default/files/arquivos/11_residuos_solidos_da_mineracao.pdf. 2011> Acesso em: 20 out. 2019.

DA SILVA, J. E. et al. Estudo de cinética e equilíbrio de adsorção empregando a casca do coco modificada quimicamente para a remoção de Pb (II) de banho sintético. **Rev. Virtual Quim**, v. 10, n. 5, nov. 2018. Disponível em: <<http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/VicenteNoPrelo.pdf>>. Acesso em 10 out. 2019.

DA SILVA, J. L. B. C.; PEQUENO, O. T. B. de L.; ROCHA, L. K. S.; A., E. C. O. de; MARCIEL, T. A. R.; BARROS, A. J. M. Biossorção de metais pesados: uma revisão. **Revista Saúde & Ciência Online**, v. 3, n. 3, p. 137-149, 2014.

DALLAGO, R. M.; SMANIOTTO, A.; OLIVEIRA, L. C. A. Resíduos sólidos de curtumes como absorventes para remoção de corantes em meio aquoso. **Química Nova**, v. 28, n. 3, p. 433-437, 2005.

DEOLIN, Mara Helen da Silva et al. **Obtenção do ponto de carga zero de materiais adsorventes**. Maringá: Centro Universitário Cesumar, p. 2-5, 2013.

DIAS, Fernando Ferreira da Silva; SILVA, Pedro B. V.; SANTOS, André F. de M. S.; ANDRADE, José G. P.; ALBUQUERQUE, Izabelle L. T. Tratamento de efluente têxtil através de processo oxidativo avançado (H₂O₂/TiO₂/UV). **Revista Geama**, v. 4, n. 3, p. 4-9, 2018.

ECOAMOS. **Embalagens de polpa moldada – Embalagem Ecológica, 2020**. Disponível em: <<https://www.ecoamos.com.br/320/embalagens-de-polpa-moldada--embalagem-ecologica>>. Acesso em 10 de setembro de 2020.

EL QADA, E.N.; ALLEN, S.J.; WALKER, G.M. Adsorption of basic dyes from aqueous solution onto activated carbons. **Chemical Engineering Journal**, v. 135, p. 174–184, 2008.

EREN, E.; AFSIN, B. E. Investigation of a basic dye adsorption from aqueous solution onto raw and pre-treated sepiolite surfaces. **Dyes and Pigments**, v. 73, p. 162–167, 2007.

FIGUEIRA, Hedda Vargas; LUZ, Adão Benvindo da; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro, p. 143 – 211, 2010.

FREIRE, L. F. A.; FORMIGA, W. J. F.; LAGDEN, M. G.; DE LUNA; ALVES, A. S.; F. de L.; CORRÊA, M. de A.; DOS SANTOS, M. A. G. Avaliação da Adsorção de Efluente Têxtil por Compósitos de Quitosana. **Revista Processos Químicos**, v. 12, n. 24, p. 9-17, 2018.

FREITAS, I. C. V.; MALDONADO, A. C. D.; ALVARENGA, C. B.; CAMARGO, R.; WENDLING, B. Adsorção e dessorção de metais no solo e coeficientes de isotermas de Freundlich e Langmuir. **Agropecuária técnica**, v. 31, n. 2, p. 153-163, 2010.

GRACH, F. C. **Incorporação de resíduos de embalagens pós-consumo provenientes das agroindústrias na fabricação de bandejas de polpa moldada**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Florianópolis, 2006.

HASSEMER, Maria Eliza Nagel; CORAL, Lucila Adriani; LAPOLLI, Flávio Rubens; AMORIM, Maria Teresa Souza Pessoa. Processo UV/H₂O₂ como pós-tratamento para remoção de cor e polimento final em efluentes têxteis. **Química nova**, v. 35, n. 5, p. 900-9004, 2012.

HO, Y. S.; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. **Process Biochemistry**. v.34, p.451-465, 1998.

HONORIO, Jacqueline Ferandin. **Emprego da Casca de Soja como adsorvente na Remoção de Corantes Reativos Têxteis**. 2013. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Relações anuais de informações sociais**. Disponível em: < <https://ces.ibge.gov.br/base-dados/metadados/mte/relacao-anual-de-informacoes-sociais-rais.html> >. Acesso em: 12 nov. 2019.

KIMURA, I. Y.; GONÇALVES JR., A. C.; STOLBERG, J.; LARANJEIRA, M. C. M.; FÁVERE, V. T. de. Efeito do pH e do tempo de contato na adsorção de corantes reativos por microesferas de quitosana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 9, n. 3, p. 51-57, 1999.

KYZAS, George Z. **Commercial coffee wastes as materials for adsorption of heavy metals from aqueous solutions**. *Materials*, v. 5, n. 10, p. 1826-1840, 2012.

LU, P. J.; LIN, H.; YU, W.; CHERN, J. Chemical regeneration of activated carbon used for dye adsorption. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 42, n.2, p. 305-311, 2011.

MARTINEZ, K. Y. P. **Planejamento da produção na indústria de embalagens de polpa moldada**. 2013. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

MELLO, D. **Análise das condições competitivas da indústria de papel de embalagens do estado de Santa Catarina**. 2002, 207 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Sócio-Econômico. Programa de Pós-Graduação em Economia. Florianópolis, 2002.

MENOSSE, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira, 2004.

MENOSSE, R. T. et al. Pó de Pedra: uma alternativa ou um complemento ao uso da areia na elaboração de misturas de concreto?. **Holos Environment**, v. 10, n. 2, p. 209-222, 2010.

MÜLLER, L. C.; ALVES, A. 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, n. 4, p. 687-695, 2019.

NASCIMENTO, R. F. do; LIMA, A. C. A. de L.; VIDAL, C. B.; MELO, D. de Q. M.; RAULINO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p.

NETO, H. M. Tratamento de efluentes na indústria de papel e celulose. **Revista TAE**. 2014. Disponível em: < <http://www.revistatae.com.br/7197-noticias>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

OFTER, R., YERACHMIEL, A., SHMUEL, Y. “**Marine macroalgae as biosorbents for cadmium and nickel in water**”. Water Environment Research, v.75, pp.246-253, 2003.

OLIVEIRA, S. P. de. **Adsorção do Corante Azul de Metileno em Caulinita Natural e Intercalada com Acetato de Potássio Provenientes da Região de Bom Jardim de Goiás – GO**. 2012. 80f. Dissertação (Mestrado de Geociências) - Universidade Federal do Mato Grosso. Cuiabá, 2012.

OLIVEIRA, S. P.; 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.

PIETROBELLI, J. M. T. de A. **Remoção dos íons Cádmio, Cobre e Zinco utilizando Macrófita Egeria Densa.** 2012. 125 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

ROULIA, M.; VASSILIADIS, A. A. **Sorption characterization of a cationic dye retained by clays and perlite.** *Microporous and Mesoporous Materials*, v. 116, n. 1-3, p. 732-740, 2008

SÁ, M. V. V. A. **Influência da substituição de areia natural por pó de pedra no comportamento mecânico, microestrutural e eletroquímico de concretos.** 2006. 140f. Tese (Doutorado) – Programa de pós graduação em Ciencia e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2006.

SALLEH, M. A. M.; MAHMAOUND, D. K; KARIM, W. A. W. A; IDRIS, A. Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. *Desalination*, v. 280, p. 1-13, 2011.

SANTOS, E. O. **Caracterização, biodegradabilidade e tratabilidade do efluente de uma lavanderia industrial.** 2006. 136f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2006.

SCHEUFELE, Fabiano Bisinella. **Estudo da Remoção do Corante Reativo Azul 5G Utilizando Bagaço de Cana-De-Açúcar como Adsorvente.** 2014. 229 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2014.

SILVA, B. C. da. **Biossorção do corante Amarelo Reafix B8G a partir do bagaço de malte em batelada e sistema contínuo:** avaliação experimental e simulação fluidodinâmica computacional. 2019. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

SILVA, W. L. L. da; DE OLIVEIRA, S. P.. Modificação das características de adsorção do bagaço de cana para remoção de azul de metileno de soluções aquosas. *Scientia Plena*, v. 8, n. 9, 2012.

VELOSO, L. de A. Dossiê Técnico, Corantes e pigmentos. **Serviço Brasileiro de respostas Técnicas**, 2012.

ZANUTTO, A.; da SILVA, B. C.; DUARTE, E. R.; de ALMEIDA, L. N. B.; PIETROBELLI, J. M. T. A.; "AVALIAÇÃO CINÉTICA DO BAGAÇO DE MALTE NA REMOÇÃO DO CORANTE AMARELO REATIVO", p. 302-307. In: **Anais do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica** [=Blucher

Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n.3]. ISSN impresso: 2446-8711. São Paulo: Blucher, 2015. ISSN 2359-1757, DOI 10.5151/chemeng-cobeqic2015-267-.

ZOLLINGER, H. Color chemistry, synthesis, properties and application of organic dyes and pigments. **Weinheim, New York**, p. 367, 1987.