



UFPB
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

SARA OLIVEIRA FEITOSA

**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DA ZEÓLITA ZSM-5 COMO ADSORVENTE DE CORANTE
VERMELHO BF-3 RS**

João Pessoa - PB

2022

SARA OLIVEIRA FEITOSA

Trabalho de final de curso apresentado à
Universidade federal da Paraíba, como parte
das exigências do programa de graduação em
Engenharia Química para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química.
Orientador: Prof. Dr.º Genaro Zenaide Clericuzi

João Pessoa - PB

2022

F311s Feitosa, Sara Oliveira.

Síntese e caracterização da zeólita ZSM-5 como
adsorvente de corante vermelho BF-3 RS / Sara Oliveira
Feitosa. - João Pessoa, 2022.

47 f. : il.

Orientação: Genaro Clericuzi.

TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Zeólita ZSM 5, cinética de adsorção, isoterma de
a. I. Clericuzi, Genaro. II. Título.

UFPB/CT

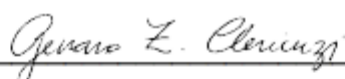
CDU 661.183.6(043.2)

SARA OLIVEIRA FEITOSA


**SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DA ZEÓLITA ZSM-5 COMO ADSORVENTE DE CORANTE
VERMELHO BF-3 RS**

Trabalho de final de curso apresentado à
Universidade federal da Paraíba, como parte
das exigências do programa de graduação em
Engenharia Química para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Química.
Orientador: Prof. Dr.º Genaro Zenaide Clericuzi

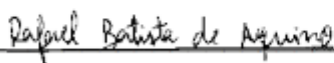
Aprovado em: 07/12/2022



Prof(a). Dr(a). Genaro Zenaide Clericuzi



Dr(a). Franklin Pessoa Aguiar



Me. Rafael Batista de Aquino

AGRADECIMENTOS

Agradeço sempre a Deus por esta conquista de permitir que sonhos realmente sejam realizados. Agradeço também pelas pessoas que o Senhor colocou na minha trajetória. Fonte de inspiração, me ajudam, me desafiam e me encorajam a ser cada dia minha melhor versão.

À minha família, meu amor incondicional, agradeço pelo apoio psicológico, pela preocupação desde a infância em me ensinar valores, força e dedicação em todos os momentos.

Ao professor Genaro Zenaide Clericuzi pela oportunidade, orientação, ensinamentos transmitidos e dedicação para realização deste trabalho ao longo de 3 anos dedicados à pesquisa científica.

Aos integrantes do laboratório de fenômenos , pelo apoio e esforço durante a realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas de faculdade, sem eles não chegaria tão longe. Um especial agradecimento para Beatriz e Luana, minhas companheiras fiéis que vou levar para vida.

A todos meus colegas de trabalho que de algum modo contribuíram para que eu mantivesse meus estudos possibilitando que dois grandes sonhos se somassem.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Química pelo conhecimento e atenção.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A todos que cruzaram minha trajetória e deixaram um pedacinho de ensinamento e valores .

1. RESUMO

Dentre os poluentes emergentes, destaca-se a presença de corantes, sobretudo os corantes vermelhos BF3 RS, tendo como principal rota de escape esgotos oriundos da indústria têxtil. Isto ocorre devido ao alto uso no processo de tingimento por serem eficazes na fixação das fibras dos tecidos. No entanto, chama atenção principalmente no quesito da toxicidade aos organismos, podendo em alguns tipos de corantes serem agentes cancerígenos. Somado ao tratamento ineficaz dos efluentes pelos métodos tradicionais de tratamento de esgoto, tem-se um potencial vilão a saúde pública, fauna e flora a longo prazo. Assim, metodologias de remoção desses compostos vêm sendo estudados, destacando o processo de adsorção, que apresenta alta eficiência e baixo custo. Nesse contexto, o adsorvente escolhido, foi a zeólita, aluminossilicatos que apresentam uma rede de canais que lhe conferem uma seletividade de forma em escala molecular, alto grau de hidratação, estabilidade da estrutura cristalina quando desidratada, propriedades de troca catiônica, canais uniformes, dentre outras. Desse modo, primeiramente foi feito a caracterização da zeólita mediante métodos de Difração de raios X, Espectroscopia na região do infravermelho e Ponto de carga zero. Assim, um posterior estudo mostrou uma adsorção de acima de 16% em um dos parâmetros estabelecidos, por mais que não seja alto é um caminho para pesquisas futuras na área variando os critérios. Ademais, foi possível estudar as isotermas de adsorção que mostraram um caráter linear, o que indica um comportamento proporcional entre concentração de adsorbato e adsorvente. Por fim, uma avaliação da cinética de adsorção complementou a pesquisa com resultados satisfatório aumentando a adsorção conforme o passar do tempo e o modelo que teve maior adequação ao comportamento experimental foi o de pseudo segunda ordem.

2. **PALAVRA-CHAVE:** Zeólita ZSM 5, cinética de adsorção, isoterma de adsorção, corante vermelho BF-3 RS

3. **TITLE:** SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF ZEOLITE ZSM-5 AS A RED DYE ADSORBENT BF-3RS

4. **ABSTRACT:** Among the emerging pollutants, the presence of dyes stands out, especially the red BF-3RS dyes, with the main escape route being sewage from the textile industry. This is due to their high use in the dyeing process, as they are effective in fixing fabric fibers. However, it draws attention mainly to the issue of toxicity to organisms, and some types of dyes may be carcinogenic agents. Added to the ineffective treatment of effluents by traditional methods of sewage treatment, there is a potential villain for public health, fauna and flora in the long term. Thus, methodologies for removing these compounds have been studied, highlighting the adsorption process, which presents high efficiency and

low cost. In this context, the adsorbent chosen was zeolite, aluminosilicates that present a network of channels that confer shape selectivity on a molecular scale, a high degree of hydration, stability of the crystalline structure when dehydrated, cation exchange properties, uniform channels, among others. Thus, firstly, the characterization of the zeolite was carried out using methods of X-ray Diffraction, Infrared Spectroscopy and Zero Charge Point. Thus, a subsequent study showed an adsorption of over 16% in one of the established parameters, even though it is not high, it is a path for future research in the area by varying the criteria. Furthermore, it was possible to study the adsorption isotherms that showed a linear character, which indicates a proportional behavior between the concentration of adsorbate and adsorbent. Finally, an evaluation of the adsorption kinetics complemented the research with satisfactory results, increasing the adsorption as time went by and the model that was most suitable for the experimental behavior was the pseudo second order model.

5. **KEYWORDS:** Zeolite ZSM5, adsorption kinetics, adsorption isotherm, red dye BF-3RS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do corante	17
Figura 2 - Estrutura do corante vermelho BF 3 RS	18
Figura 3 - Síntese da zeólita ZSM 5	26
Figura 4 - Teste de ph da solução	27
Figura 5 - Amostra após a calcinação	21
Figura 6 - Processo de filtragem e ajuste de ph	28
Figura 7 - Espectro na região do infravermelho da zeólita	32
Figura 8 - Difratoograma de raios-X da zeólita ZSM 5	33
Figura 9 - Gráfico phf vs phi (primeira batelada)	34
Figura 10 - Gráfico phf vs phi (segunda batelada)	34
Figura 11 - Curva de calibração abs vs Co	36
Figura 12 - Isotermas de Langmuir e Freundlich para Zeolite ZSM 5	38
Figura 13 - Modelo cinético de pseudo primeira ordem e pseudo segunda ordem da zeólita	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e aplicações dos principais corantes	16
Tabela 2 - Estrutura do corante vermelho BF 3 RS	22
Tabela 3 - Parâmetros da curva de calibração	37
Tabela 4 - Parâmetros da isoterma de adsorção	37
Tabela 5 - Dados da isoterma de adsorção zeólita ZSM 5 modelo Langmuir	40
Tabela 6 - Dados da isoterma de adsorção zeólita ZSM 5 modelo Freundlich	40
Tabela 7 - Parâmetros da cinética de adsorção	41
Tabela 8 - Dados do modelo de pseudo primeira ordem da zeólita ZSM 5	43
Tabela 9 - Dados do modelo de pseudo segunda ordem da zeólita ZSM 5	43

LISTA DE EQUAÇÕES

$C_{eq} / q_{eq} = 1 / (Q_m \times K_L) + C_{eq} / Q_m$	(1)	22
$q_{eq} = K_f \times C_{eq}^{(1/n)}$	(2)	23
$dx/dt = K_1 \times (X - x)$	(3)	24
$q_t = q_e \times (1 - e^{(-K_1 \times t)})$	(4)	24
$q_t = K_2 \times q_e \times t / (1 + K_2 \times t \times q_e^2)$	(5)	25
$\% \text{ REM} = (C_i - C_f / C_i) \times 100$	(6)	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DRX – Difractometria de Raios-X

FTIR – Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

PCZ – Ponto de Carga Zero

pH – Potencial de Hidrogênio

TPABr - Tetrapropilamônio

% REM - Percentual de remoção

CONAMA - Conselho Nacional do Meio ambiente

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	16
2.1 Objetivos Geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Corantes	16
3.2 Tratamento de efluentes industriais têxteis	19
3.3 Zeólita	21
3.4 Adsorção	22
3.4.1 Modelo isotérmico de adsorção de Langmuir	22
3.4.2 Modelo Isotérmico de adsorção Freundlich	24
3.5 Cinética de adsorção	24
3.5.1 Modelo de pseudo primeira ordem	25
3.5.2 Modelo de pseudo segunda ordem	26
4. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	26
4.1 Síntese da zeólita	27
4.2 Caracterização dos materiais	29
4.2.1 PONTO DE CARGA ZERO	29
4.2.2 Análise de DRX	30
4.2.3 Análise de Infravermelho	30
4.3 Preparação do efluente sintético	31
4.4 Curva de calibração	31
4.5 Percentual de remoção (REM)	31
4.6 Ensaio de adsorção	32
4.7 Cinética de adsorção	32
5. RESULTADOS	32
5.1 Caracterização dos materiais	32
5.1.1 Infravermelho	32
5.1.2 Difração de raios-X	34
5.1.3 Ponto de carga zero	36
5.2 Isotermas de Adsorção	38

5.3 Cinética de adsorção	41
6. CONCLUSÃO	45
7. Sugestões para trabalhos futuros	46
REFERÊNCIA	47

1. INTRODUÇÃO

Com advento da globalização os processos industriais vem se intensificando trazendo consigo a liberação de muitos resíduos prejudiciais no meio ambiente, sobretudo corantes . Assim, pensando nas gerações futuras tem-se que criar alternativas que permitam o uso consciente e renovável dos recursos naturais.

A indústria têxtil, movimenta a economia de todo o mundo, principalmente no Brasil, o processo de industrialização iniciou-se mediante este setor. Nativos brasileiros confeccionavam suas vestimentas através de técnicas artesanais e foi a partir da chegada dos portugueses que novos métodos foram sendo implementados até a chegada da indústria 4.0. (FebratexGrupo; 2019) . Dessa forma, é de extrema relevância o tratamento desse efluente industrial, antes do seu descarte na natureza, evitando os danos que podem ser causados pela exposição desse material (HUNGER, 2003).

Desse modo, uma das formas de redução dos resíduos poluentes, é buscar alternativas de captura destes compostos como forma de combater a toxicidade nos efluentes. Dentre os diversos procedimentos, destaca-se o uso de materiais mesoporos como material adsorvente de baixo custo, sustentável e renovável. A adsorção apresenta grandes vantagens quando comparado com outras técnicas, pois pode ser utilizada tanto para processos em batelada como contínuos na remoção de compostos químicos persistentes, pode ser aplicada em concentrações mais baixas, é de fácil operação e o material adsorvente pode ser regenerado tornando menos o investimento quando comparada às outras técnicas já mencionadas (SILVA, 2015; THUROW, 2015)

Assim o estudo das zeólita abre um leque para diversas aplicações na indústria que podem trazer inovação e eficiência para a sociedade. Desse modo, a pesquisa científica vem com a finalidade de buscar comportamentos e características intrínsecas da zeólita ZSM 5 para posteriores fins de adsorção de corante vermelho BF-3 RS.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos Geral

Este trabalho tem como objetivo, sintetizar e caracterizar a zeólita ZSM 5, para com isso analisar a capacidade de adsorção do corante vermelho BF-3 RS, que traz a problemática do devido tratamento dos efluentes.

2.2 Objetivos específicos

- Síntese da zeólita ZSM 5;
- Caracterização da composição da zeólita mediante métodos de Difração de Raios-X (DRX), Ponto de Carga Zero (PCZ) e Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR);
- Obter o percentual de remoção (%Rem) e a capacidade de remoção de equilíbrio (qeq);
- Estudar as isotermas de adsorção e definir qual melhor se ajusta a curva de remoção do corante BF-3 RS utilizando como adsorbente de zeólita ZSM 5 ;
- Avaliar a cinética da adsorção do adsorvato;
- Avaliação dos resultados.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Corantes

Corantes são compostos com estrutura diversificada e aplicações abrangentes. Característica esta que é bem difundida na indústria têxtil, de acordo com Safariková et al., (2005), dois terços de sua produção é destinada para o ramo. Na tabela 1, tem-se um resumo entre as principais características e aplicabilidades destes compostos.

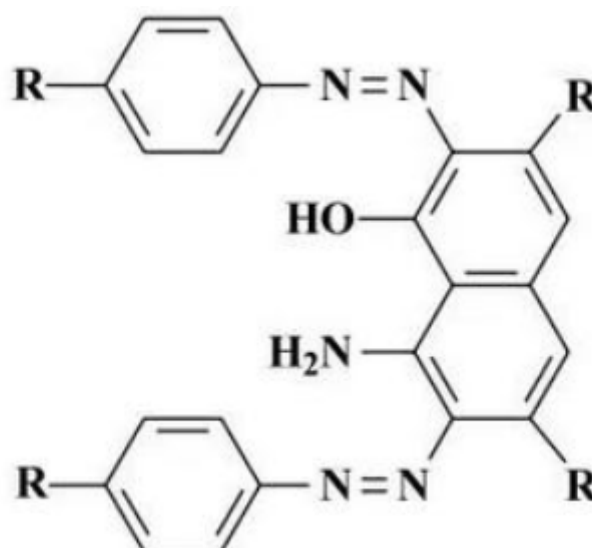
Tabela 1 - Características e aplicações dos principais corantes

Tipo	Principais características	Aplicações
Corante ácido	Solúvel ; Pelo menos um grupo sulfônico ($-\text{SO}_3^-$); Afinidade com fibra celulóstica do tecido.	Couro, papel, fibras sintéticas (nylon e elastoméricas) e fibras naturais de lã
Corante Azóicos	Insolúvel; Afinidade apenas mediante acoplanagem na fibra; No mínimo um grupo azo em sua constituição ($-\text{N}=\text{N}-$).	Fibras naturais de algodão e fibras sintéticas de poliéster
Corantes Branqueadores	Apresentam grupos carboxílicos azometino ($-\text{N}=\text{CH}-$) ou etilênicos ($-\text{CH}=\text{CH}-$) ligados à anéis aromáticos em suas estruturas químicas.	Fibras naturais, fibras artificiais, fibras sintéticas, plásticos, tintas e papel.
Corantes a Cuba	Insolúvel; Mais de um anel aromático em sua estrutura química; Aplicados com ditonito em solução alcalina para se fixar à fibra de tecido.	Fibras naturais de algodão
Corantes Diretos	Solúveis em água; Possuem mais de uma cadeia de azo; Interage com a fibra de tecido por forças de van der Waals.	Couro, papel fibras naturais de algodão, fibras artificiais de viscose
Corantes Dispersivos	Insolúveis em água; Não apresentam grupos azos em sua composição.	Fibras sintéticas (poliéster e nylon) e fibras artificiais de acetato de viscose
Corantes Enxofre	Insolúveis em água; Apresentam em sua estrutura química polissulfetos ($-\text{Sn}-$).	Fibras naturais de algodão
Corantes Pré-Metalizados	Apresentam íons metálicos ligados em suas estruturas químicas.	Tintas, plásticos, papel e couro
Corantes Reativos	Possuem grupos químicos eletrofilicos reativos; Contêm a função antraquinona e azo como grupos cromóforos.	Fibras naturais de algodão, fibras artificiais de viscose, couro e papel

Adaptado: KUNZ et al., (2017) e VELOSO (2012).

Reconhecido por ser usado no tingimento de tecidos, a molécula do corante pode ser dividida em duas partes: o grupo cromóforo e a parte responsável por se ligar à estrutura da fibra segundo Kunz et al., (2017) de acordo com a figura 1.

Figura 1 - Estrutura do corante

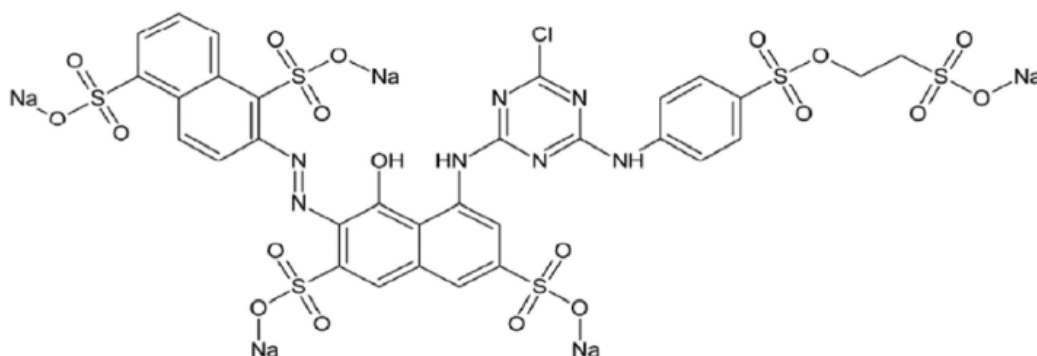


Fonte: Kunz et al., (2017)

No entanto, o grupo mais representativo e largamente empregado pertence à família dos azocorantes, que se caracterizam por apresentarem um ou mais grupamentos $-N=N-$ ligados a sistemas aromáticos com outras partes ligadas ao grupo cromóforo, responsável pela fixação do corante à fibra. Estes corantes representam cerca de 60% dos corantes atualmente utilizados no mundo, sendo extensivamente utilizados no tingimento de fibras têxteis. (Fernanda, 2020)

A figura 2 ilustra a estrutura química do corante vermelho BF 3RS no qual é possível observar a presença de um grupo cromóforo azo –N=N– e dois grupos reativos, o vinilsulfona e o monoclorotriazina (Barbosa et al., 2019).

Figura 2 - Estrutura do corante vermelho BF 3 RS



Fonte: Barbosa et al., 2019

Por sua abrangência em vários tratamentos, é notório que os resíduos estejam presentes nos efluentes. Somado às técnicas de tratamento de esgoto que em suma não tem especificidade na remoção de corantes, ela mesmo que em pouca quantidade nas águas fluviais é capaz de prejudicar a flora microbiana e algas do ecossistema além de ser agentes cancerígenos, segundo estudos de Kunz et al., (2017) mostra que algumas classes de corantes, principalmente azocorante.

3.2 Tratamento de efluentes industriais têxteis

A indústria têxtil, movimenta a economia de todo o mundo, principalmente no Brasil, o processo de industrialização iniciou-se mediante este setor. Nativos brasileiros confeccionavam suas vestimentas através de técnicas artesanais e foi a partir da chegada dos portugueses que novos métodos foram sendo implementados até a chegada da indústria 4.0. (FebratexGrupo, 2019)

A produção de tecidos na indústria requer grande consumo de água e comitantemente produz efluentes contaminados com substâncias do processo em proporção, contribuindo para a contaminação ambiental. Segundo estudos na literatura, todos os anos, a indústria têxtil usufrui de 93 trilhões de litros de água, que é comparado a 4% da capacidade mundial de água doce anual. Uma camiseta, por exemplo, consome quase 3 mil litros de água e para cada calça jeans fabricada no Brasil são consumidos 5 mil litros. A indústria da moda é a segunda maior consumidora de água no mundo. (Flush engenharia, 2013).

Assim, fica evidente que a indústria têxtil é responsável por impactos ambientais quando se fala em demanda de água, geração de efluentes e consumo genético. Ademais, a presença de corantes nas correntes aquosas reduz a atividade fotossintética, afetando o equilíbrio natural da biota., devido à sua grande toxicidade é possível acumulação no meio ambiente por ser de difícil degradação (Terezinha, 2010).

Somente uma análise físico-química, dessa água pode afirmar, com segurança, o que é preciso para tratar nela e como. Paulo; 2013, defende que o segmento é altamente detectável, por apresentar coloração típica o que facilita o trabalho dos órgãos ambientais, no entanto é sabido que modifica a coloração dos corpos hídrico, dificulta a penetração dos raios solares, dificultando a oxigenação e por consequência fotossíntese de vários seres vivos.

No caso do Brasil, ainda não há uma legislação específica que delimite padrões de cor para efluentes. Nesse sentido, podemos citar a Resolução nº 357, atualizada em novembro de 2009 da CONAMA, que traz diversas regras para que os efluentes da indústria têxtil atinjam um padrão que permita sua liberação em corpos de água. De maneira geral, o CONAMA quer garantir que os resíduos lançados não interfiram ou até mesmo causem a morte da vida aquática da região, e que também não impeça que a água seja usada para o seu devido fim. (Superbac, 2022).

Dessa forma, implementar novas tecnologias de remoção de efluentes, sobretudo corantes, já reduziria a porcentagem de toxicidade e volume de efluentes poluidores. Assim, entres os estudos realizados de remoção de

corantes destacam-se: Processo de fenton, absorção, membranas, coagulação/ floculação, eletrólise e radiação ultravioleta.

3.3 Zeólita

Descoberta por Axel Frederick Cronstedt em 1756, foi denominada por zelita pelo junção das palavras “fever” e “pedra” em grego justamente por ser constituída de vários poros e borbulhar quando colocado imerso em água.

Existem vários tipos de zeólitas, os quais são diferenciados pela geometria estrutural e razão Si/Al. Dentre eles temos a ZSM 5 que possui uma estrutura de 10 anéis tetraédricos em uma estrutura 3D. Os diferentes tipos de zeólitas formadas dependem de certos fatores no momento da síntese, por exemplo, temperatura, pressão, concentração, tempo, pH, fontes de alumínio e silício, direcionador orgânico (template) e íons catiônicos. O cátion utilizado na síntese irá direcionar a estrutura e a formação dos poros do material (Braga e Morgon, 2007).

As zeólitas são classificadas como aluminossilicatos que são referência como catalisadores na indústria petroquímica. Esses materiais apresentam uma rede de canais que lhe conferem uma seletividade de forma em escala molecular, alto grau de hidratação, estabilidade da estrutura cristalina quando desidratada, propriedades de troca catiônica, canais uniformes, dentre outras (Luz, 1995).

Em virtude de seus microporos, atua como meio filtrante tendo várias aplicabilidades em várias áreas para processos industriais e agronegócio. Dentes as utilidades pode-se pontuar o tratamento da água como vertente, visto que pode atuar como barreira física retendo partículas sólidas e impurezas, troca catiônica e adsorção por ligações fracas.

Pode-se pontuar outras aplicabilidades relevante na utilização da zeólita:

- Tratamento de água e efluentes;
- Purificação de gases;
- Remoção de metais pesados, óleos ou contaminantes ambientais;
- Agricultura;
- Alimentação animal;
- Fabricação de detergente em pó;
- Fabricação de cimento;
- Fabricação de cosméticos e fármacos;
- Tratamento de resíduos radioativos.

Por exemplo, se comparada a meios filtrantes convencionais como areia e quartzo, a zeólita apresenta maior capacidade de retenção de sólidos utilizando cerca de 30% a 50% menos material no filtro, em função da menor densidade aparente. Por fim, é mais resistente a produtos químicos, pode reduzir ou eliminar dureza da água, tem uma vida útil maior e é menos propensa a entupir rapidamente, o que significa uma queda de pressão mais baixa. (NewWater, 2013).

3.4 Adsorção

O processo de adsorção consiste na passagem de componente fluido, líquido ou gasoso em uma superfície porosa adsorvente até que o mesmo esteja saturado por partículas adsorvidas. (McCABE et al., 2005)

Existem vários modelos que descrevem isotermas de adsorção, os mais conhecidos são os propostos por Langmuir e Freundlich.

3.4.1 Modelo isotérmico de adsorção de Langmuir

O modelo isotérmico de adsorção em monocamada foi desenvolvido por Langmuir sendo considerado uns dos mais simples em virtude de limitações:

- Cada sítio ativo só acomoda uma molécula de adsorvato (HILL, 1977, p. 174).
- Interações entre moléculas adsorvidas são desprezíveis (HILL, 1977, p. 174).
- A adsorção ocorre superficialmente bem definidos e localizados (HILL, 1977, p. 174).
- A energia de adsorção é igual em todos os sítios (HILL, 1977, p. 174).

Seguindo a teoria proposta, tem-se um viés linear entre concentração e adsorção até chegar em uma valor constante de acordo com a equação 1:

$$\frac{C_{eq}}{q_{eq}} = \frac{1}{(Q_m \times K_L)} + \frac{C_{eq}}{Q_m} \quad (1)$$

C_{eq} = concentração de adsorvato no equilíbrio [mg/L];

Q_{eq} = quantidade adsorvida no equilíbrio [mg/g];

K_L = constante de Langmuir relacionada com a energia de adsorção [g/mg];

Q_m = capacidade máxima de adsorção [mg/g].

O parâmetro de equilíbrio traz uma característica essencial para prever se o processo adsortivo é favorável ou desfavorável segundo tabela 2.

Tabela 2 - Estrutura do corante vermelho BF 3 RS

Parâmetro de Equilíbrio	Tipo de isoterma
$K_L < 0$	Desfavorável
$K_L = 1$	Linear
$0 < K_L < 1$	Favorável
$K_L = 0$	Irreversível

Fonte: Inac, 2005

3.4.2 Modelo Isotérmico de adsorção Freundlich

Freundlich inovou nos modelos isotérmicos de adsorção ao propor um processo heterogêneo e empírico bastante condizente visto que a concentração influencia na concentração das moléculas adsorvidas (FREUNDLICH, 1932).

$$q_{eq} = K_f * C_{eq}^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

No qual:

q_{eq} : quantidade de soluto adsorvido (mg.g-1)

C_{eq} : concentração de equilíbrio em solução (mg.L-1)

$1/n$: constante relacionada à heterogeneidade da superfície

K_F : constante de capacidade de adsorção de Freundlich

Este modelo também tem suas limitações em pressões muito baixas ou altas. Para pressões muito baixas ou para gases, a constante $1/n$ se aproxima de 1, possibilitando prever um limite para o processo. Em antagônia, para pressões elevadas, a constante $1/n$ se aproxima de 0, transformando a curva em uma constante. (FREUNDLICH, 1932).

3.5 Cinética de adsorção

A velocidade com que as moléculas do adsorvato são adsorvidas pelo adsorvente é descrita pela cinética de adsorção. Esta velocidade depende das características físico químicas do adsorvato (natureza do adsorvato, peso molecular, solubilidade e etc.), do adsorvente (natureza, estrutura dos poros) e da solução (pH, temperatura e concentração). (SILVA, 2012). Envolve portanto,

transferência de massa de componente da fase líquida no interior do adsorvente (NASCIMENTO et al., 2022).

Modelos bem difundidos podem citar o pseudo primeira ordem e pseudo segunda ordem que auxiliam os mecanismos intrínsecos dos processos e sua interpretação.

3.5.1 Modelo de pseudo primeira ordem

Umas das primeiras equações de taxa estabelecidas para adsorção em superfícies sólidas em um sistema de adsorção sólido/líquido foi a de Lagergren, 1898, também conhecida como equação cinética de pseudo-primeiro ordem. É amplamente utilizada em processos de adsorção do soluto de uma solução líquida e está baseada na capacidade de adsorção do sólido (MacKay, 2000)

$$\frac{dx}{dt} = K_1(X - x)dt \quad (3)$$

Onde,

K_1 : Constante de taxa de adsorção de pseudo-primeira ordem (min^{-1});

X : Capacidade de adsorção no equilíbrio (mg/g);

x : Capacidade de adsorção no equilíbrio em um tempo t (mg/g).

Sua forma não linear pode ser transformada em:

$$q_t = q_e(1 - e^{-K_1 t}) \quad (4)$$

Onde,

K_1 : Constante de taxa da adsorção de pseudo-primeira ordem (min^{-1});
 q_e : Quantidade de soluto adsorvido por unidade de massa de adsorvente no equilíbrio (mg/g);
 q_t : Quantidade de soluto adsorvido por unidade de massa de adsorvente no instante t (mg/g).

3.5.2 Modelo de pseudo segunda ordem

Também baseado na capacidade de adsorver sólido,relata o comportamento do processo em toda a faixa de tempo de contato. É descrito através da equação 5:

$$q_t = \frac{K_2 q_e t}{1 + K_2 t q_e} \quad (5)$$

Onde,

K_2 : Constante de velocidade de modelo de pseudo-segunda ordem (g/mg min)
 q_e : Concentração no equilíbrio (mg/g)
 q_t : Concentração em um tempo t (mg/g)

4. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A realização deste trabalho ocorreu mediante parceria com o Laboratório de Fenômenos de transportes, Laboratório de combustíveis e materiais e o Laboratório de operações unitárias pertencentes ao departamento de engenharia química que se localiza no centro de tecnologia da universidade federal da Paraíba (CT - UFPB - Campus I).

4.1 Síntese da zeólita

Primeiramente foi preparado uma solução de 0,455 g de aluminato de sódio para então colocar 54,8 g de H₂O e 0,24 g de brometo de tetrapropilamônio (TPABr) como co-direcionador da estrutura e adicionou 13,8 g de álcool etílico para então acrescentar 9,0 g de SiO₂ e manteve-se o gel sob agitação por 30 minutos de acordo com a figura 3.

Figura 3 - Síntese da zeólita ZSM 5



Fonte: Autor, 2022

Durante a confecção do gel foi-se pegando o pH para certificar que era ácido. Para por fim colocar o gel em autoclaves de aço inoxidável. Ademais, a temperatura de cristalização empregada é de 150 °C, conforme figura 4 e 5.

Figura 4 - Teste de ph da solução



Fonte: Autor, 2022

Figura 5 - Amostra após a calcinação



Fonte: Autor, 2022

Para então ser feita a calcinação, com a finalidade de tornar o material termicamente estável, mediante a eliminação de compostos voláteis presentes e eliminar o direcionador de estrutura. Assim, após passar 48 horas na autoclave à 150 °C foi feita a lavagem e filtração com o uso do filtrador a vácuo. Segue figura 6 para ilustrar:

Figura 6 - Processo de filtragem e ajuste de ph



Fonte: Autor, 2022

4.2 Caracterização dos materiais

4.2.1 PONTO DE CARGA ZERO

O estudo do ponto de carga zero (PCZ) é um parâmetro imprescindível para o entendimento do processo de adsorção e sua aplicabilidade. O pH do ponto de carga zero (pH PCZ) está relacionado com a variação de pH, em que o balanço entre as cargas positivas e negativas, presentes na superfície do adsorvente apresenta valor nulo (MIMURA et al., 2010)

Logo, trata-se justamente do pH em que a superfície do material se torna eletricamente neutra. Como o corante BF3 RS possui em sua estrutura grupamento azo, apresentando grupos funcionais sulfonados que são carregados negativamente, a interação do corante com a superfície do adsorvente pode ocorrer através dos grupos protonados do sólido interagindo com os grupos aniônicos do corante, conforme descrito por Nascimento et al., (2014).

Assim, a metodologia constituiu de pesar 20 mg de zeólita em uma solução de 0,1 mol/L de cloreto de potássio em Ph que varia de 1 a 12 com intervalo de 1 entre eles. Para conseguir ajustar os devido ph, foi preparado soluções de (1 mol/L - 0,1 mol/L) de HCl e (2 mol/L - 0,1 mol/L) de NaOH. Posteriormente a solução foi posta em agitação de 150 rpm durante 4 horas em uma mesa agitadora, para por fim passar por uma filtração e aferição dos ph finais. Com os dados obtidos, foi construído uma curva de ph inicial versus ph final.

4.2.2 Análise de DRX

As análises de DRX foram realizadas no Laboratório de Solidificação Rápida- Centro de Tecnologia, utilizando o equipamento de DRX do modelo BRUCKER D2 PHASER com radiação Cu-Ka, $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$ e uma varredura entre 2θ de 5° a 80° . Em um gráfico intensidade versus ângulo, observa-se curvas do difratograma que mostram as fases cristalinas e amorfas.

4.2.3 Análise de Infravermelho

A espectroscopia no infravermelho produz espectros de absorção (e/ou transmissão) fazendo um feixe de luz na região do infravermelho incidir sobre a substância e determinando as frequências absorvidas por ela. Enfatizar que se mede diretamente o quanto de cada comprimento de onda (ou frequência) da radiação eletromagnética incidente é absorvido (ou transmitido) (Diego, Rogério et al., 2012). Desse modo, a metodologia do FTIR foi realizada para confirmar a formação de grupos funcionais presentes na zeólita. Na faixa espectral 800 nm a 1 000 000 nm (0,8 a 1000 μm), as vibrações que surgem nas bandas correspondem às vibrações moleculares, sendo amplamente usados na identificação de compostos orgânicos, inorgânicos e poliméricos.

4.3 Preparação do efluente sintético

Primordialmente foi preparado soluções de corante em água destilada com concentração de 10 ppm a 100 ppm, variando de 20 ppm entre eles. Para garantir a uniformidade da solução foi posta em agitação por 30 minutos a 150 rpm. Com isto, obteve-se as curvas de calibração e estudos das isotermas de adsorção.

4.4 Curva de calibração

A curva de calibração, por sua vez, corresponde à relação gráfica entre os valores de absorvância e os de concentração de uma determinada substância. Através do gráfico é possível verificar a linearidade da reação e calcular um fator de conversão de valores de absorvância em concentração. São utilizados calibradores com concentração conhecidas com objetivo de determinar suas respectivas absorvâncias, sendo que quanto maior a concentração da substância, maior sua absorvância. Isso permite transformar a cor em número. O gráfico obtido que relaciona concentração e absorvância fornece uma reta, em que sua equação o y corresponde a absorvância, x a concentração, e a e b, os coeficientes angulares e inclinação da reta respectivamente (SOARES et al., 2019) por meio da leitura no comprimento de onda fixado em 540 nm, obtido através de uma varredura feita anteriormente.

4.5 Percentual de remoção (REM)

A percentagem de remoção do adsorvato pelo adsorvente pode-se ser obtida mediante a equação abaixo:

$$\% REM = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100 \quad (6)$$

Descrição:

Ci: concentração inicial (ppm)

Cf: concentração final (ppm)

4.6 Ensaios de adsorção

Para a obtenção das isotermas de adsorção em que se utilizou 0,5 g de adsorvente em 25 ml de solução de adsorvato (efluente sintético), com o pH ajustado para $4,25 \pm 0,2$, de acordo com o ponto de carga zero, utilizando diferentes concentrações, variando de 10, 30, 50, 70, 90 e 100 ppm. O ensaio foi sob constante agitação, feito em mesa agitadora orbital, a 200 rpm durante um período de 4 horas, para então filtrar as amostras e o sobrenadante ser feito à leitura de absorbância no espectrofotômetro UV-Visível. Com isso, os dados experimentais obtidos foram ajustados aos modelos de Langmuir e Freundlich.

4.7 Cinética de adsorção

Foi utilizado 0,5 g de adsorvente em 25 ml de solução de adsorvato com o pH $4,25 \pm 0,2$, usando a concentração de maior taxa de remoção obtida do resultado das isotermas de adsorção . O estudo cinético, utilizou intervalos de tempo: 4, 8, 15, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 minutos, para construir a curva de concentração em função do tempo. O ensaio foi feito a uma agitação constante de 200 rpm. Por fim, modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem foram aplicados.

5. RESULTADOS

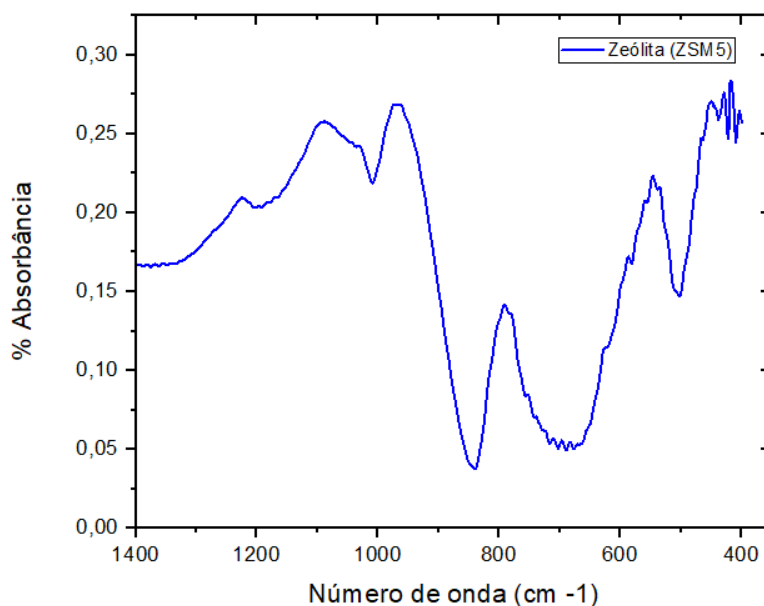
5.1 Caracterização dos materiais

5.1.1 Infravermelho

Vibrações e deformações de moléculas e grupos funcionais podem ser captados nos espectros de absorção na região do infravermelho no intervalo de 400 a 1400 cm^{-1} com intuito de obter informações a respeito dos aspectos estruturais da zeólita. Na figura 7, tem-se o gráfico obtido na plotagem dos dados do espectrofotômetro.

Figura 7 - Espectro na região do infravermelho da zeólita

1



Fonte: Autor, 2022

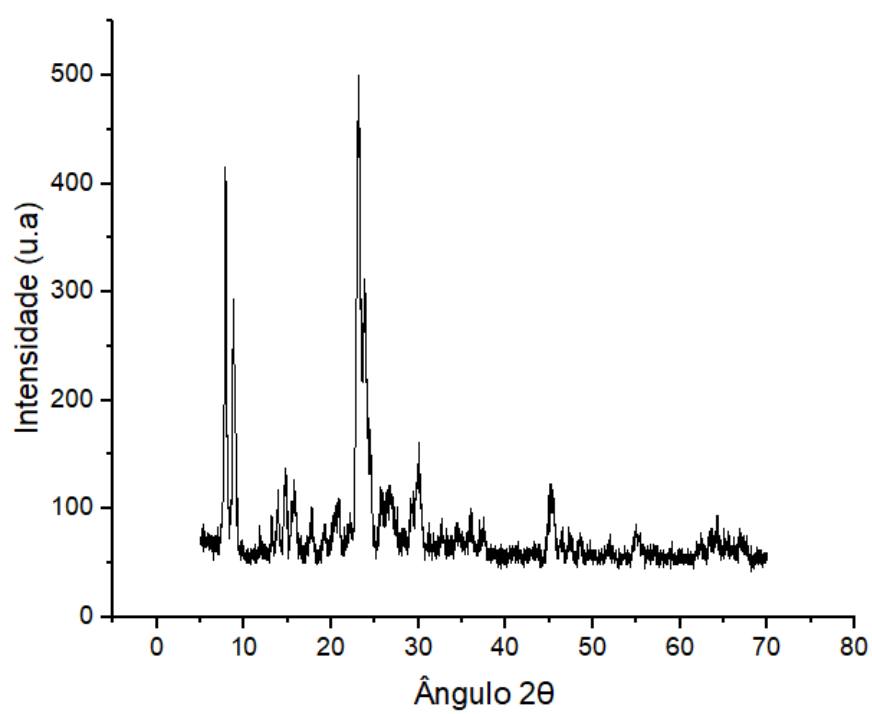
As bandas de absorção próximas a 800, 1080 cm^{-1} são características de unidades tetraédricas SiO_4 (SHIRAZI et al., 2008). As bandas em torno de 1220 e 1090 cm^{-1} correspondem a vibrações assimétricas internas e externas aos tetraedros, respectivamente. Conforme também apontado por Livia, (2014) às bandas em torno de 790 cm^{-1} correspondem a vibrações simétricas externas aos tetraedros. Já as vibrações do anel duplo são sinalizadas nas bandas 540 cm^{-1} . Por fim, nas proximidades de 450 cm^{-1} correspondem às

vibrações das ligações T-O. Obtendo assim, valores em concordância com a literatura para os espectros da zeólita ZSM 5.

5.1.2 Difração de raios-X

A amostra de zeólita ZSM 5 foi submetida à análise de difração de raios-X (DRX) para caracterização mineralógica, com o intuito de identificar as fases cristalinas presentes. A figura 8 apresenta o difratograma da zeólita ZSM 5, no qual apresenta picos padrões em $2\theta = 8,06$, $9,02$, $23,15$, $23,96$ e $24,27$ com planos cristalinos $[1\ 0\ 1]$, $[2\ 0\ 0]$, $[0\ 5\ 1]$, $[0\ 3\ 3]$ e $[3\ 1\ 3]$, conforme descrito por Treacy et al. 2001, estando de acordo com a literatura. Observa-se que a fase zeolítica presente é a ZSM-5. O processo em agitação favorece a formação de fases zeolíticas conduzindo a fases mais cristalinas.

Figura 8 - Difratoograma de raios-X da zeólita ZSM 5



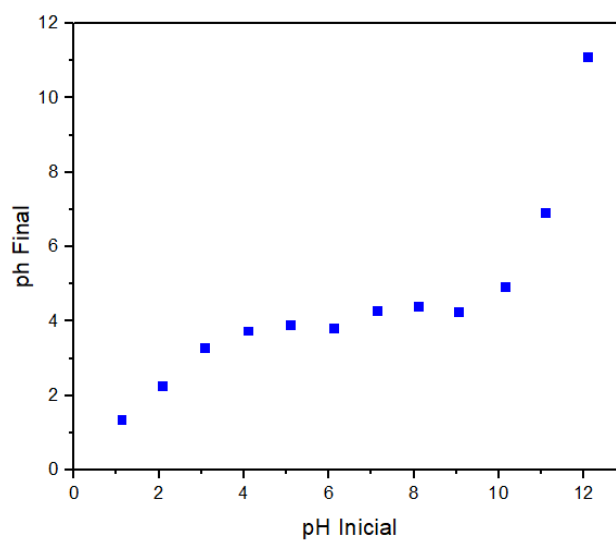
Fonte: Autor,2022

5.1.3 Ponto de carga zero

Nas figuras 9 e 10 expõe um gráfico ph final versus ph inicial da zeólita em solução KCl.

Figura 9 - Gráfico phf vs phi (primeira batelada)

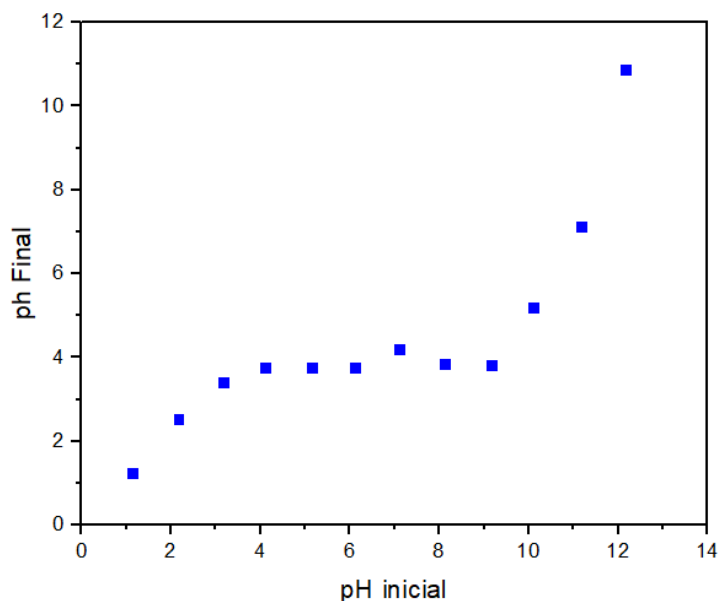
1



Fonte: Autor,2022

Figura 10 - Gráfico phf vs phi (segunda batelada)

1



Fonte: Autor,2022

Mediante análise dos dados obtidos têm-se que o ponto de carga zero é de 4,25. Foi possível chegar a este resultado através de uma média aritmética entre os pontos do pH final. Valores próximos foi encontrado Mara Ellen et al., (2013) de 4,1 para NaZSM 5. Portanto para pH menores que 4,25, a superfície do material torna-se positiva e para pH maiores a carga passa a ser negativa.

Com isso, a adsorção do corante BF-3R é favorecida entre pH 01 e 07, criando condições em que a superfície torna-se positiva conforme sinalizado por Leonardo et al., (2019) que utilizando pH igual a 1 obteve a maior taxa de remoção entre seus experimentos de 70,78%.

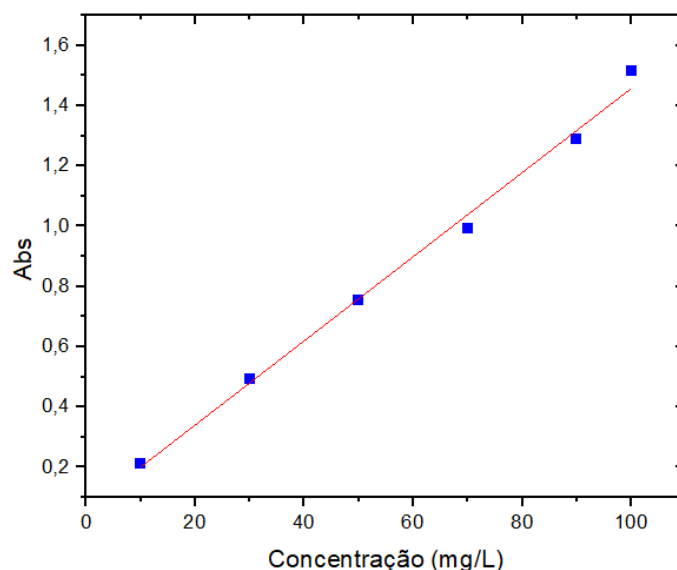
Nascimento et al., (2014) pontua que o corante possui em sua estrutura grupamento azo, apresentando grupos funcionais sulfonados que são carregados negativamente, a interação do corante com a superfície do adsorvente pode ocorrer através dos grupos protonados do sólido interagindo com os grupos aniônicos do corante.

Isto ocorre visto que a superfície carregada positivamente busca se balancear com cargas negativas, assim a remoção mediante adsorvente se torna mais eficaz de adsorbatos aniônicos pela atração eletrostática.

5.2 Isotermas de Adsorção

Na figura 11, tem-se o gráfico da curva de calibração utilizado para obter os dados do experimento, gerando os valores obtidos na tabela 3.

Figura 11 - Curva de calibração abs vs Co



Fonte: Autor,2022

Tabela 3 - Parâmetros da curva de calibração

Equação	$y = a + b \cdot x$
Interseção	$0,06058 \pm 0,03447$
Inclinação	$0,01397 \pm 5,18642E-4$
Soma residual dos quadrados	0,007
R de Pearson	0,997
R^2	0,995

Adj R. quadrado

0,993

Fonte: Autor,2022

A partir da análise dos dados obtidos na tabela 4, foi feito o estudo de adsorção ajustados às isothermas do Modelo Langmuir e Freundlich, com a finalidade de descobrir a capacidade de adsorção de corante vermelho quimifix BF3 RS utilizando ZSM 5.

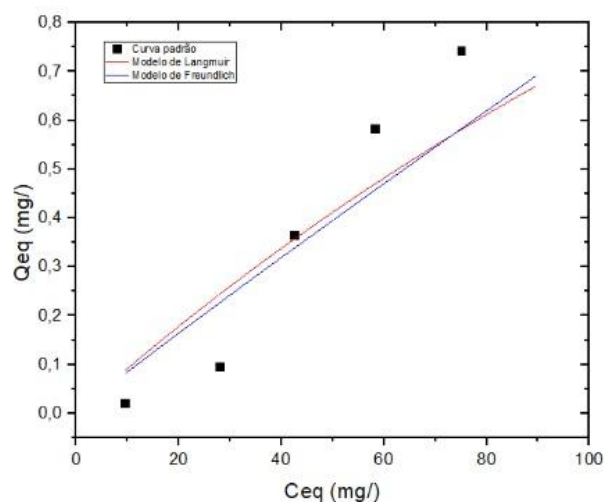
Tabela 4 - Parâmetros da isoterma de adsorção

Concentração	Absorbância	Absorbância			
o (ppm)	Inicial	a Final	Ceq (ppm)	% REM	Qeq (mg/g)
10,000	0,211	0,195	9,600	4,000	0,020
30,000	0,493	0,454	28,100	6,333	0,095
50,000	0,755	0,659	42,743	14,514	0,363
70,000	0,992	0,878	58,386	16,592	0,581
90,000	1,288	1,113	75,171	16,476	0,741

Fonte: Autor,2022

Analisando os dados, pode-se inferir que na concentração de 70 ppm a remoção de corante foi de 16,59% , sendo a maior obtida entre as demais concentrações, por isso a cinética de adsorção foi realizada com este parâmetro.

Figura 12 - Isotermas de Langmuir e Freundlich para Zeolite ZSM 5



Fonte: Autor, 2022

É notório um comportamento linear na capacidade de remoção do adsorvato, isto é, a quantidade adsorvida é proporcional à concentração no equilíbrio, não tendo um valor máximo de adsorção conforme ilustrado na figura 12.

Fazendo o cálculo do indicativo RI para obter o grau de adsorção, tem-se que $RI = 0,9906$ bem próximo de 1 confirmando seu comportamento linear. No entanto, o parâmetro n proposto por Freundlich é equivalente a 1,0438, ou seja, maior do que 1 indicando um processo favorável para adsorção. Nas tabelas 5 e 6 exibe os parâmetros de cada modelo, com R quadro razoável, sendo o de Freundlich com uma pequena desvantagem nas projeções.

Tabela 5 - Dados da isoterma de adsorção zeólita ZSM 5 modelo

Langmuir

Modelo	Langmuir
Equação	$q_m \cdot ((K_l \cdot c_{eq}) / (1 + K_l \cdot c_{eq}))$
q_m (mg/L)	$3,25068 \pm 9,14701$
K_l (L/mg)	$0,0029 \pm 0,00982$
R^2	0,893

Fonte: Autor,2022

Tabela 6 - Dados da isoterma de adsorção zeólita ZSM 5 modelo

Freundlich

Modelo	Freundlich
Equação	$q_{eq} = k_f \cdot c_{eq}^{(1/n)}$
k_f	$0,00931 \pm 0,01635$
$(1/n)$	$0,95795 \pm 0,41311$
R^2	0,871

Fonte: Autor,2022

5.3 Cinética de adsorção

Para iniciar o estudo cinético, foi necessário obter os parâmetros mediante dados do espectrofotômetro . No qual, na tabela 7, já podemos inferir

que a concentração do corante vai diminuindo ao longo do tempo de que a quantidade de adsorvato adsorvido vai aumentando concomitantemente.

Tabela 7 - Parâmetros da cinética de adsorção

t (min)	t (min)	Abs	Ceq (mg/L)	% Rem	Qeq (mg/g)
4	4	0,77	50,782	27,455	0,961
8	8	0,742	48,777	30,318	1,061
15	15	0,638	41,333	40,953	1,433
30	30	0,492	30,882	55,883	1,956
60	60	0,270	14,991	78,585	2,750
120	120	0,130	4,969	92,901	3,252
180	180	0,078	1,247	98,219	3,438
240	240	0,062	0,102	99,855	3,495
300	300	0,053	0,543	99,225	3,473

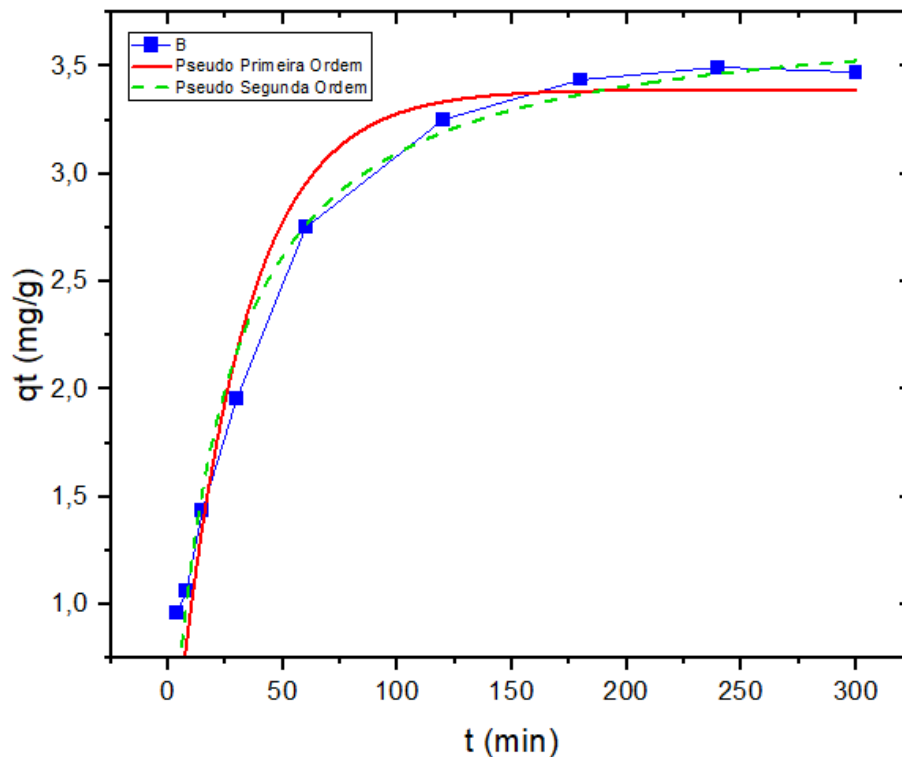
Fonte: Autor,2022

A partir disso, os modelos de pseudo primeira ordem e pseudo segunda ordem foram utilizados para caracterizar a cinética de adsorção a partir de uma concentração de 70 ppm , plotando o gráfico da figura 13.

Figura 13 - Modelo cinético de pseudo primeira ordem e pseudo segunda ordem da zeólita

1





Fonte: Autor,2022

Visualizando o gráfico pode-se confirmar os dados obtidos em que a partir dos 250 minutos a percentagem de remoção varia minimamente, indicando que entrou em equilíbrio. Ademais, o método de segunda ordem por ter o R^2 mais próximo de 1, indica uma melhor confiabilidade na modelagem dos dados experimentais que o modelo de pseudo primeira ordem. Segue tabelas 8 e 9 exemplificando os dados obtidos.

Tabela 8 - Dados do modelo de pseudo primeira ordem da zeólita ZSM 5

Modelo	Pseudo Primeira Ordem
Equação	$q_e(1-\exp(-k^*t))$
k (min ⁻¹)	$0,03411 \pm 0,00508$
qe (mg/g)	$3,39139 \pm 0,13083$
R ²	0,94998

Fonte: Autor,2022

Tabela 9 - Dados do modelo de pseudo segunda ordem da zeólita ZSM 5

Modelo	Pseudo Segunda Ordem
Equação	$(k^*(q_e^2)^*t)/(1+(k^*q_e^*t))$
k (min ⁻¹)	$0,01181 \pm 0,00201$
qe (mg/g)	$3,78762 \pm 0,12957$
R ²	0,9764

Fonte: Autor,2022

6. CONCLUSÃO

A amostra de zeólita que foram caracterizadas por difração de raios X e Espectroscopia na região do infravermelho, possibilitou confirmar o êxito na formação do composto conforme descrito na literatura. Com a averiguação do ponto de carga zero estudou-se o pH de equilíbrio eletrostático que possibilitou saber o comportamento favorável ou desfavorável de adsorção.

A análise do percentual de remoção, mostrou uma adsorção de 16% de corante para a concentração 70 ppm, indicando um caminho favorável para futuras pesquisas de adsorção neste viés.

Posteriormente, um estudo das isotermas ilustrou um comportamento linear que indica uma proporcionalidade entre concentração de adsorvato e adsorvente, os modelos de Langmuir e Frederick obtiveram um R^2 superior a 0,80, no entanto fica a proposta de testar outros modelos presentes na literatura para melhor adequação ao comportamento dos dados experimentais.

A aplicabilidade dos modelos cinéticos é feita através da análise gráfica e a avaliação dos dados, por análise do coeficiente de correlação da reta (R^2), que deve ter valor próximo a 1 para que o ajuste dos dados para determinado modelo cinético seja satisfatório. Desse modo, muitos modelos promovem uma explicação simples e satisfatória para o processo global de adsorção e o que levou a melhor adequação aos dados experimentais foi o modelo de pseudo segunda ordem com R^2 igual a 0,97.

Por fim, a zeólita ZSM 5 é um material promissor e viável para adsorção de corantes vermelhos BF3 RS, com bons resultados mediante variação dos parâmetros necessários.

7. Sugestões para trabalhos futuros

- Averiguar a influência de outros parâmetros como temperatura, pH, volume e massa de adsorvente no estudo de remoção de corante
- Estudar outros modelos de isoterma e cinética de adsorção e realizar uma comparativa com os modelos realizados neste estudo no intuito de chegar ao que mais se adequa aos dados experimentais.

REFERÊNCIA

ANJOS, L.V. SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DAS ZEÓLITAS FERRIERITA E ZSM-5 PARA PIRÓLISE DE ÓLEOS VEGETAIS. Dissertação de pós graduação - Faculdade de engenharia de materiais, Universidade de Sergipe. Sergipe, p 6. 80.

A.P. Magiorakos, A. Srinivasan, R.B. Carey, Y. Carmeli, M.E. Falagas, C.G. Giske, S. Harbarth, J.F. Hindler, G. Kahlmeter, B. Olsson-Liljequist, D.L. Paterson, L.B. Rice, J. Stelling, M.J. Struelens, A. Vatopoulos, J.T. Weber, D.L. Monnet, Multidrug-resistant, extensively drug-resistant and pandrug-resistant bacteria: an international expert proposal for interim standard definitions for acquired resistance, *Clinical Microbiology and Infection*, Volume 18, Issue 3, 2012,.

BARBOSA, Antonielly dos Santos et al. REMOÇÃO DO CORANTE REATIVO VERMELHO POR ADSORÇÃO UTILIZANDO ARGILAS BRANCA E VERMELHA. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, Florianópolis, v. 8, n. 2, p.539-561, abr. 2019.

Cuidados da indústria têxtil no tratamento de efluentes. SUPERBAC, Disponível em: <https://www.superbac.com.br/blog/tratamento-de-efluentes-na-industria-textil/>. Acesso em: 22 nov. 2022.

DEOLIN, M.E. OBTENÇÃO DO PONTO DE CARGA ZERO DE MATERIAIS ADSORVENTES Disponível em: http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/epcc2013/oit_mostra/Mara_Helen_da%20Silva_Deolin.pdf. Acesso em: 27 out 2022.

D. A. Fungaro, S. I. Borrely. Síntese e caracterização de zeólita de cinzas de carvão modificada por surfactante catiônico. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/C3qBcNNtB4H8cNMVRVjkYXg/?lang=pt&format=pdf>. Acesso: 12 ago 2022.

FREUNDLICH, H. Of the adsorption of gasses. section ii. kinetics and energetics of gas adsorption. Introductory paper to section ii. Transactions of the Faraday Society, v. 28, p. 195–201, 1932. Citado na página 21.

HILL, C. An Introduction to Chemical Engineering Kinetics and Reactor Design. New York: John Wiley and Sons, 1977. 594 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=okQWAwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>.

Acesso em: 26 out 2018. Citado 4 vezes nas páginas 14, 19, 20 e 26.

KUNZ, Airton et al (Comp.). Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. 2017. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/tendencias-efluentes-texteis/>>.

Acesso em: 19 jul. 2017.

LEITE, D.O , PRADO, R.J. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/QbZCxCNqrv3B7nYTHzwtrmFm/?lang=pt>. Acesso em: 5 set 2022

MARIN, P.; BORBA, C. E.; MÓDENES, A. N.; OLIVEIRA, S. P. D.; PASSAIA, N.; FIGUEIREDO, L. S. Avaliação do efeito da temperatura, pH e granulometria do adsorvente na adsorção do corante azul reativo 5g. ENGEVISTA, v. 17, n. 1, p. 59-68, 2015.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit operations of chemical engineering. 7. ed. Nova

Iorque: McGraw-Hill, 2005.

NASCIMENTO, G. E.; DUARTE, M. M. M. B.; CAMPOS, N. F.; BARBOSA, C. M. B. M.; SILVA, V. L. Adsorption of the reactive gray BF-2R dye on orange peel: kinetics and equilibrium studies, Desalination and Water Treatment, v. 52 n. 7-9, p. 1578-1588, 2013.

NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S. C. Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza:

Imprensa Universitária, 2014. Disponível em:
http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014_liv_rfdnascime
 nto.pdf. Acesso: 11 jun. 2022

NEVES, T. SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE ZEÓLITAS ZSM-5 PARA A DESIDRATAÇÃO DO GLICEROL. Dissertação de mestrado - Faculdade de engenharia química, Universidade federal do Rio Grande. Rio Grande, p. 7. 49.

R. J. MacKay. R. W. Oldford. "Scientific Method, Statistical Method and the Speed of Light." Statist. Sci. 15 (3) 254 - 278, August 2000.

SANTOS, F.A. ADSORÇÃO DOS CORANTES REATIVOS VERMELHO BF – 4B E AMARELO BF – 3R 200% POR ARGILA VERDE-CLARA. Monografia em engenharia química. a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA. Mossoró, p. 15. 66.

SILVA, E.D. Formação de mesoporosidade em zeólitas ZSM-5 - Avaliação do método de preparação e do potencial como catalisador ácido através do craqueamento de cicloexano. Tese de pós graduação - Faculdade de engenharia química Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, p. 100. 165.

SILVA, L.R, BARBOSA, T.L.A et al., SÍNTESE DA ZEÓLITA ZSM-5 PARA SER UTILIZADA COMO ADSORVENTE NA REMOÇÃO DO CORANTE REATIVO BF-3R: INFLUÊNCIA DO pH. Disponível em:https://editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2019/TRABALHO_EV126_MD1_SA6_ID1437_01072019173116.pdf. Acesso em: 8 out 2022

SILVA, N. C. Adsorção de antibióticos em meio aquoso utilizando diferentes adsorventes Tese de Doutorado em Ciências dos Materiais. Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira, 2012.

SOARES, Maria Clara de Souza. Biossorção de corante reativo utilizando caranguejo uça (*Ucides cordatus*). João Pessoa, 2019.

Braga, Ataulpa A. C., e Nelson H. Morgon. “Descrições estruturais cristalinas de zeólitos.” *Química Nova* 30: 178 - 188 (2007).

SHIRAZI L., JAMSHIDI E., GHASEMI M. R. The effect of Si/Al ratio of ZSM-5 zeolite on its morphology, acidity and crystal size. *Crystal Research and Technology*. 34.2008.

TREACY, M. M. J.; HIGGINS J. B. *Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites*. 4th ed. [S.l.]: Elsevier, 2001