



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA**  
**CAMPUS I - CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM LICENCIATURA EM QUÍMICA**

**MARIA TALITA BARBOSA PINTO DA SILVA**

**DESENVOLVIMENTO DE ADSORVENTES BASEADOS EM BENTONITAS E**  
**APLICAÇÃO EM PROCESSO DE ADSORÇÃO DE EFLUENTES TÊXTEIS**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2024**

MARIA TALITA BARBOSA PINTO DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE ADSORVENTES BASEADOS EM BENTONITAS E  
APLICAÇÃO EM PROCESSO DE ADSORÇÃO DE EFLUENTES TÊXTEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Licenciatura em Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito para obtenção do título de Graduada em Licenciatura em Química.

**Orientador:** Prof. Dr. Deoclécio Ferreira de Brito

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2024**

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

S586d Silva, Maria Talita Barbosa Pinto da.  
Desenvolvimento de adsorventes baseados em bentonitas e aplicação em processo de adsorção de efluentes têxteis [manuscrito] / Maria Talita Barbosa Pinto da Silva. - 2024.  
34 f. : il. color.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

\*Orientação : Prof. Dr. Deocleio Ferreira de Brito, Departamento de Química - CCT\*.

1. Bentonitas. 2. Efluentes têxteis. 3. Poluição ambiental. 4. Adsorção. I. Título

21. ed. CDD 628.168

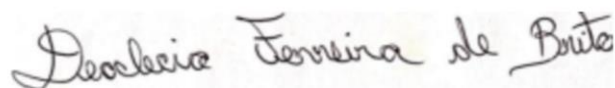
MARIA TALITA BARBOSA PINTO DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE ADSORVENTES BASEADOS EM BENTONITAS E  
APLICAÇÃO EM PROCESSO DE ADSORÇÃO DE EFLUENTES TÊXTEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Licenciatura em Química do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito para obtenção do título de Graduada em Licenciatura em Química.

Aprovada em: 22/11/2024.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Deoclécio Ferreira de Brito (Orientador)  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

Prof. Dr. Juracy Regis de Lucena Júnior  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



---

Profa. Me. Nataline Cândido da Silva Barbosa  
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concebido saúde, força e sabedoria ao longo da caminhada.

A toda minha família, de modo especial, ao meu pai, Raimundo Pinto da Silva (*in memoriam*), embora fisicamente ausente, sentia sua presença ao meu lado, dando-me força. À minha mãe, Maria Iêda Barbosa, por todo amor ofertado em forma de cuidado e atenção. Aos meus irmãos, Raymara, Ribamar, Ionara e Dilany. Aos demais familiares por todo apoio, de modo especial agradeço ao meu tio João (*in memoriam*). A Aylla Samara, por todas as palavras, gestos de amor e cuidado.

Ao professor Deoclécio pela dedicação, companheirismo, ensinamentos e confiança depositada desde a época da iniciação científica. Aos demais professores e professoras do curso de graduação em Licenciatura em Química da UEPB que contribuíram para minha formação.

A amiga Cristiane Aragão, pela parceria durante o desenvolvimento da pesquisa. Aos demais colegas de curso, Maria Antônia, Kallyna, Cardoso, Sandriel, Paulo Renan, Adriano, Helder e Regina pelos momentos de amizade, aprendizagem e apoio.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi sintetizar e caracterizar organobentonitas modificadas com o cátion orgânico hexadeciltrimetilamônio pelo processo de troca iônica e aplicar na adsorção do corante aniônico vermelho de remazol RB e de corantes presentes em efluente têxtil real, avaliando a influência de diferentes parâmetros que podem influenciar na síntese das organobentonitas e no processo de adsorção. Na metodologia de síntese dos adsorventes foi utilizado uma bentonita sódica com capacidade de troca catiônica (CTC) de 88 cmol (+)/kg a qual reagiu pelo método de troca iônica, auxiliado por agitação e aquecimento constante, com uma solução do surfactante brometo de hexadeciltrimetilamônio (C16) em concentração de 200% da CTC. Variou-se os parâmetros tempo (1h e 3h) e temperatura de síntese (25°C e 60°C), para avaliar a influência deles na formação dos adsorventes. Após a síntese, os adsorventes obtidos foram caracterizados por DRX, FTIR e análise elementar de CHN e aplicados no processo de adsorção do azo corante vermelho de remazol (RB) e do efluente têxtil real oriundo da indústria de produção de jeans da região de Toritama/PE, avaliando a influência de parâmetros como o tempo de contato, pH do meio, massa do adsorvente e concentração da solução do corante. Os resultados indicaram a obtenção eficiente dos adsorventes desejados, nos quais os padrões de DRX indicaram a incorporação do cátion orgânico na região interlamelar da bentonita, demonstrando variação no espaçamento basal de 1,26 nm para até 2,04 nm. Os resultados de FTIR indicaram, para todos os adsorventes sintetizados, a presença de grupos orgânicos, apresentando bandas atribuídas às vibrações características para grupos CH<sub>2</sub> e CH<sub>3</sub>, corroborando com os resultados de DRX. A análise elementar de CHN confirmou a organofuncionalização da bentonita apresentando porcentagem de carbono e nitrogênio para os adsorventes sintetizados e ausência na bentonita bruta. Os resultados dos testes de adsorção demonstraram que todos os adsorventes sintetizados apresentaram eficiência na adsorção do corante vermelho de remazol (RB) com porcentagens de adsorção superiores a 95%, bem como eficiência de adsorção das espécies presentes no efluente têxtil real, o qual apresentou aspecto totalmente límpido após o uso dos adsorventes.

**Palavras-Chave:** bentonitas; efluentes têxteis; poluição ambiental; adsorção.

## ABSTRACT

The aim of this study was to synthesize and characterize organobentonites modified with the organic cation hexadecyltrimethylammonium by the ion exchange process and apply them in the adsorption of the anionic dye Remazol red RB and dyes present in real textile effluent, evaluating the influence of different parameters that can influence the synthesis of organobentonites and the adsorption process. In the adsorbent synthesis methodology, a sodium bentonite with a cation exchange capacity (CEC) of 88 cmol (+)/kg was used, which reacted by the ion exchange method, aided by constant stirring and heating, with a solution of the surfactant hexadecyltrimethylammonium bromide (C16) at a concentration of 200% of the CEC. The parameters time (1h and 3h) and synthesis temperature (25°C and 60°C) were varied to evaluate their influence on the formation of the adsorbents. After synthesis, the obtained adsorbents were characterized by XRD, FTIR and elemental analysis of CHN and applied in the adsorption process of the azo dye remazol red (RB) and real textile effluent from the jeans production industry in the Toritama/PE region, evaluating the influence of parameters such as contact time, pH of the medium, mass of the adsorbent and concentration of the dye solution. The results indicated the efficient production of the desired adsorbents, in which the XRD patterns indicated the incorporation of the organic cation in the interlayer region of the bentonite, demonstrating variation in the basal spacing from 1.26 nm to 2.04 nm. The FTIR results indicated, for all synthesized adsorbents, the presence of organic groups, presenting bands attributed to the characteristic vibrations for CH<sub>2</sub> and CH<sub>3</sub> groups, corroborating the XRD results. The elemental analysis of CHN confirmed the organofunctionalization of the bentonite, presenting a percentage of carbon and nitrogen for the synthesized adsorbents and absence in the raw bentonite. The results of the adsorption tests demonstrated that all the synthesized adsorbents presented efficiency in the adsorption of the remazol red dye (RB) with adsorption percentages higher than 95%, as well as adsorption efficiency of the species present in the real textile effluent, which presented a completely clear appearance after the use of the adsorbents.

**Keywords:** bentonites; textile effluents; environment pollution; adsorption.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Estrutura da montmorillonita.....	15
Figura 2 -	Estrutura química do brometo de hexadeciltrimetilamônio (CTAB).....	16
Figura 3 -	Estrutura molecular do corante vermelho de remazol.....	16
Figura 4 -	Padrões de DRX para bentonita bruta e para os híbridos sintetizados (Bent-C16-1h-25°C),(Bent-C16-1h-60°C),(Bent-C16-3h-25°C) e (Bent-C16-3h-60°C).....	20
Figura 5 -	Espectros de FTIR para bentonita bruta e para os híbridos sintetizados (Bent-C16-1h-25°C), (Bent-C16-1h-60°C), (Bent-C16-3h-25°C) e (Bent-C16-3h-60°C).....	21
Figura 6 -	Influência do tempo na adsorção do corante .....	23
Figura 7 -	Influência do pH na adsorção do corante .....	24
Figura 8 -	Influência da massa na adsorção do corante .....	25
Figura 9 -	Influência da concentração na adsorção do corante. RB.....	26
Figura 10 -	Solução do corante antes e depois do processo de adsorção de 50mg do adsorvente, concentração inicial de 200mg/L <sup>-1</sup> , 300min de agitação e pH da própria solução.....	26
Figura 11 -	Tratamento do efluente têxtil com o híbrido Bent-C16-3h-60°C .....	27
Figura 12 -	Comparativo entre o padrão e as amostras após os ensaios de adsorção nos intervalos de 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas, 4 horas e 5 horas.....	28



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVOS.....	11
2.1	Objetivos gerais.....	11
2.2	Objetivos específicos.....	11
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	12
3.1	Argilas bentonitas.....	12
3.1.1	<i>Processo de intercalação por troca catiônica</i> .....	13
3.2	Corantes.....	14
4	METODOLOGIA.....	15
4.1	Materiais.....	15
4.2	Métodos.....	16
4.2.1	<i>Preparo dos híbridos</i> .....	16
4.2.2	<i>Caracterização dos híbridos</i> .....	17
4.2.3	<i>Preparo da solução do corante vermelho de remazol RB</i> .....	17
4.2.4	<i>pH da solução do corante vermelho de remazol RB</i> .....	18
4.2.5	<i>Efluente têxtil</i> .....	18
4.3	Testes de adsorção.....	18
4.3.1	<i>Isotermas de tempo</i> .....	18
4.3.2	<i>Isotermas de pH</i> .....	19
4.3.3	<i>Massa do adsorvente</i> .....	19
4.3.4	<i>Concentração da solução inicial do corante</i> .....	19
4.3.5	<i>Teste para o efluente têxtil</i> .....	19
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	20
5.1	Análise da Difração de Raio X (DRX).....	20
5.2	Espectrometria de absorção na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	21
5.3	Análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN).....	22
5.4	Testes de adsorção do corante RB.....	23
5.4.1	<i>Isotermas de tempo</i> .....	23
5.4.2	<i>Isotermas de pH</i> .....	23
5.4.3	<i>Massa do adsorvente</i> .....	24
5.4.4	<i>Concentração da solução do corante RB</i> .....	25

<b>5.5</b>	<b>Teste de adsorção do efluente têxtil.....</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>31</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável para a vida, possuindo alto valor econômico, ambiental e social para manutenção do ecossistema terrestre, sendo a poluição das águas naturais um grande problema da sociedade moderna (Cardoso, 2022). A poluição dos corpos hídricos tornou-se uma das maiores preocupações ambientais da atualidade (Palagran et al., 2020), causada principalmente como consequência indesejada das atividades industriais, afetando significativamente a aparência e o equilíbrio ecológico dos recursos aquáticos, além de ser uma ameaça em potencial à saúde humana (Giri et al., 2020).

Problemas ambientais relacionados aos meios aquáticos são ainda mais preocupantes na região do semiárido, onde a escassez de água é uma característica marcante, então se faz necessário buscar tratamentos viáveis capazes de solucionar ou amenizar esse problema, buscando materiais e tecnologias que tenham um baixo custo e sejam eficientes, principalmente na remoção de poluentes recalcitrantes (Brito, 2018).

Nesse contexto, a indústria têxtil merece uma atenção especial, pois geram grandes volumes de efluentes contendo quantidades relevantes de corantes orgânicos sintéticos em seus resíduos, podendo causar sérios problemas de poluição ambiental se não forem tratados adequadamente (Queiroz, 2019). De acordo com Ramos (2020), efluentes da indústria têxtil são caracterizados como uma mistura complexa de resíduos de corantes, eletrólitos, ajustadores de pH, agentes tensoativos, sais, metais, entre outros, sendo altamente coloridos devido parte do corante utilizado não aderir às fibras durante o processo de tingimento.

Toritama, no agreste de Pernambuco, é conhecida como a "Capital do Jeans" e é essencial para a economia do estado devido à sua indústria de confecções. A cidade é uma das maiores produtoras de jeans no Brasil, gerando muitos empregos e impulsionando o comércio local. Este dinamismo econômico torna Toritama um centro industrial vital para Pernambuco, reconhecido pela qualidade e inovação de seus produtos.

Os corantes são compostos orgânicos que apresentam em sua estrutura grupos cromóforos tais como nitro ( $-\text{NO}_2$ ), nitroso ( $-\text{NO}$ ) e azo ( $-\text{N}=\text{N}-$ ). Esses grupos possuem a propriedade de absorver luz visível seletivamente, razão pela qual aparecem coloridos (Salahuddin et al., 2018). Vale salientar que além dos corantes, existem vários outros tipos de poluentes que são lançados em ambientes aquáticos, como por exemplo, os fertilizantes, pesticidas, fármacos, fenóis e metais tóxicos, sendo responsáveis por sérios danos à saúde humana, com repercussões clínicas que variam desde dermatites leves até intoxicações severas com risco iminente de morte (Pandey et al., 2017; Tohdee et al., 2018).

Dentre os corantes reativos, o vermelho de remazol (RB) é um corante aniônico que apresenta como grupo cromóforo o azo e esses tipos de corantes representam cerca de 30% da produção mundial de tintas, tendo como uma das principais preocupações o fato de que 10 a 50% deles podem permanecer em solução após o processo de tingimento, gerando grande poluição ambiental (Brito et al., 2018). Nesse sentido, tecnologias ecologicamente corretas e economicamente viáveis têm garantido a qualidade dos recursos hídricos a partir da degradação ou imobilização destes compostos em efluentes (De Araújo et al., 2016; Moreira et al., 2017).

As bentonitas são argilas compostas por pelo menos 50% de argilominerais do grupo das esmectitas, com destaque para a montmorilonita (Bergaya et al., 2013). Elas podem ser modificadas e utilizadas em diversos processos para remoção e/ou degradação de poluentes. Na sua forma bruta, a bentonita já possui características atraentes como uma alta área superficial específica, porosidade, estabilidade térmica e capacidade de troca catiônica (CTC), tornando-as adequadas para aplicações como adsorventes e suportes catalíticos (Hassane et al., 2015). Vale salientar que o estado da Paraíba é um dos que detêm as maiores jazidas de bentonitas do país, sendo interessante desenvolver pesquisas e tecnologias com esse tipo de argila, dando valor agregado a um material abundante na região.

Uma característica relevante da utilização de bentonitas na síntese de novos materiais é sua alta versatilidade em termos de modificação e, dependendo da abordagem utilizada, é possível criar materiais com propriedades e aplicações variadas (Bergaya et al., 2011). A estrutura das bentonitas pode ser modificada de várias maneiras, incluindo troca iônica, silanização, tratamento ácido, pilarização, e deposição de óxidos metálicos, entre outras técnicas (Bergaya et al., 2011; Lagaly et al., 2013).

Uma das regiões da estrutura da montmorilonita mais reativas e utilizadas para realizar modificações é a região interlamelar. A capacidade de troca catiônica (CTC) atrelada à propriedade de variar o espaçamento basal com a hidratação, facilita a intercalação de outros tipos de cátions na região interlamelar da montmorilonita propiciando modificações nas características e propriedade. Vale salientar que a característica de aumentar o espaço entre as lamelas é ainda mais significativa nas bentonitas sódicas, devido elas possuírem maior capacidade de expandir quando hidratadas, tornando-as mais atrativas para a aplicação proposta neste trabalho (Bhattacharyy e Gupta 2008; Brigatti et al., 2013).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

- Sintetizar e caracterizar organobentonitas modificadas com o cátion orgânico hexadeciltrimetilamônio pelo processo de troca iônica e aplicar na adsorção do corante aniônico vermelho de remazol RB e de corantes presentes em efluente têxtil real, avaliando a influência de diferentes parâmetros que podem influenciar na síntese das organobentonitas e no processo de adsorção.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Sintetizar híbridos adsorventes utilizando o brometo de hexadeciltrimetilamônio CTAB como surfactante;

- Caracterizar os híbridos sintetizados por meio de difração de raio X (DRX), espectroscopia de absorção na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN);

- Avaliar a influência do tempo de temperatura de síntese no processo de troca iônica para obtenção das organobentonitas.

- Estudar os principais parâmetros que afetam o processo de adsorção, incluindo o pH do meio, massa do adsorvente, tempo de contato e concentração inicial da solução do corante;

- Verificar o comportamento dos híbridos sintetizados mediante aplicação no processo de adsorção de corantes presentes em efluente têxtil real.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Argilas Bentonitas

A bentonita é um tipo de argila amplamente mencionado na literatura. Originalmente, o termo foi atribuído a uma rocha argilosa descoberta na região de Fort Benton, Wyoming, EUA, de onde deriva seu nome e possui propriedades plásticas e coloidais (Morandini, 2014). Atualmente, o termo se refere a uma argila composta principalmente por argilominerais do grupo das esmectitas, especialmente a montmorillonita, que é o componente principal. As bentonitas, apesar de uma estrutura química complexa, apresentam propriedades que despertam o interesse científico e tecnológicos, tais como, alta área superficial específica, estabilidade térmica, alta porosidade, capacidade de troca catiônica, estabilidade mecânica, sítios ativos específicos e viabilidade econômica (Ngulube et al, 2017; Pandey, 2017).

A montmorillonita, principal constituinte das bentonitas, é um argilomineral do grupo das esmectitas classificado como estrutura do tipo 2:1 (TOT) obtida pela união de duas folhas tetraédricas em sanduíche com uma folha octaédrica (Brigatti et al., 2013). Os cátions octaédricos mais comumente encontrados na montmorillonita são  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$  e a ocorrência de substituições isomórficas de íons de carga distinta na rede, como por exemplo, do  $Si^{4+}$  pelo  $Al^{3+}$  no tetraedro ou de  $Al^{3+}$  por  $Fe^{2+}$  no octaedro faz com que as camadas não sejam eletricamente neutras, ou seja, apresentam um excesso de cargas negativa na lamela e essas cargas são neutralizadas por cátions trocáveis hidratados localizados na região interlamelar (Bergaya et al, 2011; Brigatti et al., 2013). Assim, o excesso de carga naturalmente é neutralizado originando uma propriedade muito importante destes minerais que é a capacidade de troca catiônica (CTC), a qual é de extrema importância para a realização de modificações na estrutura da bentonita e foi o método de síntese utilizado neste trabalho (Brigatti et al., 2013; Schoonheydt e Johnston, 2013).

A interação entre as lamelas da bentonita é modificada pelo tipo de cátion adsorvido em sua estrutura. O cátion predominante exerce uma influência direta sobre as propriedades finais do material, sendo utilizado como critério de classificação (Machado et al., 2018). A presença do cátion  $Na^+$  na bentonita sódica aumenta o espaçamento entre as lamelas, facilitando a absorção de água em maior volume quando comparado ao cátion  $Ca^{2+}$  encontrado na bentonita cálcica (Nones et al., 2015).

### ***3.1.1 Processo de intercalação por troca catiônica***

O tipo de cátion interlamelar é um fator muito importante que afeta a natureza e o comportamento da montmorillonita, bem como a aplicação da mesma e o processo de troca iônica, visto que dependendo do tamanho do espaçamento basal, alguns cátions poderão apresentar dificuldade para troca (Li et al., 2016).

O teor do cátion trocável ou capacidade de troca catiônica (CTC) varia na faixa de 80-120 cmol(+)/Kg na montmorillonita sódica e na faixa de 40-70 cmol(+)/Kg para montmorillonita cálcica (Bergaya et al., 2011; Bergaya et al., 2013). A CTC permite que sejam realizadas várias modificações químicas nas bentonitas, alterando suas propriedades e consequentemente suas aplicações (Wu et al., 2011). Porém, a montmorillonita também pode ser modificada nas regiões de bordas e na região de superfície (Vinodh et al., 2021).

A reação de troca iônica envolve um processo reversível, na qual um íon (cátion ou ânion) presente em uma determinada solução pode ser trocado pelos íons de mesma carga presentes na região interlamelar de um determinado tipo de argila (Bergaya et al., 2013).

A IUPAC define a intercalação como uma reação, geralmente reversível, que envolve a inserção de um material hóspede em espécies hospedeiras, sem causar uma grande modificação em sua estrutura. Já a troca catiônica é definida como sendo o processo de troca de cátions entre uma solução e um trocador de cátions, em que o trocador iônico seria uma substância sólida ou líquida, inorgânica ou orgânica que conteria íons trocáveis com outros de mesma carga, presentes em uma solução em que o trocador é considerado como insolúvel (IUPAC, 2014).

A intercalação de espécies orgânicas como modificadores em bentonitas geralmente alteram a estrutura e o ambiente da superfície dos argilominerais, podendo a partir daí se obter argilas organofílicas e assim aumentar a afinidade desses materiais frente a contaminantes orgânicos (Zhu et al., 2015; Ren et al., 2019). Diversos são as espécies orgânicas utilizadas como modificadores das propriedades das bentonitas, porém os cátions de sais de amônio quaternários oriundos de surfactantes estão entre os mais utilizados para essa finalidade e são amplamente difundidos na literatura apresentando resultados satisfatórios em diversos tipos de aplicações em que bentonitas modificadas com eles foram utilizadas (Ren et al., 2019). Esse tipo de modificação geralmente provoca uma alteração na carga superficial da bentonita de negativa para positiva e, consequentemente, proporciona a interação da bentonita com espécies aniônicas como o corante vermelho de remazol RB, a qual na forma bruta não seria favorecida.

### 3.2 Corantes

Os corantes sintéticos são compostos orgânicos derivados, em grande maioria do petróleo, utilizados para coloração de materiais devido sua capacidade de absorver radiação na zona visível do espectro eletromagnético (400 a 700 nm), e por isso, possuem aplicação em diversas indústrias, como a têxtil, alimentícia, papelaria, cosmética, curtume, dentre outras. Atualmente, estima-se que estejam disponíveis comercialmente, em todo mundo, mais de 100 mil tipos diferentes de corantes sintéticos, com uma produção aproximada de 1 milhão de toneladas ao ano. Esta grande utilização se deve a diversas vantagens dos corantes sintéticos frente aos corantes naturais, como a grande variedade de pigmentos/cores e tons, a rápida coloração, estabilidade, diversas aplicabilidades e menor custo (Bathia *et al.*, 2017; Jamee & Siddique, 2019; Shindhal *et al.*, 2021). No entanto, estima-se que de 15 a 50% da produção mundial de corantes é perdida para o meio ambiente, causando grandes danos (Ferreira *et al.*, 2019).

A preocupação com a descarte incorreto de efluentes contendo corantes sintéticos é oriunda de diversos fatores, como por exemplo, suas características recalcitrantes, potencial poluidor, comprometimento do equilíbrio dos corpos aquáticos por dificultar a penetração de luz, suas características tóxicas que oferecem sérios riscos à saúde dos seres humanos, além das grandes quantidades descartadas anualmente no meio ambiente (Bushra *et al.*, 2021).

A estrutura geral de um corante reativo é composta por um grupo cromóforo, grupo ponte, grupo reativo à fibra e grupo de solubilização. Quando os corantes reativos interagem com as fibras celulósicas, eles podem reagir por substituição nucleofílica aromática ou por adição nucleofílica em alquenos (Marin, 2015). Os corantes podem ser facilmente detectados a olho nu e até mesmo em baixas concentrações de cerca de  $1 \text{ mg.L}^{-1}$  e quando lançados em efluentes aquáticos, mesmo em pequenas quantidades, eles podem causar uma drástica mudança de cor nos rios, o que é facilmente percebido à olho nu. A falta de tratamento dos efluentes têxteis descartados nos corpos d'água pode levar rapidamente à redução do oxigênio dissolvido, desequilibrando o ecossistema, pois impede a penetração da luz solar nas camadas mais profundas, prejudicando a atividade fotossintética do ambiente e comprometendo a qualidade da água, podendo resultar em efeitos tóxicos para a fauna e a flora (Almeida *et al.*, 2017).



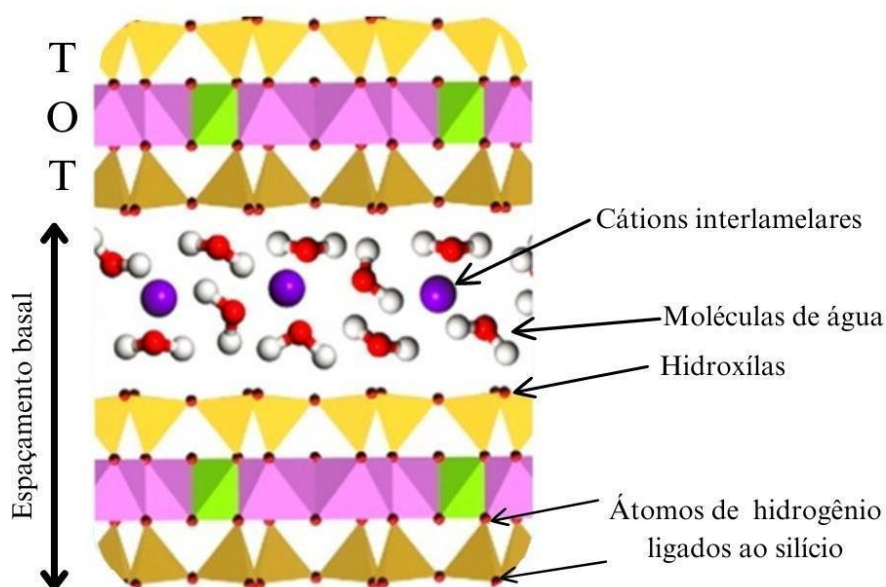
## 4 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida no laboratório de síntese e quimiometria (LabSiQ) da Universidade Estadual da Paraíba – campus I. O efluente têxtil foi coletado na cidade de Toritama, Pernambuco. De natureza experimental e aplicada, o estudo envolveu a modificação das argilas para aumentar sua eficiência na remoção de corantes e outras substâncias presentes nos efluentes. A metodologia incluiu a caracterização das argilas, testes de adsorção e avaliação da eficiência do tratamento.

### 4.1 Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se uma bentonita sódica, a qual possui capacidade de troca catiônica (CTC) de 88  $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ , medido pelo método da troca com amônio, este valor que condiz com a faixa de CTC observada em montmorilonitas, cujos valores estão entre 80-120  $\text{cmol}(+)/\text{kg}$  (Bergaya, et al., 2011). A estrutura do argilomineral montmorilonita está apresentada na Figura 1.

Figura 1: Estrutura da montmorillonita

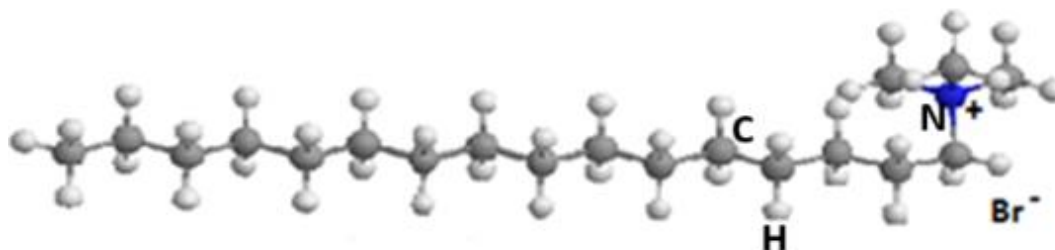


**Fonte:** Adaptado de ZHU (2015).

Considerando o fato de que através da troca de cátions a montmorillonita pode ter suas propriedades modificadas, utilizou-se o cátion do sal de amônio quaternário, brometo de hexadeciltrimetilamônio (CTAB) (Sigma-Aldrich, 98%), diluído em água destilada e com concentração de 100% da capacidade de troca catiônica da bentonita (CTC), com o intuito de inserir o cátion orgânico oriundo da dissociação desse sal na região interlamelar da argila. A

estrutura química do brometo de hexadeciltrimetilamônio está ilustrada na figura 2.

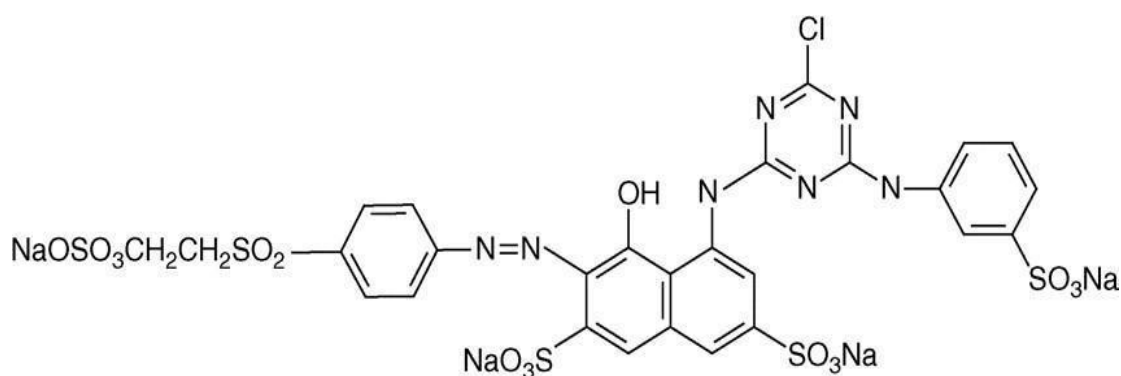
Figura 2: Estrutura do brometo de hexadeciltrimetilamônio (CTAB).



**Fonte:** Adaptado de Brito (2019).

O primeiro corante utilizado foi o corante sintético vermelho de remazol (RB) que é um azo-corante reativo de cor vermelho intenso, o qual contém dois grupos sulfonados em sua estrutura molecular, conferindo-lhe uma carga negativa em meio aquoso. Sua absorvância máxima ocorre na faixa de 510 a 518 nm, característico ao grupo azo, que está ligado ao cromóforo através da transferência de carga; além disso, há uma banda de absorção em 287 nm associada ao grupo aromático (Cervantes et al., 2009, Chemical book 1, 2020). A estrutura molecular do vermelho de remazol está demonstrada na figura 3.

Figura 3: Estrutura molecular do corante vermelho de remazol RB.



**Fonte:** Elaborado pela autora (2024).

O segundo poluente utilizado foi o efluente têxtil real de cor azul intenso, extraído direto da fábrica onde ocorre o processo de beneficiamento de jeans na cidade de Toritama no Estado de Pernambuco.

## 4.2 Métodos

#### ***4.2.1 Preparo dos híbridos***

Utilizou-se 4g da bentonita sódica na sua forma bruta a qual foi colocada em contato com 100 mL de uma solução do brometo de hexadeciltrimetilamônio com concentração igual a 100% da CTC da bentonita. Essa mistura foi submetida a agitação constante nas temperaturas de 25 °C e 60 °C e em tempos de 1h e 3h de síntese, para posteriormente avaliar a melhor condição para a formação das organobentonitas. Após o período de troca iônica, os sólidos obtidos foram separados da solução por centrifugação. Em seguida, foram lavados repetidamente com água destilada para remover o excesso de surfactante não incorporado, secos em estufa a 60 °C, desaglomerados, peneirados em uma peneira de 200 mesh e encaminhados para caracterização. Os sólidos sintetizados foram nomeados de acordo com o tempo e a temperatura de síntese: Bent-C16-1h-25°C, Bent-C16-3h-25°C, Bent-C16- 1h-60°C e Bent-C16-3h-60°C.

#### ***4.2.2 Caracterização dos híbridos***

As caracterizações dos híbridos e da bentonita na sua forma bruta foram feitas por difratometria de raio x (DRX), espectroscopia de absorção na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e por análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN). Os difratogramas de DRX foram obtidos utilizando o método do pó em um difratômetro modelo XD3A da marca Shimadzu, operando com uma velocidade de varredura de  $0,03^\circ \text{ s}^{-1}$ . A fonte de radiação utilizada foi  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 0,15406 \text{ nm}$ ), com um intervalo de  $2\theta$  e de  $1,5^\circ$  a  $70^\circ$ , e uma voltagem de 2 kV, à temperatura ambiente. Os espectros de FTIR foram analisados através de um espectrofotômetro da marca Bomem, modelo MB-Series, empregando a transformada de Fourier e utilizando pastilhas de KBr na região de 4000 a  $400 \text{ cm}^{-1}$ , com resolução de  $4 \text{ cm}^{-1}$  e 32 acumulações. Por fim, a análise elementar foi realizada com um analisador LECO CNH, modelo 628.

#### ***4.2.3 Preparo da solução do corante vermelho de remazol RB***

Inicialmente, foram preparadas as soluções do corante vermelho de remazol com concentração de 200 mg/L, a mesma foi utilizada para os ensaios de tempo, massa e pH. Os ensaios de variação de concentração do corante foram preparados com concentrações de variadas.

#### 4.2.4 pH da solução do corante vermelho de remazol RB

Com a finalidade de avaliar a influência do pH do meio no processo de adsorção do corante os pHs das soluções 200 mg/L do vermelho de remazol RB foram ajustados para valores de 3 (meio ácido) e 10 (meio básico) e utilizado também o pH da própria solução do corante sem ajustes. Para o ajuste de pH utilizou-se soluções de hidróxido de sódio (NaOH) ou ácido clorídrico (HCl). As medidas de pH foram realizadas em tempo real utilizando um pHmetro.

#### 4.2.5 Efluente têxtil

O efluente foi coletado direto de uma lavanderia têxtil onde ocorre o processo de beneficiamento de jeans. A amostra não recebeu tratamento, apenas verificou-se o seu pH que estava em torno de 5, caracterizando uma solução levemente ácida.

### 4.3 Testes de adsorção

As organobentonitas sintetizadas foram aplicadas no processo de adsorção dos corantes, no qual foram estudadas a influência dos parâmetros tempo de contato, pH da solução do corante, massa do adsorvente e concentração da solução do corante. Através do método de batelada, os híbridos foram colocados em contato com a solução do corante aniônico vermelho de ramazol RB, utilizando uma mesa agitadora com agitação constante a 200 rpm e em temperatura ambiente.

No final de cada ensaio, as amostras foram centrifugadas durante 5 min a 5000 rpm e em seguida realizada a leitura da concentração do corante por espectroscopia de adsorção molecular na região do UV-Vis, utilizando um espectrômetro SHIMADZU, modelo UV-1800, nas faixas de 1 - 50 ppm, com o comprimento de onda de 516 nm (região de maior absorção do vermelho de remazol RB) e o percentual de adsorção (%) foi calculado a partir da variação entre as concentrações iniciais e finais da solução do corante em mg/L (Equação 1).

$$\text{Degradação\%} = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

#### 4.3.1 Isotermas de tempo

O primeiro parâmetro avaliado foi a influência do tempo de contato entre a solução do corante e o adsorvente no processo de adsorção. Amostras de 50 mg de organobentonita

foram colocadas em contato com 25 mL de uma solução de vermelho de ramazol com concentração de 200 mg/L, à temperatura ambiente e sob agitação constante de 200 rpm. Os tempos de contato variaram de 5 a 300 minutos (5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 25 min, 30 min, 40 min, 50 min, 60 min, 90 min, 120 min, 150 min, 180 min, 210 min, 240 min, 270 min e 300 min).

#### ***4.3.2 Isotermas de pH***

O pH do meio exerce significativa influência no processo de adsorção. Por esse motivo, investigou-se o efeito do pH nos processos de adsorção, variando em valores de pH 3, pH da própria solução do corante e pH 10. Para preparar a amostra, foram utilizados 50 mg de organobentonita em contato com 25 mL de solução de vermelho de remazol, mantidos sob agitação constante a 200 rpm, por 5 horas a 25°C.

#### ***4.3.3 Massa do adsorvente***

Após determinado o tempo de adsorção e o pH de maior adsorção, ambos foram fixados e variou-se a massa do adsorvente, utilizando quantidades de 25, 50, 75 e 100 mg da organobentonita. Essas amostras foram colocadas em contato com 25 mL da solução de vermelho de remazol a 200 ppm para investigar o efeito da dosagem do adsorvente.

#### ***4.3.4 Concentração da solução inicial do corante***

Definidos o pH, a massa de adsorvente e o tempo de saturação, verificou-se então a influência da concentração inicial do corante. As amostras de organobentonita foram colocadas em contato com 25 mL de solução do corante vermelho de remazol RB em diferentes concentrações: 50 ppm, 100 ppm, 150 ppm, 200 ppm, 250 ppm, 300 ppm, 350 ppm, 400 ppm, 450 ppm e 500 ppm, mantidas sob agitação pelo tempo de saturação especificado anteriormente para cada sólido.

#### ***4.3.5 Teste para o efluente têxtil***

Para realizar o teste de adsorção do efluente têxtil, foi escolhido o adsorvente com o melhor desempenho na remoção do corante vermelho de remazol RB. O mesmo critério foi aplicado para determinar o tempo ideal e a quantidade adequada de adsorvente a ser utilizada.

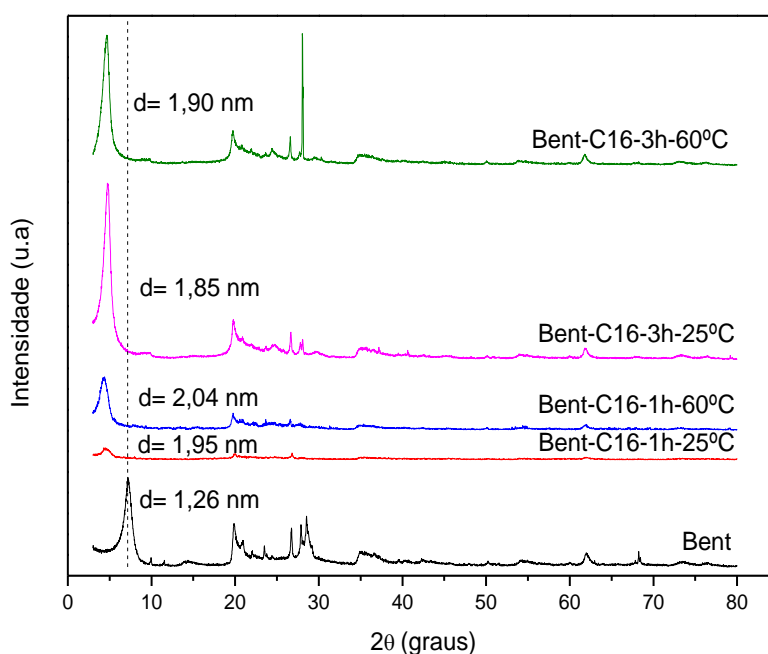
Utilizou-se o pH original da solução e a mesma concentração do corante, a fim de evitar qualquer alteração na natureza da amostra e preservar suas características naturais.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise da Difração de Raio X (DRX)

A análise da difração de raios X (DRX) é considerada uma técnica eficaz para determinar a presença e o efeito da intercalação da bentonita porque pode fornecer valores precisos de espaçamento basal (Zhu et al., 2023). Na Figura 4 apresenta-se os padrões de difração de raios X para a bentonita bruta e para os híbridos adsorventes sintetizados. É possível observar que a bentonita bruta apresenta os picos característicos do argilomineral montmorillonita, com o pico principal em valor de  $2\sigma$  de aproximadamente 7,04 apresentando um espaçamento basal de 1,26 nm, espaçamento típico de bentonitas sódicas (Queiroga, 2019).

Figura 4: Padrões de DRX para bentonita bruta (Bent), e para os híbridos adsorventes sintetizados (Bent-C16-1h-25°C), (Bent-C16-1h-60°C), (Bent-C16-3h-25°C) e (Bent-C16-3h-60°C).



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Em todos os adsorventes sintetizados houve um deslocamento do pico principal para valores menores de  $2\sigma$ , fato que leva a um aumento no espaçamento basal da montmorillonita, esse aumento é explicado pela entrada dos cátions orgânicos na região interlamelar da

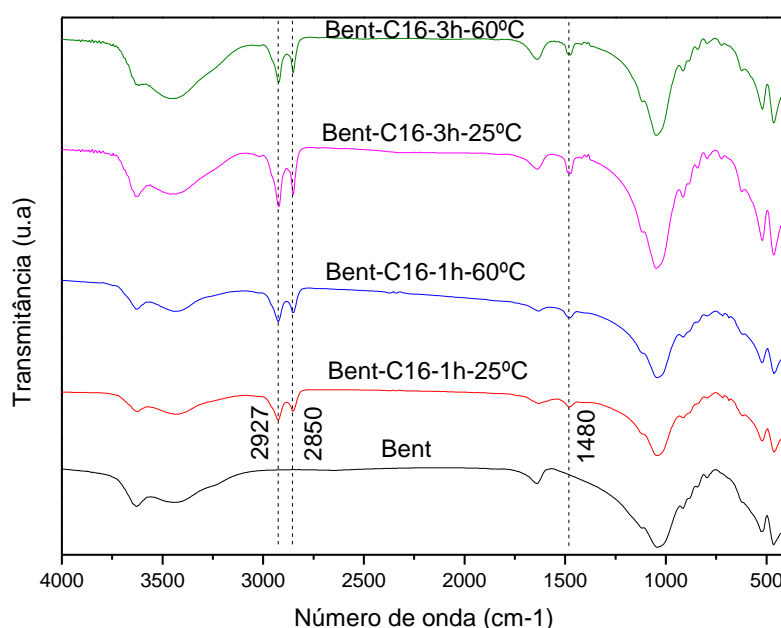
bentonita, e conseqüentemente, indica a formação bem sucedida dos adsorventes em todas as condições de síntese utilizadas, uma vez que os cátions orgânicos são espécies grandes e quando incorporados na região interlamelar forçam a um aumento no espaçamento basal. Além disso, à medida que a cadeia carbônica do surfactante aumenta, também há um aumento no espaçamento basal, o que está de acordo com a literatura (Queiroga et al., 2019; Zhu et al., 2023).

Nos padrões de DRX apresentados, observa-se que os híbridos adsorventes apresentaram um aumento no espaçamento basal de 1,26 nm da bentonita pura para 1,95 nm (Bent-C16-1h-25°C), 2,04 nm (Bent-C16-1h-60°C), 1,85 nm (Bent-C16-3h-25°C) e 1,90 nm (Bent-C16-3h-60°C).

## 5.2 Espectrometria de absorção na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 5, observa-se os espectros de FTIR para a bentonita bruta e para os adsorventes sintetizados. O espectro para a bentonita bruta apresenta as bandas características do esqueleto inorgânico da montmorilonita (lado direito) e duas bandas em aproximadamente  $3630\text{ cm}^{-1}$  e  $3433\text{ cm}^{-1}$  referentes a estiramento das unidades OH estruturais e vibrações OH devido à presença de água de hidratação, respectivamente. (Queiroga, 2019; Kumaresan et al., 2020; Belkadi et al., 2022).

Figura 5: Espectros de FTIR para bentonita bruta (Bent), e para os híbridos sintetizados (Bent-C16-1h-25°C), (Bent-C16-1h-60°C), (Bent-C16-3h-25°C) e (Bent-C16-3h-60°C).



**Fonte:** Elaborado pela autora, 2024.

Os espectros FTIR dos adsorventes sintetizados apresentaram bandas características das vibrações simétricas das ligações C-H em aproximadamente  $2850\text{ cm}^{-1}$  e das vibrações assimétricas em aproximadamente  $2927\text{ cm}^{-1}$ , assim como uma banda em aproximadamente  $1480\text{ cm}^{-1}$  atribuída ligações N-H do grupo amônio dos cátions orgânicos (Ahmad et al., 2018; Ulhaq et al., 2021), bandas não presentes na amostra da bentonita pura, indicando a incorporação dos cátions orgânicos na estrutura da bentonita e estando em conformidade com os resultados obtidos através da análise por DRX.

### 5.3 Análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN)

A análise elementar de CHN revelou os resultados para as argilas bentonita bruta e os adsorventes sintetizados, conforme apresentado na Tabela 1. A confirmação da organofilização ocorreu pela comparação do teor de carbono na bentonita bruta, que é praticamente zero, com os valores encontrados nos adsorventes sintetizados, assim como pela análise da porcentagem de nitrogênio. Este resultado foi importante para comprovar a organofuncionalização da bentonita pelos cátions orgânicos.

Tabela 1: Análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN)

<b>Espécie</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>C (%)</b>	<b>H (%)</b>	<b>N(%)</b>
<b>Bent</b>	0,1043	0,11	1,94	-
<b>Bent-C16-1h-25°C</b>	0,1055	17,51	1,833	0,8135
<b>Bent-C16-1h-60°C</b>	0,1140	17,56	1,841	0,8087
<b>Bent-C16-3h-25°C</b>	0,1003	17,76	1,845	0,8283
<b>Bent-C16-3h-60°C</b>	0,1032	17,48	1,786	0,8187

Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os dados apresentados na Tabela 1 confirmam a incorporação consistente do material orgânico (surfactante C16) na estrutura da bentonita. Essa modificação resulta em um aumento significativo nos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio, o que é um indicativo claro da alteração estrutural da bentonita. O comportamento similar observado nas diferentes condições de síntese (tempo e temperatura) reforça a eficácia e a robustez do processo de modificação, sendo uma abordagem promissora para a obtenção de materiais adsorventes mais eficientes.



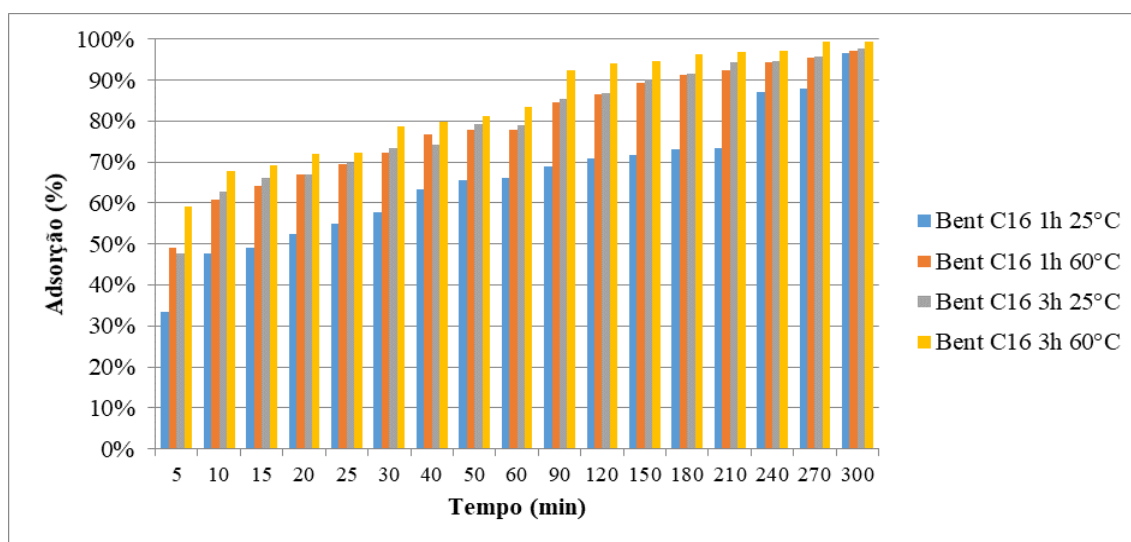
## 5.4 Testes de adsorção do corante RB

Os resultados dos testes de adsorção indicam que todos os adsorventes testados são promissores e demonstram alta eficiência na adsorção do corante aniônico vermelho de remazol RB.

### 5.4.1 Isotermas de tempo

Foi analisado o efeito do tempo de contato entre os híbridos e a solução do corante aniônico vermelho de remazol RB. Os perfis obtidos estão ilustrados na figura 6.

Figura 6: Influência do tempo na adsorção do corante RB



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

Os dados apresentados acima, demonstram que o tempo de equilíbrio durante a adsorção é de aproximadamente 180 min, com percentuais de remoção muito próximos, sendo 91,23 e 91,66 e 96,32% para os híbridos Bent-C16-1h-60°C, Bent-C16-3h-25°C e Bent-C16-3h-60°C, respectivamente, demonstrando o potencial de adsorção dos híbridos aplicados, uma vez que alcançou porcentagem de adsorção de aproximadamente 100%.

### 5.4.2 Isotermas de pH

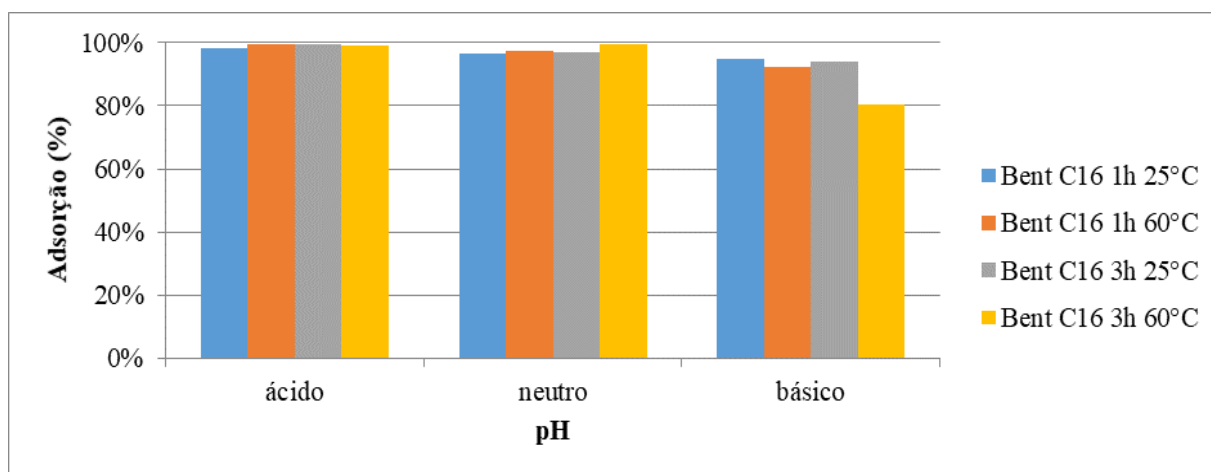
A literatura demonstra que o pH desempenha um papel significativo no processo de adsorção de algumas espécies. Isso ocorre devido à variação das cargas entre a espécie adsorvida e a superfície do adsorvente. Em outras palavras, a capacidade de adsorção de um adsorvente é influenciada pelo pH do meio em que ocorre o processo (Brito, 2019; Ihtisham et al., 2021; Zhu et al., 2023).

A Figura 7 demonstra a variação na porcentagem de adsorção do corante vermelho de remazol RB nas faixas de pH, ácido, próximo ao neutro e básico. Observa-se que o meio ácido favorece o processo de adsorção e proporciona melhores resultados para ambos os híbridos utilizados. Isso ocorre porque o pH da solução afeta significativamente a carga superficial dos adsorventes e a ionização dos poluentes.

Ao estudar o efeito do pH, verificou-se que os melhores resultados foram obtidos em um pH de 3,0, com altas taxas de remoção para todos os adsorventes sintetizados. Podemos observar um comportamento semelhante em (Galvão 2020), no qual ele conseguiu alto índice de adsorção em pH 3, pois houve um aumento na carga superficial do adsorvente e no grau de ionização do adsorvato.

Considerando a eficiência dos resultados obtidos em pH da própria solução do corante (6,7), decidiu-se manter essa condição, pois não é recomendável adicionar ácidos para ajustar o pH nos processos de tratamento de água. Do ponto de vista econômico, o uso do pH da própria solução do corante é mais vantajoso, pois elimina a necessidade de uma etapa adicional, que seria a acidificação do meio e, nesse caso, levando em consideração a alta eficiência de adsorção que esse meio apresentou.

Figura 7: Influência do pH na adsorção do corante vermelho de remazol RB.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

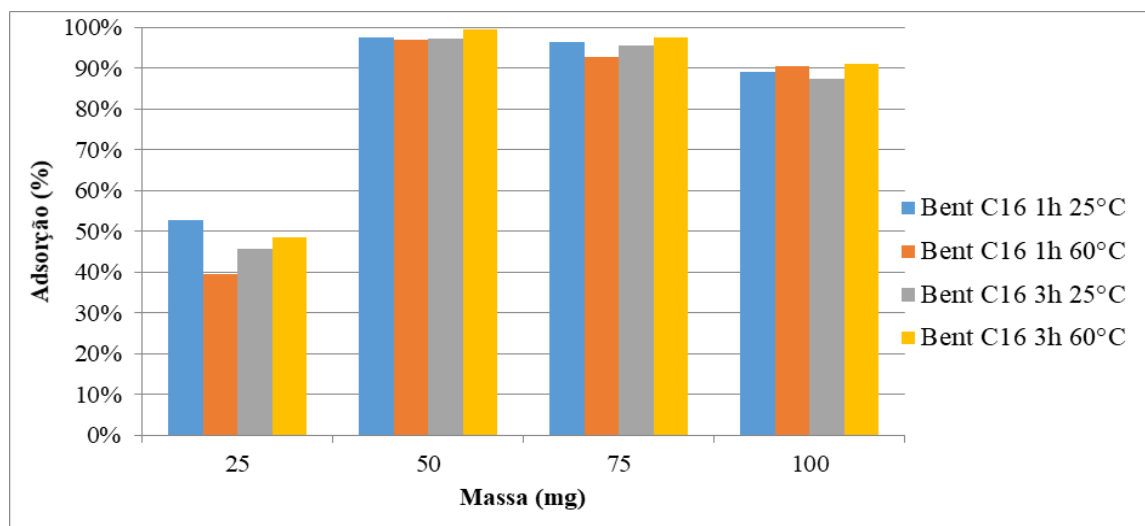
#### 5.4.3 Massa do adsorvente

Muitos estudos são realizados para determinar a quantidade mínima de adsorvente necessária e eficaz na remoção de corantes aniônicos e catiônicos, avaliando a eficiência de diferentes doses de adsorventes (Akram, 2017; Turkan, 2020).

A massa adequada do adsorvente é importante para otimizar a capacidade de adsorção de um corante, permitindo um uso mais eficiente conforme as condições experimentais e resultando em benefícios econômicos significativos.

A Figura 8 apresenta a influência da quantidade de massa do adsorvente no processo de adsorção do corante utilizado.

Figura 8: Influência da massa na adsorção do corante RB.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

O gráfico que determina a quantidade ideal de massa de adsorvente foi elaborado a partir de uma solução sem ajuste de pH e um tempo de contato fixo de 300 minutos. As massas dos adsorventes testadas foram de 25, 50, 75 e 100 mg. Como apresentado na Figura 8, a eficiência máxima para todos os híbridos sintetizados foi alcançada com uma dosagem de 50 mg. Nesta quantidade, a remoção do corante atingiu praticamente 100% para todas as organobentonitas utilizadas. Assim, não há necessidade de usar quantidades maiores de adsorvente nessas condições, resultando em economia dos adsorventes.

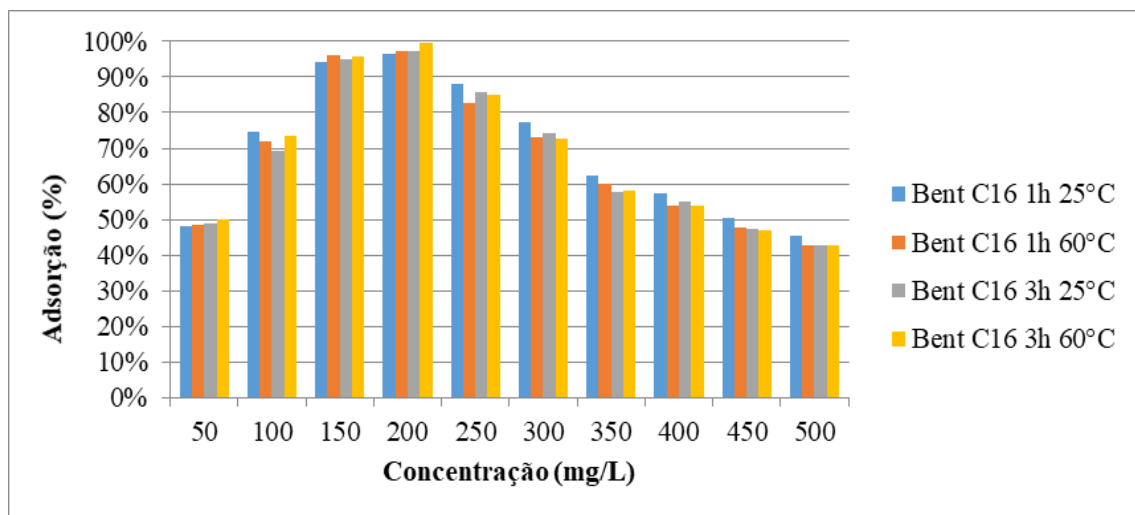
Dahlan et al., (2019), ao estudar a relação entre a massa do adsorvente e a massa do adsorvato, encontrou resultados semelhantes, observando que a eficiência de remoção aumentou até certo ponto, momento em que o equilíbrio foi alcançado. Após esse ponto, não houve um aumento significativo na eficiência de remoção, o que indica que esse é o valor ótimo a ser utilizado nas condições testadas.

#### 5.4.4 Concentração da solução do corante RB

Os estudos de adsorção são essenciais para analisar o efeito da concentração inicial do corante, uma vez que a força motriz para superar a resistência à transferência de massa entre

as fases líquida e sólida é proporcionada por esse efeito, o que explica o aumento na quantidade adsorvida no equilíbrio, a partir do aumento da concentração (Galvão, 2020). Por outro lado, a diminuição na remoção de corante, ilustrada na Figura 9, ocorre devido à saturação mais rápida do adsorvente com o aumento da concentração, o que força a adsorção a ocorrer em sítios de acesso mais difíceis.

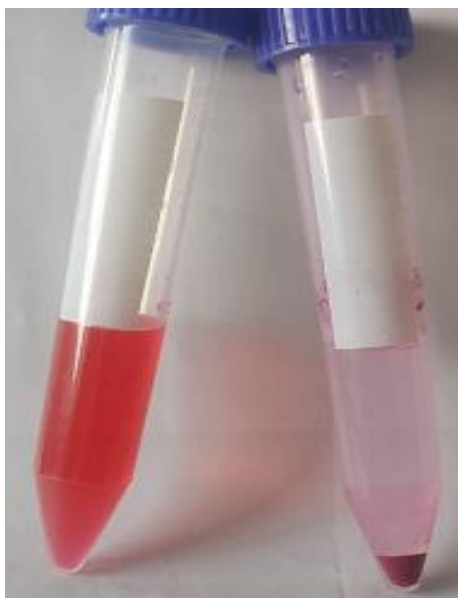
Figura 9: Influência da concentração na adsorção do corante RB.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024.

A Figura 10 apresenta as imagens das soluções padrão do corante vermelho de remazol RB com concentração de 200 mg/L e da solução remanescente após o processo de adsorção nas condições otimizadas.

Figura 10: Solução do corante antes e depois do processo de adsorção com 50 mg do adsorvente, concentração inicial de 200 mg/L, 300 min de agitação e pH da própria solução do corante.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Na Figura 10, é possível observar que, após o processo de adsorção utilizando os adsorventes sintetizados, a solução do corante torna-se límpida. Isso indica que a maior parte do corante foi efetivamente adsorvida pelos híbridos. Essa mudança na coloração da solução é um indicativo visual da eficiência dos adsorventes sintetizados, demonstrando que os materiais modificados têm a capacidade de remover de forma eficaz os corantes da solução, o que está relacionado ao aumento da área superficial e à presença de grupos ativos na superfície dos adsorventes.

### 5.5 Testes de adsorção do efluente têxtil

Diante dos resultados satisfatórios obtidos no processo de adsorção do corante vermelho de remazol RB e avaliando o comportamento diante das variações de tempo de contato, pH, massa e concentração da solução, escolheu-se o híbrido Bent-C16-3h-60 °C para testar sua eficiência frente a um efluente têxtil coletado na sua forma bruta e sem passar por nenhum tipo de tratamento prévio. Como mostra a figura 11, observa-se uma melhora significativa na coloração da amostra, que inicialmente era de um azul-marinho intenso e após o tratamento com o adsorvente, a solução tornou-se límpida.

Figura 11: Tratamento do efluente têxtil com o híbrido Bent-C16-3h-60°C.

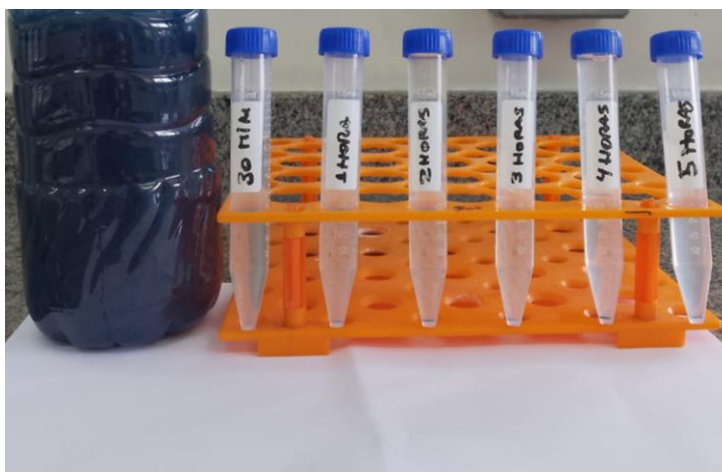


**Fonte:** Elaborado pela autora, 2024.

Melo et. al., 2020, estudando a capacidade de adsorção da bentonita organofílica no corante azul marinho K-BF, encontrou um comportamento parecido, sintetizando a bentonita com o cátion octadecilamônio, obteve-se valores de adsorção de 89,18% utilizando um pH 2,0, temperatura de 35°C e 1,0 g de bentonita organofílica. Devido à limitação de tempo para o desenvolvimento da pesquisa, não foi possível realizar as medições necessárias para quantificar o valor de adsorção. No entanto, a eficiência do adsorvente utilizado foi comprovada qualitativamente, evidenciando sua capacidade de adsorção e, conseqüentemente, descoloração de um efluente têxtil real.

A Figura 12 apresenta uma comparação entre o efluente real padrão e as amostras adsorvidas em diferentes intervalos de tempo, evidenciando que o processo de adsorção foi eficaz e os adsorventes apresentam potencial para descoloração de efluentes reais.

Figura 12: Comparativo entre o padrão e as amostras após os ensaios de adsorção nos intervalos de 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas, 4 horas e 5 horas.



**Fonte:** Elaborado pela autora, 2024.

Foi observado que a bentonita em sua forma bruta também demonstrou uma eficaz capacidade de adsorção do efluente têxtil real. Esse comportamento sugere que os corantes e contaminantes presentes nesse efluente possuem cargas opostas às da bentonita, indicando que esses corantes são possivelmente catiônicos. Na sua forma natural, as bentonitas são amplamente aplicadas na adsorção de poluentes carregados positivamente (catiônicos), sendo essa propriedade atribuída à carga superficial negativa da montmorillonita, resultante da substituição isomórfica dos metais que compõem sua estrutura. Esse fenômeno de adsorção é mais eficaz para espécies de poluentes catiônicos, uma vez que a interação entre a carga negativa da bentonita e a carga positiva dos corantes favorece a adsorção. Porém, o mesmo não ocorre para espécies poluentes aniônicas, como o corante vermelho de remazol RB, cujas

cargas negativas não são adequadamente atraídas pela superfície negativa da bentonita, resultando em uma menor eficiência de adsorção para esses compostos.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos por Difração de Raios X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e Análise Elementar CHN confirmam a eficácia do método de síntese empregado na obtenção dos adsorventes sintetizados. Observou-se um aumento no espaçamento basal da montmorilonita nos híbridos, bem como o surgimento de bandas características de estiramentos C-H, indicando que o cátion orgânico hexadeciltrimetilamônio foi incorporado de maneira eficiente na região interlamelar da montmorilonita.

Além disso, os testes de adsorção revelaram que os adsorventes demonstraram alta eficiência na adsorção do corante aniônico vermelho de remazol RB, com uma eficiência superior a 90% para todos os híbridos testados. Entre eles, o híbrido Bent-C16-3h-60°C apresentou uma cinética de adsorção mais rápida do que o híbrido Bent-C16-1h-60°C.

O tempo ideal para alcançar a maior eficiência na remoção do corante, nas condições testadas, foi de 300 minutos. No entanto, para o híbrido Bent-C16-3h-60°C, a taxa de remoção já ultrapassou 90% em apenas 90 minutos. Além disso, os testes de pH demonstraram que a adsorção foi eficiente tanto no pH natural das soluções quanto em pH ácido. A massa de 50 mg do adsorvente provou ser a mais eficaz nas condições testadas, não havendo necessidade de utilizar maiores quantidades. O aumento na concentração inicial do corante resultou em uma maior quantidade adsorvida no equilíbrio, mas levou a uma diminuição na eficiência de remoção devido à saturação mais rápida do adsorvente. O estudo indicou que, para uma remoção mais eficiente sob as condições analisadas, a concentração ótima do corante foi de 200 mg/L.

Os adsorventes sintetizados demonstraram uma alta eficiência na descoloração do efluente têxtil real, alcançando uma descoloração total em um período de apenas 30 minutos. Este desempenho reflete a eficácia dos materiais modificados, que foram especialmente desenvolvidos para maximizar a adsorção de corantes e outros poluentes presentes nos efluentes. A rápida descoloração observada sugere que esses adsorventes podem ser uma solução prática e eficiente para o tratamento de efluentes na indústria têxtil, contribuindo significativamente para a redução da carga poluente lançada no meio ambiente e promovendo a sustentabilidade nas operações industriais. A capacidade de alcançar tal resultado em um tempo tão curto destaca o potencial dos adsorventes sintetizados em aplicações industriais em larga escala, onde a rapidez e a eficiência do tratamento são cruciais.



## REFERÊNCIAS

- AHMAD, M.; AHMED, S.; SWAMI, B. L.; IKRAM, S. Adsorption of heavy metal ions: role of chitosan and cellulose for water treatment. **International Journal of Pharmacognosy**, v. 2, 2015.
- AKRAM, M.; BHATTI, H. N.; IQBAL, M.; NOREEN, S.; SADAF, S. Eficiência de biocomposto para adsorção de Cr (VI): estudos cinéticos, de equilíbrio e termodinâmica. **Jornal de Engenharia Química Ambiental**, 2017.
- ALMEIDA, É. J. R.; DILARRI, G.; CORSO, C. R. **A indústria têxtil no Brasil: uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Bioquímica e Microbiologia, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.
- ALTUN, T. Preparation and application of glutaraldehyde cross-linked chitosan coated bentonite clay capsules: Chromium (VI) removal from aqueous solution. **Journal of the Chilean Chemical Society**, v. 65, n. 2, p. 4790-4797, 2020.
- BATHIA, D.; SHARMA, N. R.; SINGH, J.; KANWAR, R. S. Biological methods for textile dye removal from wastewater: a review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 19, 2017.
- BELKADI, A.; MELIANI, M. F.; MOKHTAR A.; DJELAD, A.; ABDELKRIMA, S.; KEBIR-MEDJHOUDA, Z. A.; SASSI, M. Amoxicillin loaded bentonite, advanced low-cost antibacterial and environmentally friendly materials. **Journal of Molecular Structure**, v. 1270, p. 133880, 2022.
- BERGAYA, F.; JABER, M.; LAMBERT, J.F. Clays and clay minerals. **Rubber-Clay Nanocomposites: Science, Technology, and Applications**, p. 1-44, 2011.
- BERGAYA, F.; LAGALY, G. General Introduction: Clays, Clay Minerals, and Clay Science. In: **Clay Science, Handbook of Clay Science, and mineralogy of clay minerals**, v. 5, p. 1-19, 2013.
- BHATTACHARYYA, K. G.; GUPTA, S. S. **Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review**, Advances in Colloid and Interface Science, Volume 140, Issue 2, Pages 114-131, 2008.
- BRIGATTI, M. F.; GALÁN, E.; THENG, B. K. G. Structure and mineralogy of clay minerals In: **Clay Science, Handbook of Clay Science, and mineralogy of clay minerals**, v. 5, p. 21-81, 2013.
- BRITO, D. F.; SILVA, F.; EDSON, C.; FONSECA, M. G.; JABER, M. Organophilic bentonites obtained by microwave heating as adsorbents for anionic dyes. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 6, p. 7080-7090, 2018.
- CERVANTES, T. N. M.; ZAIA, D. A. M.; DE SANTANA, H. Estudo da fotocatalise heterogênea sobre Ti/TiO<sub>2</sub> na descoloração de corantes sintéticos. **Química Nova**, v. 32, p. 2423-2428, 2009.

CHAVES, N. O.; DE CARVALHO, L. C. F.; OLIVEIRA, R. M. P. B. As principais técnicas utilizadas para remoção de corantes das águas residuais da indústria têxtil: uma revisão. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia-ISSN: 1984-5693**, v. 14, 2022.

DE ARAÚJO, K. S.; ANTONELLI, R.; GAYDECZKA, B.; GRANATO, A. C.; MALPASS, G. R. P. Advanced oxidation processes: a review regarding the fundamentals and applications in wastewater treatment and industrial wastewater. **Ambiente e Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 11, n. 2, p. 387-401, 2016.

FERREIRA, I. L. S. **Tingimento de tecido de algodão com corantes reativos utilizando água do mar**. 2019. Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

GIRI, B. S.; GUN, S.; PANDEY, S.; TRIVEDI, A.; KAPOOR, R. T.; SINGH, R. P.; SINGH, R. S. Reusability of brilliant green dye contaminated wastewater using corncob biochar and *Brevibacillus parabrevis*: hybrid treatment and kinetic studies. **Bioengineered**, v. 11, n. 1, p. 743-758, 2020.

HASSANE, A.; KHATAEE, A.; KARACA, S. Photocatalytic degradation of ciprofloxacin by synthesized TiO<sub>2</sub> nanoparticles on montmorillonite: Effect operation parameters and artificial neural network modeling. **Journal of Molecular Catalysis A: chemical**, v. 409, p. 149-161, 2015.

IUPAC - International Union of Pure and Applied Chemistry. **Compendium of Chemical Terminology Gold Book**, 2014.

KUMARESAN, S.; ROKADE, D. S.; MARATHE, Y. N.; INGOLE, P. G.; PAWAR, R. R.; POL, H. V.; BAJAJ, H. C. Synthesis and characterization of nylon 6 polymer nanocomposite using organically modified Indian bentonite. **SN Applied Sciences**, v. 2, p. 1-11, 2020.

LI, M.; QIANG, Z.; PULGARIN, C.; KIWI, J. Accelerated methylene blue (MB) degradation by Fenton reagent exposed to UV or VUV/UV light in an innovative micro photo-reactor. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 187, p. 83-89, 2016.

MACHADO, M. C. P. et al. **Estudo do comportamento e caracterização de argilas bentoníticas após processo de liofilização**, *Cerâmica*, v. 64, n. 370, 2018.

MARIN, Sandra Liliana Albornoz. **Remoção dos corantes têxteis CI Reactive Blue 203 e CI Reactive Red 195 mediante o uso de bagaço de maçã como adsorvente**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MELO, A. R.; FARIAS, H. R.; MARQUES, C. R. M.; BORTOLATTO, L. B. Avaliação da capacidade de adsorção do corante têxtil azul marinho K-BF utilizando bentonita. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 2, 2020.

MORANDINI, T. L. C. **Solos tropicais e bentonitas: análise geotécnica de misturas com ênfase na abordagem coloidal**. Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG, 2014.

- MOREIRA, F. C.; BOAVENTURA, R. A. R.; BRILLAS, E.; VILAR, V. J. P.; Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters. **Appl. Catal. B Environ**, v. 202, p. 217–261, 2017.
- NGULUBE, T.; GUMBO, J. R.; MASINDI, V.; MAITY, A. An update on synthetic dyes adsorption onto clay based minerals: A state-of-art review. **Journal of Environmental Management**, v. 191, p. 35-57, 2017.
- NONES, J.; RIELLA, H.G.; TRENTIN A.G.; NONES, J.; **Appl. Clay Science**, 105- 106, n.225, 2015.
- PAGALAN JR, E.; SEBRON, M.; GOMEZ, S.; SALVA, S. J.; AMPUSTA, R.; MACARAYO, A. J.; ARAZO, R. Activated carbon from spent coffee grounds as an adsorbent for treatment of water contaminated by aniline yellow dye. **Industrial Crops and Products**, v. 145, p. 111953, 2020.
- PANDEY, S. A comprehensive review on recent developments in bentonitebased materials used as adsorbents for wastewater treatment. **Journal of Molecular Liquids**, v. 241, p. 1091–1113, 2017.
- QUEIROGA, L. N. F. Bentonita silanizada multifuncional obtida por reação ultrarrápida com aquecimento por micro-ondas. 2019. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- QUEIROZ, M. T. A.; QUEIROZ, C. A.; ALVIM, L. B.; SABARÁ, M. G.; LEÃO, M. M. D.; AMORIM, C. C. D. Reestruturação na forma do tratamento de efluentes têxteis: uma proposta embasada em fundamentos teóricos. **Gestão & Produção**, v. 26, n. 1, p. 1149, 2019.
- RAMOS, M. D. N.; CLÁUDIO, C. C.; REZENDE, P. H. V.; CABRAL, L. P.; SANTOS, L. A.; COSTA, G. D.; AGUIAR, A. Análise crítica das características de efluentes industriais do setor têxtil no Brasil. **Revista Virtual de Química**, v. 12, p. 913-929, 2020.
- REN, S.; DENG, J.; MENG, Z.; WANG, T.; XIE, T.; XU, S. Enhanced removal of phenol by novel magnetic bentonite composites modified with amphoteric-cationic surfactants. **Powder Technology**, v.356, 2019.
- ROCHA, R. A. Caracterização do tratamento de efluente da indústria têxtil, Teresina-PI. 2020. 33 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2020.
- SALAHUDDIN, N.; EL-DALY, H.; EL SHARKAWY, R. G.; NASR, B. T. Synthesis and efficacy of PPy/CS/GO nanocomposites for adsorption of ponceau 4R dye. **Polymer**, v. 146, p. 291–303, 2018.
- SCHOONHEYDT, R. A.; JOHNSTON, C. T. Surface and interface chemistry of clays minerals. In: Clay Science, **Handbook of Clay Science, and mineralogy of clay minerals**, v. 5, p. 139-172, 2013.
- SHINDHAL, T. et al. A critical review on advances in the practices and perspectives for the treatment of dye industry wastewater. **Bioengineered**, v. 12, n. 1, p. 70-87, 2021.

SILVA, R. F.; ARAGÃO, J. V.; MATOS, P. H.; MILANEZ, V. F.; MACEDO, J. S.; DUARTE, A. D.; COSTA, A. Life cycle analysis of dye degradation using advanced oxidative processes. *Chemical Engineering Transactions*, v. 86, p. 589–594, 2021.

TASSI, F. G. **Metodologias para tratamento de efluentes têxteis: uma revisão**. 2022.

TOHDEE, K.; KAEWSICHAN, L. Enhancement of adsorption efficiency of heavy metal Cu (II) and Zn (II) onto cationic surfactant modified bentonite. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 2, p. 2821-2828, 2018.

VINODH, R.; SASIKUMAR, Y.; PALANICHAMY, M.; ATCHUDAN, R.; AHAMAD, T. **Bentonite clay incorporated 3-aminopropyl triethoxy silane composite (bentonite/APTES) for CO<sub>2</sub> adsorption**. *Materials Letters*, v. 294, 2021.

WU, X. L.; ZHAO, D.; YANG, S. T. Impact of solution chemistry conditions on the sorption behavior of Cu(II) on Lin'an montmorillonite. **Desalination**, v. 269(1-3), p. 84–91, 2011.

ZHU, Y.; CUI, Y.; PENG, Y.; DAI, R.; CHEN, H.; WANG, Y. Preparation of CTAB intercalated bentonite for ultrafast adsorption of anionic dyes and mechanism study. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 658, p. 130705, 2023.