



**AMANDA LEMES BORGES**

**POLIURETANAS PARA ADSORÇÃO DE CORANTES:  
APLICAÇÕES, DESAFIOS E PERSPECTIVAS**

**LAVRAS-MG  
2022**

**AMANDA LEMES BORGES**

**POLIURETANAS PARA ADSORÇÃO DE CORANTES: APLICAÇÕES, DESAFIOS E  
PERSPECTIVAS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Guilherme Max Dias Ferreira  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2022**

**AMANDA LEMES BORGES**

**POLIURETANAS PARA ADSORÇÃO DE CORANTES: APLICAÇÕES, DESAFIOS  
E PERSPECTIVAS**

**POLYURETHANES FOR DYE ADSORPTION: APPLICATIONS, CHALLENGES  
AND PERSPECTIVES**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 14 de setembro de 2022.

Prof. Dr. Guilherme Max Dias Ferreira Orientador – UFLA

Prof. Dr. Suellen Mendonça Nascimento - UFLA

Prof. Dr. João Moreira Neto

Prof. Dr. Guilherme Max Dias Ferreira  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela minha vida e por todas as bênçãos e obstáculos vividos durante o período da graduação. Obrigada por me mostrar que nunca estarei sozinha, pois és meu refúgio e fortaleza. A Virgem Maria pela sua intercessão clemente, piedosa, doce e maternal.

Aos meus queridos e amados pais, Antônio Carlos e Valéria, por serem meus heróis, me dando muito amor, carinho e apoio durante toda vida. Obrigada por sempre estarem presentes, e confiarem em mim! Amo muito vocês!

De maneira muito especial, agradeço minha querida avó Ofélia, por ser meu maior exemplo de ser humano e meu porto seguro nos momentos de tribulação. Obrigada por todas as orações e conselhos, me ensinando a ver o lado positivo de tudo, mesmo nas situações mais difíceis.

Minha eterna gratidão a minha irmã Brenda, por ter passado junto comigo pelos momentos mais bonitos e também pelos mais difíceis da Engenharia Química. Obrigada por ser minha confidente, meu consolo e minha inspiração. Sem você nunca teria chegado até aqui.

Aos meus irmãos Daniel e Deborah, por serem tão determinados e meus exemplos de honestidade e trabalho. Obrigada pela torcida, companheirismo e orações durante essa etapa. Amo muito vocês. Aos meus tios, tias, primos e primas por vibrarem junto comigo por cada semestre vencido e por estarem sempre presentes em minha vida.

Ao meu orientador Guilherme, por todos os conselhos, ensinamentos, compreensão e pela paciência. Obrigada também pela amizade! Você me ensinou muito mais do que uma sala de aula pode ensinar, com seu exemplo de fé, perseverança e profissionalismo.

A Universidade Federal de Lavras por proporcionar um ensino gratuito e de qualidade. Agradeço também a cada professor e cada funcionário que compartilhou o conhecimento de sua forma única, me mostrando que antes de ser um bom profissional, é primordial ser uma pessoa de bem.

Aos meus amigos da graduação, Julia C., Julia F., Thais, Carol, Isa, Joyce, Karina, Luiza, Luana, Larissa, Leticia, Lucas, Gi, Ruth, Leo, José Carlos, Matheus, Maria Isabela, Thiago e Yago que tornaram essa etapa mais leve. Obrigada por me ensinarem uma das lições mais importantes, que sozinho ninguém consegue chegar longe.

Ao MUR, GOUs e EJNS por me permitirem viver tardes de fé. Obrigada pelas orações, descontração e por me proporcionarem muita paz e a esperança que dias melhores sempre virão.

Ao pessoal da Steammaster, JMacedo e Raízen por estarem junto comigo nessa etapa final da graduação. Obrigada pelo carinho e aprendizado.

*Tudo tem o seu tempo determinado e há tempo para todo o propósito debaixo do céu.*  
*(Ec.3:1)*

## RESUMO

A contaminação de corpos hídricos por espécies orgânicas e inorgânicas causam efeitos nocivos aos seres humanos e é um problema enfrentado por muitos países. Na classe dos contaminantes orgânicos destacam-se os corantes, para os quais se estima que mais de 700 mil toneladas são produzidas anualmente em todo o mundo, das quais cerca de 20% são despejadas em efluentes industriais. A concentração média de corantes em efluentes têxteis é de cerca de 300 mg L<sup>-1</sup>. O descarte destes em corpos d'água não causam apenas poluição visual, mas também dificultam a transmissão da luz solar, prejudicando a fotossíntese de organismos aquáticos, além de se acumularem no meio ambiente e organismos vivos, representando riscos significativos à saúde de diferentes organismos. Assim, a remediação de águas residuárias contendo contaminantes como corantes é uma prioridade. Assim, essa revisão forneceu uma visão geral de várias técnicas para a remoção de corantes de águas residuárias, dando enfoque para a adsorção. Essa técnica é considerada uma das mais utilizadas atualmente para a remoção de corantes em sistemas aquosos, visto que possui baixo custo e alta eficiência. Nesse cenário, a implantação de adsorventes adequados desempenha um papel vital para a aplicação dessa técnica. O uso de poliuretanas (PU) como adsorventes, polímero extremamente versátil formado a partir da reação entre um poliálcool e um isocianato, tem ganhando destaque nos últimos anos, principalmente quando utilizado como compósitos. Os mecanismos de remoção, incluindo cinética de adsorção, isoterma, termodinâmica e interações entre adsorventes de PU e os corantes também foram discutidos. Dada a importância dessa temática, foram realizadas pesquisas na plataforma *Web of Science* que se basearam em estudar e comparar a capacidade de remoção dos compósitos de PU com diferentes tipos de corantes. O resultado encontrado foi que esses materiais são capazes de adsorver de pequenas a grandes quantidades desses contaminantes, demonstrando que condições operacionais empregadas nessa técnica são também bastante variadas e influenciam bastante a capacidade de adsorção. Com isso, materiais a base de PU se mostraram promissores para remoção de corantes e a realização de pesquisas se torna necessária para melhor conhecimento, otimização e aperfeiçoamento da técnica. Além disso, o uso desse material também pode ser adaptado para operações em grande escala, vantagem adicional para se tornar um dos principais candidatos em estações de tratamento de efluentes.

**Palavras-chave:** Polímero. Remoção de contaminantes. Corantes. Tratamento de água. Adsorção.

## ABSTRACT

Contamination of water bodies by organic and inorganic contaminants causes harmful effects to human beings and is a problem faced by many countries. In the class of organic contaminants, dyes stand out, for which it is estimated that more than 700 thousand tons are produced annually worldwide, of which about 20% are dumped in industrial effluents. The average concentration of dyes in textile effluents is around 300 mg L<sup>-1</sup>. The disposal of these in water bodies not only cause visual pollution, but also hinder the transmission of sunlight, impairing the photosynthesis of aquatic organisms, in addition to accumulating in the environment and living organisms, representing significant health risks for different organisms. Thus, the remediation of pollutants such as dyes, from wastewater is a priority. Thus, this review provided an overview of various techniques for removing dyes from wastewater, focusing on adsorption. This technique is considered one of the most used currently for the removal of dyes in aqueous systems, since it has low cost and high efficiency. In this scenario, the implementation of suitable adsorbents plays a vital role in the application of this technique. The use of polyurethanes (PU) as adsorbents, an extremely versatile polymer formed from the reaction between a polyol and an isocyanate, has gained prominence in recent years, especially when used as composites. Removal mechanisms including adsorption kinetics, isotherms, thermodynamics and interactions between PU adsorbents and dyes were also discussed. Given the importance of this topic, research was carried out on the Web of Science platform based on studying and comparing the removal capacity of PU composites with different types of dyes. The result found was that these materials are able to adsorb from small to large amounts of these contaminants, demonstrating that operating conditions used in this technique are also quite varied and greatly influence the adsorption capacity. Thus, PU-based materials have shown to be promising for removing dyes and conducting research is necessary for better knowledge, optimization and improvement of the technique. In addition, the use of this material can also be adapted for large-scale operations, an additional advantage to become one of the main candidates in wastewater treatment plants.

**Keywords:** Polymer. Removal of contaminants, Dyes. Water treatment. Adsorption

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do polímero PVC e seu monômero e mero.....	16
Figura 2 - Relação entre massa molecular e propriedade dos polímeros .....	16
Figura 3 - Distribuição do mercado mundial de PU em 2020.....	18
Figura 4 - Representação esquemática da estrutura de PU.....	19
Figura 5 - Pré polímero de PU.....	19
Figura 6 - Representação dos segmentos rígidos e flexíveis em uma cadeia polimérica de PU. .....	20
Figura 7 - Classes de poluentes presentes em efluentes industriais.....	24
Figura 8 - Esquema que representa a finalidade dos grupos cromóforo e auxocromo.....	30
Figura 9 - Interação entre corantes aniônicos com as fibras.....	31
Figura 10 - Estrutura química de um corante básico. ....	31
Figura 11 - Exemplo de corante azoico diazo. ....	32
Figura 12 - Exemplo de um corante branqueador. ....	33
Figura 13 - Exemplo de corante direto - Vermelho Congo. ....	33
Figura 14 - Exemplos de corantes reativos.....	34
Figura 15 - Exemplo estrutural de um corante à cuba.....	35
Figura 16 - Estrutura química de um corante dispersivo.....	35
Figura 17 - Estrutura química de um corante de enxofre .....	36
Figura 18 - Estrutura do complexo gerado com interação do íon metálico cromo. ....	36
Figura 19 - Representação esquemática do processo de adsorção, absorção e sorção.....	40
Figura 20 - Mecanismo cinético de adsorção. ....	41
Figura 21 - Representação de um esquema para estudo estático de adsorção.....	43
Figura 22 - Esquema experimental para obtenção das condições de equilíbrio.....	44
Figura 23 - Determinação da quantidade adsorvida por meio das concentrações de equilíbrio. .....	45
Figura 24 - Representação do modelo de Langmuir e Freundlich.....	47
Figura 25 - Mecanismo de transferência do adsorvato até o adsorvente.....	49
Figura 26 - Comportamento ideal de um leito com adsorvente operando em modo dinâmico. .....	50
Figura 27 - Representação da interação das cargas da solução de acordo com o pHPCZ. ....	52
Figura 28 - Metodologia empregada para determinação do pHPCZ.....	52
Figura 29 - Capacidade máxima de adsorção em diferentes corantes em função da temperatura.	



.....	54
Figura 30 - Comportamento da concentração de adsorvato em função da capacidade de adsorção. ....	56
Figura 31 - Comportamento da dosagem com as variáveis de capacidade máxima de adsorção e % de remoção.....	57
Figura 32 - Quantidade de publicações e citações sobre a temática de remoção por meio de PU. ....	58
Figura 33 - Quantidade de publicações e citações sobre a temática de adsorção de corantes por meio de PU. ....	58

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Setores e aplicações dos polímeros. ....	15
Quadro 2 - Vantagens e desvantagens de polióis. ....	21
Quadro 3 - Principais isocianatos utilizados na indústria para síntese de polióis. ....	22
Quadro 4 - Extensores de cadeia mais comuns. ....	23
Quadro 5 - Representação da imensa aplicabilidade de PUF na remoção de diversos contaminantes. ....	26
Quadro 6 - Limites estabelecidos para o lançamento de efluentes. ....	28
Quadro 7 - Classificação dos corantes segundo a sua estrutura química ....	30
Quadro 8 - Vantagens e desvantagens das metodologias empregadas para remoção de corantes. .....	38
Quadro 9 - Comparação entre a adsorção física e química ....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação do corante, tipo de interação e presença em efluentes.....	37
Tabela 2 - Trabalhos utilizando PU para adsorção de corantes e suas condições operacionais .....	60
Tabela 3 - Diferentes adsorventes e suas respectivas capacidades máximas de adsorção em mg de adsorvato/ grama de adsorvente para o corante azul de metileno.....	67

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Polímeros .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Química dos polímeros .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Poliuretanas.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Poliuretanas: Aplicações ambientalmente amigáveis.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3</b>	<b>Panorma sobre os corantes e impactos ambientais.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4</b>	<b>Classificação dos corantes .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Corantes ácidos ou aniônicos.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Corantes básicos ou catiônicos .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Corantes azoicos .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Corantes branqueadores .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Corantes diretos .....</b>	<b>33</b>
<b>2.4.6</b>	<b>Corantes reativos .....</b>	<b>34</b>
<b>2.4.7</b>	<b>Corantes a cuba .....</b>	<b>34</b>
<b>2.4.8</b>	<b>Corantes dispersivos.....</b>	<b>35</b>
<b>2.4.9</b>	<b>Corante de enxofre .....</b>	<b>35</b>
<b>2.4.10</b>	<b>Corantes pré-metalizados .....</b>	<b>36</b>
<b>2.5</b>	<b>Estimativas de perdas de corantes em águas residuárias .....</b>	<b>36</b>
<b>2.6</b>	<b>Métodos para remoção de corantes de efluentes e águas residuária .....</b>	<b>37</b>
<b>2.7</b>	<b>Adsorção: conceitos e aplicações em remediação ambiental .....</b>	<b>40</b>
<b>2.8</b>	<b>Estudos de adsorção: cinética e equilíbrio.....</b>	<b>43</b>
<b>2.8.1</b>	<b>Estudo estático .....</b>	<b>43</b>
<b>2.8.2</b>	<b>Equilíbrio de adsorção .....</b>	<b>43</b>
<b>2.8.3</b>	<b>Cinética de adsorção.....</b>	<b>48</b>
<b>2.8.4</b>	<b>Estudo dinâmico .....</b>	<b>50</b>
<b>2.9</b>	<b>Influência das propriedades do adsorvato, adsorvente e solução na adsorção.....</b>	<b>51</b>
<b>2.9.1</b>	<b>Influência do pH .....</b>	<b>51</b>
<b>2.9.2</b>	<b>Influência da temperatura .....</b>	<b>53</b>
<b>2.9.3</b>	<b>Influência da concentração inicial .....</b>	<b>55</b>
<b>2.9.4</b>	<b>Influência da dosagem de adsorvente.....</b>	<b>56</b>

<b>3</b>	<b>REVISÃO: APLICAÇÃO DE PU DE NA REMOÇÃO DE CORANTES .....</b>	<b>58</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos acontecimentos mais importantes da história se deu por meio das Revoluções Industriais, as quais foram responsáveis por conferir inúmeras transformações no setor industrial, principalmente no que se refere ao aumento da produção.

Nesse sentido, a Primeira Revolução Industrial, ocorrida no final do século XVIII na Inglaterra, foi responsável por alavancar a produção da indústria têxtil através das máquinas a vapor. Esse fato foi muito importante para o crescimento da economia do país e do mundo. Até o fim daquele século, a Inglaterra mantinha-se como líder da produção têxtil e apenas em meados do século XIX, com o advento de novas tecnologias e aprimoramento de métodos científicos, a indústria foi capaz de se expandir de maneira sólida para outros países e aumentar exponencialmente a produção, impactando diretamente no crescimento econômico. (FIGUEIREDO; SANTOS; RIBAS, 2020).

No Brasil, a Revolução Industrial se deu tardiamente se comparada à Inglaterra. Somente no período compreendido entre 1808 a 1930, o país passou pelo processo de industrialização, sendo que as primeiras empresas implantadas foram a têxtil e a alimentícia. (FIGUEIREDO; SANTOS; RIBAS, 2020).

No cenário atual, no que se refere a indústria têxtil, o país possui uma das maiores capacidades de produção do ocidente. Para o ano de 2019, o Brasil produziu mais de 2 milhões de toneladas de tecidos e faturou mais de 185 bilhões de reais. (“Abit - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção”, 2022). Essa elevada produção, apesar de trazer muitas vantagens socioeconômicas ao país, colabora para o aumento da contaminação de águas residuárias por meio da contaminação de corantes, visto que esses podem ser comercializados em diversas formas, como líquido, em pó, pastoso ou granulado.

O esgoto da indústria têxtil tem sido taxado como o mais agressivo a fauna e a flora. (RANI et al., 2014). Além disso, estima-se que grande parte de despejo de corantes no ambiente se dê por meio desse setor (REVANKAR; LELE, 2007). Para efeitos de exemplificação, para cada quilograma de tecido produzido, geram-se entre 80 a 150 litros de efluentes (SILVA DE ROSSI et al., 2021) e 50% desse volume contém corantes (OLIVEIRA et al., 2020).

Em se tratando das indústrias alimentícias, a utilização de corantes também é muito frequente e em grande escala. Isso ocorre, pois, o consumo de alimentos está ligado à experiência sensorial, como a cor, variável que leva o consumidor a comprá-los ou não. Na

maioria das vezes, a coloração natural dos produtos é modificada com o uso de corantes sintéticos, o que proporciona maior satisfação ao consumi-los (COLLINS e PLUMBLY, 1995; FREUND et al., 1988).

Nesse sentido, com a tendência crescente no uso de corantes derivados do petróleo pelo mundo, deve-se atentar para a contaminação das águas, ar e solo por meio dessas substâncias químicas que são de fácil manuseio, altamente estáveis devido a baixa sensibilidade a luz, calor, oxigênio e ação das bactérias e, portanto, apresentam difícil degradação no ambiente (ARIAS et al., 2018).

Segundo Sugimoto (2021) devido a crescente quantidade de compostos químicos e seus produtos gerados atualmente, muitas vezes estes não são testados em relação a toxicidade, o que dificulta definir sobre o desencadeamento dos reais impactos ao meio ambiente, principalmente aos corpos d'água.

Devido aos efluentes de corantes possuírem alta demanda biológica e química de oxigênio (DBO e DQO) e grande quantidade de poluentes orgânicos e inorgânicos, como compostos clorados, metais pesados, enxofre, nitratos, naftol e outros, devem-se aplicar metodologias capazes de removê-los antes de serem despejados no ambiente (ARIAS et al., 2018; SLAMA et al., 2021).

Algumas dessas remoções são realizadas por meio de processos físicos, químicos e biológicos, como por exemplo, adsorção, ozonização e biorremediação, respectivamente, ou até mesmo uma combinação desses tipos de tratamentos. Esses métodos possuem vantagens e desvantagens a serem consideradas e, este trabalho objetiva discutir alguns métodos de remoção de corantes daqueles efluentes, principalmente a adsorção com foco nas espumas de poliuretano (PUF) como material adsorvente.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Polímeros

Um dos primeiros registros encontrados sobre o uso de materiais poliméricos pelo homem se deu na Antiguidade por meio dos povos egípcios e romanos, que utilizavam resinas e graxas para vedação de vasilhames e colar documentos (HIPOLITO I. S.; HIPOLITO R. S.; LOPES G. A., 2013). Nesse sentido, os polímeros naturais, presentes na borracha, lã, seda, madeira e outros, foram utilizados por muitos séculos para inúmeras finalidades. Com o desenvolvimento da ciência, o primeiro polímero sintético, a baquelite, foi sintetizada por Leo Baekeland apenas em 1912. (JR CANEVAROLO S. V., 2010)

A partir do fim de 1945, com o término da Segunda Guerra Mundial, os polímeros sintéticos passaram a ser produzidos em grande escala, o que revolucionou diversos setores industriais, como automotivo, eletrônico, construção, embalagens, têxteis e outros, tornando esses materiais alternativos e até mesmo superiores em relação às cerâmicas e metais em algumas de suas propriedades. (HAGE JR., 1998)

Dentre suas características mais cobiçadas dessa classe de materiais estão o baixo preço da produção em grande escala e a fácil moldagem para adequação de propriedades desejadas pela indústria. Algumas das aplicações de polímeros sintéticos estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Setores e aplicações dos polímeros.

Setor	Aplicação
Aeroespacial	Estabilidade térmica e oxidativa
Engenharia	Substituição de metais
Automobilístico	Fibras de alto módulo para uso em cordas de pneus
Construção civil/móveis	Espumas não inflamáveis
Agricultura	Polímeros degradáveis (liberação controlada de pesticidas, fertilizantes)
Medicina	Liberação controlada de drogas, suturas degradáveis, órgãos artificiais
Eletrônica	Placas de circuitos, isolantes, baterias

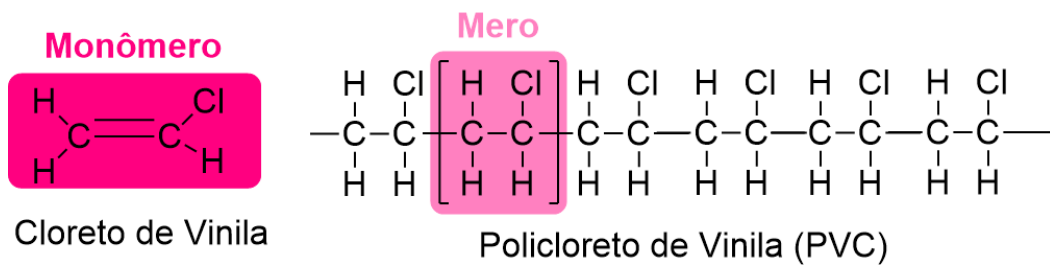
Fonte: Do autor - Adaptado de Caram (2006).



### 2.1.1 Química dos polímeros

A palavra polímero vem do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição), ou seja, é uma macromolécula constituída por meros ligados entre si por meio de ligações covalentes ao longo da estrutura. A estrutura básica de um polímero é um monômero, que é uma molécula simples contendo funcionalidade (número de pontos reativos) mínima igual a 2. Também, tem-se que um único mero é denominado de monômero. A Figura 1 representa a representação esquemática desses conceitos.

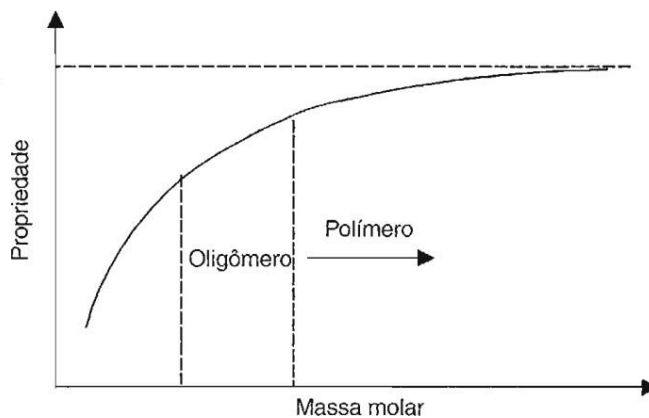
Figura 1 - Representação esquemática do polímero PVC e seu monômero e mero.



Fonte: Do autor (2022).

Essa classe de materiais, se diferencia das outras, justamente pela constituição em cadeias longas e de alta massa molar, sendo que cadeias poliméricas possuem massa molar superior a 10000 g/mol e constituições variando de 1000 e 10000 g/mol são consideradas oligômeros ou polímeros de baixa massa molecular, como é possível perceber pela Figura 2 (JR CANEVAROLO S. V., 2010).

Figura 2 - Relação entre massa molecular e propriedade dos polímeros.



Fonte: JR Canevarolo (2010).

Nesse sentido, a reação conhecida como polimerização é capaz de combinar os monômeros e conseqüentemente aumentar sua massa molar. Pode ser classificada de acordo com o número de monômeros, tipo de reação química, cinética de polimerização e tipo de arranjo físico.

Durante a polimerização, um ou mais monômeros podem estar envolvidos na reação ao mesmo tempo. A homopolimerização considera apenas um monômero, já no caso de a reação ocorrer por meio de dois ou três monômeros, é denominada, respectivamente de copolimerização e terpolimerização.

Em relação ao tipo de reação, pode-se formar ligações químicas distintas para unir tais monômeros, como por exemplo adição etênica para produção de polietileno, esterificação para síntese de poliéster, entre outras.

Já para a cinética de polimerização, o processo pode ocorrer em etapas (policondensação), em cadeia (poliadição) e com abertura de anel.

Por fim, a depender dos reagentes e materiais utilizados na reação, o processo pode ser homogêneo ocorrendo na mesma solução ou heterogêneo com formação de suspensão e emulsão. (JR CANEVAROLO S. V., 2010)

Ao decorrer desse processo, algumas variáveis como pressão, temperatura, tempo da reação, agitação podem alterar o rendimento reacional e até mesmo afetar a estrutura final do polímero e, portanto, devem ser bastante controladas.

O que irá definir as propriedades de um polímero são o comprimento da cadeia polimérica, presença e estrutura das ramificações, apresentando configurações e conformações quase que ilimitadas (MOTHEO, 2012).

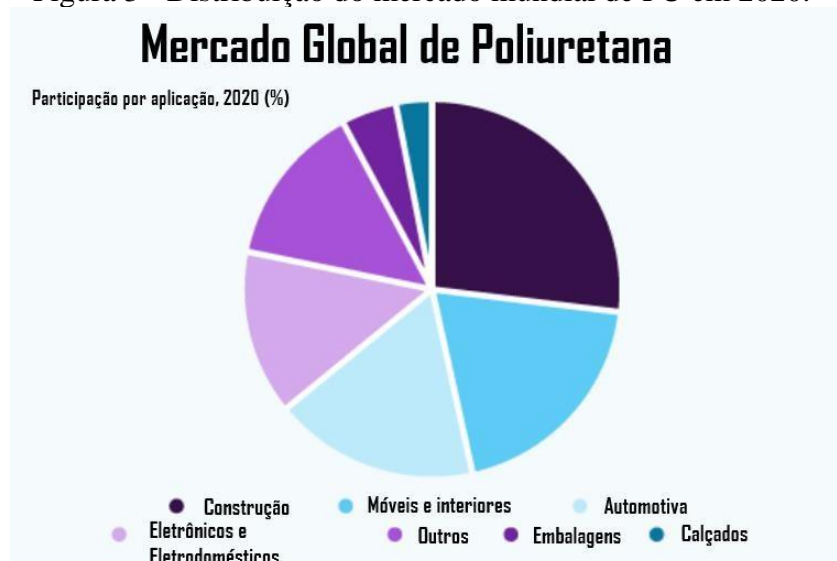
Nesse sentido, um dos materiais mais versáteis da classe dos polímeros são as poliuretanas (PU), que podem se apresentar na forma de termoplásticos (se deformam com aumento da temperatura e pressão, moldados por meio de extrusão, injeção), termofixos (com ligações complexas e cruzadas entre as cadeias poliméricas, rompidas com aumento da temperatura e pressão) ou elastômero (polímero à temperatura ambiente que pode ser deformado e retorna voltar rapidamente ao tamanho original), a depender dos reagentes utilizados em sua síntese. (MOTHEO, 2012).

## **2.2 Poliuretanas**

O primeiro relato encontrado sobre poliuretanas (PU) se deu em 1947, na Alemanha,

durante a Segunda Guerra Mundial, em que Bayer e colaboradores (1947) relataram o seu uso como substituto da borracha. Já em 1952, a produção de PU flexível em escala industrial foi iniciada e a partir de 1990 passou a ganhar destaque e se expandir para todo o mundo com uma grande quantidade de aplicações em inúmeras áreas, como aplicações biomédicas, automotiva, na construção civil, nas indústrias têxteis e em várias outras. Podem ser utilizadas, portanto, em revestimentos de superfície, espumas, estofamentos, isolamentos térmicos e acústicos, compósitos, adesivos, e também há a possibilidade de serem incorporados a elastômetros, isolantes, elásticos, tintas e outros. (CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M.; NETO S. C., 2009; KANEYOSHI A., 2006). Sua distribuição em relação aos setores de utilização no mercado mundial pode ser verificada na Figura 3.

Figura 3 - Distribuição do mercado mundial de PU em 2020.



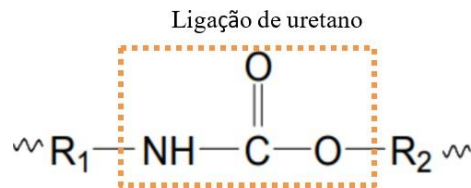
Fonte: Adaptado de Grand View Research (2021)

Atualmente, devido à possibilidade de agregar propriedades inerentes a metais, como durabilidade e tenacidade, com a elasticidade da borracha, as PU são os materiais mais estudados e adaptáveis do mundo (ZIA et al., 2014). Por esse motivo, elas são consideradas os materiais do futuro, visto que podem apresentar ainda propriedades superiores de dureza, alongamento e resistência (AKINDOYO et al., 2016).

As PU são materiais poliméricos constituídos de uma ligação de uretano  $[-NH-C(O)-O-]$  formada por meio da reação entre um grupo hidroxila ( $-OH$ ) de um poliálcool e um grupo isocianato ( $-N=C=O$ ). Na presença de uma base de Lewis, por exemplo, o carbono eletrofílico do grupo isocianato promove um ataque nucleofílico ao par de elétrons do oxigênio de um dos grupos hidroxílicos do poliálcool. Após a quebra e formação de algumas

ligações, a ligação uretânica é formada. A estrutura geral dessa ligação é apresentada na Figura 4, em que R1 representa a cadeia dos monômeros de isocianato e R2, ao radical originado do polioli. Essa reação somente é possível devido à alta reatividade do grupo isocianato que é estabilizado por ressonância.

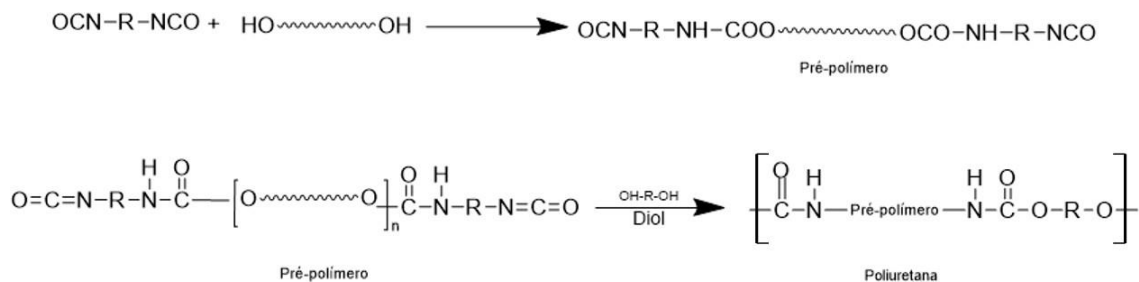
Figura 4 - Representação esquemática da estrutura de PU.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

Assim, para ocorrer a reação de formação de uma PU, conhecida como polimerização em etapas ou policondensação, o componente isocianato deve conter pelo menos dois grupos isocianatos. Nessa reação, deve haver excesso estequiométrico desse grupo e o produto formado será um pré-polímero de cadeia curta (ŠEBENIK; KRAJNC, 2007). Esse pré-polímero será o precursor para a produção da PU, no qual possui grupamentos NCO livres nas extremidades da cadeia, permitindo a reação de reticulação com um extensor de cadeia, como um diol. A Figura 5 demonstra o mecanismo de reação para produção desse pré-polímero e a formação da PU.

Figura 5 – Síntese de pré polímero de PU.

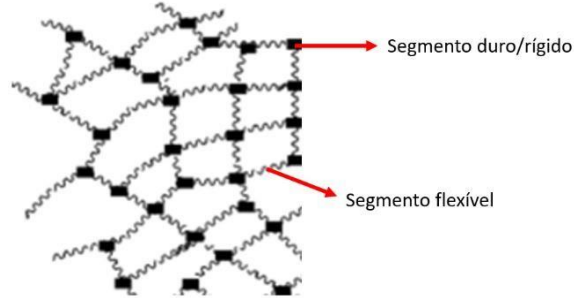


Fonte: Clemente e colaboradores (2014).

Deste modo, a possibilidade de alteração dos grupamentos radicais R1 e R2 (Figura 4) das PU alteram suas propriedades mecânicas, térmicas a até mesmo elétricas e sua estrutura normalmente é influenciada pela presença de segmentos duros e flexíveis. Os segmentos rígidos são gerados a partir da reação entre um isocianato e um extensor de cadeia e conferem dureza, resistência, tenacidade. Já os flexíveis são obtidos por meio da

cadeia referente ao polioliol e dão flexibilidade a PU. Esses segmentos podem ser visualizados pela Figura 6.

Figura 6 - Representação dos segmentos rígidos e flexíveis em uma cadeia polimérica de PU.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).

Características como o peso molecular dos reagentes, polidispersidade e capacidade de reticulação, também impactam no produto final, a PU. (KAUSAR, 2016; FERREIRA, 2018).

Nesse sentido, os grupamentos R1 mais comuns utilizados na síntese de PU são aqueles originados de poliéteres, poliésteres, polibutadienos e de produtos naturais, como óleos vegetais (AYRES E., 2006). Os primeiros polióis utilizados na síntese das PU foram os polióis-poliésteres, os quais fornecem alta rigidez a PU, e em condições ambiente apresentam alta viscosidade, requerendo maior processamento e, portanto, um custo mais elevado no produto final. Possuem grupos carboxílicos, o que favorece reações químicas nos seus sítios reativos (SOUZA F.M; SULAIMAN M. R.; GUPTA R. K., 2021). Posteriormente, foram inseridos os polióis-poliéteres como uma nova classe de monômeros e esses demonstraram melhor estabilidade, maior flexibilidade e maciez, além de menor custo e facilidade de manuseio para síntese do polímero. O Quadro 2 demonstra as principais vantagens e desvantagens dos polióis obtidos de diferentes fontes.

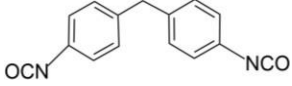
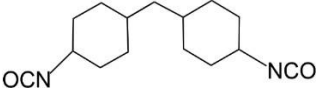
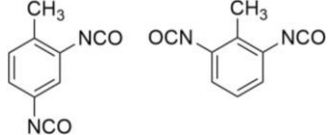
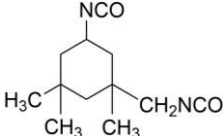
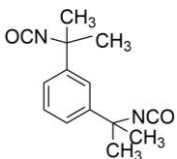
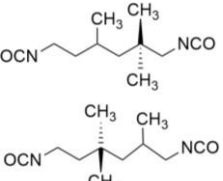
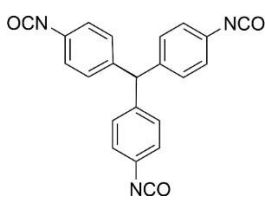
Quadro 2 – Representação das vantagens e desvantagens de polióis.

<b>Tipo de poliol</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Polióis de poliéter à base de óxido de propileno e óxido de etileno	Estabilidade hidrolítica, custo, viscosidade, flexibilidade	Estabilidade oxidativa, módulo/força, instabilidade térmica, inflamabilidade
Poliol poliéster alifático	Estabilidade oxidativa, módulo/força	Viscosidade, estabilidade hidrolítica
Poliol poliéster aromático	Retardamento de chama, módulo/rigidez	Viscosidade, baixa flexibilidade
Poliol poliéter à base de tetrahidrofurano	Estabilidade hidrolítica, estabilidade oxidativa, módulo/força	Estabilidade oxidativa, viscosidade, custo
Poliol de policarbonato	Estabilidade hidrolítica, estabilidade oxidativa, módulo/força	Viscosidade, custo
Polióis acrílicos	Estabilidade hidrolítica/oxidativa, dureza	Viscosidade, custo, baixa flexibilidade
Poliol de polibutadieno	Flexibilidade a baixa temperatura, resistência a solventes	Viscosidade, termicamente oxidável (a menos que hidrogenado), custo

Fonte: Adaptado de Sonnenschein (2015).

Em se tratando dos isocianatos, assim como os polióis, eles podem apresentar estruturas alifática e aromáticas. Os mais utilizados para síntese de PU são o diisocianato de tolueno (TDI) e o diisocianato de 4,4-difenilmetano (MDI), ambos aromáticos. (VILAR W., 1999). Esses são mais estáveis, mais resistentes à temperatura e capazes de conferir alta rigidez aos polímeros. O Quadro 3 demonstra alguns dos principais isocianatos utilizados na para síntese das PU, alguns deles sendo uma mistura de isômeros.

Quadro 3 - Principais isocianatos utilizados na indústria para síntese de poliuretanas.

Isocianatos Alifáticos/Cíclicos	Isocianatos Aromáticos
$\text{OCN}-(\text{CH}_2)_6-\text{NCO}$ <p>Diisocianato de 1,6-hexametileno (HDI)</p>	 <p>Diisocianato de 4,4'-difenilmetano (MDI)</p>
 <p>Diisocianato de 4,4'- diclohexilmetano (HMDI)</p>	 <p>Mistura dos isômeros 2,4 e 2,6 Diisocianato de tolueno 80:20 (TDI)</p>
 <p>Diisocianato de isoforona (IPDI)</p>	 <p>Diisocianato de p- tetrametilxileno (TMXDI)</p>
 <p>Mistura de isômeros 2,2,4 e 2,4,4 Diisocianato de 2,2,4-trimetil Hexametileno (TMDI)</p>	 <p>Triisocianato de 4,4,4'- trifenilmetano (TTI)</p>

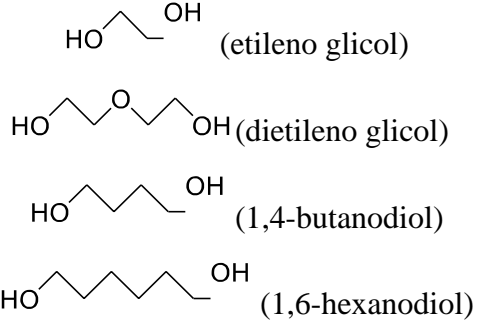
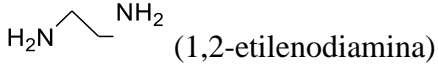
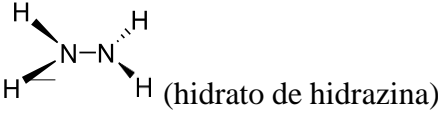
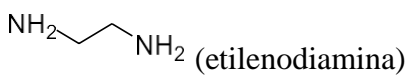
Fonte: Do autor (2022).

Além dos precursores utilizados para síntese de PU, os extensores de cadeia podem ser adicionados para adequação das propriedades finais do polímero, bem como aumentar a massa molar. Normalmente são poliamidas ou polióis de baixa massa molecular (dióis) que aumentam a cadeia polimérica, tornando-a mais rígida, além de ser capaz de aumentar a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), trazendo assim, melhor estabilidade térmica ao polímero. (VILAR W., 1999).

A estrutura molecular de um extensor de cadeia pode ser curta ou longa, aromática

ou alifática, hidrofílica ou hidrofóbica, utilizados de acordo com as propriedades que sejam requeridas. Devido à baixa massa molar e sua alta reatividade com isocianatos, essas moléculas influenciam diretamente as características de processamento, viscosidade e propriedades reológicas. Portanto, são responsáveis por promover a formação de cadeias longas no polímero, conferindo padronização e homogeneidade de propriedades na indústria. Algumas das principais estruturas de extensores de cadeia pode ser visualizada no Quadro 4.

Quadro 4 - Extensores de cadeia mais comuns.

Extensores de cadeia	Propriedades e uso conferidos ao polímero
 <p>HO-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-OH (etileno glicol)  HO-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-O-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-OH (dietileno glicol)  HO-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-OH (1,4-butanodiol)  HO-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-OH (1,6-hexanodiol)</p>	Síntese de polímeros de elastômeros, com características viscosas e elásticas
 <p>H<sub>2</sub>N-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub> (1,2-etilenodiamina)</p>	Elasticidade
 <p>H<sub>2</sub>N-NH-NH<sub>2</sub> (hidrato de hidrazina)</p>	Maciez
 <p>NH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-NH<sub>2</sub> (etilenodiamina)</p>	Alta dureza, resistência química e a solvente

Fonte: Do autor (2022)

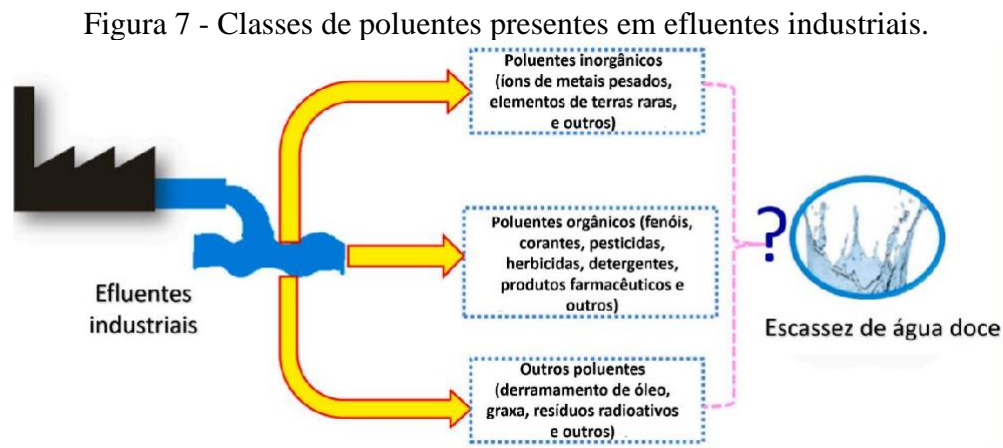
### 2.2.1 Poliuretanas: Aplicações ambientalmente amigáveis

As PU, além de apresentarem diversas finalidades na indústria e chamar a atenção de diversos pesquisadores devido a uma infinidade de propriedades para diferentes aplicações, a sua relevância em aplicações ambientalmente amigáveis vem ganhando destaque. Um dos exemplos se dá por meio da utilização dessa classe de materiais como materiais adsorventes no tratamento de corpos d'água contaminados com vários poluentes ambientais de origem orgânica e inorgânica de procedências naturais e antropológicas



(industrial, residencial, agricultura e outras). A sorção, fenômeno por trás da remoção de contaminantes de meios aquosos, será abordado em uma seção posterior.

A Figura 7 demonstra alguns dos principais poluentes encontrados em efluentes industriais em corpos hídricos.



Fonte: Adaptado de Selvasembian (2021).

De maneira geral, os processos de separação e pré-concentração dessa grande variedade de poluentes em corpos hídricos podem ser realizados por poliuretanas na sua forma de espuma (PUF), que possuem características moduláveis por meio de combinação de diferentes precursores, custo acessível, alta eficiência de remoção, principalmente as que apresentam célula porosa aberta, ou seja, possuem alta porosidade (espaços vazios) e podem abrigar partículas de contaminantes. Sua estrutura com membranas arredondadas é propícia para promover alta velocidade de difusão de espécies químicas, em contraposição à materiais sólidos e granulares

Nesse sentido, dada a grande variedade de poluentes encontrados, as propriedades das PU mais adequadas para melhor remoção de determinado contaminante dependerá das características específicas de tal contaminante, como o tamanho da molécula, íons e a natureza do grupo funcional presente, bem como das propriedades do meio (ALVES C. C. O., 2012). As propriedades das PU que mais influenciam nesse processo são a área de superfície específica, porosidade, hidrofobicidade, grupos funcionais de superfície, carga superficial, cristalinidade e microestrutura (KALAIVANI et al., 2016; VIEIRA AMORIM et al., 2021).

Uma grande área de superfície específica aumenta o número de sítios de interação entre a PU com o contaminante por grama de material, melhorando a performance de remoção. Também, quanto maior a porosidade, melhor é a remoção de poluentes, porém a

acessibilidade aos poros não depende somente do tamanho deles, mas da estrutura molecular das espécies a serem removidas. Para compostos orgânicos em geral, como óleos, gorduras e afins, quanto maior for a hidrofobicidade das PU, maior é a sua porcentagem de remoção em águas residuárias (SELVASEMBIAN et al., 2021). Em relação aos grupos funcionais de superfície e carga superficial, essas propriedades controlam o mecanismo de remoção dos contaminantes, visto que as PU são carregadas em elétrons, o que normalmente facilita a interação com poluentes carregados positivamente, como íons metálicos e cátions. Outros estudos relataram que quanto mais heterogênea for a estrutura das PU (baixa cristalinidade), melhor é o acesso dos contaminantes metálicos a suas microestruturas (SARANYA M. et al., 2017).

O primeiro estudo relatando sorção e pré-concentração de contaminantes por PU foi em 1970, por Bowen, que mostrou a potencialidade desses polímeros na química de separação em soluções aquosas (BOWEN, 1970). Após esse estudo, foi publicado um livro contendo trabalhos de 1970-1985 que abordavam essa temática (BRAUN T.; JAMES D.; FARAG B., 1985). Um dos exemplos desse estudo foi o uso de espumas de poliuretano para extração de metais nobres, como a separação do paládio e extração da platina de solução de tiocianato (AL-BAZI; CHOW, 1982), com foco de aplicação mais voltado para metodologias analíticas.

No Brasil, o primeiro trabalho envolvendo espumas de poliuretano para extração e concentração de contaminantes (Ga, U, Th, Hg), em 1990 (CARVALHO M. S., 1993). A partir de então novos estudos foram sendo desenvolvidos, como espumas de poliuretano empregadas para extração e concentração de molibdênio de água do mar (FERREIRA, 2003) e também sorção de Au em PUF para aplicações analíticas (PEREIRA, 2014).

Atualmente os estudos envolvendo PUF para pré-concentração de elementos e compostos vem demonstrando ainda mais o potencial desses materiais (MANABE et al., 2021), como é possível perceber pelo Quadro 5 a grande variedade de compostos químicos que podem ser removidos por meio de espumas de poliuretano.

Quadro 5 - Representação da imensa aplicabilidade de espumas de poliuretano na remoção de diversos contaminantes.

Descrição da PUF	Contaminante	Referência
PUF com composto de óxido de ferro grafenomeso	Acetona, óleo de feijão, clorofórmio, óleo diesel, dimetilformamida, dimetilsulfóxido, óleo lubrificante, tetra-hidrofurano, tolueno	Anju; Renuka (2020)
PUF revestido com filme de quitosana	Corante Azul Reativo	Centenaro e colaboradores (2017)
Nanofibrilas de celulose carboximetiladas incorporadas em PUF	Cu <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> , Pb <sup>2+</sup>	Hong e colaboradores (2018)
Nanopartículas de óxido de ferro incorporadas em um PUF poroso	Arsênico	Hussein; Abu-zahra (2016)
PUF modificada com concha do mar	Solventes orgânicos (acetato de etila, etanol, acetona, 2-propanol) Óleo (azeite, óleo cru, óleo de gergelim, óleo hidráulico, óleo cozido)	Jamsaz; Goharshadi, (2020)
PUF baseado em derivado de dopamina	Azul de metileno	Jin e colaboradores (2020)
PUF com Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ácido oleico óxido de grafeno	Clorofórmio, tolueno, azeite, óleo de canola, acetona, querosene, yadavaran, tetraidrofurano, dehloran, hexano, DMSO,	Khalilifard; Javadian (2020)
PUF modificada com carvão	Verde brilhante	Kong e colaboradores (2016)
PUF à base de nanohiskers de celulose	Azul de metileno	Kumari e colaboradores (2016)
PUF	Vermelho Direto 80 e Azul Reativo 21	Neta J. J. S. e colaboradores (2011)
PUF modificado com nanoargila	Óleo	Nikkhah e colaboradores (2015)

Fonte: Adaptado de Selvasembian e colaboradores (2021).

Nesse cenário, um dos compostos que tem recebido bastante atenção são os corantes obtidos de fontes petroquímicas, devido a sua alta nocividade aos seres humanos, fauna e flora. Sua estrutura química bastante complexa, e a indústria, principalmente a têxtil, é responsável por lançar grande quantidade de efluentes contendo essa classe de poluentes.

### 2.3 Panorama sobre os corantes e impactos ambientais

Apesar do uso dos corantes sintéticos ter se intensificado com o advento das Revoluções Industriais, a utilização de corantes pelo ser humano é visualizada desde os períodos pré-históricos relatados há mais de 30.000 anos, por meio das pinturas rupestres, porém, sua origem até hoje é controversa (MELLO; SUAREZ, 2012). Sabe-se, no entanto,

que esses corantes eram de origem natural, normalmente derivados de moluscos, folhas, flores, frutos, raízes e matéria-orgânica em geral (ZOLLINGER, 1987). Seu uso se estendeu ao longo dos anos por civilizações antigas como no Egito por meio dos hieróglifos, pela Grécia, Roma e pela China em 2600 a.C. Dessa forma, os corantes passaram a ser um grande instrumento para o desenvolvimento da escrita e da arte em geral. Com o advento do século XIX, a síntese do primeiro corante sintético, a malveína,

foi realizada acidentalmente pelo estudante químico inglês, William Henry Perkin, o qual, partir do precipitado obtido da oxidação do sulfato de anilina, que em contato com álcool etílico na vidraria, originou uma coloração roxa capaz de tingir tecidos como a seda. (MARTINS, 2021). A partir de então, o uso de corantes sintéticos foi escalonado em grande quantidade pela indústria e diversas tonalidades foram criadas. Segundo Watanabe (2021), existem cerca de 100.000 corantes sintéticos no mundo e sua produção chega a 1 milhão de toneladas por ano.

Nesse cenário promissor do uso de corantes, o seu emprego foi intensificado para diversos setores, como o de cosmético, papel e celulose, alimentício, têxtil, farmacêutico e outros, sendo que o setor têxtil corresponde a mais de 70% da produção anual (BURKINSHAW; SALIHU, 2013) e, portanto, promove maior descarte de efluentes que contêm corantes em sua constituição. (DILARRI et al., 2016).

Nesse sentido, a alta concentração desses corantes em efluentes dificulta a penetração da luz solar nas camadas mais profundas de meios aquáticos e altera a atividade fotossintética do meio. Isso provoca a deterioração da qualidade da água por meio da diminuição da solubilidade de oxigênio, como também alteração das propriedades físico-químicas, como pH, temperatura. Assim, além do impacto direto na água, o solo também é afetado, visto que corantes sintéticos possuem alta solubilidade, estabilidade, toxicidade além de difícil degradabilidade (luz, oxigênio, calor e pH). (ALBUQUERQUE et al., 2021; BELTRAME, 2000; LALNUNHLIMI; KRISHNASWAMY, 2016).

Também os efluentes com corantes apresentam enorme impacto na saúde do ser humano, visto que podem afetar vários órgãos vitais (cérebro, rim, fígado, coração) e sistemas (respiratório, imunológico, reprodutivo). Podem até mesmo causar doenças por meio do contato direto através da inalação, e desenvolver problemas respiratórios, asma, alergia, náusea ou irritação e dermatite da pele e dos olhos. Também podem ser agravadas por modo indireto, através da cadeia alimentar, e desenvolver doenças como tuberculose, hemorragia, mutações genéticas e até mesmo câncer. (KHAN; MALIK, 2018; YADAV, 2014)

Para tentar amenizar os efeitos nocivos ao ambiente, existem legislações a nível Federal e Estadual que especificam as condições de descarte dos efluentes em corpos hídricos. O órgão vigente Federal é o CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, o qual determina que os próprios causadores da poluição são os responsáveis por realizar o tratamento de seus efluentes antes de retorná-los a corpos hídricos. De acordo com Brasil (2005), é especificado algumas condições que o efluente deva apresentar. Para isso, uma vez descartado em corpos hídricos, esse não deve alterar os valores estabelecidos pelo órgão e não pode comprometer as características das águas receptoras e a biota ali presente.

Até o ano de 2010, a legislação vigente era a Resolução CONAMA n. 357 de 2005 que determinava alguns padrões e condições de lançamento desses efluentes em corpos hídricos receptores (mares, rios, lagos, lagoas naturais e córregos) (BRASIL,2005). No ano de 2011, a legislação foi alterada por meio do Art. 16 ° que passou a exigir que efluentes devem ser tratados adequadamente e somente após devem ser avaliados perante aos limites estabelecidos. Um ponto sobre a legislação de 2011, é que de acordo com o Art. 34, os efluentes não podem causar aos corpos d'água águas efeitos que comprometam a reprodução ou fisiologia da vida e nem a restrição de seus usos.

Para coloração, o que se tem em relação à Legislação é que a quantidade máxima permitida de lançamento de corantes aos corpos hídricos de água doce seja 75 mg Pt/L. (BRASIL, 2011). Essa unidade, também conhecida como Uh (unidades Hazen) foi criada com o intuito de padronizar a indicação da carga de poluentes e a coloração em águas residuárias, principalmente as que contém tons amarelados e matéria orgânica e representa miligramas de platina por litro. A metodologia empregada é titular a amostra com uma solução padrão de cloroplatinato de potássio. Além disso, outros limites estabelecidos podem ser visualizados pelo Quadro 6.

Quadro 6 - Limites estabelecidos para o lançamento de efluentes.

<b>Parâmetro</b>	<b>Condição aceitável</b>
pH	Entre 5 e 9
Temperatura	Inferior a 40 °C
Materiais sedimentáveis	Até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone imhoff
DBO <sub>5,20</sub>	Remoção mínima de 60%
Regime de lançamento	Vazão máxima até 1,5 vezes a vazão média do período de atividade diária

Fonte: Brasil (2011).

No entanto, apesar da legislação estar mais rigorosa em relação à resoluções anteriores e haver muitos estudos que provam a nocividade de efluentes aquosos que não são devidamente tratados, alguns autores relatam não haver valores limites únicos para

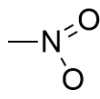
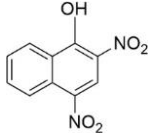
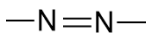
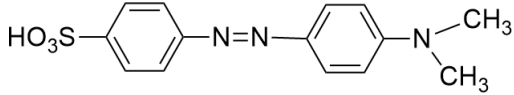
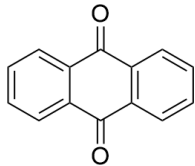
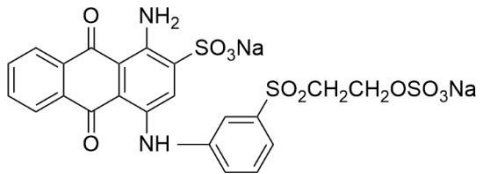
corantes e aditivos em diferentes países e que os métodos de análise empregados ainda são arcaicos, por meio de análise comparativa com soluções padrão. No entanto, não somente a descoloração (por métodos químicos/biológicos) é eficaz para tratamento de efluentes com corantes, visto que para o seu processo reacional pode ocorrer a formação de produtos parciais que podem ser tão ou até mesmo mais prejudiciais do que os próprios corantes. (ZANONI M. V. B; YAMANAKA H., 2016). Portanto, é necessário o uso de técnica eficazes na sua remoção das águas residuárias.

#### **2.4 Classificação dos corantes**

Dando enfoque para os corantes têxteis pela sua contribuição na composição dos efluentes em geral, esses podem ser classificados pela sua estrutura química ou pela sua interação com fibras e tecidos.

Os corantes são divididos em cromóforos e auxocromos. Os cromóforos são divididos em algumas classes como antraquinona, azo, nitro e outros. São capazes de promover a absorção de radiação visível permitir a percepção da cor. Normalmente são compostos por insaturações conjugadas, como  $-C=C-$ ,  $-C=N-$ ,  $-C=O-$ ,  $-N=N-$ ,  $-NO_2$  e  $-NO$ . Já em relação aos auxocromos, eles se ligam aos cromóforos por meio de doação ou recepção de elétrons e são responsáveis por alterar a capacidade da absorção da luz, modificando a intensidade da cor. Normalmente são ácidos e bases que podem formar sais e garantem resistência a degradação de luz e água (Rodrigues J., 2018). Os grupos mais comuns para essa finalidade são  $-NH_2$ ,  $-NR_2$ ,  $-NHR$ ,  $-COOH$ ,  $-SO_3H$ ,  $-OH$  e  $-OCH_3$ . (LEAL, 2011). O Quadro 7 demonstra alguns grupos cromóforos e estrutura molecular dos corantes de alguns corantes mais comuns.

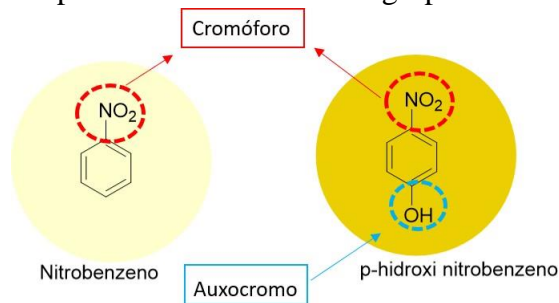
Quadro 7- Classificação dos corantes segundo a sua estrutura química.

Classe	Cromóforo	Estrutura Molecular
Nitro		
Azo		
Antraquinona		

Fonte: Do autor (2011).

Um exemplo é que o benzeno não apresenta cor, mas a presença do grupo nitro ( $-\text{NO}_2$ ) é capaz de conferir a ele uma coloração amarela pálida. Porém, a presença do auxocromo hidroxila ( $-\text{OH}$ ) aumenta a sua intensidade, tornando-a mais voltada para a cor mostarda, como é possível visualizar pela Figura 8.

Figura 8 - Esquema que representa a finalidade dos grupos cromóforo e auxocromo.



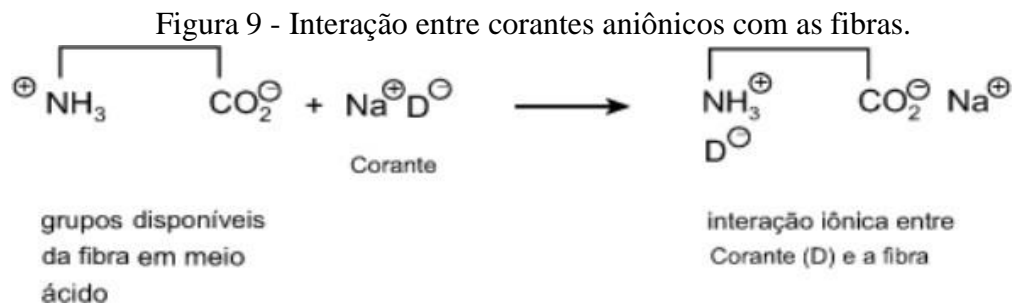
Fonte: Do autor (2022).

Outra forma de classificar os corantes é com relação à fixação com fibras e tecidos, como descrito nas subseções a seguir.

#### 2.4.1 Corantes ácidos ou aniônicos

Os corantes ácidos são aqueles que são fixos as fibras em um meio ácido ou neutro

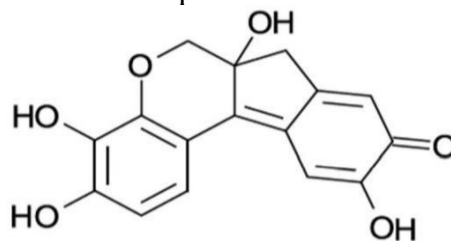
por meio das interações entre as fibras dos tecidos (catiônicas) e os sítios dos corantes (aniônicas) por meio de interações iônicas, van de Waals e até mesmo pontes de hidrogênio. Apresentam alta solubilidade e possuem ao menos um grupo sulfônico ( $-\text{SO}_3^-$ ) (SILVA, 2018). São exemplos de fibras que possuem afinidade por esses corantes as oriundas de proteína animal, como poliamida, lã, seda e couro e também de fontes sintéticas como o nylon. (ZANONI M. V. B; YAMANAKA H., 2016). Normalmente, de acordo com a interação entre os elétrons livres presentes nas fibras não protonadas, como os grupos amino e carboxilatos com os corantes ácidos. (GUARATINI; ZANONI, 2000). É possível verificar essa interação a partir da Figura 9.



#### 2.4.2 Corantes básicos ou catiônicos

Os corantes básicos apresentam uma coloração brilhante. Em contrapartida, são opostos aos ácidos, visto que possuem sítios catiônicos (positivos) e se interagem as fibras de tecidos aniônicos (negativos). As interações que as regem são iguais as relatadas pelos corantes ácidos, porém devido a sua baixa solubilidade, deve ser adicionado ácido acético para aumentá-la e favorecer o contato fibra-corante (GUARATINI; ZANONI, 2000; SILVA, 2018). A Figura 10 demonstra a estrutura química de um corante básico.

Figura 10 - Estrutura química de um corante básico.

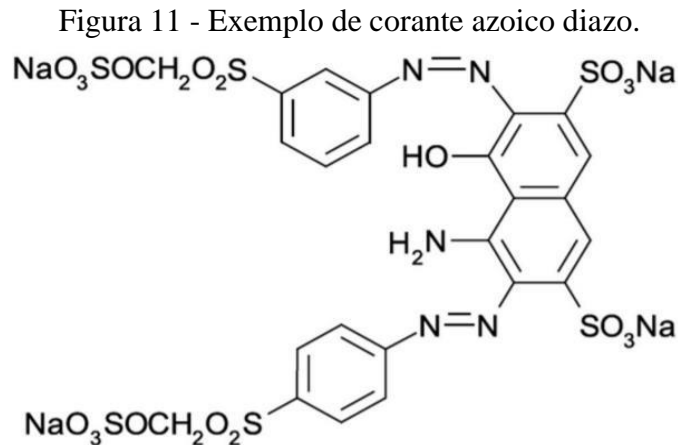


Fonte: Nascimento e colaboradores (2017).



### 2.4.3 Corantes azoicos

Os corantes azoicos, pelo próprio nome, apresentam pelo menos um grupo azo em sua constituição ( $-N=N-$ ). Podem ser classificados como monoazo, diazo, triazo e poliazos, conforme a quantidade de grupamentos azos, porém os mais comuns são os monoazos (GENG et al., 2015). Representam a maior parte dos corantes sintéticos encontrados na indústria devido a sua facilidade de produção e possuem inúmeras cores. São insolúveis em água e é necessário sintetizá-lo diretamente sobre os poros da fibra, como a celulose. Para tal tingimento, é necessário adicionar um agente de acoplamento que tenha alta afinidade pela fibra, como o naftol e também um sal de diazônio ( $RN_2^+$ ) solúvel, responsável por reagir com esse o agente de acoplamento e permitir então a produção do corante. Normalmente o corante é bastante estável à luz e umidade e por esse motivo, sua degradação não é completa, apresentando alta toxicidade. (GUARATINI; ZANONI, 2000; MARIA V. BOLDRIN ZANONI; HIDEKO YAMANAKA, 2016; SILVA, 2018). A Figura 11 representa um exemplo de corante azoico diazo. (KLEIN, 2013).



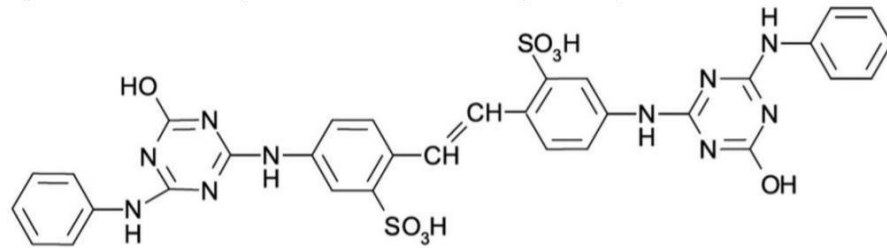
Fonte: Nascimento e colaboradores (2017).

### 2.4.4 Corantes branqueadores

Os corantes branqueadores conhecidos também como branqueadores ópticos e branqueadores fluorescentes são capazes de diminuir a absorção do comprimento de onda de fibras orgânicas que podem ser decompostas. Após esse processo, apresentam uma coloração amarelada e portanto, a presença de corantes branqueadores, que contém grupamentos carboxílicos, azometino ( $-N=CH-$ ) ou etilênicos ( $-CH=CH-$ ) que se ligam a hidrocarbonetos aromáticos como benzenos, naftenos, pirenos benzênicos, e são capazes

de diminuir a cor por meio de reflexão de luz ultra-violeta. A Figura 5 demonstra um exemplo de corante branqueador.

Figura 12 - Exemplo de um corante branqueador.

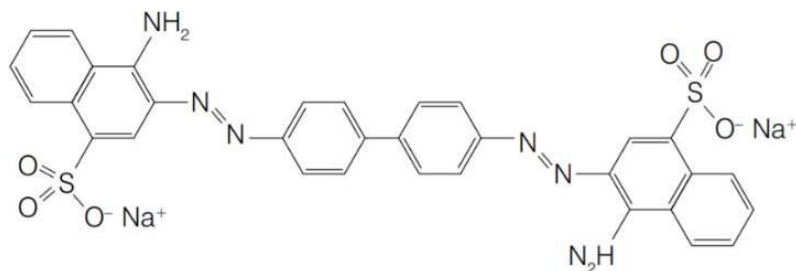


Fonte: Nascimento e colaboradores (2017).

#### 2.4.5 Corantes diretos

Os corantes diretos são solúveis em água e se ligam as fibras de celulose como algodão e viscose por meio de interação de Van der Waals em meios alcalinos ou neutros. Seu uso também pode estar presente nas indústrias de papel e celulose. (GUARATINI; ZANONI, 2000; LEAL, 2011; NASCIMENTO R. F. et al., 2017; SILVA, 2018). Por apresentar estrutura plana e normalmente ligações duplas conjugadas, a sua adsorção às fibras é favorável e pode ser auxiliada pela presença de eletrólitos ou mordentes. Sua estrutura é composta por mais de um grupamento azo ou pré-transformados em complexos metálicos e a principal vantagem de seu uso é que pela forte interação com a fibra, há a diminuição da quantidade de corante eliminada em efluentes e consequentemente em águas residuárias. (LEAL, 2011). A Figura 13 demonstra um exemplo de corante direto.

Figura 13 - Exemplo de corante direto - Vermelho Congo.

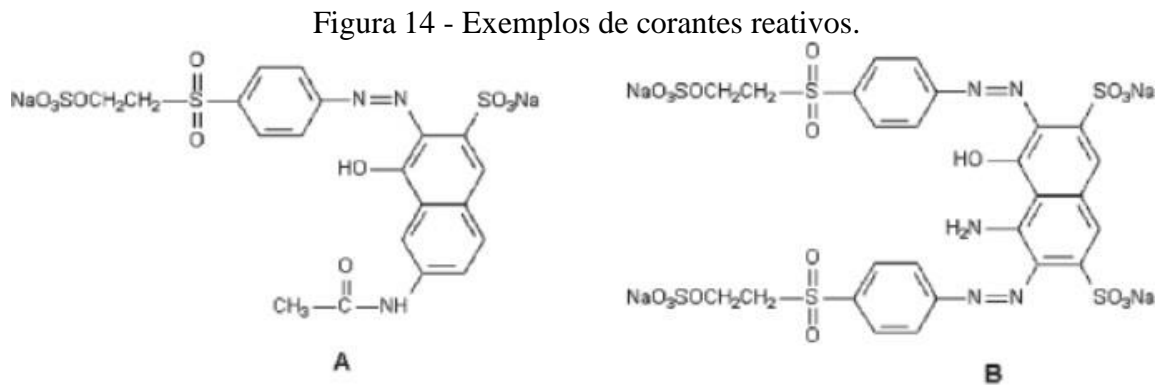


Fonte: Rodrigues K. e colaboradores (2010).

### 2.4.6 Corantes reativos

Essa classe de corante é bastante solúvel em água e apresentam grupos eletrofílicos reativos (clorotriazinila e sulfatoetilsulfonila) capazes de realizar ligação covalente com oxigênio, enxofre e nitrogênio presente nas fibras de celulose, bem como as poliamidas por meio do calor e pH. (GUARATINI; ZANONI, 2000)

Apresentam como grupos cromóforos grupamentos azo e antraquinona. A Figura 14 demonstra dois exemplos de corantes reativos.

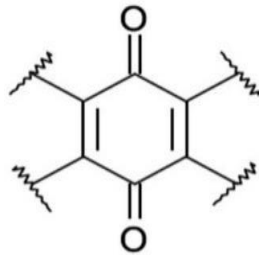


Legenda: A – Corante Laranja Reativo 16; B – Corante Preto Reativo 5; Brillhante 3G-P.  
Fonte: Adaptado de Souza e Peralta-Zamora (2005).

### 2.4.7 Corantes à cuba

Corantes a cuba são os grupos mais antigos encontrados. São insolúveis em água, porém podem interagir com fibras proteicas e se tornarem solúveis por meio da sua redução com o ânion ditionito ( $S_2O_4^{2-}$ ) em solução básica, como hidróxido de sódio (NaOH) e com outros agentes (eletrólitos e sulfeto de hidrogênio ou de sódio). Em seguida, por meio de processos oxidativos, como o ar, o composto solúvel pode retornar-se a sua forma original apresentando um ou mais grupamentos cetônicos, tornando-se assim insolúvel à água e aderido à fibra. Porém, nesse processo, há geração de hidrossulfito de sódio ( $Na_2S_2O_4$ ), o que está causando a diminuição de seu uso em escala industrial, pois traz sérios problemas ambientais. A Figura 15 demonstra um exemplo estrutural de um corante a cuba.

Figura 15 - Exemplo estrutural de um corante à cuba.

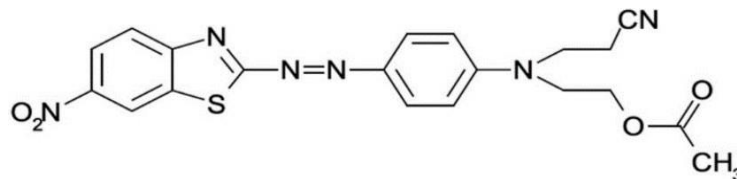


Fonte: Nascimento e colaboradores (2017).

#### 2.4.8 Corantes dispersivos

São conhecidos como corantes não iônicos e insolúveis em água. São aplicados em fibras sintéticas como nylon, poliéster, acetato de celulose e outros, por meio de suspensão. Assim, para interação com as fibras, os corantes dessa classe sofrem hidrólise e seu precipitado é fixado à fibra. Esse processo normalmente ocorre por meio da adição de agentes dispersantes com cadeias longas ou por termofixação em condições extremas de pressão e temperatura. (SILVA, 2018; ZANONI M. V. B; YAMANAKA H., 2016). A Figura 16 demonstra um exemplo de corante dispersivo.

Figura 16 - Estrutura química de um corante dispersivo.



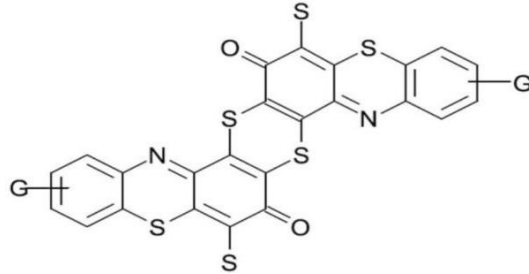
Fonte: Nascimento e colaboradores (2017).

#### 2.4.9 Corante de enxofre

Os corantes de enxofre ou sulfurosos são insolúveis em água e seu processo de aderência a fibra é semelhante aos corantes à cuba, em que é necessária redução com  $S_2O_4^{2-}$  e posterior oxidação e formação da estrutura química polissulfeto ( $-S_n-$ ) após sua interação com fibras normalmente celulósicas. Possuem inúmeras colorações entre elas, marrom, preto, verde oliva e azul marinho. No entanto, geram compostos tóxicos ao ambiente e seu uso também vêm-se tornando mais escasso (UEDA, 2006; MARIA V. BOLDRIN ZANONI; HIDEKO YAMANAKA, 2016; SILVA, 2018). A Figura 17

demonstra a estrutura de um corante de enxofre.

Figura 17 - Estrutura química de um corante de enxofre.

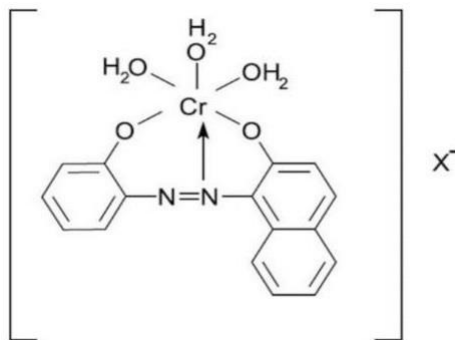


Fonte: Nascimento e colaboradores (2017).

#### 2.4.10 Corantes pré-metalizados

Esses corantes são utilizados para tingimento de fibras animais e poliamidas. Em sua composição apresentam um grupo hidroxila ou carboxila em posição orto ao grupo cromóforo azo, o que facilita a interação deles com íons metálicos, como cromo, cobre, cobalto e níquel, formando complexos de coordenação bastante estáveis. Devido a esse fato, possuem índice de aderência de até 95% às fibras, podendo até mesmo ser reutilizado. No entanto, o seu uso está se restringindo devido a quantidade elevada dos metais citados em efluentes. A Figura 18 apresenta um exemplo do complexo gerado com o corante pré-metalizado.

Figura 18 - Estrutura do complexo gerado com interação do íon metálico cromo.



Fonte: Nascimento e colaboradores (2017).

#### 2.5 Estimativas de perdas de corantes em águas residuárias

Como foi possível perceber, os corantes sintéticos interagem de diversas formas com as fibras de tecidos e podem ser mais brandas e até mesmo mais intensas. Esse fator irá influenciar diretamente na presença desses corantes em efluentes como está apresentado

na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação do corante, tipo de interação e presença em efluentes.

Tipo de corante	Tipo de fixação à fibra	Estimativa de perda em efluentes (%)
Acido	Ligações iônicas	5 -20
Pré-metalizados	Ligações iônicas	2-10
Diretos	Ligações iônicas	5-30
Básicos	Ligações iônicas	0-5
Dispersos	Impregnação coloidal, adsorção	0-10
Reativos	Ligações covalentes	10-50
Enxofre	Precipitação de corante na fibra	10-40
Vat ou à Cuba	Precipitação de corante na fibra	5-20
Azoico	Precipitação de corante na fibra	2-3

Fonte: Adaptado de Santana (2009).

Os dados da Tabela 1 mostram que em uma indústria têxtil, independentemente do corante utilizado em sua produção, este ainda se encontra como vetor de poluição de corpos d'água. Assim, metodologias devem ser aprimoradas e desenvolvidas para a remoção desses corantes em efluentes.

## 2.6 Métodos para remoção de corantes de efluentes e águas residuária

Atualmente existem muitos estudos para aprimorar as tecnologias já existentes na remoção dos corantes dos efluentes, principalmente oriundos do setor têxtil, visto que são compostos altamente estáveis. Devido a sua propriedade de absorção de luz na região do espectro visível, os corantes são perceptíveis a olho nu, mesmo em concentrações baixas como 1 mg/L. Nesse sentido, várias metodologias vêm ganhando destaque para remoção da cor de efluentes. (GUARATINI; ZANONI, 2000)

Para a remoção de corantes em efluentes e/ou em águas residuárias, existem diversas tecnologias empregadas, dentre elas a filtração por membrana, troca iônica, precipitação química, oxidação, osmose reversa, ozonização, coagulação e floculação, adsorção e degradação biológica. No entanto, o tratamento biológico muitas vezes possui menor eficiência na remoção de corantes e contaminantes em geral, além de necessitar de áreas grandes para operação do tratamento e a estar suscetível a variações climáticas e da

toxicidade do meio. (TRAN et al., 2017). Também, tratamentos com precipitação química, coagulação, floculação e oxidação são onerosos e em alguns casos geram grande quantidade de lodo. (CRINI, 2006)

Os diversos processos de separação por membranas, bem como a adsorção, se encaixam nos processos físicos de tratamento. Grande quantidade de estudos presentes na literatura descreve o processo de adsorção como sendo o mais popularmente empregado para o tratamento de efluentes com elevadas solubilidade e estabilidade química, produzindo um efluente final de alta qualidade.

Assim, a separação por membranas e a adsorção são técnicas de remoção físicas bem-sucedidas para essa finalidade. Porém, a adsorção apresenta mais estudos encontrados na literatura devido a geração de efluentes com baixas concentrações de contaminantes e facilidade de utilização. Nesse sentido, essa técnica apresenta resultados bastante eficazes e demonstra aplicação bastante simples de ser implementada na indústria. (CRINI, 2006). Inicialmente os adsorventes eram bastante caros, principalmente os carvões ativados de origem sintética. No entanto, com o desenvolvimento de vários estudos, provou-se que o uso de materiais alternativos como as PU pode ser tão eficaz quanto os carvões na remoção de corantes. (PIQUET; MARTELLI, 2022)

O Quadro 8 resume alguns dos métodos de separação físico-química mais comuns para remoção de corantes e apresenta a vantagem e desvantagens dessas metodologias.

Quadro 8- Vantagens e desvantagens das metodologias empregadas para remoção de corantes.

<b>Metodologia</b>	<b>Descrição</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Adsorção	Formados a partir de materiais de alta capacidade de adsorção para adsorver moléculas de corante.	Excelente método de remoção para uma ampla variedade de corantes. Adsorvente regenerável.	Os adsorventes podem ser caros (No entanto estudos estão sendo realizados e comprovam diminuição de custo) Em alguns casos possui cinética desfavorável
Ozonização	O uso do ozônio é capaz de reagir com grande classe de compostos devido a seu alto potencial de oxidação, superior ao peróxido e cloro.	Aplicação em fase gasosa sem alteração do volume	Tempo de meia-vida curto (20 min) e forma ácidos carboxílicos como produtos de degradação

(Continua...)

(Continuação...)

<b>Metodologia</b>	<b>Descrição</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Coagulação e floculação	Os agentes indutores de coagulação/floculação são adicionado à água residual de tingimento onde as partículas de corante se aglomeram. Os aglomerados podem então ser removidos por filtração.	Barato. Método robusto. Adequado apenas para efluentes de corantes dispersos, sulfurosos e de cuba.	Geração de grandes quantidades de lodo concentrado. Não adequado para efluentes de corantes ácidos, azo, básicos e reativos.
Troca iônica	Um processo químico reversível pelo qual os íons das águas residuais do corante trocam com íons semelhantes ligados a uma superfície sólida estacionária.	Pode ser regenerado. Bom método de remoção de corante. Produz água de alta qualidade.	Eficaz para um número limitado de corantes
Irradiação	A radiação é usada para remover as moléculas de corante das águas residuais de corante.	Eficaz em escala laboratorial.	Uma enorme quantidade de oxigênio dissolvido é necessária.
Filtração por membrana	A água residual do corante é passada através de uma membrana que separa as partículas de corante da água limpa.	Eficaz para recuperação e reutilização de água.	Investimento inicial caro. Fácil incrustação da membrana. Produz lodo concentrado. Inadequado para remoção de corante.
Nanofiltração e ultrafiltração	As águas residuais de tingimento são passadas através de uma membrana que separa as partículas do corante e torna a água limpa.	Pode remover qualquer tipo de corante	Alto custo. Alto consumo de energia. Poros da membrana constantemente obstruídos por moléculas de corante. Requer alta pressão. Curto tempo de vida.
Osiose Reversa	Sistema acionado por pressão onde a água é passada através de uma membrana extremamente fina deixando contaminantes de um lado e água do outro.	Método comum de reciclagem de água. Eficaz para descolorir e dessalinizar uma variedade de corantes. Produz água limpa e pura.	Dispendioso. Requer alta pressão

Fonte: Adaptado de Katheresan; Kansedo; Lau, (2018) e Robinson e colaboradores (2001).

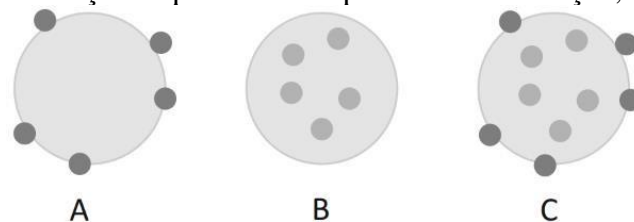


## 2.7 Adsorção: conceitos e aplicações em remediação ambiental

A adsorção em fase sólida é um dos métodos físico-químicos mais conhecidos atualmente para tratamento de água contaminadas e vem sendo cada vez mais estudado devido a sua importância prática na indústria e na conservação ambiental. (MOREIRA S. A., 2008). Trata-se de uma operação de transferência de massa baseada na capacidade que materiais sólidos têm de concentrarem em sua superfície (ou em alguns sítios ativos intrapartícula), substâncias presentes em soluções aquosas ou misturas de gases, o que permite a separação desses componentes do fluido. (MCCABE W. L.; SMITH J. C.; HARRIOTT P., 1993; RABOCKAI T., 1979)

Os componentes que se encontram na superfície dos materiais sólidos são conhecidos como adsorvatos e o material sólido, de adsorvente. Em alguns casos, pode ocorrer adsorção acompanhada por absorção, por meio da transferência do componente da fase fluida para dentro da fase sólida, sendo mais adequado o termo sorção nesse caso para tratar de fenômenos de remoção envolvendo sólidos. A Figura 19 demonstra a diferença entre os processos de adsorção, absorção e sorção.

Figura 19 - Representação esquemática do processo de adsorção, absorção e sorção.



Legenda: A – Adsorção; B – Absorção; C – Sorção.

Fonte: Adaptado de Rist (2018).

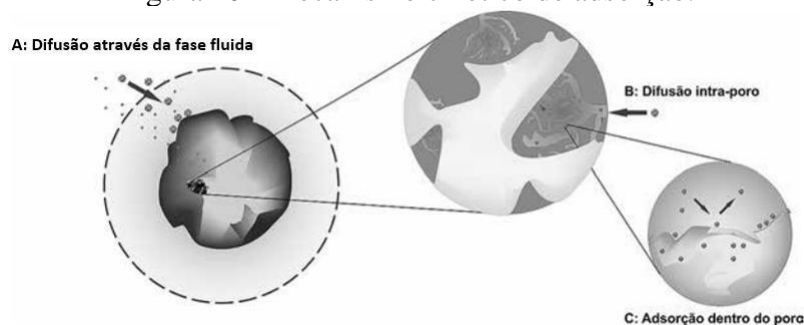
As propriedades do adsorvente influenciam no processo de adsorção, mas as condições do meio também devem ser levadas em consideração, como o potencial hidrogeniônico (pH), temperatura, concentração inicial do soluto, tempo de contato entre adsorvente e adsorvato, além das propriedades do próprio adsorvato, como polaridade, hidrofobicidade, tamanho da molécula, presença de íons e grupos funcionais. (ALMEIDA, 2017; COONEY D. O., 1999). No entanto, alguns pesquisadores demonstraram que o pH e a presença de adequados grupos funcionais são as mais influentes para o processo de adsorção. (ALVES C. C. O., 2012) Esse é controlado por meio de três mecanismos sendo eles o estérico, de equilíbrio e cinético (RIST S.; HARTMANN N. B., 2018).

O mecanismo estérico está relacionado com a porosidade do material adsorvente, visto que o tamanho dos poros influencia diretamente nas moléculas que podem se interagir com ele. Um exemplo se dá com o interesse de adsorção de compostos de um fluido que apresentam moléculas de tamanhos grande e pequeno, em que se deseja adsorver somente as pequenas. A escolha de um adsorvente com o tamanho dos poros mais próximo a essas dimensões, deve ser escolhido.

O mecanismo de equilíbrio está relacionado com a habilidade dos componentes interagirem com os adsorventes, estabelecendo uma relação de concentração adsorvida e não adsorvida do contaminante. Por exemplo, caso haja em um meio cátions e ânions e o adsorvente esteja carregado negativamente, os cátions irão tender a ser atraídos pelo adsorvente, visto que os ânions serão repelidos.

Já o mecanismo cinético está relacionado com a taxa de remoção do adsorvato da fase fluida até os sítios do adsorvente. A Figura 20 demonstra esse processo.

Figura 20 - Mecanismo cinético de adsorção.



Fonte: Adaptado de Nascimento e colaboradores (2014).

Além disso, a adsorção pode ser classificada de acordo com as interações entre adsorvato e adsorvente e pode ser considerada física ou química. A adsorção física, fisisorção ou ainda adsorção de Van der Waals, remete a interações relativamente fracas entre as moléculas da fase fluida e os sítios de adsorção da fase sólida do adsorvente e é reversível. Já na adsorção química, ou quimissorção, há a formação de ligações químicas (normalmente covalente) entre adsorvato e adsorvente por meio de transferência ou compartilhamento de elétrons e, portanto, são mais difíceis de serem rompidas e são geralmente irreversíveis (FOUST A. S.; CLUMP C. W.; WENZEL L. A., 1982). Além disso, considera-se que a adsorção química é dita como específica, pois não é toda a área superficial dos sítios ativos que são capazes de interagir quimicamente com o adsorvato. Já a adsorção física em contrapartida é inespecífica ou não localizada, significando que esta ocorre em toda a superfície do adsorvente e não somente nos sítios

ativos. (NASCIMENTO R. F. et al., 2014).

Energeticamente, a adsorção física possui variação de entalpia de adsorção ( $\Delta H$ ) em torno de 20 kJ/mol, enquanto que a adsorção química possui valores de  $\Delta H$  próximos a 200 kJ/mol (ATKINS P. W., 1994). Com exceção de alguns estudos, de maneira geral, a adsorção química é um processo exotérmico e espontâneo, e demonstrando respectivamente valores de  $\Delta H$  e energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) negativos e a redução da liberdade translacional do componente a ser adsorvido é dada por uma variação negativa de entropia ( $\Delta S$ ) (PEREIRA, 2014). O Quadro 9 compara as principais características da adsorção química e física.

Quadro 9 - Comparação entre a adsorção física e química.

<b>Adsorção física</b>	<b>Adsorção química</b>
Força de Van der Waals	Forças comparáveis a ligações químicas
Calor de adsorção inferior a 20 kJ/mol	Calor de adsorção superior a 20 kJ/mol
A espécie adsorvida conserva sua natureza	A espécie sofre transformação
A quantidade adsorvida depende mais do adsorvato do que do adsorvente	A quantidade adsorvida depende tanto do adsorvato como do adsorvente
Especificidade baixa	Especificidade elevada
Adsorção apreciável somente abaixo do ponto de ebulição do adsorvato	Adsorção pode acontecer a altas temperaturas
Energia de ativação baixa	Energia de ativação elevada
Adsorção pode acontecer em multicamada	Adsorção somente em monocamada

Fonte: Adaptado de Masel (1951).

Os critérios para adsorção física e química apresentados no Quadro 9 não são rígidos, mas se aplicam à maioria dos casos. O processo irá depender de outras moléculas no processo de adsorção, como também o solvente, a interface (gás-sólido ou líquido-sólido), sendo, portanto, necessário avaliar com cautela a energia e as interações envolvidas para classificar o processo como físico ou químico.

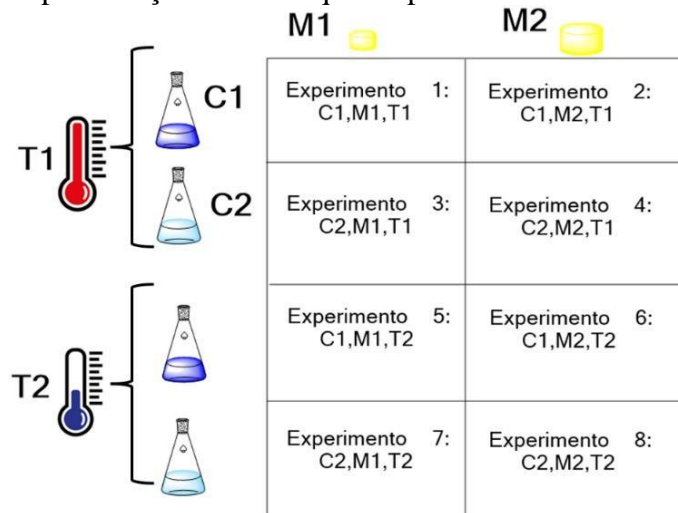
## 2.8 Estudos de adsorção: cinética e equilíbrio

### 2.8.1 Estudo estático

Nesse estudo, conhecido também como regime batelada, o volume da solução do adsorvato e do adsorvente são constantes e os resultados são obtidos em condições de equilíbrio, encontrando dados de cinética e termodinâmica do processo de adsorção. Nesse método, a maioria dos trabalhos estuda as variações nas concentrações iniciais do soluto, da dosagem (mg de adsorvente/L de solução), de temperatura do processo e do pH, a fim de otimizar o processo. Com essas informações, por meio do equilíbrio entre a fase estacionária (adsorvente) e a fase fluida (em que se encontra inicialmente o adsorvato), determina-se a capacidade máxima de adsorção, ou seja, a quantidade de material adsorvido pela massa do adsorvente (MARCHETTI et al., 2009).

A Figura 21 demonstra um esquema que representa um experimento em batelada, variando a dosagem de adsorvente (M1, M2), concentração de adsorvato (C1, C2,) e temperatura (T1, T2) e a partir desses resultados, pode-se de se obter informações importantes, como por exemplo, especificar e limitar as condições operacionais da adsorção (NASCIMENTO R. F. et al., 2014).

Figura 21 - Representação de um esquema para estudo estático de adsorção.



Fonte: Do autor (2022).

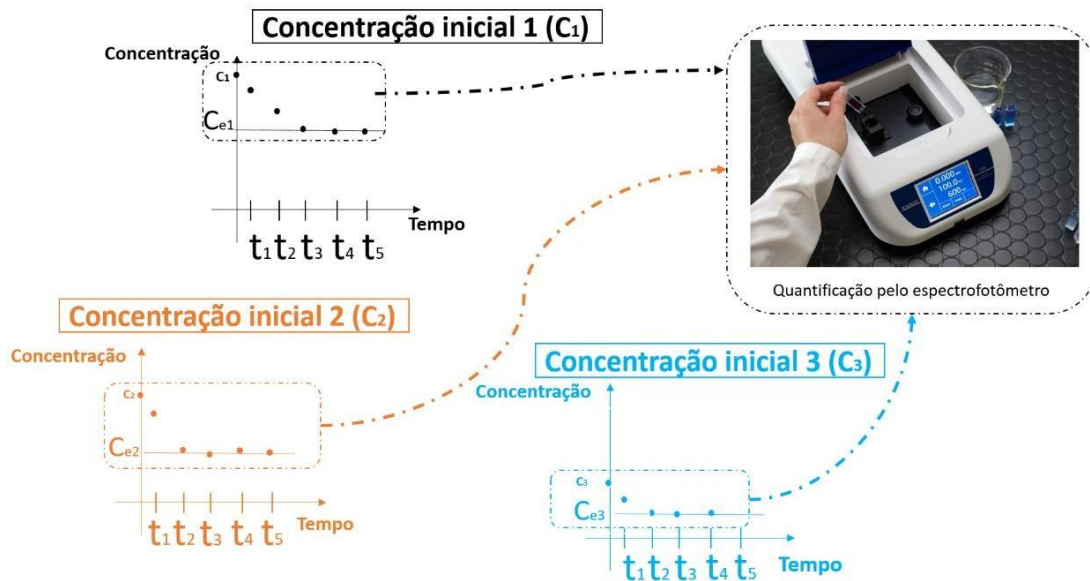
### 2.8.2 Equilíbrio de adsorção

O estudo e determinação do equilíbrio de adsorção é muito importante para poder

se identificar e descrever esse processo. Como já visto, o adsorvente passa por um processo de saturação em seus sítios ativos em que não é mais capaz de adsorver nenhuma quantidade de adsorvato, caracterizando a saturação da superfície. É essa condição em que se caracteriza o equilíbrio de adsorção e, portanto, a concentração de soluto na fase líquida é denominada de concentração de equilíbrio ( $C_e$ ) e a concentração na fase sólida é denominada capacidade de adsorção ( $q_e$ ), dada pela razão entre a massa adsorvida e massa de adsorvente.

Para determinar a condição de equilíbrio de adsorção em sistemas envolvendo corantes, utiliza-se geralmente condições fixas, como dosagem de adsorvente, temperatura, pH, e a concentração inicial de adsorvato na solução. A variação da concentração de adsorvato no sobrenadante é então monitorada ao longo do tempo, para cada concentração inicial, normalmente utilizando-se um espectrofotômetro, até que se atinja a condição de concentração constante. A Figura 22 demonstra um dos procedimentos mais usuais para determinação da condição de equilíbrio, principalmente com corantes como adsorvatos.

Figura 22 - Esquema experimental para obtenção das condições de equilíbrio.



Fonte: Do autor (2022).

Assim, após a coleta das concentrações de adsorvato no equilíbrio, é calculada a quantidade adsorvida por meio da Equação 1:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (1)$$

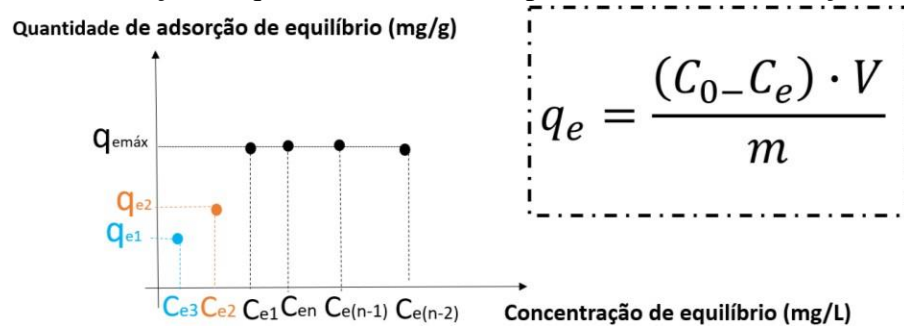
em que  $q_e$ : Quantidade adsorvida (mg/g),  $C_0$ : Concentração inicial de adsorvato (mg/L),  $C_e$ : Concentração de equilíbrio (mg/L),  $V$ : volume da solução de adsorvato adicionada (L) e  $m$ : massa de adsorvente (g).

Também é interessante dimensionar a porcentagem de remoção de adsorvato (%R) ao atingir o equilíbrio, o que pode ser observado pela Equação 2:

$$\%R = \frac{(C_0 - C_e) \cdot 100}{C_0} \quad (2)$$

É possível, portanto, construir um gráfico relacionando a variável  $q_e$  com a concentração  $C_e$ , como ilustrado pela Figura 23.

Figura 23 - Determinação da quantidade adsorvida por meio das concentrações de equilíbrio.



Fonte: Do autor (2022).

A curva construída na Figura 23 é denominada de isoterma de adsorção, mostrando, portanto, a relação de equilíbrio entre a concentração do sobrenadante e a capacidade de adsorção nessa condição (COONEY D. O., 1999). As isotermas de adsorção podem apresentar diferentes formatos e podem ser modeladas por diferentes equações matemáticas, sendo as mais utilizadas as de Langmuir (1918) e Freundlich (1906).

A isoterma de Langmuir é um dos modelos mais simples para descrever o processo de adsorção, a qual assume que cada adsorvato interage apenas com um sítio ativo formando uma monocamada (FOO; HAMEED, 2010). Esses sítios possuem energia equivalentes entre si, e considera-se que a superfície do adsorvente é homogênea (RABOCKAI T., 1979).

A Equação que rege a isoterma de Langmuir relaciona as variáveis  $q_e$  e  $C_e$  por meio de dois parâmetros:  $K_L$  (constante de afinidade de Langmuir, que expressa a relação entre as constantes de adsorção e dessorção, L/mg) e  $q_m$  (capacidade máxima de adsorção,

mg/g),  $q_e$  e pode ser observada pela Equação 3.

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

No entanto, a Equação 3, que relaciona  $q_e$  com  $C_e$  apresenta perfil não linear e muitos autores, a fim de determinar os parâmetros importantes  $K_L$  e  $q_m$ , utilizam uma linearização dessa equação, que pode ser visualizada pela Equação 4. Outros autores considerarem-na como errônea ao estimar os parâmetros e reportam em seus estudos o uso da Equação 3.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m \cdot K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (4)$$

O uso da Equação 4 se torna interessante para comparar o modelo de Langmuir com outros modelos, os quais, a partir do coeficiente de determinação entre eles, é capaz de se prever o comportamento da adsorção, principalmente no que diz respeito à monocamada ou multicamada.

A isoterma de Freundlich se trata de uma equação puramente empírica para pressões e concentrações moderadas e se aplica bem para sistemas não ideais (MCKAY, 1995). Toma como premissa que o adsorvente possui sítios ativos heterogêneos e que se interagem com mais de um adsorvato, não prevendo a saturação da superfície. (SABER-SAMANDARI; HEYDARIPOUR, 2015; SUZUKI, 1990). Ainda, alguns artigos sugerem que essa não saturação se dá a formação de multicamadas, porém não há correlação direta e nem teórica para essa afirmação. A consideração realizada pelo modelo de Freundlich considera que os sítios possuem energia adsorptivas diferentes entre si. A Equação 5 descreve o modelo de Freundlich, relacionando  $q_e$  e  $C_e$ . A forma linearizada desse modelo é apresentado na Equação 6.

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \cdot \log C_e \quad (6)$$

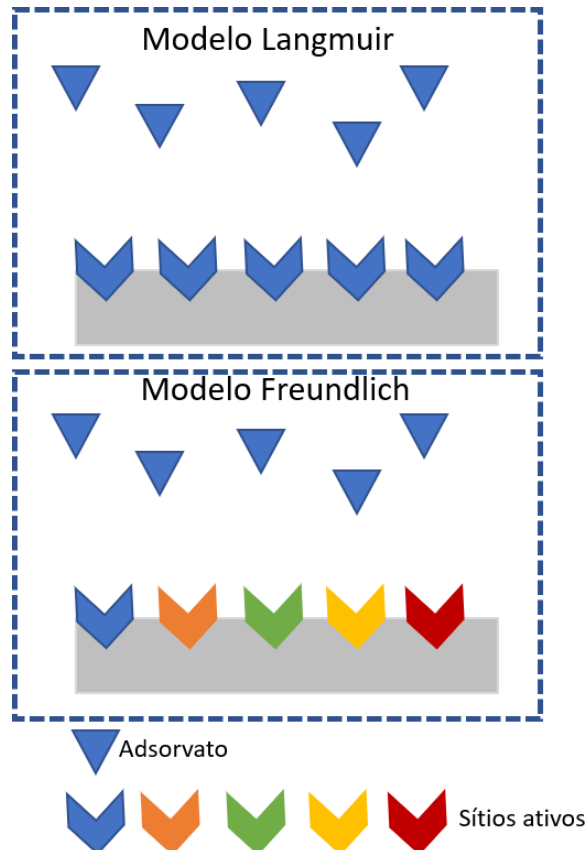
em que  $\frac{1}{n}$  representa uma constante que indica se a adsorção é favorável ou não, com  $n$

de 1 a 10 significando adsorção favorável (LATINI, 2006), e  $K_F$ : Constante de capacidade de adsorção de Freundlich.

Uma isoterma é considerada como favorável se é possível remover grandes quantidades de soluto, mesmo em concentrações baixas de adsorvatos.

A Figura 24 demonstra um esquema do funcionamento do modelo de Langmuir e Freundlich, demonstrando, portanto, o comportamento dos dois modelos, ou seja, no de Langmuir os sítios ativos possuem a mesma energia, representado pela mesma coloração dos sítios ativos e o modelo de Freundlich que denota coloração diferente dos sítios ativos pelo modelo representar energias distintas entre si.

Figura 24 - Representação do modelo de Langmuir e Freundlich.



Fonte: Do autor (2022).



Além desses modelos de isotermas que são os mais utilizados, que relacionam  $q_e$  e  $C_e$ , há também as equações de Temkin, Redlich-Peterson, Dubinin-Radushkevich além de outros, que também podem ser utilizados para descrever os processos de adsorção. A isoterma de Temkin, é empírica e, de maneira geral, se ajusta melhor a adsorção em meios gasosos. Possui como hipótese para sua formulação que a interação entre adsorvente-adsorvato diminui linearmente com a ocupação dos sítios ativos, e que sítios energéticos são ocupados antes dos menos energéticos (ATKINS P. W., 1994). Já a isoterma de Redlich-Peterson, também empírica, une as características de formulação de Langmuir e Freundlich, uma vez que se adequa aos dados experimentais com concentração de adsorvato mais baixas, até condições mais elevadas. (NASCIMENTO R. F. et al., 2014). Normalmente é utilizada para descrever a adsorção de metais pesados, como o Níquel (II) e Cobre (II). (NETA, 2022).

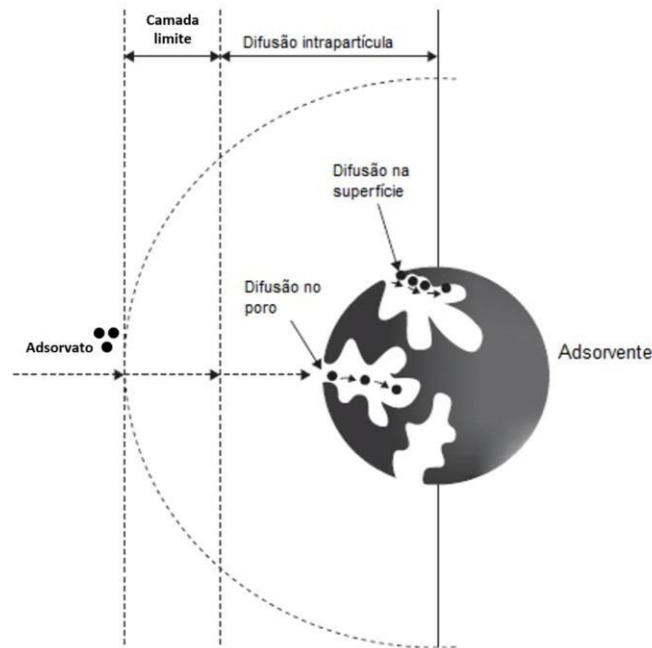
A isoterma de Dubinin-Radushkevich se adequa de maneira geral a adsorvatos na sua forma gasosa e normalmente orgânicos, e adsorventes sólidos. Se aproxima bastante das condições empregadas por Langmuir, com a diferença de não assumir sítios ativos homogêneos, além de ser um modelo que identifica se há adsorção física ou química (DUBININ, M.M; RADUSHKEVICH, L.V, 1947).

### 2.8.3 Cinética de adsorção

Por meio de estudos de cinética de adsorção é possível expressar a velocidade ou taxa na qual o soluto da fase fluida migra para os poros do adsorvente e desse modo estimar o tempo mínimo necessário do contato entre eles para promover maior quantidade adsorvida no equilíbrio. (MCKAY, 1995). Assim, a cinética é bastante importante, visto que é capaz de otimizar o processo por meio do estudo de modelos difusivos para determinar a etapa limitante que irá controlar a adsorção. (FOUST A. S.; CLUMP C. W.; WENZEL L. A., 1982; MCCABE W. L.; SMITH J. C.; HARRIOTT P., 1993; MCKAY, 1995; RABOCKAI T., 1979).

Geralmente são quatro etapas geralmente para a transferência do soluto para os poros. A primeira se dá por meio da transferência do adsorvato até a camada limite do fluido. A segunda se dá da camada limite até a entrada dos poros do adsorvente. A terceira corresponde a difusão interna nos poros, sendo influenciada pelas propriedades do adsorvente e das condições do fluido. Por fim, a última etapa se refere a ligação/interação do adsorvato com o adsorvente. (VALENCIA, 2007). A Figura 25 demonstra o mecanismo difusivo do processo de adsorção.

Figura 25 - Mecanismo de transferência do adsorvato até o adsorvente.



Fonte: Adaptado de Valencia (2007).

Nesse sentido, para determinar a etapa que controla o processo de adsorção, normalmente se utilizam modelos cinéticos lineares, em que os mais utilizados são o de pseudoprimeira ordem e pseudosegunda ordem.

O modelo de pseudoprimeira ordem proposto por Lagergren, em 1898, considera que a velocidade de consumo de adsorvato é diretamente proporcional à diferença entre a concentração de equilíbrio e à quantidade de sítios ativos do adsorvente ocupados. Porém, muitos estudos encontraram que esse modelo somente se aplica no estágio inicial da adsorção e que com o decorrer do tempo de contato, o mecanismo já não se torna mais válido. Sua equação linearizada pode ser visualizada pela Equação 7, em que  $t$  é o tempo decorrido da adsorção,  $q_t$  é a quantidade de soluto adsorvida ( $\frac{mg}{g}$ ) em  $t$  e  $K_1$  é a constante de velocidade de adsorção ( $tempo^{-1}$ )

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - K_1 \cdot t \quad (7)$$

Já o modelo de pseudosegunda ordem se aplica ao longo de todo o processo de adsorção e por isso, muitas vezes se adapta a maioria dos casos devido à consideração de que a velocidade de adsorção é dependente do teor de sítios ativos desocupados. (MCKAY,1995; NETA J. J. S. et al., 2011). Sua equação linearizada pode ser verificada pela Equação 8, em que  $K_2$  é a constante de velocidade de pseudosegunda ordem ( $\frac{g}{mg \cdot tempo}$ ).

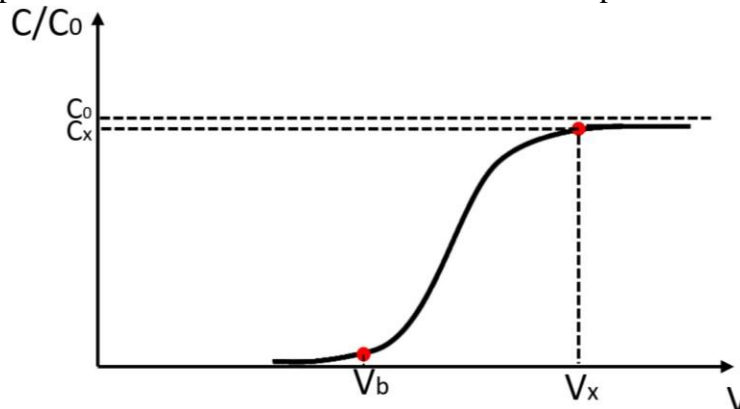
$$\frac{t}{q_t} = \left( \frac{1}{K_2 \cdot q_e^2} \right) + \left( \frac{1}{q_e} \right) \cdot t \quad (8)$$

### 2.8.4 Estudo dinâmico

Apesar de o estudo estático ter inúmeras vantagens, a principal desvantagem é que em alguns casos, atingir o equilíbrio leva tempo demasiado, tornando o processo oneroso e ineficiente. Neste caso, utiliza-se o processo contínuo, no qual por meio de uma coluna preenchida pelo adsorvente, a solução contendo o adsorvato a atravessa a uma taxa constante, utilizando uma bomba peristáltica, consegue-se, assim, adsorver um maior volume de solução em um pequeno espaço de tempo até se obter a saturação do adsorvente.

Para se quantificar a adsorção em regime dinâmico, constrói-se a curva de ruptura, em que se relaciona as variáveis  $C/C_0$  ao longo do volume da coluna, em que  $C$  é a concentração da solução na saída e  $C_0$  a concentração inicial da solução afluente. A Figura 26 demonstra uma curva de ruptura para o comportamento ideal em um leito com adsorvente.

Figura 26 - Comportamento ideal de um leito com adsorvente operando em modo dinâmico.



Fonte: Do autor (2022).

No início do processo, tem-se que a coluna está realizando alta remoção do adsorvato, ou seja, na sua saída, a concentração de soluto é baixa. Com o decorrer do processo,  $C$  aumenta sutilmente. No ponto  $V_b$  tem-se o ponto de ruptura e a partir dele,  $C$  começa a aumentar a uma taxa elevada, visto que a coluna vai se tornando cada vez mais saturada com adsorvente. O instante no qual a  $C$  é igual a  $C_0$  ( $V_x$ ) significa que há a

saturação total do adsorvente na coluna e nessas condições, não é mais possível remover o contaminante. (MARCHETTI et al., 2009; NASCIMENTO R. F. et al., 2014).

## **2.9 Influência das propriedades do adsorvato, adsorvente e solução na adsorção**

As variáveis a serem estudadas que são fundamentais no processo de adsorção são temperatura, pH, concentração inicial do adsorvato e algumas de suas propriedades, tempo de contato. Além dessas, será discutido e aprofundado nessa seção, como elas podem influenciar o processo adsorptivo e garantir uma maior capacidade máxima de remoção dos contaminantes que são foco desse trabalho, os corantes.

Os testes de adsorção encontrado na maioria de estudos ocorrem em escala laboratorial por meio de ensaios, os quais objetiva diminuir custos operacionais. São mais rápidos e também mais adaptáveis às alterações a serem realizadas, pois utilizam de pouca quantidade de material. (NASCIMENTO R. F. et al., 2014)

Esses experimentos podem ocorrer de duas formas, pelo método estático (ou batelada) ou pelo dinâmico (coluna de leito fixo ou expandido), já que ambos as metodologias possuem suas vantagens e desvantagens. O modelo batelada é mais simples de ser realizado, uma vez que é capaz de estimar com alta precisão parâmetros, cinéticos e termodinâmicos da adsorção, porém possui alto custo operacional caso seja necessário operar com alto volume de solução contaminante. Nesse caso, o mais adequado é a utilização de um modelo contínuo por meio da passagem da solução por meio de um leito fixo contendo o adsorvente a uma taxa constante. (TREYBAL R. E., 1968)

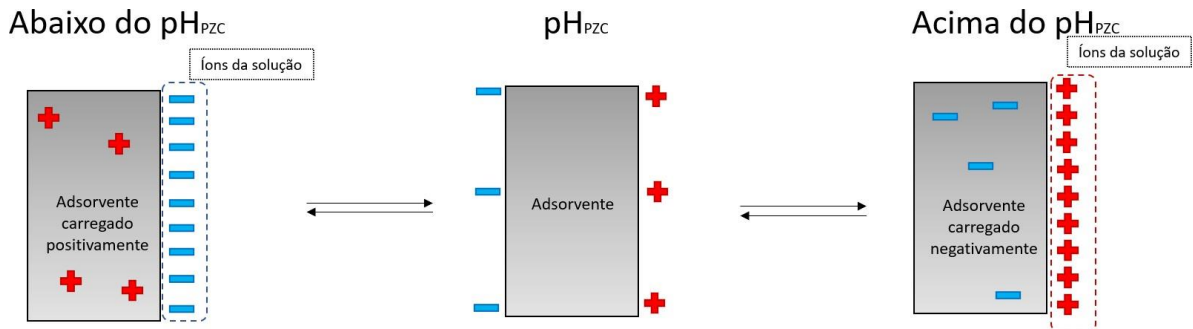
### **2.9.1 Influência do pH**

De maneira geral como já visto, o pH é capaz de modificar o processo de adsorção, o tornando favorável ou não. Isso ocorre principalmente devido a sua influência sobre as interações eletrostáticas entre o adsorvato e o adsorvente. Isso ocorre porque a superfície do adsorvente possui grupos protonáveis e desprotonáveis que podem ter sua carga variada pelo pH do meio ao mesmo tempo em que adsorvato em solução pode mudar de carga pelo mesmo efeito. Nesse sentido, o ponto de carga zero ( $pH_{PCZ}$ ), ou seja, o valor de pH no qual a carga líquida do adsorvente é nula, é um parâmetro importante de um adsorvente. Caso o pH da solução seja maior do que o  $pH_{PCZ}$ , o adsorvente terá carga líquida superficial negativa e interagirá mais favoravelmente com cátions da solução do contaminante. O

oposto também pode ocorrer, em caso de o pH da solução ser menor que o  $pH_{PCZ}$ , fazendo o adsorvente interagir favoravelmente com os ânions da solução. (APPEL et al., 2003; EL QADA; ALLEN; WALKER, 2006; TREYBAL R. E., 1968). A Figura 27 demonstra a interação entre o adsorvente e adsorvato em valores de pH em relação ao  $pH_{PCZ}$ .

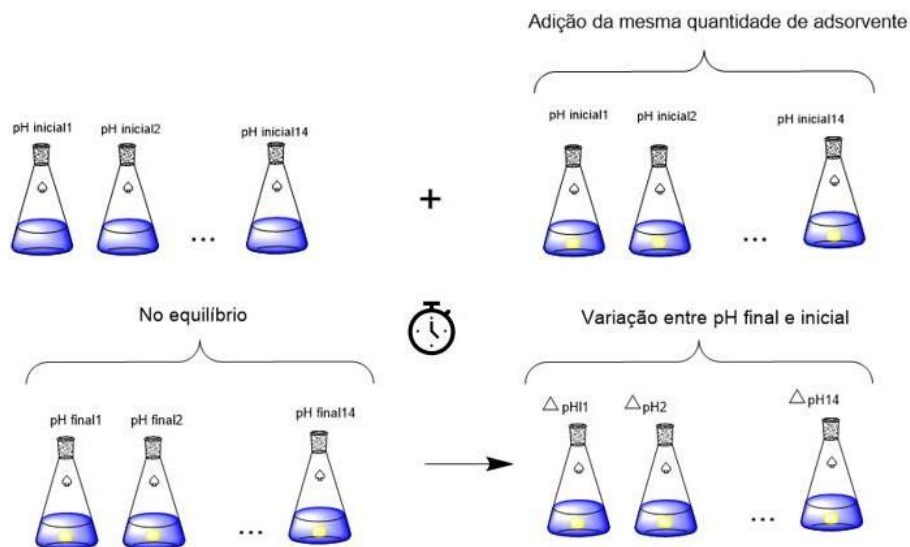
Figura 27 - Interação das cargas da solução de acordo com o  $pH_{PCZ}$ .

Fonte: Do autor (2022).



Para determinar o valor do  $pH_{PCZ}$ , ajusta-se a solução contaminantes a diferentes pH, na faixa de 1 a 14 e posteriormente adiciona-se o adsorvente nessas diferentes soluções até atingir o equilíbrio. Em seguida calcula-se a  $\Delta pH$  do início e final do processo. Quando essa variação é igual a zero, tem-se o  $pH_{PCZ}$ . O procedimento adotado é visível na Figura 28 (ČEROVIĆ et al., 2007).

Figura 28 - Metodologia empregada para determinação do  $pH_{PCZ}$ .



Fonte: Do autor (2022).

Apesar de que para o processo de adsorção ser favorável seja desejável que a carga do adsorvente e do adsorvato sejam opostas, para que haja atração eletrostática e melhor

remoção de adsorvatos indesejados, (TOLEDO I. B. et al., 2005).

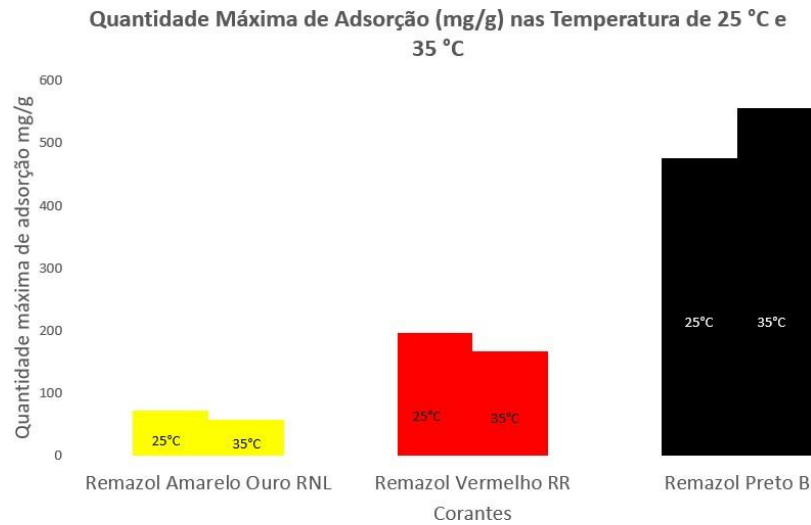
### 2.9.2 Influência da temperatura

A temperatura é uma variável que altera o processo adsorptivo, uma vez que é capaz de mudar a viscosidade de uma solução e a velocidade difusional entre adsorvato e adsorvente. Assim, um aumento de temperatura é capaz de aumentar a energia cinética de um sistema, alterar a solubilidade e afetar o potencial químico do adsorvato, provocando aumento vibracional, rotacional dessas moléculas. Isso pode facilitar a sua difusão para a superfície dos adsorventes, promovendo, portanto, maior velocidade na remoção de contaminantes. O que expressa a dependência da adsorção com a temperatura é a constante de velocidade de adsorção, a qual, quanto maior, mais rápida a remoção tende a ocorrer.

No entanto, temperaturas muito elevadas também podem causar a obstrução dos poros do adsorvente, modificando, portanto, um potencial sítio ativo, o que pode acabar diminuindo a remoção de um adsorvato em específico. (DOĞAN et al., 2006; MARIN et al., 2014)

Para exemplificar a influência do aumento de temperatura sobre o processo de adsorção, que pode ser tanto favorável ou não, a Figura 29 apresenta o impacto na adsorção de diferentes corantes em um bioadsorvente de alga verde *Chlorella vulgaris*. É possível perceber que as condições da temperatura não exercem papel exclusivo sobre o processo. Um conjunto de variáveis, como propriedades do adsorvato, como também do adsorvente, além do meio que estão inseridos irá influenciar na adsorção (CORRÊA, MARINA SCARANO et al., 2018).

Figura 29 - Capacidade máxima de adsorção em diferentes corantes em função da temperatura.



Fonte: Adaptado de Aksu e Tezer (2005).

Nesse sentido, caso a capacidade de adsorção aumente com o incremento da temperatura, considera-se um processo endotérmico. Caso diminua, o processo é exotérmico. Para quantificar essa capacidade e identificar condições que regem o processo de adsorção, ou seja, se é espontâneo ou não, além de estabelecer se a adsorção é majoritariamente física ou química e auxiliar a entender o mecanismo pelo entre adsorvato e adsorvente, é necessário obter uma estimativa por meio de parâmetros termodinâmicos, como  $\Delta G$ ,  $\Delta S$  e  $\Delta H$ . Por meio da Equação 9, tem-se a relação entre esses três parâmetros, os quais dependem da temperatura (T).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (9)$$

$\Delta G$  é utilizada para verificar a espontaneidade do processo. Para  $\Delta G < 0$ , a adsorção é considerada espontânea, fato esse encontrado para a maioria dos processos adsorptivos (PIQUET; MARTELLI, 2022). No entanto, alguns trabalhos trazem a adsorção como processo não espontâneos (MÜLLER et al., 2019). Além disso esse parâmetro é capaz de quantificar o grau de não/espontaneidade, ou seja, quando maior sua variação em módulo, maior a intensidade do processo.

Também,  $\Delta G$  pode ser desenvolvida por meio da Equação 10, relacionando a constante ideal dos gases ( $R$ ) e ( $\ln K$ ), parâmetro que pode ser determinado por meio de uma isoterma de adsorção por meio de um modelo que mais se adeque aos dados experimentais.

$$\Delta G = -RT \ln K \quad (10)$$

Assim, substituindo a Equação 9 na Equação 10 e isolando o  $\ln K$ , tem-se a Equação 11, na qual, é possível determinar  $\Delta S$  e  $\Delta H$  caso os dados se ajustem por meio de uma regressão linear variando a  $1/T$  e  $\ln K$ .

$$\frac{-\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} = \ln K \quad (11)$$

Caso não seja possível ajustar os dados a uma reta, é necessário a utilização de softwares adequados que realizem o ajuste não linear. Para determinar, portanto  $\Delta H$  e  $\Delta S$  por regressão linear, o coeficiente angular se refere a  $-\Delta H/R$  e o linear a  $\Delta S/R$ . Nesse sentido,  $\Delta H > 0$  caracteriza um processo endotérmico, e  $\Delta H < 0$  exotérmico.

### 2.9.3 Influência da concentração inicial

A concentração inicial do adsorvato exerce influência bastante significativa na capacidade de adsorção. Para determinar a sua influência, normalmente fixa-se a quantidade de massa de adsorvente, a temperatura, o pH e a dosagem, variando-se a concentração inicial da de adsorvato na solução ao longo do tempo. Assim, é possível verificar em vários estudos que o aumento da concentração inicial provoca aumento do tempo para se atingir o estado de equilíbrio e também aumento na capacidade de adsorção. (NASCIMENTO R. F. et al., 2014)

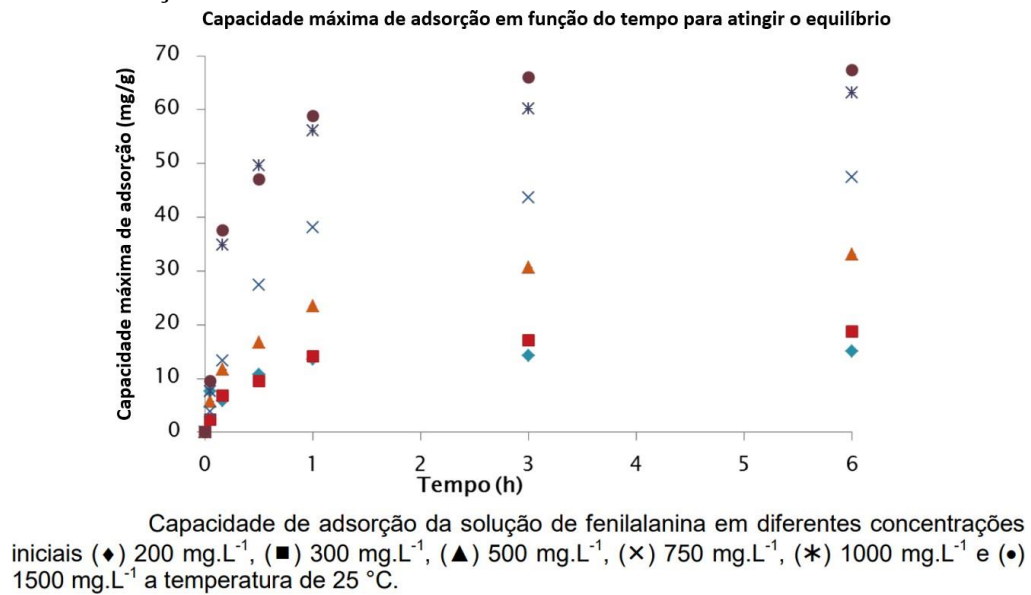
Isso se deve ao fato de que uma maior quantidade de adsorvato irá competir com sítios de adsorção, levando a um maior tempo para atingir o equilíbrio. O aumento da quantidade de adsorvato gera no sistema maior força motriz (gradiente de concentração com conseqüente aumento de potencial químico do adsorvato na solução em relação ao potencial químico do adsorvato na superfície do adsorvente) entre a superfície do



adsorvente e da solução, havendo, portanto, maior capacidade de adsorção em condições de concentrações iniciais mais elevadas. (ALVES C. C. O., 2012)

A Figura 30 demonstra o comportamento de maior capacidade de adsorção com o aumento da concentração inicial do aminoácido fenilalanina, além de mostrar um maior tempo para atingir o equilíbrio nessa condição.

Figura 30 - Comportamento da concentração de adsorvato em função da capacidade de adsorção.



Fonte: Adaptado de Alves (2012).

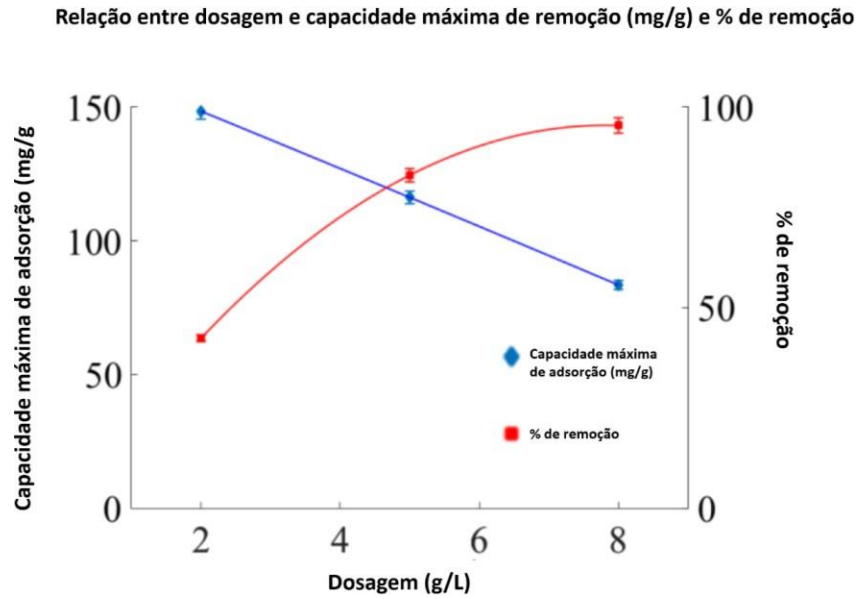
#### 2.9.4 Influência da dosagem de adsorvente

A dosagem do adsorvente em um sistema de adsorção normalmente é realizada por meio do aumento da massa deste, mantendo-se as variáveis como concentração inicial, pH, temperatura constantes, e avalia-se a capacidade de adsorção nessas condições. Nesse sentido, os estudos remetem que a percentagem de remoção de adsorvato aumenta com o aumento da dosagem, visto que há maior quantidade de sítios ativos disponíveis para interação com o adsorvato. No entanto, a capacidade máxima geralmente é diminuída, visto que há uma menor relação adsorvato/adsorvente. (ALVES C. C. O., 2012)

Assim, há um ponto ótimo entre a capacidade de adsorção e a porcentagem de remoção que maximiza a quantidade de adsorvato adsorvida e minimiza a quantidade total de adsorvente utilizado para uma dada concentração inicial de contaminante, temperatura e pH. Normalmente esse ponto de operação máximo, se dá entre a interseção das duas curvas em função da dosagem, como é possível verificar pela Figura 31. No caso

apresentado, a dosagem ótima de adsorvente é de aproximadamente 4,7 g/L (JAIME, 2016).

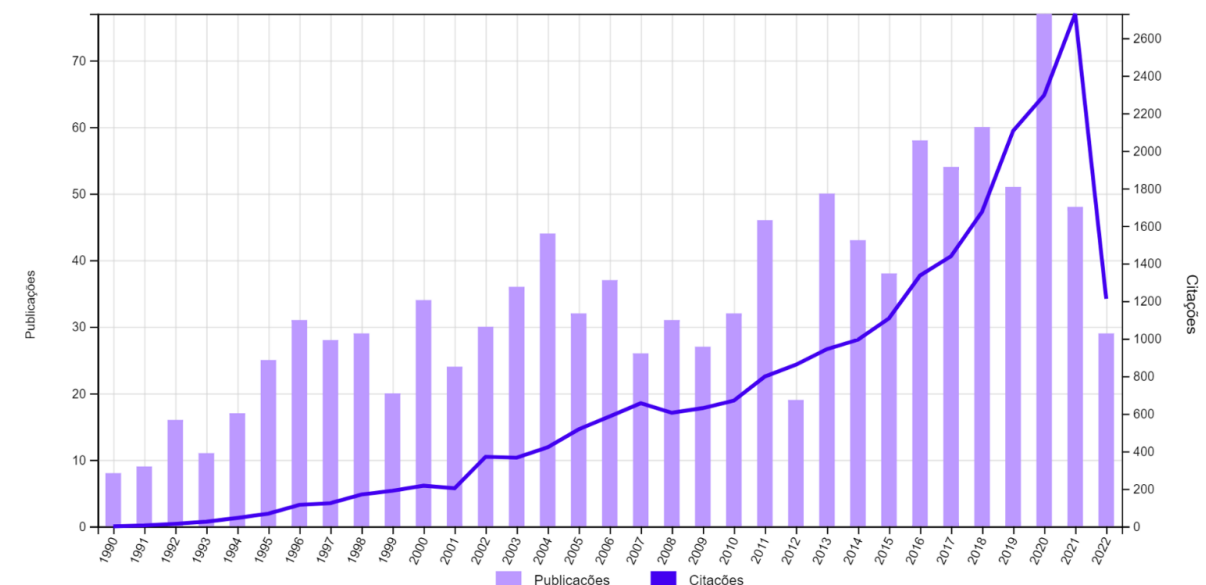
Figura 31 - Comportamento da dosagem com as variáveis de capacidade máxima de adsorção e % de remoção.



Fonte: Adaptado de Jaime (2016)

### 3 REVISÃO: APLICAÇÃO DE PU DE NA REMOÇÃO DE CORANTES

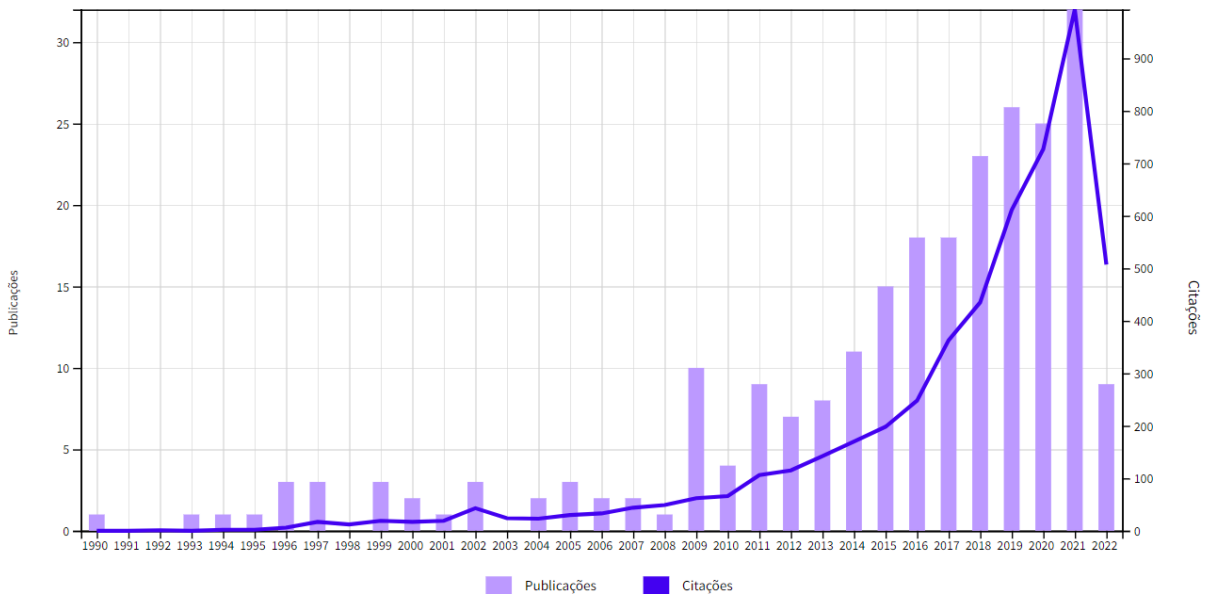
A partir de uma busca por tópicos na *Web of Science*, plataforma robusta que conta com quase 2 bilhões de referências e é citada em mais de 170 milhões de registros, foram encontrados 1120 publicações e quase 24 mil citações entre os anos de 1990 até 2022 para o tema alvo deste trabalho. A busca contou com o uso das palavras-chave “*removal*” and “*adsorption*” or “*sorption*” and “*polyurethane*”, como é possível observar pela Figura 32. Figura 32 - Quantidade de publicações e citações sobre a temática de remoção por meio de PU.



Fonte: Web of Science (2022).

Ao se realizar uma nova busca, dando enfoque para a remoção por corantes por meio de PU, refinando a busca por meio da palavra-chave “*dye*” (Figura 32) é possível perceber pela comparação entre as Figuras 32 e 33 que uma parcela importante dos estudos na temática de remoção de contaminantes utilizando PU se dá a partir do estudo de remoção de corantes.

Figura 33 - Quantidade de publicações e citações sobre a temática de adsorção de corantes por meio de PU.



Fonte: Web of Science (2022).

Como é possível perceber pela Figura 33, o estudo de PU para a remoção de corantes é bastante recorrente ao longo dos anos e a tendência é um crescimento ainda maior, visto que além de serem utilizadas na forma de espumas, esses materiais podem ser utilizados também como compósitos para remoção de corantes, representando cerca de 56% dos trabalhos que utilizam espumas de poliuretano. Isso se deve ao fato de que durante a reação de polimerização para a síntese de espumas de poliuretano, ocorre uma reação paralela entre o diisocianato e água, o que permite a formação de poros no material, aumentando, portanto, a área superficial da espuma, o que consequentemente favorece o processo de adsorção de contaminantes em geral. (SOARES, 2012)

Também, o uso de PU em forma de membrana e filmes tem sido utilizado para fins de remoção, porém em menor quantidade se comparada às espumas de poliuretano (PUF) (WEB OF SCIENCE 2022). Muitos trabalhos estão envolvendo o uso de polióis de origem renovável, como óleos, sementes, bactérias e fungos, e as PU obtidas desses materiais tem mostrado capacidades máximas de adsorção para alguns corantes equiparáveis às oriundas de fontes petroquímicas. Inicialmente, a maioria dos polióis utilizados para preparar PU foram obtidos de fontes de petróleo, mas devido às preocupações ambientais, aumentaram a necessidade de um substituto mais adequado e ecologicamente correto. Recentemente, isso atraiu enorme atenção comercial e acadêmica para fontes renováveis, como óleos vegetais. (DESROCHES et al., 2011). A última década testemunhou uma clara maioria de estudos aparecendo na literatura sobre o uso de óleos

vegetais como alternativas aos materiais à base de petróleo para a produção de PU.

Nesse sentido, objetivando homogeneizar a comparação de PU por uma mesma classe de matérias primas, foi construída, a partir da Figura 33, a Tabela 2, em que foram classificados os trabalhos de forma a considerar somente as PU obtidas por polióis de origem petroquímicas. Essa Tabela 2 relaciona o material utilizado para a adsorção, o contaminante, que pertence a classe dos corantes, a capacidade máxima de adsorção e as condições do estudo de adsorção (dosagem, concentração inicial, temperatura, pH). Para os casos em que não foi reportada a capacidade máxima de adsorção nos trabalhos avaliados, foi apresentada na Tabela 2 a % de remoção do corante.

Tabela 2 – Trabalhos utilizando PU para adsorção de corantes e suas condições operacionais.

<b>Matéria Prima (agentes modificantes)</b>	<b>Contaminante</b>	<b>% de Remoção</b>	<b>Capacidade máxima de adsorção</b>	<b>Condição de adsorção</b>	<b>Referência</b>
Poli(etilenoglicol) (PEG) para síntese de PU com quitosana	Amarelo ácido 199 Vermelho ácido 337 Azul ácido 324	Amarelo ácido: 90% Vermelho ácido: 99% Azul ácido: 90%	-	D = 5 mg/mL; C = 1 g/mL; $\theta = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH = NI.	SCHIN, 2004.
PUF com dodecilsulfato de sódio (SDS)	Azul de Metileno	-	23,03 mg/g	D = 1mg/mL, C = $5,0 \times 10^{-5}\text{ M}$ ; $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH= NI	BALDEZ, 2008.
PUF com SDS	Violeta Cristal	-	20,48 mg/g	D = 1 mg/mL, C = $5 \times 10^{-5}\text{ M}$ $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH= 3,5- 4,0	MORI, 2009.
PUF com SDS	Rodamina B	-	3,28 mg/g	D = 1 mg/mL; C = $1 \times 10^{-5}\text{ M}$ ; $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH= NI	BALDEZ, 2009.
PUF modificada com quitosana	Violeta ácido 48	-	30 mg/g	D = 5 mg/mL; C= 0,01 M/M $\theta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH= 3;	LEE, 2009.
Poli(etilenoglicol) (PEG) para síntese de PU com quitosana	Amarelo ácido 199 Vermelho ácido 337 Azul ácido 324	Amarelo ácido: 90% Vermelho ácido: 99% Azul ácido: 90%	-	D = 5 mg/mL; C = 1 g/mL; $\theta = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH = NI.	SCHIN, 2004.
PUF com dodecilsulfato de sódio (SDS)	Azul de Metileno	-	23,03 mg/g	D = 1mg/mL, C = $5,0 \times 10^{-5}\text{ M}$ ; $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH= NI	BALDEZ, 2008.

(Continua...)

(Continuação...)

Matéria Prima (agentes modificantes)	Contaminante	% de Remoção	Capacidade máxima de adsorção	Condição de adsorção	Referência
PUF com $\beta$ -ciclodextrina	Preto de Eriocromo T	-	20,17 mg/g	D= 50 mg/mL; C = 1200 mg/L; $\theta$ = 25 °C; pH= NI	DONG, 2013.
PUF com atapulgita	Verde Malaquita	-	47,985 mg/g	D = 40 mg/mL; C = 1500 mg/L; $\theta$ = 35 °C; pH: 5;	QIN, 2019.
PUF embebida com p-terc butil tiacalix[4]areno	Verde Malaquita	-	58,82 mg/g	D = 1 mg/mL; C = 20 mg/L; $\theta$ = 25 °C; pH = 6;	MOHAMMADI, 2014.
PUF com óxido de grafite	Verde Malaquita	-	68,823 mg/g	D= 40 mg/mL; C = 100 mg/mL; $\theta$ = 50 °C; pH= NI;	QIN, 2014.
PUF com óxido de alumínio	Ponceau 4R- Vermelho ácido C.I. 18	-	39,29 mg/g	D = 20 mg/mL; C = 0,1 g/L; $\theta$ = NI; pH= 2	TIKHOMIROV A, 2014.
Couro sintético preenchido com PU e ácido	<i>Argacid Blue N-BL (AB)</i> <i>Argacid Red N-2RBL (AR)</i> <i>Argacid Yellow N-RX (AY)</i>	-	24,68 mg/g (AB) 39,24 mg/g (AR) 38,56 mg/g (AY)	D = 1 mg/mL; C TODOS OS CORANTES = 2% m/m; $\theta$ = 90 °C; pH= 4,5 – 5	LIU, 2015.
Monólitos de carbono contendo nanopartículas de níquel e PU	Laranja de Metila	-	440 mg/g	D = 0,4 mg/mL; C = 200 mg/L $\theta$ = 30°C; pH = NI	LIU, 2015.
PUF modificada com iodo	Azul de Anilina (AA) Violeta Cristal (VC)	-	188,9 mg/g (AA) 183,6 mg/g (VC)	D = 4 mg/mL; C TODOS OS CORANTES = 1 g/mL; $\theta$ = 25°C; pH = 7-12	MOAWED, 2015.
PUF modificada com quitosana	Verde Malaquita	-	16,67 mg/g	D = 0,05g/mL; C= 100 mg/mL; $\theta$ = 30°C; pH = 9;	LI, 2015.
PUF com salicilato	Verde Malaquita	95%	-	D= 25 mg/mL; C= 50 ppm; $\theta$ = 45 °C; pH = 10-12	EL-BOURAIIE, 2015.

(Continua...)

(Continuação...)

Matéria Prima (agentes modificantes)	Contaminante	% de Remoção	Capacidade máxima de adsorção	Condição de adsorção	Referência
PUF com óxido de quitosana-grafita	Violeta Cristal	-	64,935 mg/g	D = 50 mg/mL; C = 300 mg/L; $\theta$ = 35°C; pH = 10	QIN, 2015.
PUF modificada com quitosana	Verde Malaquita	-	4,7985 mg/g	D = 0,009 mg/mL; C = 100 mg/L; $\theta$ = 30°C; pH=NI;	LI, 2016.
PUF modificada com carvão	Verde Brilhante	-	134,95 mg/g	D = 4 mg/g; C = 200 mg/L; $\theta$ = 40°C; pH = NI	KONG, 2016.
Membranas de matriz mista à base de UiO-66-MOF por polimerização de nanocristais de UiO-66-NH <sub>2</sub> e oligômero de poliuretano	Verde Malaquita	-	125 mg/g	D = 0,7 mg/mL; C = 1 x 10 <sup>-5</sup> mol/L; $\theta$ = 25°C; pH = NI;	YAO, 2016.
PU em pó modificada com iodo em pó	Rosanilina (R) Verde Brilhante (VB)	-	106,8 mg/g (R) 154,4 mg/g (VB)	D = 4 mg/mL; C = 1 g/mL; $\theta$ = 20°C; pH = 6-10	MOAWED, 2016.
PU com óxido de grafeno reduzido e dióxido de manganês	Azul de metileno	96 %	-	D = 3,33 mg/mL; C = 50 mg/mL; $\theta$ = 25 °C; pH= NI	WANG, 2016.
PUF microporosa	Azul de metileno	-	23,89 mg/g	D = 2 mg/mL; C = 5 x 10 <sup>-4</sup> mol/L; $\theta$ = 25°C; pH = 5 - 7	CHAIO, 2017.
PUF com nanopartículas de prata PU-H	Alaranjado de metila	96,43%	-	D = 4 mg/mL; C = 10 - 100 mg/L; $\theta$ = 25°C; pH = 1,0 - 6,0	ALI, 2017.
Nanocompósito de PUF-sulfeto de cádmio	<i>Reactive Orange 122 (RO122)</i>	-	22,7 mg/g	D = 2,5 mg/mL; C = 30 mg/L; pH = 1; $\theta$ = 25°C	DORRAJI, 2017.
PUF com isotiourônio acoplado com nanopaticulas de magnetita	Amarelo Brilhante (AB) Verde Brilhante (VB)	-	424,70 mg/g (AB) 154,31 mg/g (VB)	(VB): D = 4 mg/ml; C = 1 mg/mL; $\theta$ = 50 °C; pH = 10)  (AB): D = 4 mg/mL; C = 1 mg/mL; $\theta$ = 65°C; pH = 4	MOAWED, 2017.

(Continua...)

(Continuação...)

<b>Matéria Prima (agentes modificantes)</b>	<b>Contaminante</b>	<b>% de Remoção</b>	<b>Capacidade máxima de adsorção</b>	<b>Condição de adsorção</b>	<b>Referência</b>
PUF com estruturas metálicas (MOFs)	Rodamina B	84,6 %	10,4 mg/g	D = 0,88 mg/mL; C = 10 mg/mL; $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH= NI	SONG, 2017.
PU em gel carregadas de porções cicloalifáticas	Violeta Cristal (CV) Amaranto (AM) Amarelo de eosina (EY) Laranja de metila (MO)	-	Apenas o corante (CV) foi adsorvido: 201 mg/g	D = 4 mg/mL C = $1 \times 10^{-5}$ M; $\theta = 25^{\circ}\text{C}$ pH = NI;	BADD, 2018.
PUF com HCL	Tartrazina (Sigma-Aldrich, $\geq 85\%$ ),  Amarelo Crepúsculo (Sigma-Aldrich, $\geq 90\%$ ),  Ponceau 4R (Sigma-Aldrich, $\geq 75\%$ ),  <i>Fast Green FCF</i> (Sigma-Aldrich, $\geq 85\%$ ) Quinolina Amarelo WS	-	Somente Ponceau 4R (30,94 mg/g)	D = 2mg/mL; C = 0,1 g/L; $\theta = \text{NI}$ ; pH = 2,3	TIKHOMIROV A, 2018.
PU de coordenação HTPU-M, em que M = Mn (II), HTPU-Ni, em que Ni = Ni (II), HTPU-Zn, em que Zn = Zinco	Vermelho Congo	-	HTPU-M --> 169,8 mg/L e HTPU-NI --> 152,1 mg/L	D = 0,1 mg/g; C = 200 mg/L; $\theta = 30^{\circ}\text{C}$ ; pH= NI	LAXMI, 2018.

(Continua...)



(Continuação...)

<b>Matéria Prima (agentes modificantes)</b>	<b>Contaminante</b>	<b>% de Remoção</b>	<b>Capacidade máxima de adsorção</b>	<b>Condição de adsorção</b>	<b>Referência</b>
Nanopartículas magnéticas conjugadas com CD com redes de poliuretano (HPMNPU)	Violeta Cristal (CV) e Violeta de Metila (MV)	-	1269 mg/g (CV) 1667 mg/g (MV)	(CV): D= 0,36 mg/mL; C= 0,04 mg/mL $\theta= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH = 9  (MV): D= 0,36 mg/mL; C= 0,04 mg/mL; $\theta= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH = 9	NASIRI, 2019.
Coluna com espuma de quitosana/poliuretano	Vermelho Allura	-	108,1 mg/g	D = 0,04 mg/mL; C = 100 mg/L; $\theta= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH=2;	SCHIO, 2019.
Carvão ativado com nanocompósitos superparamagnéticos derivados de resíduos de PUF	Rodamina B	-	113 mg/g	D = 5 mg/mL; C = 10 mg/L; $\theta= 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH = 8	SHIVAPRASAD, 2019.
Membrana nanofibrosa de poliuretano carregada de óxido de grafeno PUF modificadas por revestimento por imersão de nanotubos de haloisita com retardamento de chama	Azul de Metileno (AM) Rodamina B (RB)	-	109,88 mg/g (AM) 77,15 mg/g (RB)	D = NI; C = 10 mg/g; $\theta= 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH = 12	SUNDARAN, 2019.
PUF modificadas por revestimento por imersão de nanotubos de haloisita com retardamento de chama	Azul de Metileno	-	0,15 mg/g	D = 25 mg/mL; C = $3,75 \cdot 10^{-3}\text{ g/L}$ ; $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH = NI	WU, 2019.
Fuligem de escape de diesel revestido com PUF	Rodamina B	-	50,01 mg/g	D= 3 mg/mL; C = 100 mg/L; $\theta = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH = 12	SINGH, 2019.
Elastômero de poliuretano contendo grupos sulfonados como extensor de cadeia	Verde Malaquita	-	122,97 mg/g	D = 0,5 mg/mL; C = 30 a 80 mg/L; $\theta = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH = 8	MOJERLOU, 2019.
Silicato de cálcio (CaSiO <sub>3</sub> ) introduzido na liga de acrilonitrila butadieno estireno/PU	Azul de Metileno	-	8,18 mg/g	D = 18 mg/mL; C = 200 mg/L; $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; pH = NI	LIU, 2020.

(Continua...)

(Continuação...)

<b>Matéria Prima (agentes modificantes)</b>	<b>Contaminante</b>	<b>% de Remoção</b>	<b>Capacidade máxima de adsorção</b>	<b>Condição de adsorção</b>	<b>Referência</b>
Resíduos plásticos de PU em carvão ativado	Verde Malaquita	-	1428 mg/g	D= 0,4 mg/mL; C = 300 mg/L; $\theta = 25^{\circ}\text{C}$ pH = 7	LI, 2020.
Nanofolhas de grafeno incorporadas homogeneamente em PUF	Azul de metileno (MB) Brometo de etídio (EtBr) Eosina Y (EY)	-	187,18 mg/g (MB); 332,43 mg/g (EtBr); 562,69 mg/g (EY)	D= 2,5 mg/mL; C= 100 $\mu\text{mol/L}$ ; $\theta = 25^{\circ}\text{C}$ (EY): pH= 3 (MB, EtBr): pH = 10	MANABE, 2020.
Nanoesponja de PU com $\beta$ -ciclodextrina ( $\beta$ -CD) modificada com nanotubos de carbono de paredes múltiplas fosforiladas (pMWCNTs)	Vermelho Congo	-	146,96 mg/g	D = 0,33 mg/mL; C= 30 ppm; $\theta = 37^{\circ}\text{C}$ ; pH = 3;	TAKA, 2020.
PUF revestida com nanotubos de carbono de paredes múltiplas	Azul de metileno	99,64 %	-	D = 24,69 mg/mL; C=NI; $\theta = \text{NI}$ ; pH = NI	BABURO, 2020.
PUF funcionalizada à base de derivado de dopamina	Azul de metileno	99,0%	857,6 mg/g	D=NI ; C= 64 mg/mL; $\theta$ =NI; pH=NI	JIN, 2020.
PUF modificada por alginato e carvão ativado	Azul de Metileno (AM) Violeta (VC) Cristal (VC) Laranja de Metila (MO) Verde Malaquita (VM)	82% (AM) 54% (VC) 18% (MO) 97% (VM)		D=NI; C= 10 mg/L; $\theta = \text{NI}$ ; pH=NI	MALLAKPOUR, 2021.
Espuma macroporosa de PU-polianilina	Laranja de Metila	-	255 mg/g	D=4,1 x 10 <sup>-5</sup> mol/mL; C=50 mg/g; $\theta$ =25 $^{\circ}\text{C}$ ; pH=5	MENDIETA-RODRIGUEZ, 2021.
PUF reciclável carregada com carboximetilquitosana	Azul de Metileno	-	118,2 mg/g	D = 4 mg/mL; C=4 mg/mL; $\theta$ =25 $^{\circ}\text{C}$ ; pH=7	REN, 2021.

(Continua...)

(Continuação...)

<b>Matéria Prima (agentes modificantes)</b>	<b>Contaminante</b>	<b>% de Remoção</b>	<b>Capacidade máxima de adsorção</b>	<b>Condição de adsorção</b>	<b>Referência</b>
PUF carregada com estruturas metálicas a base de zircônio	Violeta	98,4 %	63,38 mg/g	D = 1 mg/mL; C = 10 mg/L; $\theta = 25^{\circ}\text{C}$ ; (VC): pH= 11 (RB): pH= 7	ZHAO, 2021.
	Cristal (VC)	93,5 %	67,73 mg/g		
PUF funcionalizada com nanofolha de cobre	Rodamina B (RB)		714 mg/g	D=0,4 mg/ml; C= 800 mg/L; $\theta=$ 25°C; pH=2	2SASIDHARAN , 2021.
	Vermelho Congo				

Legenda : D – Dosagem; C – Concentração inicial;  $\theta$  – Temperatura; pH – Potencial Hidrogeniônico; NI – Não identificado

Fonte: Do autor (2022)

Por meio da Tabela 2 é possível perceber que a maioria dos estudos encontrados utilizam as PU para a formação de um compósito. Ou seja, apesar das capacidades de adsorção consideráveis, a modificação da PU com aditivos aumenta a hidrofobicidade, a área superficial ou a seletividade do material e isso reflete quantitativamente na remoção do contaminante adsorvido. (ANJU; RENUKA, 2020). Também é possível avaliar na Tabela 2 que a capacidade máxima de adsorção dos materiais baseados em PU é bastante variável entre um estudo e outro, encontrando-se valores desde 0,15 mg/g até 1428 mg/g. Com isso, as condições operacionais empregadas tendem a ser bastante diferentes entre si, associadas às próprias propriedades físico-químicas do material.

Essas diferenças na performance de adsorção podem estar associadas a vários fatores, como as matérias primas utilizadas, os reagentes e condições do meio reacional, a interação entre solvente e adsorvato, os aditivos incorporados à PU, dentre outras.

Como exemplo, pode-se comparar o trabalho de Baldez (2008), que utiliza uma espuma de poliuretano carregada com SDS com o de Choi (2017), que trabalha com o uso de espuma de poliuretano microporosa. Apesar de ambos tratarem de adsorção de azul de metileno, a capacidade máxima de adsorção dos respectivos trabalhos é 23,03 mg/g e 239,89 mg/g, demonstrando mais uma vez que as PU são materiais que podem ser otimizáveis e que a estrutura do material contribui bastante no processo de adsorção, principalmente no ramo de tratamento de corantes.

No entanto, de maneira geral, encontrar condições ótimas para adsorção dessa classe de contaminante é bastante complexo visto que há inúmeras variáveis associadas, desde condições do próprio adsorvente, do adsorvato e do meio. Porém é possível também

perceber que a quantidade de trabalhos no ramo vem crescendo nos últimos anos, o que demonstra que o tema vem ganhando mais notoriedade. Os resultados encontrados nesses trabalhos são promissores para adsorção de corantes quando comparado com adsorventes mais usuais, como a base de carbono, como por exemplo o carvão ativado. Apesar do último ser o mais utilizado para tratamento de efluentes com corantes, seu uso, de maneira geral, tende a ser menos vantajoso economicamente em operações em grande escala. (ZAKARIA et al., 2009)

A Tabela 3 compara diferentes tipos de adsorventes e suas respectivas capacidades máximas de adsorção em mg de adsorvato/ grama de adsorvente para o corante azul de metileno.

Tabela 3 - Diferentes adsorventes e suas respectivas capacidades máximas de adsorção em mg de adsorvato/ grama de adsorvente para o corante azul de metileno.

<b>Adsorvente</b>	<b>Capacidade máxima de adsorção (mg/g)</b>	<b>Referência</b>
Grânulos ativados extrudados de lignina-quitosana ativados	36,3	ALBADARIN et al., 2017
Aerogel microporoso de de Ni-C-N/Sílica	54	DAI et al., 2021
Hidróxidos duplos em camadas de MgAl	102	ZHAO et al., 2017
PUF imobilizada com carboximetilquitosana	118,2	REN et al., 2021
Carvão ativado à base de bambu	454	HAMEED; DIN; AHMAD, 2007

Fonte: Adaptado de Ren e colaboradores (2021).

Por meio da Tabela 3 é possível perceber que o carvão ativado, quando comparado aos adsorventes apresentados, possui elevada capacidade de adsorção, motivo justificado pela sua alta porosidade e área superficial, podendo a última chegar até a 4000 m<sup>2</sup>/g. No entanto, a utilização de poliuretanas é mais barato, além de serem materiais versáteis e demonstrarem maior facilidade de dessorção, o que conseqüentemente permite o reuso do adsorvente, as colocando como materiais com alta possibilidade para tratamentos em grandes volumes. Alguns trabalhos, como o de Jin e colaboradores (2021) mostraram que PU funcionalizadas com derivado de dopamina tem capacidade de adsorção de corante azul de

metileno em grande escala com eficiência de até 80%. Nesse cenário, a espuma foi capaz de tratar 4,1 L de águas residuais com fluxo de 22,2 L/(m<sup>3</sup>.s), evidenciando, portanto, a aplicabilidade das PU em projetos de engenharia.

Outro trabalho que evidencia a possibilidade de aplicar as PU em escalas industriais é de Kai e colaboradores (2022), que utilizou PUF revestida com polidopamina em nanotubos de haloisita carregados com  $\gamma$ -aminopropiltrióxissilano para adsorção de corantes catiônicos, aniônicos e metais pesados em uma coluna com o adsorvente. Por meio do trabalho, foi possível concluir que o compósito de espuma de poliuretano é facilmente recuperado e opera por meio de fluxo contínuo, o que evita contaminações secundárias. Além disso, o tempo para adsorção foi muito rápido. Em 20 minutos, os corantes foram removidos, chegando a uma remoção de 98,9%, característica desejada em operações industriais.

#### 4 CONCLUSÃO

Essa revisão permitiu compreender a versatilidade do polímero PU, que podem ser utilizadas em almofadas, colchões, interiores automotivos, isolantes acústicos, carpetes e outros, sendo um dos materiais mais pesquisados no mundo. As PU podem ser sintetizadas a partir de uma grande variedade de isocianatos, polióis e extensores de cadeia, sendo fácil de se adequar às necessidades finais desejadas. Esse trabalho deu enfoque para o uso de PU e seus compósitos para adsorção de corantes, já que estes, utilizados principalmente na indústria têxtil, apresentam efeitos indesejáveis à fauna, flora e aos seres humanos.

A adsorção se mostra como um tratamento bastante eficaz para remoção de corantes em águas residuárias e a utilização de PU como adsorvente se destacou como por permitir facilmente a separação entre adsorvente e adsorvato além de ser uma técnica econômica e possuir alta eficiência. O papel dos parâmetros físico-químicos, como pH da solução, concentração inicial do adsorvato, dosagem do adsorvente, temperatura do sistema, além da interação adsorvato-adsorvente também foram discutidos.

No entanto, apesar das PU apresentarem boa capacidade de remoção de corantes, a maioria dos trabalhos não a utilizam de maneira isolada para testes de adsorção, ou seja, normalmente nesses testes utilizam compósitos de PU incorporadas a outros materiais, como nanotubos de carbono, detergentes e outros compostos capazes de oferecer vantagens adicionais em termos estruturais e adsorptivos ao polímero final. Esse fato demonstra mais uma vez que as PU são bastante adaptáveis e pelo fato da relação entre o meio, adsorvente e adsorvato influenciarem na capacidade de adsorção, as PU devem ser constantemente estudadas, para se otimizar o processo de adsorção para definir condições operacionais adequadas, com o objetivo de fornecerem maior capacidade de remoção de corantes.

## REFERÊNCIAS

AKINDOYO, J. O. et al. *Polyurethane types, synthesis and applications – a review*. **RSC Advances**, v. 6, n. 115, p. 114453–114482, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1039/C6RA14525F> >. Acesso em: 01 mar. 2022

AKSU, Z.; TEZER, S. Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 3 - 4, p. 1347–1361, 2005. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2004.06.007> >. Acesso em: 01 mar. 2022.

ALBADARIN, A. B. et al. *Activated lignin-chitosan extruded blends for efficient adsorption of methylene blue*. **Chemical Engineering Journal**, v. 307, p. 264–272, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2016.08.089> >. Acesso em: 21 abr. 2022.

AL-BAZI, S. J.; CHOW, A. *Extraction of palladium thiocyanate with polyurethane foam*. **Talanta**, v. 29, n. 6, p. 507–510, 1982. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/0039-9140\(82\)80203-8](https://doi.org/10.1016/0039-9140(82)80203-8) >. Acesso em: 31 abr. 2022.

ALBUQUERQUE, B. R. et al. *Could fruits be a reliable source of food colorants? Pros and cons of these natural additives*. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 61, n. 5, p. 805–835, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1746904> >. Acesso em: 15 jul. 2022.

ALMEIDA, M. L. B. **Espumas Poliméricas contendo resíduo de catalisador da indústria de petróleo como adsorventes para contaminantes orgânicos aquosos**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017.

ALVES C. C. O. **Remoção de aminoácidos aromáticos de soluções aquosas por adsorvente preparado de resíduo agrícola**. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Ciência dos Alimentos da Faculdade de Farmácia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2012.

ANJU, M.; RENUKA, N. K. *Magnetically actuated graphene coated polyurethane foam as potential sorbent for oils and organics*. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 13, n. 1, p. 1752–1762, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.01.012> >. Acesso em: 10 mai. 2022.

APPEL, C. et al. *Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility*. **Geoderma**, v. 113, n. 1, p. 77–93, 1 abr. 2003. Disponível em: < [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00316-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00316-6) >. Acesso em: 08 mar. 2022.

ARIAS, P. E. Z. et al. *Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: una breve revisión*. **Revista La Facultad de Ciencias Químicas**, n. 19, p. 10, 2018. Disponível em: < <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/2216> >. Acesso em: 07 jun. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. Perfil do setor. **ABIT**, 2022. Disponível em: < <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor> >. Acesso em: 22 fev. 2022.

ATKINS P. W. *Physical Chemistry*. 5. ed. Oxford: University Press, 1994.

AUXOCROMO. HiSoUR Arte Cultura Exposição. **HiSour**, 2018. Disponível em: < <https://www.hisour.com/pt/auxochrome-26500/> >. Acesso em: 1 mar. 2022.

AYRES E. **Poliuretanos e nanocompósitos biodegradáveis derivados de dispersões aquosas projetados para aplicações biomédicas**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017.

BADDI, S.; PALANISAMY, A. *Thermoreversible gelation of poly(urethane acyl-semicarbazides) carrying cy-cloaliphatic moieties and studies on selective adsorption of dyes from waste-water*. **European Polymer Journal**, v. 99, p. 90-101, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.12.011> >. Acesso em: 01 abr. 2022.

BALDEZ, E. E.; ROBAINA, N. F.; CASSELLA, R. J. *Employment of polyurethane foam for the adsorption of Methylene Blue in aqueous medium*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 159, p. 580-586, 2008. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.055> >. Acesso em: 14 mai. 2022.

BALDEZ, E. E.; ROBAINA, N. F.; CASSELLA, R. J. *Study of Rhodamine B retention by polyurethane foam from aqueous medium in presence of sodium dodecylsulfate*. University of Cambridge, 2014.

BELTRAME, L. T. C. Caracterização de Efluente Têxtil e Proposta de Tratamento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2000.

BOWEN, H. J. M. *Absorption by polyurethane foams: new method of separation*. **Journal of the Chemical Society A: Inorganic, Physical, Theoretical**, p. 1082–1085, 1970. Disponível em: < <https://www.semanticscholar.org/paper/Absorption-by-polyurethane-foams%3B-new-method-of-Bowen/442be6bb99e0152b313d397e6d30730c9c3ac144> >. Acesso em: 12 fev. 2022.

BRAUN T.; JAMES D.; FARAG B. *Polyurethane Foam Sorbents in Separation Science*. 1. ed. Boca Raton, 1985.

BURKINSHAW, S. M.; SALIHU, G. *The wash-off of dyeings using interstitial water. Part 4: Disperse and reactive dyes on polyester/cotton fabric*. **Dyes and Pigments**, v. 99, n. 3, p. 548–560, 2013. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.dyepig.2013.06.006> >. Acesso em: 14 jan. 2022.

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M.; NETO S. C. Poliuretano: de travesseiros a preservativos, um polímero versátil. **Química Nova na Escola**, v. 31, p. 159–164, 2009. Disponível em: < [http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc31\\_3/02-QS-3608.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc31_3/02-QS-3608.pdf) >. Acesso em: 03 ago. 2022.



CARAM, R. **Estrutura e propriedades dos materiais - materiais poliméricos**. UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, 2006. Disponível em: < <http://www.fem.unicamp.br/~caram/8.%20MATERIAIS%20POLIMERICOS%20GRAD.pdf> >. Acesso em: 21 mar. 2022.

CARVALHO M. S. **Aplicação de espumas de poliuretano na recuperação de gálio de rejeitos industriais**. Tese (Doutorado) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 1993.

CENTENARO G. S. N. M., G. S. N. et al. *Application of polyurethane foam chitosan-coated as a low-cost adsorbent in the effluent treatment*. **Journal of Water Process Engineering**, v. 20, p. 201–206, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.11.008> >. Acesso em: 05 abr. 2022.

ČEROVIĆ, L. J. S. et al. *Point of zero charge of different carbides*. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 297, n. 1–3, p. 1–6, 2007. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.10.012> >. Acesso em: 13 jun. 2022.

CHOI, T. J.; KIM, D. Y.; CHANG, J. Y. *Water wettable, compressible, and hierarchically porous polymer composite*. **Microporous and Mesoporous Materials**, 2016. Disponível em: < <https://ur.booksc.me/book/63940969/95d1c8> >. Acesso em: 12 abr. 2022.

COONEY D. O. **Adsorption design for wastewater treatment**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999.

CORRÊA, M. S. et al. **Ciências ambientais e o desenvolvimento sustentável na Amazônia 3**. Atena, 2018.

CRINI, G. *Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review*. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 9, p. 1061–1085, 2006. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001> >. Acesso em: 09 jun. 2022.

DAI, C. et al. *Mesoporous composite Ni-C-N/SA for selective adsorption of methylene blue from water*. **Chemical Engineering Journal**, v. 407, p. 127181, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127181> >. Acesso em: 10 abr. 2022.

DESROCHES, M. et al. *From vegetable oils to polyurethanes: synthetic routes to polyols and main industrial products*. **Taylor&Francis**, v. 1, p. 41, 2011. Disponível em: < <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00659006/document> >. Acesso em: 18 mai. 2022.

DILARRI, G. et al. *Removal of Dye Toxicity from an aqueous solution using an industrial strain of Saccharomyces Cerevisiae (Meyen)*. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 227, n. 8, p. 269, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-016-2973-1> >. Acesso em: 13 abr. 2022.

DOĞAN, M. et al. *Adsorption kinetics of maxilon blue GRL onto sepiolite from aqueous solutions*. **Chemical Engineering Journal**, v. 124, n. 1–3, p. 89–101, 2006. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2006.08.016> >. Acesso em: 14 fev. 2022.

DONG, K. et al. *Adsorption behavior of azo dye eriochrome black t from aqueous solution by  $\beta$ -cyclodextrins/polyurethane foam material*. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.748805> >. Acesso em: 15 mar. 2022.

DONG, K. et al. *Polyurethane–Attapulgitite porous material: preparation, characterization, and application for dye adsorption*. **Journal of Applied Polymer**, v. 129, n. 4, 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/app.38874> >. Acesso em: 16 mai. 2022.

DORRAJI, M. S. S. et al. *Polyurethane foam-cadmium sulfide nanocomposite with open cell structure: dye removal and antibacterial applications*. **Korean J. Chem. Eng.**, v. 32, n. 4, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s11814-016-0261-9> >. Acesso em: 17 abr. 2022.

DUBININ, M.M; RADUSHKEVICH, L.V. *The equation of the characteristic curve of activated charcoal*. 1947.

EL-BOURAIIE, M. *Removal of the Malachite Green (MG) dye from textile industrial wastewater using the polyurethane foam functionalized with salicylate*. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 36, p. 1228–1236, 2015. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/01932691.2014.964802> >. Acesso em: 21 jun. 2022.

EL QADA, E. N.; ALLEN, S. J.; WALKER, G. M. *Adsorption of Methylene Blue onto activated carbon produced from steam activated bituminous coal: A study of equilibrium adsorption isotherm*. **Chemical Engineering Journal**, v. 124, n. 1–3, p. 103–110, 2006. Disponível em: < [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4395266/mod\\_resource/content/1/ChemEngJ-2011.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4395266/mod_resource/content/1/ChemEngJ-2011.pdf) >. Acesso em: 19 jul. 2022.

FERREIRA, A. L. **Síntese de poliuretano termoplástico a partir de óleo de andiroba**. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2018.

FERREIRA, S. *The determination of molybdenum in water and biological samples by graphite furnace atomic spectrometry after polyurethane foam column separation and preconcentration*. **Talanta**, v. 61, n. 6, p. 789–795, 2003. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/s0039-9140\(03\)00378-3](https://doi.org/10.1016/s0039-9140(03)00378-3) >. Acesso em: 22 abr. 2022.

FIGUEIREDO, S. C. G. DE; SANTOS, C. A. M. DOS; RIBAS, L. F. **Engenharia de produção: inovação na indústria 4.0**. Editora Poisson, 2020.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. *Insights into the modeling of adsorption isotherm systems*. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 10, 2010. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.013> >. Acesso em: 24 mai. 2022.

FOUST A. S.; CLUMP C. W.; WENZEL L. A. **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Guanabara dois, 1982.

GENG, J. et al. *2-Amino-4-chloro-5-formylthiophene-3-carbonitrile derived azo dyes*.

**Dyes and Pigments**, v. 117, p. 133–140, 2015. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2015.02.010> >. Acesso em: 23 jun. 2022.

GUARATINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes têxteis. **Química Nova**, v. 23, p. 71–78, 2000. Disponível em: < [http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe\\_artigo.asp?id=1434](http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=1434) >. Acesso em: 27 jun. 2022.

HAGE JR., E. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. **Polímeros**, v. 8, n. 2, p. 6–9, 1998. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0104-14281998000200003> >. Acesso em: 12 mar. 2022.

HAMEED, B.; DIN, A.; AHMAD, A. *Adsorption of methylene blue onto bamboo-based activated carbon: Kinetics and equilibrium studies*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 141, n. 3, p. 819–825, 2007. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.049> >. Acesso em: 28 abr. 2022.

HIPOLITO I. S.; HIPOLITO R. S.; LOPES G. A. Polímeros na Construção Civil. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, Gestão e Tecnologia para competitividade, 23, 24 e 15 de outubro de 2013. **Anais [...]** Faculdade Dom Bosco, 2013.

HUSSEIN, F. B.; ABU-ZAHRA, N. H. *Synthesis, characterization and performance of polyurethane foam nanocomposite for arsenic removal from drinking water*. **Journal of Water Process Engineering**, v. 13, p. 1–5, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jwpe.2016.07.005> >. Acesso em: 15 ago. 2022.

IONESCU, M. **Chemistry and technology of polyols for polyurethanes**. 2 ed. Shawbury: Smithers Rapra, 2016.

JAMSAZ, A.; GOHARSHADI, E. K. *An environmentally friendly superhydrophobic modified polyurethane sponge by seashell for the efficient oil/water separation*. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 139, p. 297–304, 2020. Disponível em: < <https://www.sciencegate.app/app/redirect#aHR0cHM6Ly9keC5kb2kub3JnLzEwLjEwMTYvYV5wc2VwLjIwMjAuMDQuMDQy> >. Acesso em: 29 jun. 2022.

JAIME, F. K. L. **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.

JIN, L. et al. *Functionalized polyurethane sponge based on dopamine derivative for facile and instantaneous clean-up of cationic dyes in a large scale*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 400, p. 123203, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123203> >. Acesso em: 12 jun. 2022.

JR CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

KAI, N. J. N. et al. *Fast and efficient removal of dyes and Cr(VI) ion from wastewater using halloysite nanotubes-covalently coated polyurethane sponges*. **Environmental Chemistry Letters**, v. 15, n. 2, p. 347–366, 2022. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108308> >. Acesso em: 15 fev. 2022.

- KALAIVANI, S. S. et al. *Novel hyperbranched polyurethane resins for the removal of heavy metal ions from aqueous solution. **Process Safety and Environmental Protection***, v. 104, p. 11–23, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.08.010> >. Acesso em: 09 jun. 2022.
- KANEYOSHI A. **Polyurethane and related foams**. 1. ed. Boca Raton, Flórida. .HONG, H.-J. et al. *Carboxymethylated cellulose nanofibrils (CMCNFs) embedded in polyurethane foam as a modular adsorbent of heavy metal ions. **Carbohydrate Polymers***, v. 195, p. 136–142, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.081> >. Acesso em: 30 mar. 2022.
- KATHERESAN, V.; KANSEDO, J.; LAU, S. Y. *Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering***, p. 4676–4697, 2018. Disponível em: < <http://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060> >. Acesso em: 30 mar. 2022.
- KAUSAR, A. *Review on Technological Significance of Photoactive, Electroactive, pH-sensitive, Water-active, and Thermoresponsive Polyurethane Materials. **Polymer-Plastics Technology and Engineering***, v. 56, n. 6, p. 606–616, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1233279> >. Acesso em: 31 mar. 2022.
- KHALILIFARD, M.; JAVADIAN, S. *Magnetic superhydrophobic polyurethane sponge loaded with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@oleic acid@graphene oxide as high performance adsorbent oil from water. **Chemical Engineering Journal***, v. 408, p. 127369, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127369> >. Acesso em: 09 abr. 2022.
- KHAN, S.; MALIK, A. *Toxicity evaluation of textile effluents and role of native soil bacterium in biodegradation of a textile dye. **Environmental Science and Pollution Research***, v. 25, n. 5, p. 4446–4458, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0783-7> >. Acesso em: 07 abr. 2022.
- KONG, L. et al. *Removal of brilliant green from aqueous solutions based on polyurethane foam adsorbent modified with coal. **Journal of Cleaner Production***, v. 137, p. 51–59, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.067> >. Acesso em: 02 jun. 2022.
- KUMARI, S.; CHAUHAN, G. S.; AHN, J. *Novel cellulose nanowhiskers-based polyurethane foam for rapid and persistent removal of methylene blue from its aqueous solutions. **Chemical Engineering Journal***, v. 304, p. 728–736, 2016. Disponível em: < <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20163350463> >. Acesso em: 19 abr. 2022.
- LALNUNHLIMI, S.; KRISHNASWAMY, V. *Decolorization of azo dyes (Direct Blue 151 and Direct Red 31) by moderately alkaliphilic bacterial consortium. **Brazilian Journal of Microbiology***, v. 47, n. 1, p. 39–46, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.bjm.2015.11.013> >. Acesso em: 20 mai. 2022.
- LAXMI, L. et al. *Synthesis, vibrational spectrometry and thermal characterizations of coordination polymers derived from divalent metal ions and hydroxyl terminated polyurethane as ligand. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy***, v. 188, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2017.07.032> >. Acesso em: 01 jun. 2022.

LEAL, C. S. M. **Solubilidade de Corantes Azo**. Covilhã, Portugal: Universidade da Beira Interior, 2011.

LEE, H. C. et al. *Preparation and acid dye adsorption behavior of polyurethane/chitosan composite foams*. **Fibers and Polymers**, v.10, n.5, p. 636-642, 2009. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s12221-010-0636-1> >. Acesso em: 04 abr. 2022.

LEITE, B. T. et al. *Removal of malachite green from aqueous medium employing polyurethane foam as adsorbent and sodium dodecylsulfate as carrier*. **Water Air Soil Pollut**, v. 223, p 1303–1313, 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s11270-011-0946-y> >. Acesso em: 02 jun. 2022.

LI, H. et al. *Three dimensional MOF-sponge for fast dynamic adsorption*. **Journal Name**, v. 00, p. 1-3, 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.1039/C6CP06617H> >. Acesso em: 03 jul. 2022.

LI, Z. et al. *Removal of malachite green dye from aqueous solution by adsorbents derived from polyurethane plastic waste*. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104704> >. Acesso em: 12 mai. 2022.

LI, X. X. et al. *Preparation and malachite green adsorption behavior of polyurethane/chitosan composite foam*. **Journal of Cellular Plastics**, v. 0, n. 0, p. 1–14, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1177%2F0021955X14542538> >. Acesso em: 19 mai. 2022.

LI, X. X. et al. *Malachite green adsorption behavior of polyurethane/chitosan composite fan*. **Cellular Polymers**, v. 35, n. 1, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1177%2F026248931603500101> >. Acesso em: 20 abr. 2022.

LIU, R.; CHEN, Y.; FAN, Y. *Design, characterization, dyeing properties, and application of acid-dyeable polyurethane in the manufacture of microfiber synthetic leather*. **Fibers and Polymers**, v. 16, n. 9, p. 1970-1980, 2015. Disponível em; < <http://dx.doi.org/10.1007/s12221-015-5024-4> >. Acesso em: 13 jun. 2022.

LIU, Y. et al. *Hierarchically porous graphitic carbon monoliths containing nickel nanoparticles as magnetically separable adsorbents for dyes*. **Journal of Applied Polymer**, v. 132, n. 3, 2015. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/app.41322> >. Acesso em: 10 abr. 2022.

LIU, Z. et al. *In Situ Growth of Ca<sup>2+</sup>-Based Metal–Organic framework on casio3/abs/tpu 3d skeleton for methylene blue removal*. **Materials** v. 13, n. 19, 2020. Disponível: < <http://dx.doi.org/10.3390/ma13194403> >. Acesso em: 05 fev. 2022.

MAHMOOD, N. et al. *Depolymerization of lignins and their applications for the preparation of polyols and rigid polyurethane foams: a review*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 317–329, jul. 2016. Disponível em: < <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v60y2016icp317-329.html> >. Acesso em: 04 mar. 2022.

MALLAKPOUR, S.; BEHRANVAND, V. *Polyurethane sponge modified by alginate and activated carbon with abilities of oil absorption, and selective cationic and anionic dyes clean-up*. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, n. 1, 2021. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127513> >. Acesso em: 01 jun. 2022.

MANABE, S. et al. *Graphene nanosheets homogeneously incorporated in polyurethane sponge for the elimination of water-soluble organic dyes*. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 584, p. 816–826, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.10.012> >. Acesso em: 02 jul. 2022.

MARCHETTI, N. et al. *Determination of adsorption isotherms by means of HPLC: Adsorption mechanism elucidation and separation optimization*. **Journal of Separation Science**, p. 727–741, 2009. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/jssc.200800425> >. Acesso em: 22 mar. 2022.

MARIN, P. et al. Avaliação do efeito da temperatura, ph e granulometria do adsorvente na adsorção do corante azul reativo 5G. **Engevista**, v. 17, n. 1, p. 10, 2014. Disponível em: < <https://www.semanticscholar.org/paper/AVALIA%20C3%87%20C3%83O-DO-EFEITO-DA-TEMPERATURA%20C-20PH-E-DO-NA-DO-Marin-Borba/27c5faf11eba9d5710af1b42444892bb2ff1dcdc> >. Acesso em: 14 abr. 2022.

MARTINS, L. R. J. Corantes, suas descobertas e contribuições. **PET Química UFC**, 2021. Disponível em: < <http://www.petquimica.ufc.br/corantes-suas-descobertas-e-contribuicoes/> >. Acesso em: 26 fev. 2022

MASEL R. *Principles of Adsorption and Reaction on Solid Surfaces*. 2 Ed. Nova York: Wiley, 1951.

MCCABE W. L.; SMITH J. C.; HARRIOTT P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5. ed., 1993.

MCKAY, G. *Use of adsorbents for the removal of pollutants from wastewaters*. CRC Press, 1995.

MELLO, V. M.; SUAREZ, P. A. Z. *The expressive Ink formulations through history*. **Revista Virtual de Química**, v. 4, n. 1, 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20120002> >. Acesso em: 16 jun. 2022.

MENDIETA-RODRÍGUEZ, L. S. et al. *Synthesis and characterization of a polyurethane-polyaniline macroporous foam material for methyl orange removal in aqueous media*. **Materials Today Communications**, v. 26, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102155> >. Acesso em: 16 jul. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE **Resolução n. 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. CONAMA, 2005, Disponível em: < [http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO\\_CONAMA\\_n\\_357.pdf](http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf) > Acesso em: 20 fev. 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. CONAMA, 2011. Disponível em: < [https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA\\_n.430.2011.pdf](https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/CONAMA_n.430.2011.pdf) > Acesso em: 20 fev. 2022.

MOAWED, E. A.; EL-HAGRASY, M. A.; FARHAT, A. A. M. *Application of magnetic isothiuronium polyurethane sorbent for the removal of acidic and basic dyes from wastewater.* **Journal of Cleaner Production**, v. 157, 2016. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.145> >. Acesso em: 21 abr. 2022.

MOAWED, E. A.; EL-SHAHAT, M. F. *Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies of the removal of triphenyl methane dyes from wastewater using iodopolyurethane powder.* **Journal of Taibah University for Science**, v. 10, n. 1, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.03.008> >. Acesso em: 14 fev. 2022.

MOAWED, E. A.; ABULKIBASH, A. B.; EL-SHAHAT, M. F. *Synthesis and characterization of iodo polyurethane foam and its application in removing of aniline blue and crystal violet from laundry wastewater.* **Journal of Taibah University for Science**, v. 9, n. 1, 2015. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2014.07.003> >. Acesso em: 12 jul. 2022.

MOHAMMADI, A.; LAKOURAJ, M. M.; BARIKANI, M. *Preparation and characterization of p-tert-butyl thiocalix[4]arene imbedded flexible polyurethane foam: An efficient novel cationic dye adsorbent.* **Reactive & Functional Polymers**, v. 83, p. 14-23, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.07.003> >. Acesso em: 19 mai. 2022.

MOJERLOU, F. et al. *Efciency of polyurethane elastomer containing sulfonated groups as chain extender in removing Malachite green.* **Iranian Polymer Journal**, 2020. Disponível em: < <https://www.researcher-app.com/paper/5882711> >. Acesso em: 22 abr. 2022.

MOREIRA S. A. **Adsorção de íons metálicos de efluentes aquosos usando bagaço do pendúnculo de caju:** estudos de batelada e coluna de leito fixo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2008.

MORI, M.; CASSELLA, R. Estudo da sorção do corante catiônico violeta cristal por espuma de poliuretano em meio aquoso contendo dodecilsulfato de sódio. **Química Nova**, v. 32, n. 8, p. 2039-2045, 2009. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000800011> >. Acesso em: 08 fev. 2022.

MOTHEO, A. DE J. *Aspects on fundamentals and applications of conducting polymers.* Croácia: InTech, 2012.

MÜLLER, L. C. et al. Adsorção do azul de metileno em serragem de *Pinus elliottii* (pinus) e *Drepanostachyum falcatum* (bambu). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 687–695, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019160344> >. Acesso em: 01 mar. 2022.

NASCIMENTO R. F. et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. 1. ed. Fortaleza, Ceará: Editora UFC, 2014.

NASCIMENTO R. F. et al. **Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicações em matrizes ambientais**. Fortaleza, Ceará: Imprensa Universitária, 2017. v. 1

NASIRI, S.; ALIZADEH, N. *Synthesis and adsorption behavior of hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin-polyurethane magnetic nanoconjugates for crystal and methyl violet dyes removal from aqueous solutions*. **RSC Adv.**, v. 9, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1039/C9RA03335A> >. Acesso em: 15 mar. 2022.

NETA J. J. S. et al. *Use of polyurethane foams for the removal of the Direct Red 80 and Reactive Blue 21 dyes in aqueous medium*. **Desalination**, v. 281, p. 55–60, 2011. Disponível em: < [https://www.academia.edu/5433142/Use\\_of\\_polyurethane\\_foams\\_for\\_the\\_removal\\_of\\_the\\_Direct\\_Red\\_80\\_and\\_Reactive\\_Blue\\_21\\_dyes\\_in\\_aqueous\\_medium](https://www.academia.edu/5433142/Use_of_polyurethane_foams_for_the_removal_of_the_Direct_Red_80_and_Reactive_Blue_21_dyes_in_aqueous_medium) >. Acesso em: 18 mai. 2022.

NIKKHAH, A. A. et al. *Removal of oil from water using polyurethane foam modified with nanoclay*. **Chemical Engineering Journal**, v. 262, p. 278–285, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.077> >. Acesso em: 19 abr. 2022.

NETA, O. P. L. **Estudo comparativo do uso das argilas bentonita chocolate e verde na adsorção de metais pesados: níquel e cobre**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual da Paraíba, Paraíba, 2022.

OLIVEIRA, L. G. et al. Uma revisão do uso de processos oxidativos avançados para descoloração de águas residuais de efluentes. **Revista Processos Químicos**, v. 13, n. 26, p. 105–112, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.19142/rpq.v13i26.546> >. Acesso em: 23 jun. 2022.

OLIVEIRA V. M. S. **Síntese e caracterização de dispersões aquosas de poliuretano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2008.

PENHA, A. V. S.; MOURA, K. O.; PAZ, G. L. Tratamento de águas residuais: uma revisão sobre a adsorção do corante preto de amido 10B. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 2, p. 12, 2021. Disponível em: < <http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v13n2a21.pdf> >. Acesso em: 04 abr. 2022.

PEREIRA, C. D. S. **Estudo da sorção de ouro em espuma de poliuretano de meio ácido clorídrico visando aplicações analíticas**. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

PIQUET, A. B. M.; MARTELLI, M. C. Bioadsorventes produzidos a partir de resíduos orgânicos para remoção de corantes: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, 2022. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26506> >. Acesso em: 12 abr. 2022.

QIN, J. et al. *Adsorption behavior of crystal violet from aqueous solutions with chitosan-graphite oxide modified polyurethane as an adsorbent*. **Journal of Applied Polymer**, v. 132,



n. 17, 2015. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/app.41828> >. Acesso em: 09 fev. 2022.

QIN, J. et al. *Preparation of graphite oxide/polyurethane foam material and its removal application of malachite green from aqueous solution*. **Journal of Applied Polymer**, v. 131, n. 21, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/app.40988> >. Acesso em: 11 jun. 2022.

RABOCKAI T. **Físico Química de superfícies**. 20. ed. Washington: Secretaria-Geral da Organização dos Estados Americanos, Programa Regional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 1979.

RANI, B. et al. *Bioremediation of dyes by fungi isolated from contaminated dye effluent sites for bio-usability*. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 45, n. 3, p. 1055–1063, 2014.

Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/bjm/a/93mvXjqjMvFYnLz6hkvKzZd/?lang=en&format=pdf> >. Acesso em: 17 fev. 2022.

Relatório de análise de tendências, participação e tamanho do mercado de poliuretano por produto (espuma flexível, espuma rígida), por uso final (construção, eletrônicos e eletrodomésticos), por região (APAC, América do Norte) e previsões por segmento, 2021 - 2028. **GRAND VIEW RESEARCH**, 2022. Disponível em: < <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/polyurethane-pu-market> >. Acesso em: 22 mar. 2022.

REN, L. et al. *Recyclable polyurethane foam loaded with carboxymethyl chitosan for adsorption of methylene blue*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 417, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126130> >. Acesso em: 19 jun. 2022.

REVANKAR, M.; LELE, S. *Synthetic dye decolorization by white rot fungus, Ganoderma sp. WR-1*. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 4, p. 775–780, 2007. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.03.020> >. Acesso em: 18 mar. 2022.

RIST S.; HARTMANN N. B. *Aquatic ecotoxicity of microplastics and nanoplastics: lessons learned from engineered nanomaterials*. In: KOSTIANOY, A. G.; BARCELÓ, D. (orgs). **Aquatic ecotoxicity of microplastics and nanoplastics: lessons learned from Engineered Nanomaterials. The Handbook of Environmental Chemistry**. Kongens Lyngby, Denmark: Springer International Publishing, 2018. p. 25–49.

ROBAINA, N. F.; SORIANO, S.; CASSELLA, R. J. *Polyurethane foam loaded with SDS for the adsorption of cationic dyes from aqueous medium: Multivariate optimization of the loading process*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 167, p. 653-659, 2009. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.033> >. Acesso em: 14 fev. 2022.

ROBINSON, T. et al. *Remediation of dyes in textile e,uent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative*. **Bioresource Technology**, v. 77, n. 3, p.247-2555, 2001. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00080-8) >. Acesso em: 10 mar. 2022.

- RODRIGUES, J. Auxocromo e laboratório. **OnlineFCiências**, 2018. Disponível em: < <https://www.fciencias.com/2018/03/01/auxocromo-laboratorio-online/> >. Acesso em: 1 mar. 2022.
- RODRIGUES, K. et al. Viabilidade do tratamento de água residuária sintética têxtil em reator aeróbio de leito fixo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 1, p. 99–106, 2010. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S1413-41522010000100012> >. Acesso em: 19 jun. 2022.
- SABER-SAMANDARI, S.; HEYDARIPOUR, J. *Onion membrane: an efficient adsorbent for decoloring of wastewater*. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**, v. 13, n. 1, p. 16, 2015. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1186/s40201-015-0170-6> >. Acesso em: 31 mar. 2022.
- SANTANA, C. M. **Estudo da degradação de corante têxtil em matrizes aquosas por meio dos processos oxidativos avançados O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV e foto-Fenton**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- SASIDHARAN, V. et al. *Three-dimensional (3D) polymer–metal–carbono framework for efficient removal of chemical and biological contaminants*. **Scientific Reports**, v. 11, 2011. Disponível em: < <https://www.nature.com/articles/s41598-021-86661-w> >. Acesso em: 30 mar. 2022.
- SCHIO, R. R. et al. *Fixed-bed adsorption of allura red dye on chitosan/polyurethane foam*. **Chemical Engineering Technology**, v. 42, n. 11, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/ceat.201800749> >. Acesso em: 21 mai.2022.
- ŠEBENIK, U.; KRAJNC, M. *Influence of the soft segment length and content on the synthesis and properties of isocyanate-terminated urethane prepolymers*. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 27, n. 7, p. 527–535, 2007. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2006.10.001> >. Acesso em: 17 mar. 2022.
- SELVASEMBIAN, R. et al. *Recent advances in the polyurethane-based adsorbents for the decontamination of hazardous wastewater pollutants*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 417, p. 125960, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125960> >. Acesso em: 2022.
- SHIH, C. Y.; CHEN, C. W.; HUANG, K. S. *Adsorption of color dyestuffs on polyurethane–chitosan blends*. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 91, p. 3991–3998, 2004. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/app.13549> >. Acesso em: 14 mar. 2022.
- SHIVAPRASAD, P. et al. *Superparamagnetic nanocomposites derived from waste polyurethane foam for the removal of Rhodamine B: batch and continuous column studies*. **Separation Science and Technology**, v. 55, n. 16, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1657147> >. Acesso em: 16 abr. 2022.
- SILVA DE ROSSI, P. H. et al. Utilização tecnológica de corantes naturais em alimentos: uma revisão. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, v. 2, n. 11, p. e211941, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.47820/recima21.v2i11.941> >. Acesso em: 22 mar. 2022.

SILVA, J. C. **Degradação de mistura de corantes têxteis empregando processos oxidativos avançados**. Recife, Pernambuco: Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

SILVA V. R. **Espumas rígidas de poliuretano baseadas em óleos vegetais utilizando rejeitos industriais inorgânicos como carga e retardante de chamas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2017.

SINGH, V. P.; VAISH, R. *Diesel exhaust emission soot adsorbent for the removal of dye from wastewater*. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 17, 2019. Disponível em: < <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-019-02524-y> >. Acesso em: 18 abr. 2022.

SLAMA, H. B. et al. Diversity of synthetic dyes from textile industries, discharge impacts and treatment methods. **Applied Sciences**, v. 11, n. 14, p. 6255, 2021. Disponível em: < <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/14/6255> >. Acesso em: 11 mai. 2022.

SUNDARAN, S. P. et al. *Multifunctional graphene oxide loaded nanofibrous membrane for removal of dyes and coliform from water*. **Journal of Environmental Management**, v. 240, p. 494-503, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.105> >. Acesso em: 11 mai. 2022.

SOARES, M. S. **Síntese e caracterização de espumas de poliuretano para imobilização de células íntegras e aplicação na síntese de biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

SONNENSCHNEIN, M. F. **Polyurethanes: science, technology, markets and trends**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2015.

SOUZA, C. R. L. DE; PERALTA-ZAMORA, P. Degradação de corantes reativos pelo sistema ferro metálico/peróxido de hidrogênio. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 226–228, 2005. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000200011> >. Acesso em: 07 fev. 2022.

SOUZA F.M; SULAIMAN M. R.; GUPTA R. K. **Materials and chemistry of flame-retardant polyurethanes**. Washington: American Chemical Society, 2021.

SUGIMOTO, L. A toxicologia ambiental e o antigo problema dos corantes naturais. **Jornal da Unicamp**, 2021. Disponível em: < <https://www.unicamp.br/unicamp/ju/noticias/2021/07/14/toxicologia-ambiental-e-o-antigo-problema-dos-corantes-naturais> >. Acesso em: 22 mar. 2022.

SUZUKI, M. **Adsorption engineering**. Tokyo; Amsterdam; New York: Kodansha, Elsevier, 1990.

SARANYA M. et al. *Adsorption Studies of Lead (II) from aqueous solution onto Nanochitosan /Polyurethane /Polypropylene glycol ternary blends*. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 104, p. 1436–1448, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.06.004> >. Acesso em: 11 fev. 2022.

TRAN, H. N. et al. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: a critical review. **Water Research**, p. 88–116, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014> >. Acesso em: 16 mar. 2022.

UEDA, A. C. **Aplicação de micelas reversas na remoção de corantes têxteis catiônicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2006.

UPARE, V. B. et al. *Synthesis of unzipped multi-walled carbon nanotube oxides coated polyurethane foam and its application in wastewater treatment*. **Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures**, v. 29, n. 5, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1080/1536383X.2020.1843442> >. Acesso em: 19 fev. 2022.

VIEIRA AMORIM, F. et al. *Development of hydrophobic polyurethane/castor oil biocomposites with agroindustrial residues for sorption of oils and organic solvents*. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 581, p. 442–454, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.07.091> >. Acesso em: 17 fev. 2022.

VILAR W. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 3. ed. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 1999.

TAKA, A. L. et al. *Metal nanoparticles decorated phosphorylated carbon nanotube/cyclodextrin nanosponge for trichloroethylene and Congo red dye adsorption from wastewater*. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, 2020. Disponível em: < <https://repository.nwu.ac.za/handle/10394/34609?show=full> >. Acesso em: 18 mar. 2022.

TIKHOMIROVA, T. I.; RAMAZANOVA, G. R.; APYARI, V. V. *Effect of nature and structure of synthetic anionic food dyes on their sorption onto different sorbents: Peculiarities and prospects*. **Microchemical Journal**, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2018.08.022> >. Acesso em: 02 mar. 2022.

TIKHOMIROVA, T. I.; RAMAZANOVA, G. I.; APYARI, V. V. *Sorption of Ponceau 4R anionic dye from aqueous solutions on aluminum oxide and polyurethane foam*. **Russian Journal of Physical Chemistry A**, v. 88, n. 12, pp. 2192–2196, 2014. Disponível em: < [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2014RJPCA..88.2192T/doi:10.1134/S0036024414120371](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2014RJPCA..88.2192T/doi:10.1134/S0036024414120371) >. Acesso em: 07 abr. 2022.

TOLEDO, I. B. I. et al. Bisphenol a removal from water by activated carbon: effects of carbon characteristics and solution chemistry. **Environmental Science & Technology**, v. 39, n. 16, p. 6246–6250, 2005. Disponível em: < <https://doi.org/10.1021/es0481169> >. Acesso em: 11 mai. 2022.

TREYBAL, R. E. **Mass-transfer operations**. New York : McGraw-Hill, 1968.

VALENCIA, C. **Aplicação da adsorção em carvão ativado e outros materiais carbonosos no tratamento de águas contaminadas por pesticidas de uso agrícola**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

WANG, N. et al. *Fabrication of a compressible PU@RGO@MnO<sub>2</sub> hybrid sponge for efficient removal of methylene blue with an excellent recyclability*. **RSC Advances**, v. 6, 2016. Disponível em: < <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ra/c6ra18119h> >. Acesso em: 18 mar. 2022.

WATANABE K. A. **Descoloração do corante verde de malaquita por isolado bacteriano**. Dissertação (Mestrado) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2021.

WIRZPA Z. **Polyurethanes: chemistry, technology and applications** (Ellis Horwood Series in Polymer Science and Technology). Londres: Ellis Horwood, 1993.

WU, F. et al. *Two in one: modified polyurethane foams by dip-coating of halloysite nanotubes with acceptable flame retardancy and absorbency*. **Macromol. Mater. Eng.**, v. 304, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/mame.201900213> >. Acesso em: 13 jun. 2022.

YADAV, A. *Toxic characterization of textile dyes and effluents in relation to human health hazards*. **J. Sustain. Environ. Res.**, v. 3, n. 1, p. 95-102, 2014. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/publication/304461731\\_Toxic\\_characterization\\_of\\_textile\\_dyes\\_and\\_effluents\\_in\\_relation\\_to\\_human\\_health\\_hazards](https://www.researchgate.net/publication/304461731_Toxic_characterization_of_textile_dyes_and_effluents_in_relation_to_human_health_hazards) >. Acesso em: 11 mai. 2022.

YAO, B. J. et al. *Post-Synthetic polymerization of UiO-66-NH<sub>2</sub> nanoparticles and polyurethane oligomer toward stand-alone membranes for dye removal and separation*. **Chem. Eur. J.**, v. 22, n. 30, p. 10565 – 10571, 2016. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/chem.201600817> >. Acesso em: 18 mar. 2022.

ZAKARIA, R. M. et al. *Lactic acid removal from wastewater by using different types of activated clay*. In: **THIRTEEN INTERNACIONAL WATER TECHNOLOGY CONFERENCE**, 13., Hurghada, Egíto. **Anais [...]** IWTC, 2009. p. 14.

ZANONI M. V. B; YAMANAKA H. **Corantes: caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento**. 1. ed. São Paulo: UNESP, 2016.

ZHAO, J. et al. *Synthesis of functionalized MgAl-layered double hydroxides via modified mussel inspired chemistry and their application in organic dye adsorption*. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 505, p. 168–177, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.05.087> >. Acesso em: 12 mai. 2022.

ZHAO, J. et al. *Zr-MOFs loaded on polyurethane foam by polydopamine for enhanced dye adsorption*. **ScienceDirect**, v. 101, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.08.021> >. Acesso em: 17 jun. 2022.

ZHOU, Y. et al. *Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review*. **Environmental Pollution**, v. 252, p. 352–365, 2019. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072> >. Acesso em: 09 mai. 2022.

ZIA, K. M. et al. *Synthesis and molecular characterization of chitosan based polyurethane elastomers using aromatic diisocyanate*. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 66, p. 26–32, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.01.073> >. Acesso em: 21 jun. 2022

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

