

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**DANIEL MANTOVANI**

**SUSTENTABILIDADE NA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DOMICILIARES A PARTIR  
DE ESPONJAS DE LAVAR LOUÇAS PARA FINS DE NOVO MATERIAL  
ADSORVENTE E SEUS CUSTOS OPERACIONAIS**

**PONTA GROSSA**

**2024**

**DANIEL MANTOVANI**

**SUSTENTABILIDADE NA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DOMICILIARES A PARTIR  
DE ESPONJAS DE LAVAR LOUÇAS PARA FINS DE NOVO MATERIAL  
ADSORVENTE E SEUS CUSTOS OPERACIONAIS**

**Sustainability in waste generation: household dishwashing sponges for new  
adsorbent material and operational cost**

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Profa. Dra. Giane Gonçalves Lenzi.

**PONTA GROSSA**

**2024**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



DANIEL MANTOVANI

**SUSTENTABILIDADE NA GERAÇÃO DE RESÍDUOS DOMICILIARES A PARTIR DE ESPONJAS DE LAVAR  
LOUÇAS PARA FINS DE NOVO MATERIAL ADSORVENTE E SEUS CUSTOS OPERACIONAIS**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 30 de Outubro de 2024

Dra. Giane Goncalves Lenzi, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Dr. Angelo Marcelo Tusset, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Dr. Rodrigo Brackmann - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Dra. Leda Maria Saragiotto Colpini, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Dra. Rosangela Bergamasco, Doutorado - Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/10/2024.

## ***DEDICO***

Aos meus pais Nilso e Domingos (In memoriam).

A Deus pela minha vida;

A minha amada esposa Solange, e filha Valentina amores da minha vida. Sempre estiveram ao meu lado em momentos bons e difíceis ao longo das trajetórias empostas pela vida. A presença de vocês fortalece minha vida, pela busca contínua de vitórias e melhores condições de vida para nossa família.

A minha mãe guerreira, meu amor incondicional.

**Obrigado.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por todos os momentos concebidos ao longo da minha vida, pela saúde, paz, espiritualidade e formação da minha linda família, peço forças e determinação para vencer os obstáculos da vida.

À Solange e Valentina (esposa e filha) meu pilar da força, que tenho para buscar os incentivos e compreensão durante as dificuldades enfrentadas.

A minha orientadora, Professora Dra. Giane Gonçalves Lenzi pela aposta, no projeto e acima de tudo pela compreensão durante o trabalho confeccionado.

Agradeço aos participantes da banca pela sua disposição em conceder seu tempo e dedicação para dispor deste momento tão importante para a educação brasileira, por tratar-se de um projeto que renova o empenho da busca por ciência.

A professora Dra. Rosângela Bergamasco, o meu eterno e profundo agradecimento por me proporcionar sonhos e melhoria da qualidade educacional. Desde 2014 fortaleci o meu aprendizado pela sua compreensão e dedicação aos seus alunos.

Ao meu querido e amado irmão de coração, professor Dr. Luís F. Cusioli, a qual dedico honras de ser da minha família, em especial pelo respeito que formamos com o elo mais profundo, atribuído a uma condição de amizade. Fica aqui o meu agradecimento.

A minha mãe Lúcia, guerreira vencedora passou por profundas tristezas na vida, mas lembre-se que Deus sempre sabe o que faz, e a força da fé e esperança é a última que se desfaz.

## RESUMO

A sustentabilidade na atualidade é um foco de grande importância comercial e industrial, bem como formas de melhorias para sua gestão. Assim, a reutilização de esponjas de louças, é um formato que estabelece uma nova diretriz de utilização como um adsorvente de baixo custo, pois a sustentabilidade é uma área que busca integrar os princípios da engenharia com soluções voltadas para a preservação ambiental, eficiência energética e responsabilidade social, em diversas áreas especialmente para gestão de resíduos. Dentro deste contexto, a presente proposta visa desenvolver um adsorvente a partir de descartes de esponjas de louças domésticas, passando por caracterização visando sua composição morfológica e composição química com aplicação da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia no Infravermelho da Transformada de Fourier (FTIR) e potencial Zeta. Para tanto, o formato envolvendo a análise textural, visou obter a capacidade de adsorção do material avaliado; adentrando aos estudos de custos, para obtenção das esponjas de louças e procedimentos atribuídos a produção do adsorvente. Assim, o estudo de equilíbrio para análise de contaminantes emergentes, foi aplicado ao fármaco diclofenaco com ocorrência de remoção média do contaminante empregado atribuído um valor de  $40 \text{ mg g}^{-1}$ , o que representa uma redução de 98% de sua remoção. No entanto, diante da análise focada na redução do contaminante azul de metileno, foi obtido uma redução do contaminante de  $26,4 \text{ mg g}^{-1}$ , ou seja, representa uma redução de 85% após a análise de adsorção empregada. Portanto, a visão de aplicar uma nova opção de adsorvente sustentável em especial, por possuir interações com o contaminante estudado permite sua utilização em larga escala, por apresentar um grande volume de material a ser coletado e utilizado para tal finalidade. Portanto, dentro do quesito sustentabilidade, a gestão de custos deve ser primordial para materiais provindos de descartes, devido a problemática que envolve aspectos logísticos e procedimentos relacionados a limpeza e processos de ativação do adsorvente. No entanto, os custos fixos e variáveis estão diluídos e atrativos para tal aplicação com valores de coleta por unidade de esponjas em torno de R\$ 0,49 centavos de reais, quando relacionado no perfil da coleta, a qual foi atribuído um município localizado na região noroeste do Paraná, ao qual, realizou-se a estruturação da coleta seletiva com a inclusão das esponjas de lavar louças.

**Palavras-Chave:** práticas sustentáveis; contaminantes emergentes; custo produtivo; gestão de resíduos.

## ABSTRACT

Sustainability is currently a focus of great commercial and industrial importance, as well as ways to improve its management. Thus, the reuse of dish sponges is a format that establishes a new direction of use as a low-cost adsorbent, as sustainability is an area that seeks to integrate engineering principles with solutions aimed at environmental preservation, energy efficiency and social responsibility, in several areas especially for waste management. Within this context, the present proposal aims to develop an adsorbent from discarded household dish sponges, undergoing characterization aiming at its morphological composition and chemical composition with the application of Scanning Electron Microscopy (SEM), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Zeta potential. To this end, the format involving textural analysis aimed to obtain the adsorption capacity of the evaluated material; entering into cost studies, to obtain dish sponges and procedures attributed to the production of the adsorbent. Thus, the equilibrium study for the analysis of emerging contaminants was applied to the drug diclofenac with the occurrence of average removal of the contaminant used, assigned a value of  $40 \text{ mg g}^{-1}$ , which represents a 98% reduction in its removal. However, given the analysis focused on the reduction of the methylene blue contaminant, a contaminant reduction of  $26.4 \text{ mg g}^{-1}$  was obtained, that is, it represents a reduction of 85% after the adsorption analysis used. Therefore, the vision of applying a new sustainable adsorbent option in particular, as it has interactions with the studied contaminant, allows its use on a large scale, as it presents a large volume of material to be collected and used for this purpose. Therefore, within the sustainability aspect, cost management must be paramount for materials from discards, due to problems involving logistical aspects and procedures related to cleaning and adsorbent activation processes. However, the fixed and variable costs are diluted and attractive for such an application with collection values per unit of sponges around R\$0.49 cents, when listed in the collection profile, which was assigned to a municipality located in northwestern region of Paraná, in which selective collection was structured with the inclusion of dishwashing sponges.

**Keywords:** sustainable practices; emerging contaminants; production cost; waste management.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Esquema do processo de adsorção .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2 - Estrutura química do Diclofenaco.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 3 - Estrutura química do azul de metileno .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 4 - Fluxograma relacionado a caracterização do adsorvente .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 5 - Microscopia Eletrônica de Varredura do material esponja .....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 -Produção e consumo mundial de PU .....</b>	<b>17</b>
<b>Gráfico 2 - Análise de potencial Zeta para o material esponja.....</b>	<b>39</b>
<b>Gráfico 3 - Análise de FTIR para o material esponja .....</b>	<b>40</b>
<b>Gráfico 4 - (A) efeito da massa (B) efeito do pH .....</b>	<b>41</b>
<b>Gráfico 5 - Cinética da esponja para remoção do diclofenaco .....</b>	<b>43</b>
<b>Gráfico 6 - Isotermas atribuídos a diferentes temperaturas.....</b>	<b>45</b>
<b>Gráfico 7 - Condições utilizadas na adsorção de azul de metileno .....</b>	<b>49</b>
<b>Gráfico 8 - Cinética da esponja para remoção do AM.....</b>	<b>49</b>
<b>Gráfico 9 - Isotermas de adsorção de azul de metileno.....</b>	<b>51</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos de PPO e PSO.....	45
Tabela 2 - Parâmetros dos modelos de isothermas a 288 K, 298K e 308K. ....	47
Tabela 3 - Parâmetros termodinâmicos. ....	47
Tabela 4 - Remoção de azul de metileno utilizando esponja.....	50
Tabela 5 - Gastos mensal obtido pelos custos diretos e indiretos pela coleta seletiva e processo da fabricação do adsorvente.....	52
Tabela 6 Custeio de absorção utilizando o procedimento de coleta seletiva...	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Azul de Metileno
PU	Poliuretano
Un	Unidades
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
COV's	Compostos Orgânicos Voláteis
ETA	Estações de Tratamento de Água
ETE	Estações de Tratamento de Esgoto
DCF	Diclofenaco
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>15</b>
1.2.1	Objetivo geral .....	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
<b>1.3</b>	<b>Delimitação do escopo.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	Polímeros .....	17
<b>2.2</b>	<b>Poliuretanos.....</b>	<b>18</b>
2.2.1	Gerenciamento de resíduos de poliuretano.....	20
2.2.2	Gerenciamento de resíduos de poliuretano.....	20
<b>2.3</b>	<b>Adsorção .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Poluentes emergentes .....</b>	<b>23</b>
2.4.1	Diclofenaco.....	24
2.4.2	Azul de metileno .....	25
<b>2.5</b>	<b>Caracterizações dos materiais porosos .....</b>	<b>26</b>
2.5.1	Potencial Zeta.....	26
<b>2.6</b>	<b>Caracterização morfológica .....</b>	<b>27</b>
2.6.1	Microscopia eletrônica de varredura.....	27
<b>2.7</b>	<b>Gestão de coleta.....</b>	<b>27</b>
2.7.1	Custos atribuídos a gestão de coleta e produção de adsorvente .....	28
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>30</b>
3.1.2	Reagentes .....	30
3.1.3	Preparação das soluções .....	30
3.1.4	Preparo das esponjas.....	31
<b>3.2</b>	<b>Caraterização do adsorvente.....</b>	<b>31</b>
3.2.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) .....	31
3.2.2	Análise de potencial Zeta .....	31
3.2.3	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR).....	32
3.2.4	Efeito da massa e pH para o diclofenaco .....	32

3.2.5	Efeito da massa e pH para o Azul de Metileno (AM).....	32
3.2.6	Leituras das concentrações dos contaminantes emergentes.....	33
3.2.7	Pseudo-primeira ordem.....	33
<b>3.3</b>	<b>Adsorção de isothermas.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>Atribuindo a gestão de coleta.....</b>	<b>36</b>
3.4.1	Gestão de custos referente a coleta da esponja.....	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do material.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2</b>	<b>Estudo da adsorção.....</b>	<b>41</b>
4.2.1	Efeito da massa e pH.....	41
<b>4.3</b>	<b>Estudo cinético.....</b>	<b>43</b>
4.3.1	Isotérmica de adsorção.....	45
4.3.2	Parâmetros termodinâmicos.....	47
<b>4.4</b>	<b>Ensaio adsorptivos ao contaminante azul de metileno.....</b>	<b>48</b>
4.4.1	Ensaio de adsorção do azul de metileno.....	48
<b>4.5</b>	<b>Custos da demanda por unidade de esponja.....</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A poluição da água ocorre quando produtos fármacos de forma geral, químicos, como fertilizantes, corantes, pesticidas e derivados de petróleo atingem a água e corpos. A partir desta introdução, as substâncias são encontradas em efluentes, devido à inadequação tratamento, e são produzidos em atividades antrópicas tais como, agricultura e atividades industriais e domésticas (CRINI, 2008).

Para tanto, partindo das atividades industriais, são as maiores consumidoras de água e, conseqüentemente produz uma quantidade considerável de efluente que precisa de tratamento adequado antes de ser lançado no meio ambiente. Para tanto, as substâncias químicas produzidas para determinado tipo de tratamento, diagnósticos e prevenção de doenças. Esta definição, pode ser estendida a produtos farmacêuticos veterinários e a drogas ilícitas (DAUGHTON, 2003).

Diante deste contexto, a ampla variedade de fármacos, entre eles: hormônios sintéticos, estatinas, antibióticos, anti-inflamatório, antidiabético entre outros. São produzidos e consumidos na faixa de milhares de toneladas ao ano (METCALFE *et al.*, 2003). O número de compostos de fármacos para o uso humano e veterinário ainda não é globalmente conhecido. Caldwell *et al.* (2014), relatam que esse número é de cerca de 3.500 compostos. Hughes *et al.* (2013), afirmam que esse número pode ser superior a 5.000 compostos só na Europa. Dong *et al.* (2013), relatam que esse valor é provavelmente muito maior, pois apenas nos Estados Unidos da América há relatos de pelos menos 10.000 tipos de compostos.

Entretanto, os têxteis, papel e celulose e polímero indústrias usam diversos tipos de corantes em seus produtos (CRINI, 2008), o lançamento desses efluentes não afetam apenas a estética do ambiente, mas também a infiltração da luz solar sobre a superfície da água, o que leva a uma redução da fotossíntese atividade. Desta forma, este processo causa vários impactos aos organismos aquáticos devido à insuficiência de oxigênio (NAMASIVAYAM, 2001).

Neste sentido, os inúmeros contaminantes provindos de corante químicos, o Azul de Metileno (AM), é um corante catiônico amplamente utilizado em atividades antrópicas nas indústrias têxteis. Assim, ao ingerir o AM é responsável pela formação de sensação de queimação e pode causar náuseas, vômito, diarreia e gastrite.

Desta forma, é possível enfatizar a importância de realizar o tratamento de efluentes industriais para remoção AM, entre outros corantes. Seu tratamento visa

prevenir que os poluentes dos efluentes cheguem aos corpos d'água e, portanto, prevenir a deterioração ambiental e a saúde humana. As metodologias de remoção que visavam o tratamento de efluentes contaminados por AM são coagulação/floculação, fotocatalise, foto-Fenton, eletro-Fenton e adsorção (COLE *et al.*, 2015).

Os elementos adsorventes são sólidos que mantêm o soluto em sua superfície, por meio de forças físicas ou químicas, este soluto é denominado adsorvato (RUTHVEN, 1985). Onde, a adsorção é um método eficiente e confiável focando a acumulação de uma substância na superfície de um adsorvente sólido, havendo vantagens de utilização, estando presente no formato natural e/ou sintético, baixo custo e facilidade de operação (ALI, ASIM e KHAN, 2012). Para tanto, com base nas vantagens ocupadas pela adsorção, os tratamentos alternativos de efluentes estudados afim de aumentar a eficácia no processo de tratamento e simplicidade na execução, provinda de uma alternativa bastante utilizada aos dias atuais, demonstra eficiência no tratamento de efluentes provindos de contaminantes.

A partir da inclusão de métodos eficientes aplicados a adsorção, o uso de adsorventes provindos de baixos custos, possibilita a implantação de polímeros por apresentarem interações químicas atuando como adsorvato, de forma versátil em aplicações envolvendo tratamentos de poluentes (HAMAD; KASEEM; DERI, 2013).

Assim, a produção de polímeros em especial os poliuretanos, passaram a ser produzidos em larga escala, visando abranger condições domésticas como a aplicação de esponjas de louças, onde o aumento no consumo aliado ao longo tempo de degradação acarreta no acúmulo de resíduos. Neste sentido, seu acúmulo reflete no percentual de resíduos sólidos presentes nos municípios brasileiros, elevando ano a ano, o crescimento de 1% para mais de 10% em volume entre o período de 1960 a 2005 (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Partindo do ponto de vista sobre os processos de reciclagens, a inclusão com base nas necessidades socioambientais visam ampliar as reciclagens, e, seu uso como material polimérico na incorporação do meio econômico, e reprocessamento na forma de material adsorvente, buscando integrá-lo a um sistema de logística que poderá atribuir uma quantidade significativa de volume a ser retirado do meio ambiente.

## **1.1 Justificativa**

O uso de soluções que possam minimizar a contaminação do meio ambiente, é predominante em todo o planeta, buscando soluções que possam minimizar os impactos gerados pela degradação de compostos que originarão novos contaminantes ao longo dos anos. Portanto, o uso de esponjas de lavar louças é uma alternativa que proporciona um custo reduzido no quesito investimentos, diante dos contextos atribuídos ao propósito da busca contínua por adsorvantes provindos de descartes ecológicos, dos quais manifestam grande interesses provindos de ações que poderão criar destaques diante dos contextos atribuídos em especial, aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): água e saneamento, vida saudável, produção e consumo sustentáveis e cidades e comunidades sustentáveis.

Entretanto, propor técnicas de uso de adsorção, caracterizam soluções simples de grande avanço na redução dos contaminantes entre eles: fármacos e corantes diversos, denominados como agentes emergentes, encontrados em grande quantidades em diversas regiões do planeta, devido as suas aplicações comerciais e impactos causados pela falta de gestão do controle após seu uso.

Portanto, iniciativas como essa de baixo custo aplicado, busca o fortalecimento mediante a expectativas de gerenciamento de contaminantes a comunidades e regiões carentes, onde podem ser explorados pela aplicação de esponjas de lavar louças provindas de descartes.

Diante do contexto apresentado, o presente desenvolvimento enquadra-se com a Associação Brasileira de Engenharia de Produção (ABREPO), no âmbito de gestão ambiental, aos processos produtivos na produção mais limpa e gestão de resíduos industriais e prevenção de poluição, bem como o Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): água e saneamento, vida saudável, produção e consumo sustentáveis e cidades e comunidades sustentáveis.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Buscar alternativas viáveis e atribuídas a método de custeio, dentro da cadeia da sustentabilidade, utilizando um material adsorvente a partir de seu descarte de forma sustentável, bem como realizar comparação com aplicações no formato de um novo adsorvente para aplicações em contaminantes presentes em água.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um adsorvente a partir de esponjas de lavar louças;
- Caracterizar o material escolhido;
- Realizar cinética química com contaminantes emergentes utilizando a esponja como adsorvente, na comparação na redução da contaminação;
- Verificar o método de custeio do material adsorvente empregado.

### 1.3 Delimitação do escopo

Com base na justificativa apresentada, visam-se buscar condições de tecnologia ao desenvolvimento de um novo material adsorvente proveniente de esponja de lavar louças, descartáveis de uso doméstico bem como, obter resultados adsorventes sobre composto fármaco e corante industrial.

Assim, a necessidade pela busca de conhecimento sobre critérios adsorventes é uma realidade, onde o avanço em pesquisas científicas fortalecem o desbravamento do conhecimento sobre a área de adsorção e seus modelos matemáticos aplicados para condições de obter o perfil adsorvente dos contaminantes a serem utilizados aos testes e obtenção de dados.

Diante do contexto, estabelece condições e critérios relevantes dos quais posiciona-se, os critérios adsorventes e formas de obtenção mediante a seguinte questão: é viável a produção de um material provindo de descarte, como é o caso da esponja de lavar louças como um material que possa ser utilizado na remoção de poluentes emergentes presentes no meio ambiente?

Com base neste questionamento o presente estudo visou contribuir na inovação de materiais alternativos, e minimizar problemas ambientais na gestão e desenvolvimento de novas alternativas de adsorvente, que possam estabelecer um sincronismo perfeito entre a relação ambiental e os custos atribuídos ao processo.

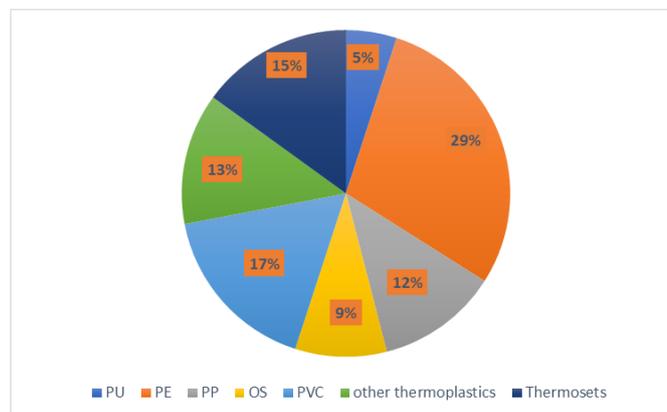
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Polímeros

Diante do contexto aplicado, os polímeros provêm de formação de macromoléculas constituídas por repetições de átomos (ou grupo de átomos) unidas por ligações covalentes. No entanto, a matéria prima principal para sua produção é o petróleo, carvão e o gás natural, bem como formas de origem natural provenientes da natureza como o amido, a seda, celulose (COLE *et al.*, 2015; GUIMARÃES *et al.*, 2021).

Os materiais mais utilizados são PE, polipropileno (PP), poliestireno (PS), Poli Cloreto de Vinila (PVC), PU e Poli Tereftalato de Etileno (PET), onde em 2017 correspondiam a 92% do consumo mundial. Desses termoplásticos os mais encontrados em resíduos sólidos urbanos são o PE, PET, PVC e PP, (ANDRADY; NEAL, 2009; GEYER, JAMBECK; LAW, 2017). Em relação ao PU, a maior parte da produção mundial conforme demonstrado no Gráfico 1, que visa como finalidade a aplicação de espumas flexíveis, principalmente em colchões e manufaturas automotivas (SINGH *et al.*, 2020).

**Gráfico 1 -Produção e consumo mundial de PU**



**Fonte: Adaptado de Singh *et al.* (2020).**

LEGENDA: Produção mundial de polímeros PU, Coatings, Adhesives, Sealants and Elastomers (CASE), Revestimentos, Adesivos, Selantes e Elastômeros).

A população mundial cresce ao longo das décadas onde em 2011 chegou a sete bilhões segundo estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU). Assim, a projeção para 2050 é uma estimativa de 9,3 bilhões de pessoas.

Assim, esse aumento populacional eleva os resultados negativos afetando a sustentabilidade do planeta, onde questões ambientais, econômica e sociais devem ser analisadas. Os fatores que impactam negativamente para a sustentabilidade é o descarte de resíduos que crescem ano a ano devido ao consumo provindo do crescimento populacional. No Brasil, no período de 2010 a 2011 a geração de resíduos foi aumentada em duas vezes o tamanho de sua população (ABRELPE, 2011).

Neste sentido, a quantidade de resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2011, foi aumentado de 61,9 milhões de toneladas, das quais apenas 23,3 milhões de toneladas foram destinados de maneira incorreta, ou seja, descartes em lixões e aterros controlados.

Dentro desta perspectiva, conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), no caso Norma NBR 10.004:2004 os resíduos sólidos são classificados como: resíduos, sólidos, semissólido que resultam de atividades provindas de formas: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e entre outras atividades focadas para gestão e tratamento.

Assim, a presença do Poliuretano (PU), é um polímero muito explorado comercialmente pela parte industrial pois, é aplicado em diversos segmentos como: espumas flexíveis, espumas rígidas, elastômeros, adesivos, selantes, tintas revestimentos entre outra infinidade de aplicações. O volume de resíduos de poliuretano gerados no Brasil em 2023 conforme dados da Associação Brasileira de Empresas de Componentes para Couro e Calçados e Artefato (ASSINTECAL) foi de 37.780 toneladas, onde os resíduos são normalmente queimados de forma indiscriminada e/ou descartes em aterros sanitários e/ou por indústrias que realizam atividades ilícitas ao meio ambiente.

## **2.2 Poliuretanos**

Os Poliuretanos, foram atribuídos pela síntese realizada pelo Dr. Otto Bayer, na Alemanha em 1937 onde, a partir desta síntese é reconhecido mundo afora como poliuretano. Sua introdução ocorreu na segunda guerra mundial em revestimentos de materiais, acabamento de aviões e vestimentas impermeáveis e resistentes à corrosão (DAS; MAHANWAR, 2020). A produção comercial foi introduzida em 1950,

na Alemanha, substituindo polímeros como o (látex) especialmente por suas propriedades e facilidade produtiva (DAS; MAHANWAR, 2020).

Portanto, a produção referente aos PU é realizada mediante uma classe de polímeros que surgem da reação de di/poli isocianatos ( $-N=C=O$ ) com di/poli álcoois ( $-OH$ ), aditivos, extensores de cadeia e catalisadores. Esse processo resulta em um copolímero no qual a unidade repetitiva contém a ligação uretânica ( $-NH-COO-$ ), conforme (DAS; MAHANWAR, 2020).

Partindo da aplicação do PU, é reconhecido como material de destaque pelo mercado mundial, entre os polímeros sintéticos. Especialmente, pelas aplicações envolvendo espumas flexíveis utilizadas para limpeza, estofados, colchões, automotivos entre outras formas globais (KLOSS *et al.*, 2002).

### 2.2.1 Degradação dos poliuretanos

A presença de microplásticos é maciça em todos os oceanos em diferentes continentes, provindos de degradação por métodos controlados ou por meio das intempéries climáticas. Para tanto, a decomposição do polímero ocorre conforme sua composição química, com a presença de grupos químicos reativos que favorecem reações químicas bem como, a quebra de suas interações (VIZCAYA, 2009).

Assim, esponjas são comumente empregadas na limpeza de utensílios domésticos, porém, sua deterioração ou fragmentação pode gerar micropartículas e causar a liberação de substâncias químicas adicionadas. Embora haja evidências da periculosidade dos microplásticos, há poucos conhecimentos sobre os efeitos provocados por essas micropartículas e pelos aditivos químicos lixiviados (HOWARD, 2002).

Entretanto, Howard (2002) os Pus podem sofrer degradação, sendo a facilidade desse processo influenciada por características estruturais como os grupos químicos presentes nas cadeias moleculares, o nível de cristalinidade, a orientação molecular, entre outros (HOWARD, 2002). Pesquisa conduzida por Lithner, Larsson e Dave (2011), foram identificados os produtos químicos presentes em 55 polímeros e classificados conforme o risco ambiental que apresentam, onde o PU flexível foi categorizado como um dos mais perigosos devido à toxicidade, mutagenicidade e carcinogenicidade de seus monômeros, catalisadores e produtos resultantes da degradação, como o cianeto de hidrogênio.

### 2.2.2 Gerenciamento de resíduos de poliuretano

Devido às suas propriedades físicas, térmicas, elétricas e químicas, os materiais poliméricos têm sido cada vez mais considerados para substituir produtos tradicionalmente fabricados com materiais metálicos e cerâmicos. Com o aumento da produção de polímeros, ocorre um esforço significativo em conduzir estudos que buscam equilibrar viabilidade econômica, benefícios ambientais e impactos sociais positivos (SILVA SPINACÉ; DE PAOLI, 2005).

Neste sentido, o sucesso da reciclagem provém das empresas buscarem medidas que possam reduzir os custos de seus processos produtivos provindos da reciclagem. Entretanto, para a maior parte das indústrias a questão ambiental não é interpretada como um fator relevante em suas produções (CARMO; SILVA; MORELLI, 2020). Para tanto, a aplicação de recursos e o sucesso comercial do poliuretano, é atribuído a quantidade de consumo anual. Onde, a formação de resíduos deverá ser focada a métodos representativos que estabeleçam a representação da reciclagem e menor geração de resíduos, a fim de evitar problemas de contaminação nas mais diversas formas entre elas: solo, água, entre outras (Simón *et al.*, 2018).

Para tanto, o Brasil visa a aplicação do 3 R (Reduzir, Reutilizar e Reciclar), provinda da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), conforme Lei nº12.305 DE 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010). Assim, busca-se introduzir diversas inovações na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos do país. Onde refere-se a primeira etapa da cadeia, visando medidas de redução e utilização de produtos descartáveis e substituição por retornáveis, forma positiva na utilização da norma em especial na redução do gasto energético da produção da matéria prima.

Portanto, a redução forma novas utilidades para produtos sem a necessidade de um novo reprocessamento, facilitando a utilização e reciclagem do processamento de materiais, propícios ao descarte onde tornam-se novos produtos e/ou matéria prima para diferentes aplicações.

## 2.3 Adsorção

A adsorção provém de um fenômeno físico-químico de adesão da superfície, observado quando um fluido, podendo ser líquido ou gasoso, é transferido para a superfície de um sólido, amplamente estudada visando desenvolver adsorventes

alternativos de baixo custo, onde geralmente os adsorventes são sólidos e com presença de partículas porosas em sua estrutura (ALI, ASIM e KHAN, 2012).

Para tanto, a sustentabilidade é uma das alternativas em uso para obter adsorventes com menores custos, especialmente aqueles considerados de descarte como os poliuretanos, atribuídos com um grande impacto ambiental e resistência química e térmica, mostrando-se com resultados promissores por possuírem boa permeabilidade, baixa densidade e alta porosidade (CUSIOLI; QUESADA, 2019).

Assim, o processo de adsorção pode ser classificado em dois tipos quanto sua intensidade: física e química. Onde, para o processo de adsorção física, a ligação entre a superfície do adsorvente e o adsorbato é considerada relativamente fraca, podendo ser atribuída às forças de Van der Waals. No entanto, o processo de adsorção química, envolve partilha ou troca de elétrons, caracterizada por uma possível ligação nova, mais forte em relação ao processo de adsorção física (NASCIMENTO *et al.* 2014).

Portanto, geralmente os adsorventes são sólidos e com partículas porosas (RUTHVEN 1985). O processo de mecanismo de adsorção pode ser explicado a partir de três etapas consecutivas (NASCIMENTO *et al.*, 2014):

- Transferência de massa externa: é correspondente à transferência de moléculas do fluido para a superfície externa da partícula adsorvente, por intermédio de uma camada de fluido que envolva a partícula;
- Difusão no poro: é a etapa ocasionada pela difusão de moléculas do fluido para o interior dos poros;
- Difusão na superfície: etapa onde a difusão das moléculas totalmente adsorvidas ao longo das superfícies dos poros.

O processo de adsorção pode ser classificado em dois tipos quanto sua intensidade: física e química. No processo de adsorção física, a ligação entre a superfície do adsorvente e o adsorbato, que é considerada relativamente fraca, podendo ser atribuída às forças de Van der Waals. Já no processo de adsorção química, envolve partilha ou troca de elétrons, sendo caracterizada por uma possível ligação nova, com maior força em relação ao processo de adsorção física (NASCIMENTO *et al.* 2014).

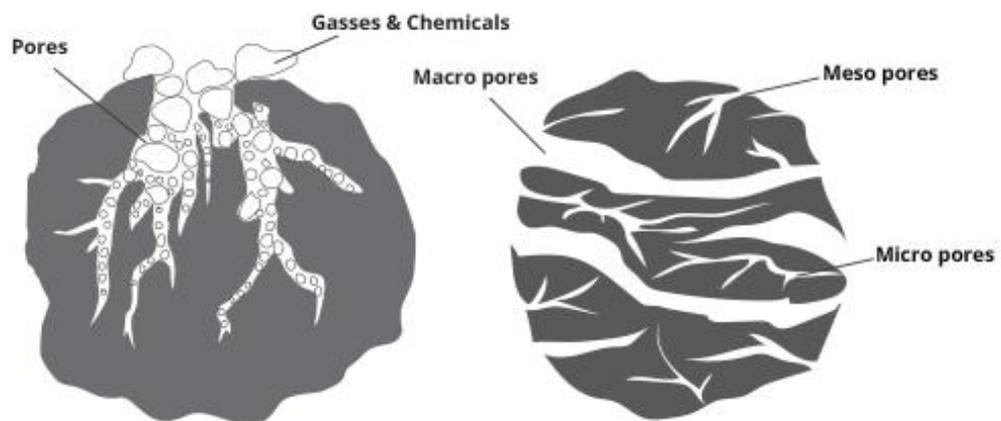
Com relação ao tratamento de água, o processo ocorre pela presença do adsorvente sólido e água contaminada, onde o poluente na forma líquida é chamado de adsorbato e o sólido de adsorvente. Assim, o processo de adsorção é muito eficiente no tratamento de águas para consumo e águas residuárias, onde é

empregada a fim de minimizar ou até mesmo, reduzir os níveis de compostos tóxicos no ambiente para valores toleráveis (MOREIRA *et al.*, 2016).

As principais vantagens da adsorção nesse processo de tratamento são focadas na natureza universal, baixo custo, facilidade de operação e eficiência, podendo chegar e superar a capacidade de remoção dos contaminantes em 99,9% (ALI, ASIM e KHAN, 2012).

Na Figura 1, observa-se a ocorrência do acúmulo de gases e substâncias químicas (adsorbato) na superfície de um sólido poroso (adsorvente), esquematizando o processo de adsorção, onde observa-se na Figura 1, três tipos distintos de poros: macroporos, mesoporos e microporos. De acordo com (RUTHVEN 1985), os macroporos possuem tamanho maior que 500 Å, os mesoporos, entre 20 e 500 Å e os microporos, menores que 20 Å.

**Figura 1 - Esquema do processo de adsorção**



**Fonte: Nascimento (2014).**

Portanto, a aplicação dos PUs visam como aplicação de agente adsorvente provindo de diversos poluentes presentes na água, entre eles: metais pesados, compostos orgânicos voláteis (COVs) bem como, corantes. Diante deste contexto, a funcionalização dos PUs mediante aos seus grupos funcionais aumentam a eficiência na remoção de determinados poluentes presentes em água potável. Assim, os PUs são materiais promissores para sistemas de adsorção química devido à sua alta porosidade, versatilidade química, boa estabilidade mecânica e baixo custo.

## 2.4 Poluentes emergentes

São compostos químicos, que geralmente não são monitorados por órgãos públicos ou regulamentadores, onde conseqüentemente podem apresentar grandes efeitos negativos ao meio ambiente e aos seres humanos. Esses compostos químicos, podem estar presentes em uma vasta variedade de produtos comerciais e são utilizados em grandes quantidades diariamente, como embalagens de alimentos, produtos de higiene, aditivos industriais, pesticidas, fármacos entre outros (GEISSEN *et al.*, 2015).

Contrariamente dos poluentes orgânicos persistentes, os poluentes emergentes não necessitam estar no ambiente para que algum efeito negativo seja causado, já que sua alta capacidade de transformação e remoção é reparada pela constante introdução do mesmo no ambiente (PETROVIĆ; GONZALEZ; BARCELÓ, 2003; RODRIGUEZ-NARVAEZ *et al.*, 2017).

Assim, os poluentes emergentes uma vez no ambiente são distribuídos rapidamente e alcançam os corpos hídricos, os quais se tornam um grande problema para as Estações de Tratamento de Água (ETA) e Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), onde na maioria das vezes ambas não são efetivas para remover esses tipos de substâncias (LUO *et al.*, 2014).

A presença dos compostos emergentes nas ETA e ETE, podem entrar em contato com substâncias químicas sintéticas e geralmente acontecer algum tipo de reação, podendo formar outros produtos que são impactantes ao ambiente, e resultando em produtos ainda mais tóxicos e persistentes (FARRÉ *et al.*, 2008).

Para Bolong *et al.* (2009), existem três grandes problemas relacionados aos poluentes emergentes. O primeiro problema relata no fato que determinada substância apresenta um determinado mecanismo de ação, o que dificulta a avaliação e a identificação dentro das matrizes ambientais. O segundo problema, é pela falta de valores máximos permitidos em legislação. Podendo haver, nenhuma e/ou baixa preocupação no monitoramento, visando garantir que essas substâncias não sejam despejadas em corpos hídricos. O terceiro problema relatado, é a preocupação destes poluentes emergentes serem considerados desreguladores endócrinos, e presentes em constante crescimento, pois a maioria deles é persistente ao ambiente.

Assim, grande parte dos poluentes emergentes que recebem pouca atenção são os princípios ativos de produtos para usos pessoais, farmacêuticos, pesticidas,

corantes e metais pesados. Com isso, serão apresentados de forma mais detalhadas os seguintes contaminantes: diclofenaco e azul de metileno.

#### 2.4.1 Diclofenaco

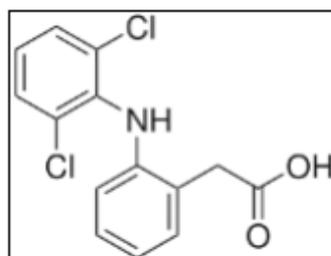
O fármaco Diclofenaco (DCF), foi lançado no mercado japonês no início de 1974, onde na atualidade é encontrado em cerca de 120 países em todo mundo. Sua aprovação ocorreu pelo *Food and Drug Administration* (FDA) em 1988, com relação a uma droga anti-inflamatória não esteroidal (AINE).

O Diclofenaco, 2-[2-(2,6-dicloroanilino) fenil] ácido acético) (DCF), conforme Figura 2, é atribuído como um Fármaco antinflamatórios não esteróides (NSAID), extensivamente utilizado na medicina. Assim, o DCF é comercializado na forma de comprimidos (via oral), bem como aplicado à pele (gel). De acordo com Vieno e Sillanpaa (2014), seus estudos relacionados a absorção do medicamento atribuído como gel, encontra-se entre 6 - 7%, onde ocorre uma liberação do fármaco a roupa utilizada pelo consumidor ocorrendo sua liberação com maior concentração ao ambiente.

No entanto, como característica física o diclofenaco, é tratado como um pó cristalino branco ou levemente amarelo, levemente higroscópico, solúvel em água, solúvel em metanol, álcool, pouco solúvel em acetona (European, 2001).

Ao contexto ambiental, a aplicação dérmica do DCF resulta em maiores descargas do fármaco nos ambientes aquáticos enfatizando a abrangência dos contaminantes em afluentes, córregos, rios, represas entre outras (ZHANG *et al.*, 2008). Já, para o quesito ingestão oral do DCF, ocorre a biotransformação quase completa no corpo, onde 65 - 70% do fármaco são excretados na urina e 20 - 30% nas fezes como metabólitos que contribuíram de forma negativa para aumento da contaminação ao meio ambiente.

**Figura 2 - Estrutura química do Diclofenaco**



Fonte: Bui e Choi (2009).

Diante do contexto, o DCF é um fármaco com características levemente ácidas ( $pK_a = 4,15$ ) e baixa solubilidade em água quando exposto a temperatura ambiente. Para tanto, ao foco de pesquisas o DCF é usado na forma salina, como diclofenaco de sódio e diclofenaco de potássio (LONAPPAN *et al.*, 2016). O seu coeficiente de partição ( $\log K_{ow}$ ), é um indicador funcional ao fármaco DCF devido as suas características que favorecem a adsorção em sólidos, o que atribuí de forma positiva a biodegradação (LUO *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2014).

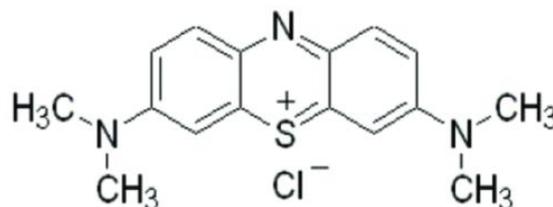
O DCF, é tratado no Brasil como um dos contaminantes mais frequentemente encontrados e com concentrações variáveis presentes em diferentes corpos de águas, entre eles: efluentes de hospitais, ETEs, rios e lodos devido à sua ampla utilização, o diclofenaco têm se acumulado no ambiente aquático causado pela sua solubilidade e hidrofobicidade (BOUND e VOULVOULIS, 2006; GOMEZ *et al.*, 2006).

Entretanto, aplicar uma metodologia que seja eficiente e obtenha um eficiente desenvolvimento bem como, economicamente viável focado na remoção deste contaminante é um grande desafio. Assim, a literatura aponta como principal meio adsorativo a utilização do carvão ativado, havendo pouca informação pertinente para demais aplicações ao meio adsorativo (QUESADA, 2019).

#### 2.4.2 Azul de metileno

O AM, trata-se de um composto sintético químico usado para tratamento de água conforme demonstrado na Figura 3, utilizado como corante e alguns processos de tingimentos têxteis, alimentos entre outros processos (KHAN *et al.*, 2022). O AM, é estável em condições ácidas e geralmente solúveis em água.

Figura 3 - Estrutura química do azul de metileno



Fonte: Autoria própria (2024).

Diante, do contexto o AM é amplamente utilizado como indicador para auxiliar no controle de bactérias, eliminar odores e reduzir o teor de ferro presentes em efluentes e outros sedimentos. Um dos seus usos é como agente químico de limpeza de piscinas, mas em altas concentrações pode ser tóxico, ocasionando sérios problemas aos usuários das piscinas e para o meio ambiente. Além disso, seu uso não é seguro quando diluído incorretamente (ALVER, METIN e BROUERS, 2020).

A presença do AM, no meio ambiente pode afetar as águas residuais, o solo e a vida aquática, sua exposição recorrente de curto prazo pode causar irritação da pele e olhos, inchaço da garganta, tosse persistente ou ainda dores de cabeça. Além disso, ocorre a formação de problemas crônicos de saúde, como câncer, doenças do sistema reprodutivo e problemas no funcionamento do sistema neurológico.

Segundo Adogaye *et al*, (2021) estima-se que, a cada ano, em torno de 8 bilhões de litros de águas residuais são gerados mundialmente com concentrações significativas de azul de metileno. Esta contaminação pode levar a um aumento das concentrações desta substância nos lagos, rios e demais corpos hídricos, provocando graves impactos na qualidade da água. Por isso, além de reduzir ao máximo o uso desse produto químico, é necessário adotar medidas que possam prevenir a contaminação do meio ambiente.

Portanto, diante deste contexto apresentado, adsorção emerge como uma técnica promissora e eficaz para a remoção de diclofenaco da água, oferecendo uma alternativa sustentável aos métodos tradicionais de tratamento, como filtração e biodegradação.

## **2.5 Caracterizações dos materiais porosos**

### **2.5.1 Potencial Zeta**

Ao utilizarmos o potencial Zeta, busca-se obter o potencial no plano de cisalhamento, para uma determinada distância da superfície, que corresponde ao plano que separa a movimentação do fluido e seus movimentos em direções opostas aos fenômenos físicos como a eletroforese e a eletrosmose (Johnson *et al.*, 2000; Castro *et al.*, 2004).

A partir desta premissa, o potencial visa estimar o valor do potencial na superfície. Essa técnica é de maior aplicação para obter o perfil de mobilidade eletroforética. Portanto, a partir dos valores de eletro mobilidade pode-se estimar o

potencial eletrostático da superfície carregada, onde determina-se o potencial eletrostático no plano de cisalhamento, denominado de Potencial Zeta.

## **2.6 Caracterização morfológica**

Ao atribuímos a microscopia objetiva-se obter imagens ampliadas de um objeto, que permite a distinção de detalhes não revelados a olho nu (Mannheimer, 2002). Portanto, foi atribuída a microscopia eletrônica de varredura para o estudo da morfologia do material esponja.

### **2.6.1 Microscopia eletrônica de varredura**

O princípio do funcionamento da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), é atribuída pela emissão de um feixe de elétrons gerado em filamento por efeito termiônico. Assim, os elétrons gerados sob alto vácuo são acelerados por uma diferença de potencial que varia entre 0,3 keV a 30 keV, esses elétrons têm seu percurso e diâmetro corrigido por um conjunto de lentes eletromagnéticas que agem como condensadoras.

Para tanto, suas lentes alinham os feixes na direção da abertura da objetiva, que realizam o ajuste do foco do feixe antes deste atingir amostra, onde a objetiva, formada por duas bobinas eletromagnéticas são as responsáveis pela varredura das amostras. Assim, ocorre uma colisão dos elétrons com a amostra, onde serão gerados uma série de sinais diferentes e captados por detectores específicos e transformados em sinais elétricos (Mannheimer, 2002).

## **2.7 Gestão de coleta**

Dentro de uma atribuição vislumbrando a quantidade de PUs para tratamentos cinéticos, no Brasil diversos fatores influenciam a vida útil de uma esponja formada por PUs devido a condições de uso e formas de interpretação dos consumidores para seu uso. Assim, todo o contexto atribuído a gestão envolvendo a quantificação do material esponjoso unidades (un.), foi atribuído na cidade escolhida no noroeste do Paraná, localizada no Brasil, tratada como uma cidade de fins ecológicos.

A cidade, é formada por 415 mil habitantes com geração média de 300 mil kg de lixo diário. Partindo deste princípio a troca de esponjas por estimativa é trocada a cada 15 a 20 dias na média.

Diante do contexto, dados atribuídos pelo Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE), 2023 estipula em torno de 188.117 residências distribuídas no plano diretor e urbanístico. Assim, no contexto descrito para o número de residências quando multiplicadas pela troca de esponjas em média a cada 15 dias dentro de um mês será obtido um número estimado de 376.234 unidades/mês.

Entretanto, para o alcance desta meta é necessário a inclusão de equipes distribuídas em uma regionalidade dentro da cidade, dividida por regiões visando atender a coleta seletiva do material em questão. A prefeitura dentro da sua gestão de coleta atribuí como equipe a aplicação de 25 funcionários diretos, e uso de 5 caminhões para realizar a gestão de coleta em toda a extensão territorial do plano diretor, representando a coleta de segunda-feira a sexta-feira durante um período de 10 horas de trabalho diário.

#### 2.7.1 Custos atribuídos a gestão de coleta e produção de adsorvente

Ao introduzirmos custos e suas relações diretas a produção industrial, é necessário identificar de forma objetiva e direta o produto a ser obtido. Portanto, a necessidade de critérios focadas no rateio (setores envolvidos) devem ser alocados aos produtos fabricados, ou aos serviços prestados. Assim, todos os recursos utilizados exclusivamente por um determinado produto representam custos financeiros direto.

Para tanto, a análise de custo produtivo sobre material adsorvente é de suma importância na escolha do material apropriado para a aplicação desejada e maximização da eficiência da produção. O custo total de um material adsorvente engloba a seleção dos materiais básicos, bem como sua aquisição, processamento e manuseio (SOUNDARARAJAN; JANARDHAN REDDY, 2019).

Ao atribuímos o formato do material é necessário identificar o material básico mais apropriado, diante das características físicas e químicas visando a determinação do nível de adsorção, necessária aos fatores como a capacidade de adsorção, resistência física e estabilidade química (KOVÁCS, 2020).

Assim, o custo de produção fornece informações importantes para tomada de decisão para a empresa e para os clientes. Por meio dele, as empresas podem determinar o preço adequado para seus produtos ou serviços, bem como monitorar o desempenho de seus processos de produção. Por outro lado, os clientes são fornecedores de informações importantes para a empresa por meio do custo de

produção, pois esta medida os ajuda a avaliar o valor de um produto ou serviço relativo ao de outros. Dessa forma, é possível determinar o preço justo de um produto ou serviço (BOULAMANTI; MOYA, 2017).

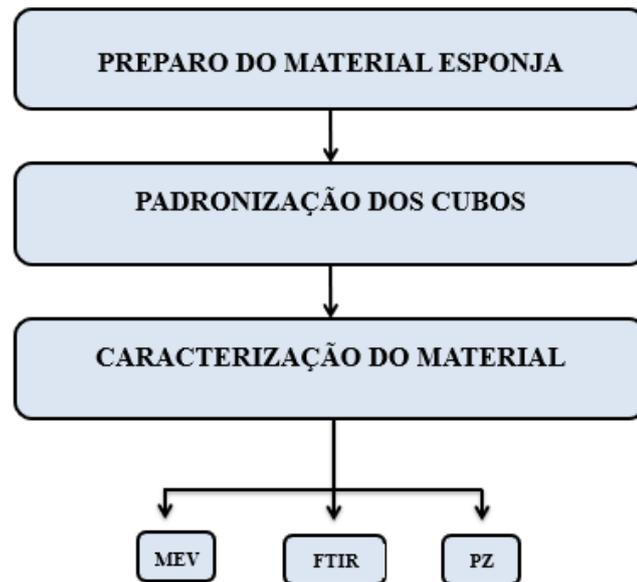
Portanto, para julgamos os custos envolvidos para a aplicação focada na coleta das esponjas os custos diretos e indiretos devem ser feitos de acordo com as necessidades do público-alvo, visando a clareza, organização e facilidade para análise das informações.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Metodologia

Nessa seção é apresentada a metodologia utilizada para a produção do adsorvente a partir do material esponja, atribuindo sua caracterização e análise de custo. Assim, a Figura 3 do fluxograma para caracterização do adsorvente.

Figura 4 - Fluxograma relacionado a caracterização do adsorvente



Fonte: Autoria própria (2024).

#### 3.1.2 Reagentes

Para a realização do trabalho foram utilizados os seguintes reagentes: diclofenaco com pureza de 99% (Sigma-Aldrich®) e azul de metileno com pureza de 99% (Neon). A esponja foi obtida por meio da gestão de coletas a qual, a prefeitura do município analisado vem adotando para melhorias da qualidade ambiental no município.

#### 3.1.3 Preparação das soluções

As soluções de contaminantes foram atribuídas as seguintes concentrações de 60 mg L<sup>-1</sup> e 50 mg L<sup>-1</sup> conforme, estudo dos contaminantes diclofenaco e Azul de Metileno, respectivamente. Assim, realizou-se diluições separadamente em balão volumétrico de 1 L e completadas com água deionizada, sob agitação constante para que fossem completamente dissolvidas.

### 3.1.4 Preparo das esponjas

A metodologia de preparação da esponja para uso científico envolve diversas etapas dentre elas: primeiramente, a esponja foi recolhida com cuidado para não causar nenhum dano. Em seguida, foi cortado em pequenos pedaços para facilitar as etapas posteriores. Passando, a utilizar água deionizada a 100 °C para remover possíveis contaminantes presentes na esponja. Isto foi feito durante 30 minutos, agitando ocasionalmente para completa remoção dos contaminantes. Por fim, a esponja foi levada à estufa e seca a 105 °C por 24 horas.

Portanto, a etapa do preparo referente as amostras permitiram que qualquer presença de água residual e contaminantes fossem evaporados, deixando a esponja pronta para ser utilizada para fins científicos.

## 3.2 Caracterização do adsorvente

### 3.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS)

O MEV é um método de imagem de superfície, a qual os feixes eletrônicos incidem ao longo da superfície da amostra e interagem com esta para gerar sinais que refletem a composição atômica e detalhes da topografia superficial da amostra (Lin *et al.*, 2014).

O equipamento foi utilizado para a realização das análises, referente a estrutura da esponja, utilizada como adsorvente. Assim, o modelo do equipamento empregado para a análise trata-se do Shimadzu SS-550 *SuperScan Scanning Electron Microscope* que possui acoplado um sistema EDS (Energia Dispersiva de Raios-X) acoplado ao Microscópio Eletrônico, o qual fornece um mapeamento dos elementos químicos presentes na superfície das amostras analisadas, revestidas com ouro na espessura de aproximadamente 30 nm.

### 3.2.2 Análise de potencial Zeta

A análise referente ao potencial Zeta, foi utilizada pelo analisador de partículas utilizando a proporção 1:1 (m/v) na faixa de pHs de 2 a 12, utilizando soluções de HCl e NaOH ambas com concentração de 0,1 mol L<sup>-1</sup>.

Neste sentido, para leitura utilizou-se uma dispersão de luz eletroforética (DLE), que determina o movimento eletroforético das partículas carregadas sob um campo

elétrico aplicado a partir do deslocamento de Doppler da luz dispersa em equipamento Beckman Coulter Delsa(TM) Nano Zeta Potential e Submicron Particle Size Analyzer foi utilizando o software Particle Analyzer Delsa™Nano UI versão 3.73. Este parâmetro é medido em mV (milivolt).

### 3.2.3 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), foi utilizada para identificar os grupos funcionais presentes nos materiais estudados, em espectrofotômetro Vertex 70v (Bruker). Para obtenção de pastilhas foram inseridas no equipamento para obtenção dos resultados, e misturadas em Brometo de Potássio (KBr) na proporção de 1:250 (m/m), na faixa espectral de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ .

### 3.2.4 Efeito da massa e pH para o diclofenaco

Para investigar o efeito da massa e pH de uma esponja na liberação de diclofenaco, foi utilizado o método relacionado ao peso da massa. Portanto, realizou-se, a análise pela variação da massa entre: 0,01 a 0,05 g de esponja e cinco concentrações diferentes de diclofenaco de 60  $\text{mg L}^{-1}$  atribuída como inicial, onde agitou-se a 120 rpm em temperatura ambiente por 24 horas, variando os valores de pH para 4, 7 e 10 para investigar o efeito do pH na liberação de diclofenaco.

Assim, a massa que apresentou melhor resultado foi utilizada no estudo do efeito do pH na liberação de diclofenaco, onde a liberação de diclofenaco foi medida para todos os diferentes níveis de pH e resultados analisados.

Neste sentido, os resultados foram comparados para identificar o efeito da massa e do pH da esponja na liberação de diclofenaco, analisando-se as interações potenciais entre os valores de massa e pH.

### 3.2.5 Efeito da massa e pH para o Azul de Metileno (AM)

A adsorção de AM, utilizando como adsorvente a esponja os experimentos foram realizados com 25 mL de amostras de solução AM preparadas em uma concentração de 50  $\text{mg L}^{-1}$  em água destilada em Erlenmeyer frasco com rolha. Os frascos foram agitados em um shaker (QUIMIS® 0022MI, Brasil) a 150 rpm, em temperatura ambiente, por 24 h. Os ensaios de adsorção foram realizados com

diferentes massas adsorvente: 0,03, 0,05, 0,1, 0,2 e 0,4 g. As amostras foram coletadas após 24 h.

### 3.2.6 Leituras das concentrações dos contaminantes emergentes

As amostras obtidas após a cinética, foram medidas em espectrofotômetro UV-Vis (HACH DR 5000), com comprimento de onda específicos conforme cada contaminante analisado. Todos os ensaios foram realizados em triplicata. A capacidade de adsorção na unidade ( $\text{mg g}^{-1}$ ) foram calculadas utilizando a Eq. (1):

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

Do qual:

$C_0$  = concentração inicial de ( $\text{mg L}^{-1}$ );

$C_t$  = concentração de equilíbrio na solução ( $\text{mg L}^{-1}$ );

tempo = (t);

V = volume da solução em litros (L);

m = adsorvente em massa (g).

A capacidade de adsorção foi determinada medindo a quantidade de diclofenaco bem como, de AM adsorvidos no material esponjoso em equilíbrio. Os dados obtidos nos experimentos foram ajustados às equações cinéticas de pseudo primeira ordem e pseudo-segunda ordem. A equação de pseudo-primeira ordem, descreve a taxa de adsorção como uma função linear dependente da concentração inicial do adsorbato ( $C_i$ ), enquanto a equação de pseudo-segunda ordem o que relaciona a taxa de adsorção a um produto da concentração inicial ( $C_f$ ) e a capacidade do adsorvente ( $q_e$ ).

### 3.2.7 Pseudo-primeira ordem

O modelo de pseudo-primeira Ordem, ou modelo de Lagergren foi o primeiro modelo a descrever a adsorção em sistemas líquido-sólidos baseados na capacidade do sólido (HO e MCKAY 1991). Indicando a velocidade de reação do adsorbato em

relação ao tempo, que é diretamente proporcional à diferença na concentração de saturação e ao número de sítios ativos de sólido.

Portanto, a equação encontrada por (LAGERGREN, 1898) é expressa pela Equação 2.

$$q_t = q_e [1 - e^{-k_1 t}] \quad (2)$$

Do qual:

$q_t$  = capacidade de adsorção no tempo  $t$  ( $\text{mg g}^{-1}$ );

$q_e$  = capacidade de adsorção no equilíbrio ( $\text{mg g}^{-1}$ );

$t$  = tempo de reação (min);

$k_1$  = constante de velocidade de adsorção de pseudo-primeira ordem ( $\text{min}^{-1}$ ).

Neste sentido, a constante pode ser determinada traçando um gráfico em  $q_t$  na relação ao  $t$  (tempo), fornecendo uma ligação linear entre eles.

### 3.2.8 Pseudo-segunda ordem

Ao tratarmos sobre o modelo de pseudo-segunda ordem, proposto e desenvolvido por (HO e MCKAY, 1999), admite que a velocidade da reação seja correspondente na quantidade do soluto adsorvido pela superfície do adsorvente e pela quantidade adsorvida no equilíbrio. A equação do modelo de pseudo-segunda ordem é expressa pela Equação 3.

$$Q_t = \frac{k_2 q_e^t t}{1 + k_2 q_e t} \quad (3)$$

Do qual:

$q_t$  = capacidade de adsorção no tempo  $t$  ( $\text{mg g}^{-1}$ );

$q_e$  = capacidade de adsorção no equilíbrio ( $\text{mg g}^{-1}$ );

$t$  = tempo de reação (min);

$k_1$  = constante de velocidade de adsorção de pseudo-segunda ordem ( $\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$ ).

Neste sentido, ao traçar  $q_t$  contra  $t$  (tempo), uma relação linear é obtida e a equação de pseudo-segunda ordem pode ser aplicada. Os gráficos lineares gerados a partir das equações cinéticas são usadas para calcular as constantes de velocidade ( $k$ ) que são então usadas para determinar as capacidades de adsorção expressas em termos de  $\text{mg g}^{-1}$ . Os dados obtidos nos experimentos podem assim ser usados para calcular a capacidade de adsorção ( $q_e$ ) e as constantes de velocidade ( $k$ ) para equações de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem. Isto, por sua vez, permite modificar as condições existentes para aumentar a capacidade de adsorção ou reduzir a constante de velocidade, conforme necessário.

### 3.3 Adsorção de isothermas

Os experimentos de isoterma de adsorção foram conduzidos em três diferentes temperaturas 298, 308 e 318 K, utilizando 30 mL de solução de diclofenaco com concentrações variadas de 10 a 250  $\text{mg L}^{-1}$  em contato com 0,01 g de adsorvente pH 7 sob agitação a 120 rpm por 720 min. A partir dos cálculos da capacidade de adsorção foram avaliados os modelos mais clássicos de isothermas de adsorção, ou seja, Langmuir e Freundlich.

#### 3.3.1 Modelo de Langmuir

A isoterma de Langmuir Langmuir (1916) baseia-se na suposição de que existe um número definido de sítios ativos sem competição entre eles, assumindo que a adsorção ocorre em um local independente dos sítios ativos adjacentes ocupados, é apresentada na Equação 4.

$$q_{eq} = \frac{q_m b_L C_e}{1 + b_L C_e} \quad (4)$$

Do qual:

$q_m$  = capacidade máxima de adsorção ( $\text{mg de adsorbato/g de adsorvente}$ );

$b_L$  = constante isotérmica de Langmuir ( $\text{L mg}^{-1}$ );

$C_e$  = concentração de equilíbrio do adsorbato na solução ( $\text{mg L}^{-1}$ ).

### 3.3.2 Modelo de Freundlich

O modelo de Freundlich é aplicado a modelos de superfícies heterogêneas e, portanto, não fornece suposições sobre a capacidade de adsorção de uma monocamada, e assume que existe uma interação entre as moléculas adsorvidas, conforme apresentada na Equação 5.

$$q_{eq} = k_F C_e^{1/n} \quad (5)$$

Do qual:

$q_e$  = quantidade adsorvida ( $\text{mg g}^{-1}$ );

$k_F$  = constante isotérmica de Freundlich ( $\text{mg L}^{-1} \cdot (\text{L g}^{-1})^{1/n}$ );

$C_e$  = concentração de equilíbrio do adsorbato na solução ( $\text{mg L}^{-1}$ );

$n$  = constante característica relacionada com a intensidade ou grau de favorabilidade de adsorção.

Neste sentido, após a aplicação dos modelos de isotermas de adsorção, os dados de equilíbrio foram utilizados para calcular os parâmetros termodinâmicos: entalpia ( $\Delta H$ ), entropia ( $\Delta S$ ), constante de equilíbrio  $K_c$  e energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ).

### 3.4 Atribuindo a gestão de coleta

Dentro de uma atribuição vislumbrando a quantidade das esponjas, PUs para tratamentos cinéticos no Brasil, diversos fatores influenciam a vida útil de uma esponja formada por PUs devido a condições de uso e formas de interpretação dos consumidores para seu uso. Assim, todo o contexto atribuído a gestão envolvendo a quantificação do material esponjoso em unidades (un) foi atribuído a cidade do estudo, tratada como uma cidade de fins ecológicos, formada por 415 mil habitantes com geração média de 300 mil kg de lixo diário. Partindo deste princípio a troca de esponjas por estimativa é trocada a cada 15 a 20 dias na média.

Diante do contexto, dados atribuídos pelo Instituto Brasileiro de Geografia (IBGE), 2023 estipula 188.117 residências distribuídas no plano diretor e urbanístico. Assim, no contexto descrito para o número de residências quando multiplicadas pela troca de esponjas em média a cada 15 dias dentro de um mês será obtido um número estimado de 376.234 unidades/mês.

Entretanto, para o alcance desta meta é necessário a inclusão de equipes distribuídas em uma regionalidade dentro da cidade, dividida por regiões visando atender a coleta seletiva do material em questão. A prefeitura dentro da sua gestão de coleta atribuí como equipe a aplicação de 25 funcionários diretos, e uso de 5 caminhões para realizar a gestão de coleta em toda a extensão territorial do plano diretor, representando a coleta de segunda-feira a sexta-feira durante um período de 10 horas de trabalho diário.

#### 3.4.1 Gestão de custos referente a coleta da esponja

Ao introduzirmos custos e suas relações diretas a produção industrial, é necessário identificar de forma objetiva e direta o produto a ser obtido. Portanto, a necessidade de critérios focadas no rateio (setores envolvidos) devem ser alocados aos produtos fabricados ou aos serviços prestados. Assim, todos os recursos utilizados exclusivamente por um determinado produto representam custos financeiros direto. Portanto, para julgamos os custos envolvidos para a aplicação focada na coleta das esponjas de lavar louças, custos diretos e indiretos devem ser realizados de acordo com as necessidades do público-alvo.

Portanto, introduziu-se como público alvo a comunidade de forma geral, a qual fornecerá a esponja descartada mediante a coleta seletiva de sua cidade, conforme rotas e destinos já pré-estabelecidos pela gestão da prefeitura que é responsável pelo gerenciamento e custeio relacionados aos gastos provindos de seu próprio orçamento que é gerenciado por secretária específica, mediante a utilização de seu estrutura pública para atender a comunidade de forma geral.

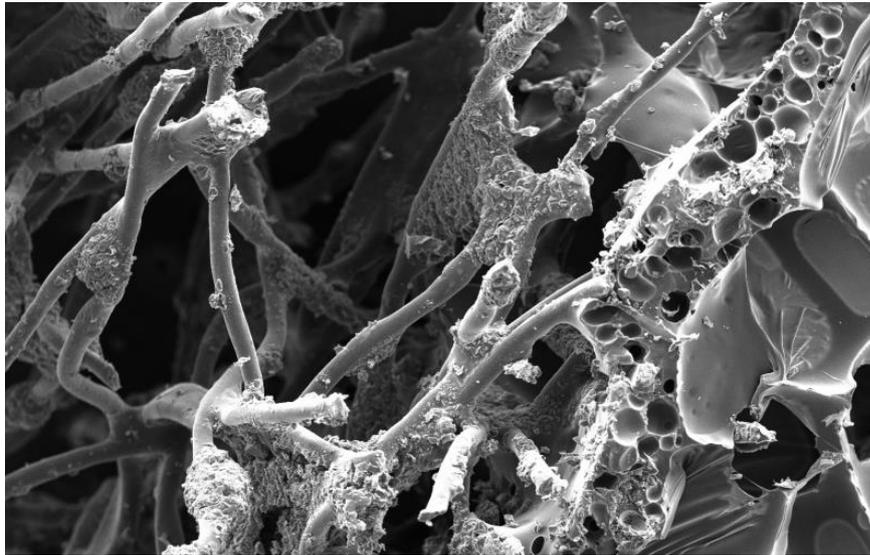
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise dos resultados e discussão serão apresentados os resultados obtidos da caracterização do material e ensaios de adsorção propostos no objetivo.

### 4.1 Caracterização do material

A, Figura 5 enfatiza a MEV do material esponja.

**Figura 5 - Microscopia Eletrônica de Varredura do material esponja**



Fonte: Autoria própria (2024).

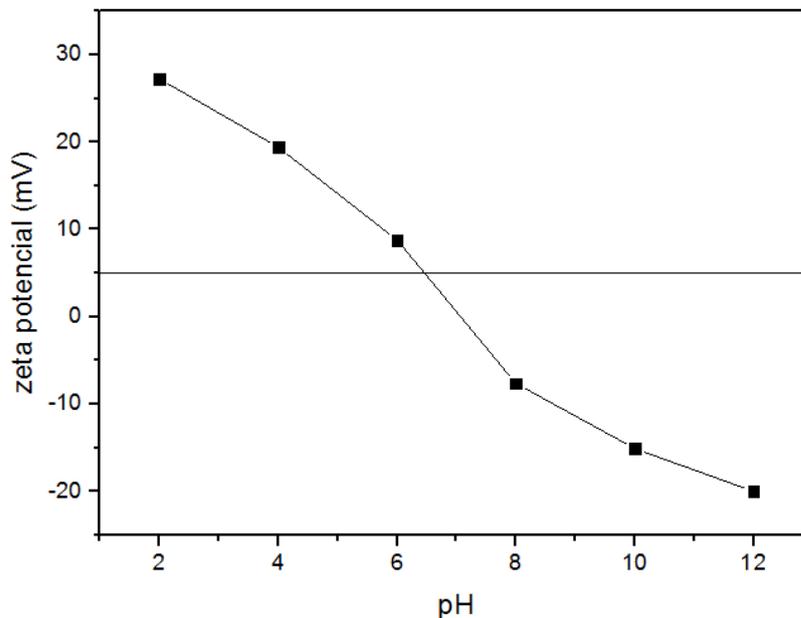
O material esponja caracteriza-se por uma estrutura superelástica, que será atribuída como material adsorvente desenvolvido para o tratamento de água e dispositivos ecológicos. É composto, por uma combinação de redes orgânicas e inorgânicas que formam uma estrutura superelástica tridimensional.

Portanto, a presente estrutura é capaz de deformar e recuperar sua forma original durante a adsorção de contaminantes, proporcionando alta capacidade de desempenho. Onde, as esponjas possuem uma forte capacidade de adsorção na comparação com os adsorventes tradicionais, permitindo-lhe adsorver uma ampla gama de contaminantes.

A partir desta ordem, a capacidade de regenerar, permite a sua reutilização para sucessivas execuções de adsorção. Para tanto, esse procedimento auxilia na redução do custo de operação e a pegada ambiental associada às operações de adsorção.

O potencial Zeta realizado, visou obter o perfil do potencial isoelétrico conforme demonstrado no Gráfico 2 para o material esponja.

**Gráfico 2 - Análise de potencial Zeta para o material esponja**



Fonte: Autoria própria (2024).

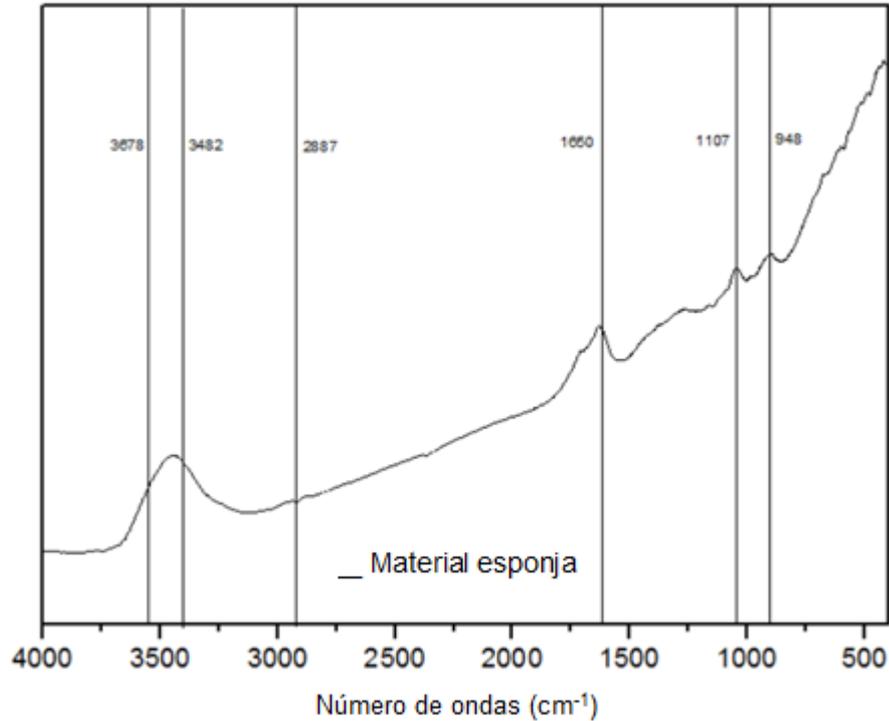
O potencial Zeta do resíduo de esponja, atribuí uma carga isoelétrica de 6,5 o que se refere à carga das partículas de resíduo presentes na esponja formando interface entre partículas no líquido circundante. O potencial Zeta de uma partícula, é determinado pela polarização das duplas camadas elétricas ao redor das partículas.

No caso do resíduo de esponja, observa-se a carga isoelétrica de 6,5 o que indica que o potencial Zeta da partícula é zero, devido à igual quantidade de cargas positivas e negativas presentes na solução (BAPTISTA *et al.*, 2015).

Para tanto, o valor zero é conhecido como ponto isoelétrico onde a repulsão entre as partículas é máxima (CHIBOWSKI; SZCZEŚ, 2016), onde essas partículas deixam de ser atraídas/repelidas umas pelas outras, formando uma suspensão coloidal estável.

Para entender as interações intermoleculares químicas do material, foi analisado o FTIR, conforme demonstrado no Gráfico 3, referente ao material esponja.

Gráfico 3 - Análise de FTIR para o material esponja



Fonte: Autoria própria (2024).

Neste sentido, aplicou-se a análise de Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), visando obtenção do perfil da esponja, e medição da absorção de radiação infravermelha pelas interações moleculares de uma amostra. Assim, diante da largura referente a banda instrumental valores entre 3.678 e 3.482  $\text{cm}^{-1}$ , o instrumento interage com as moleculares na amostra com base na quantidade de energia absorvida.

Para o número de ondas em 2887  $\text{cm}^{-1}$ , é observado uma vibração no espectro, provavelmente devido ao estiramento de uma ligação única entre dois átomos estiramento - OH na molécula de água, por exemplo (COLDEBELLA, *et al.*, 2017).

Neste sentido, o fator indica a presença de grupos OH ligados por interações de hidrogênio na amostra. Picos localizados em 1650, 1107 e 948  $\text{cm}^{-1}$  indicariam a presença de vibrações CH, vibrações C-O e vibrações C-C semelhantes (DALHOUMI *et al.*, 2022). Essas características químicas transmitem informações diferentes sobre a amostra, o que pode ajudar o pesquisador a concluir as propriedades predominantes da amostra. Por exemplo, o pico CH indicaria a presença de hidrocarbonetos alifáticos e o pico C-O poderia indicar a presença de ésteres, álcoois ou cetonas (JOGA RAO, 2021).

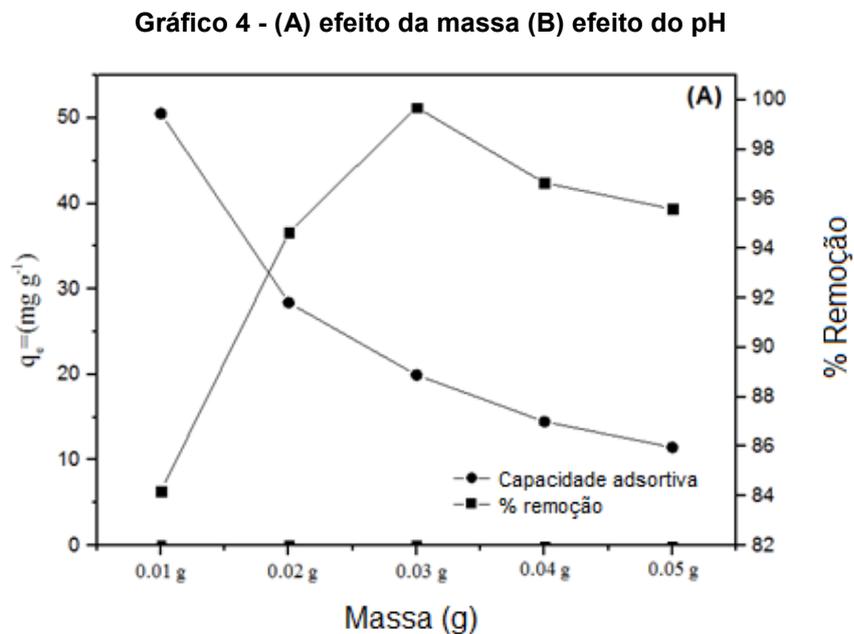
Entretanto, observa-se em diversas vezes mais de uma anotação, podendo ser realizada a partir de um único pico, o que pode exigir mais pesquisas ou confirmação. O pico C-C é uma forma de revelar a presença de carbonos alifáticos ou aromáticos, o qual pode sugerir a presença de um tipo particular de hidrocarboneto (DE SOUZA *et al.*, 2020).

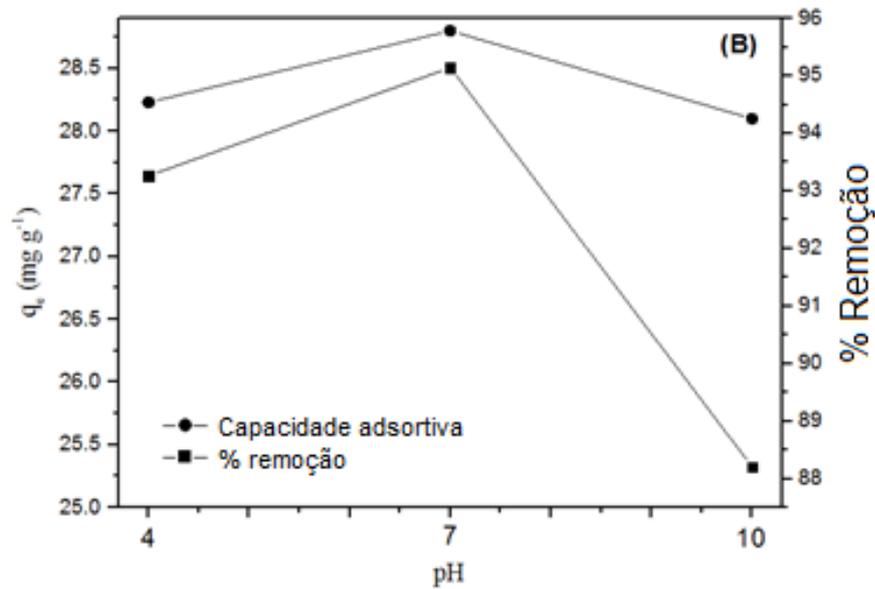
Portanto, o FTIR da esponja fornece um instantâneo temporal das interações moleculares presentes na amostra. Os vários picos podem ser analisados para determinar as conexões moleculares predominantes, inspirando investigações adicionais sobre as propriedades da amostra. Onde, diante das análises aplicadas para direcionamento de custos foram observados a viabilidade econômica por unidade de esponja de louças, ao qual, atribui-se ao estudo de adsorção.

## 4.2 Estudo da adsorção

### 4.2.1 Efeito da massa e pH

Para tanto, o estudo do efeito da massa e do pH foi avaliado conforme demonstrado no Gráfico 4 (A) referente ao efeito da massa, e representação do efeito do pH na Gráfico 4 (B).





Fonte: Autoria própria (2024).

O Gráfico 4 (A), demonstra o efeito de massa a qual, variou de 0,01 a 0,05 bem como, suas capacidades adsortivas para cada massa: 50,02, 33,09, 22,34, 16,02 e 10,03  $\text{mg g}^{-1}$  respectivamente. Assim, a quantidade de massa removida de cada uma dessas massas foi superior a 85%, onde observa-se que com aumento da massa, a capacidade adsortiva diminui.

Para tanto, a diminuição na capacidade de adsorção é provavelmente devida ao aumento do número de locais disponíveis para adsorção, bem como ao aumento do tamanho das partículas, o que reduz a área superficial disponível para adsorção.

No entanto, sabe-se que partículas se tornam mais difíceis de mover, pois criam maior resistência, reduzindo ainda mais a capacidade de adsorção, em todos os níveis de massa onde a remoção de partículas foi superior a 85%, indicando que a adsorção foi eficaz. Neste sentido, o aumento da massa pode ter aumentado a área superficial e o número de potenciais locais de adsorção tornando-se disponíveis, daí o aumento da remoção. No geral, esta experiência que demonstrou um aumento na massa diminuição da capacidade de adsorção, ao mesmo tempo proporcionando uma remoção eficaz de partículas da solução.

Portanto, é possível que diferentes tamanhos de partículas e diferentes tipos de partículas respondam de maneira diferente ao aumento de massa e exijam testes adicionais para determinar as condições ideais para cada situação aplicada.

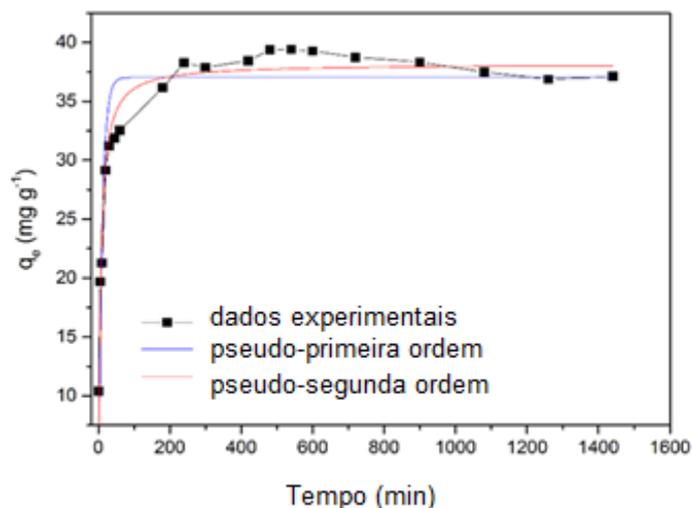
Diante deste contexto, ao avaliarmos o Gráfico 3(B), o pH é uma medida da concentração de íons de hidrogênio atuando como um fator importante na adsorção de partículas em uma superfície. Especificamente, para valores de pH mais elevados que indicam uma concentração elevada de íons de hidrogênio na solução, onde esta força iônica mais elevada pode levar a taxas maiores de adsorção. Ou seja, quando o pH é igual ou inferior a 4, as partículas tendem a se tornar mais hidrofílicas (amantes da água) e, portanto, menos propensas à adsorção. Por outro lado, quando o pH é igual ou superior a 7, as partículas tendem a tornar-se mais hidrofóbicas (repelentes à água) e, portanto, mais propensas à adsorção.

Neste sentido, caso, as capacidades adsorptivas em pH 4, 7 e 10 foram de 28, 29 e 27,5 mg g<sup>-1</sup>, respectivamente. Como a capacidade em pH 7 foi a mais elevada, podemos concluir que este valor de pH proporcionou as condições mais favoráveis para adsorção na superfície. A capacidade mais baixa em pH 4 e 10 pode refletir uma relação hidrofobicidade/hidrofiliabilidade desfavorável ou uma concentração mais baixa de íons hidrogênio.

### 4.3 Estudo cinético

O estudo da cinética e equilíbrio do processo de adsorção é muito importante, pois mediante a suas medidas, que determinamos o equilíbrio e demais parâmetros, conforme demonstrado no Gráfico 5.

Gráfico 5 - Cinética da esponja para remoção do diclofenaco



Fonte: Autoria própria (2024).

No Gráfico 5, é observado que as esponjas poderão tornar-se amplamente utilizadas para o controle da poluição da água, por possuírem alta capacidade de adsorver e remover poluentes como metais pesados e compostos orgânicos. Para testar a eficácia de adsorção de esponjas de lavar louça para a remoção específica de diclofenaco, foi realizado um estudo cinético e de equilíbrio.

Assim, no início do experimento observou-se que houve uma boa interação entre a esponja de lavar louça e o diclofenaco. A experiência foi conduzida com várias doses de diclofenaco e a taxa de adsorção foi examinada durante um período de tempo. Verificou-se que o equilíbrio foi alcançado em 400 minutos à temperatura ambiente.

No entanto, a capacidade máxima adsorvida do diclofenaco pela esponja de lavar louça foi determinada em  $39,02 \text{ mg g}^{-1}$ . Isto sugere que a esponja de lavar louça pode adsorver e reter eficazmente o diclofenaco. Os resultados experimentais foram analisados e constatou-se que os dados se ajustam ao modelo matemático de pseudo-primeira ordem.

Para tanto, observa-se no modelo que leva em consideração os efeitos de fenômenos de adsorção homogêneos e heterogêneos. Entretanto, o modelo de pseudo-primeira ordem, auxilia na compreensão da cinética de adsorção do diclofenaco agregado a esponja de lavar louça, e auxilio na determinação da magnitude do processo de adsorção.

Diante do exposto, o estudo da cinética e do equilíbrio das esponjas para remoção do diclofenaco produziu resultados promissores, onde verificou-se que a esponja de louça possui a capacidade adsorvida máxima de  $39,02 \text{ mg g}^{-1}$ , indicando que poderia ser usada para um controle eficaz da poluição da água.

Assim, observando o efeito da estabilidade, ocorrendo em aproximadamente 720 minutos, pois a partir desse momento foi caracterizado o estado de equilíbrio da reação, ou seja, os sítios ativos estavam totalmente saturados e assim não houve interação com o diclofenaco, impossibilitando a entrada de uma nova molécula na cavidade do sítio ativo, o percentual de remoção foi de 76,59% com capacidade adsorviva de  $39,02 \text{ mg g}^{-1}$ .

Assim, observa-se no modelo de pseudo-primeira ordem a obtenção da cinética de adsorção do diclofenaco ocorreu com sucesso. Os dados experimentais dos modelos estão demonstrados na Tabela 1

Tabela 1 - Modelos de PPO e PSO

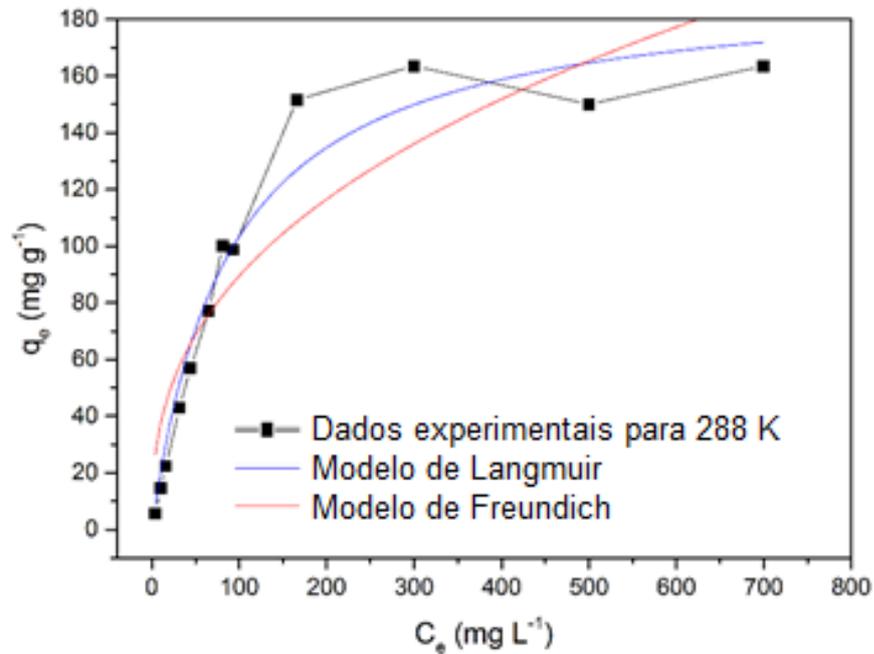
Modelos	Parâmetros	Material esponja
pseudo-primeira ordem	$q_e$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	37,02
	$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0,096
	$R^2$	0,846
	$\chi^2$	9,985
pseudo-segunda ordem	$q_e$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	38,18
	$k_2$ ( $\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$ )	0,004
	$R^2$	0,940
	$\chi^2$	3,43

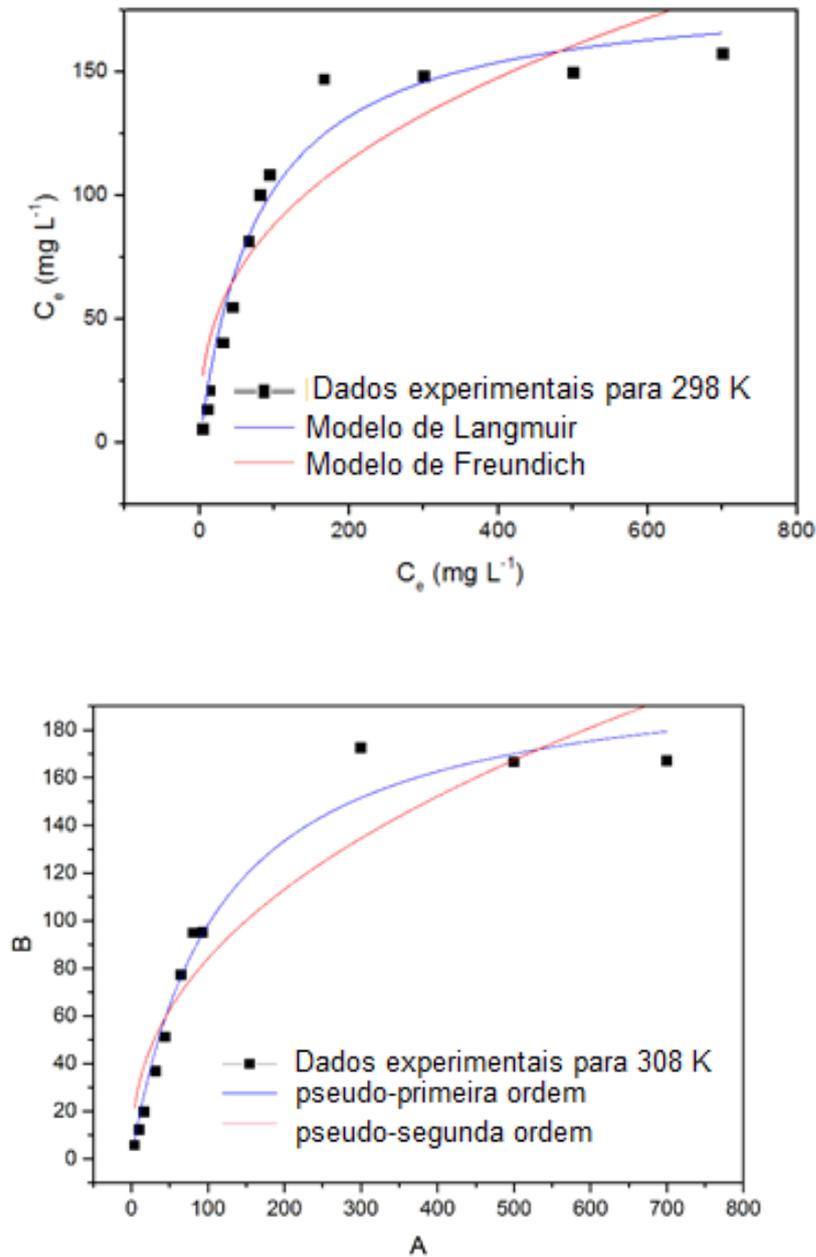
Fonte: Autoria própria (2024).

#### 4.3.1 Isotérmica de adsorção

As isotermas de adsorção foram estudadas para avaliar a remoção de contaminantes em diversas concentrações nas temperaturas de 288, 298 e 308 K, conforme demonstrado no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Isotermas atribuídos a diferentes temperaturas





Fonte: Autoria própria (2024).

Assim, foi observado a presença da isoterma de adsorção conforme gráfico da quantidade de material adsorvido versus a pressão de equilíbrio do gás ou vapor adsorvente. Este resultado é atribuído para compreender os diferentes adsorventes interagem com moléculas de gás ou vapor em diferentes temperaturas. Neste estudo de caso, o modelo de melhor ajuste foi Langmuir com fator de correlação de 0,979. Na temperatura de 288 K, a capacidade máxima de adsorção foi de  $72,81 \text{ mg g}^{-1}$ .

Neste quesito, para a temperatura de 288 K, o material adsorvente satura-se com o gás adsorvente a uma pressão mais baixa do que a outras temperaturas. Esta

pressão de equilíbrio mais baixa indica que a força da interação entre o material adsorvente e o gás adsorvente é inferior para 288 K.

Na temperatura de 298 K, a capacidade máxima de adsorção foi de 159,67 mg g<sup>-1</sup>. A pressão de equilíbrio para adsorção foi maior nesta temperatura quando comparada a temperaturas mais baixas. Assim, observa-se que a interação entre o material adsorvente e o gás adsorvente apresenta-se fortalecido para 298 K, em a temperaturas mais baixas. Na temperatura de 308 K, a capacidade máxima de adsorção foi de 208,06 mg g<sup>-1</sup>. Trata-se, do maior valor entre as três temperaturas aplicadas.

A pressão de equilíbrio para adsorção foi ainda maior em relação as outras duas temperaturas 288 e 298 K, indicando que a força da interação entre o material adsorvente e o gás adsorvente foi superior a 308 K.

Assim, admite-se observar que a capacidade de adsorção aumenta devido ao aumento da temperatura, ocorrendo uma melhor adsorção do material. Isto ocorre, porque temperaturas mais altas aumentam a energia cinética das unidades de gás adsorvente, o que resulta em forças de atração mais fortes entre o gás adsorvente e o material adsorvente. Neste sentido, a Tabela 2 representa os valores obtidos focados aos estudos.

**Tabela 2 - Parâmetros dos modelos de isotermas a 288 K, 298K e 308K**

Modelos	Parâmetros	288K	298K	308K
Langmuir	q <sub>máx</sub> (mg g <sup>-1</sup> )	173,22	184,59	208,06
	K <sub>L</sub> (L mg <sup>-1</sup> )	0,011	0,009	0,006
	R <sup>2</sup>	0,960	0,962	0,979
Freundlich	K <sub>F</sub> (mg g <sup>-1</sup> )/(mg L <sup>-1</sup> ) <sup>n<sub>F</sub></sup>	15,43	14,91	11,69
	n <sub>F</sub>	1,432	1,010	0,635
	R <sup>2</sup>	0,841	0,834	0,890

Fonte: Autoria própria (2024).

#### 4.3.2 Parâmetros termodinâmicos

Os valores de energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ), entalpia ( $\Delta H$ ) e entropia ( $\Delta S$ ) foram calculados a partir dos dados de equilíbrio são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Parâmetros termodinâmicos**

T (°C)	T (K)	( $\Delta G$ ) (KJ mol <sup>-1</sup> )	( $\Delta H$ ) (KJ mol <sup>-1</sup> )	( $\Delta S$ ) (KJ mol <sup>-1</sup> )
15	288	- 31,28		
25	298	- 33,54	- 22,72	0,07
25	308	- 35,87		

Fonte: Autoria própria (2024).

Os parâmetros termodinâmicos das três temperaturas 288, 298 e 308 K foram negativos para todas as temperaturas utilizadas. Entretanto, observa-se para temperatura de 288 K, a energia livre de Gibbs foi de  $-31,28 \text{ kJ mol}^{-1}$  indicando que o processo é espontâneo. Onde valor de entalpia negativo de  $-22,72 \text{ kJ mol}^{-1}$  indica que a reação é exotérmica.

O valor de entropia de 0,07 é bastante baixo, indicando que o processo é reversível. A 298 K, a energia livre de Gibbs foi de  $-33,54 \text{ kJ mol}^{-1}$ , a entalpia de  $-22,72 \text{ kJ mol}^{-1}$  e a entropia de 0,07. Portanto, esse comportamento indica que o processo é exotérmico e reversível, do qual confirma os resultados anteriores a 288 K.

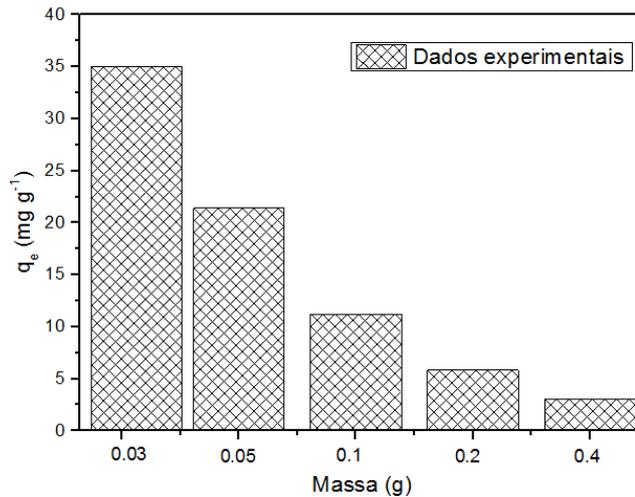
Diante do contexto, a 309 K a energia livre de Gibbs era de  $-35,87 \text{ kJ mol}^{-1}$ , a entalpia era de  $-22,72 \text{ kJ mol}^{-1}$  e a entropia era de 0,07. O resultado obtido demonstra que o processo é exotérmico e reversível. Assim, os resultados obtidos sugerem que os parâmetros termodinâmicos negativos para todas as três temperaturas estudadas se trata de um fenômeno exotérmico e reversível.

#### **4.4 Ensaios adsorptivos ao contaminante azul de metileno**

##### **4.4.1 Ensaios de adsorção do azul de metileno**

A avaliação realizada pelo efeito da massa adsorvente, os experimentos foram realizados variando a massa de 0,03 a 0,4 g da referente ao material esponja conforme demonstrado no Gráfico 6, onde a concentração de AM inicial foi de  $50 \text{ mg L}^{-1}$ , temperatura de  $25^\circ\text{C}$ , pH 6,03, e velocidade de agitação de 150 rpm foi mantida constante. Para tanto, observa-se a quantidade de AM adsorvidos foi entre: 0,03 a 0,05 g de esponja de lavar louças. O aumento adicional da massa adsorvente resultou em menor aumento na adsorção e, portanto, 0,03 g foi considerado ideal para fins de massa do adsorvente.

**Gráfico 7 - Condições utilizadas na adsorção de azul de metileno**

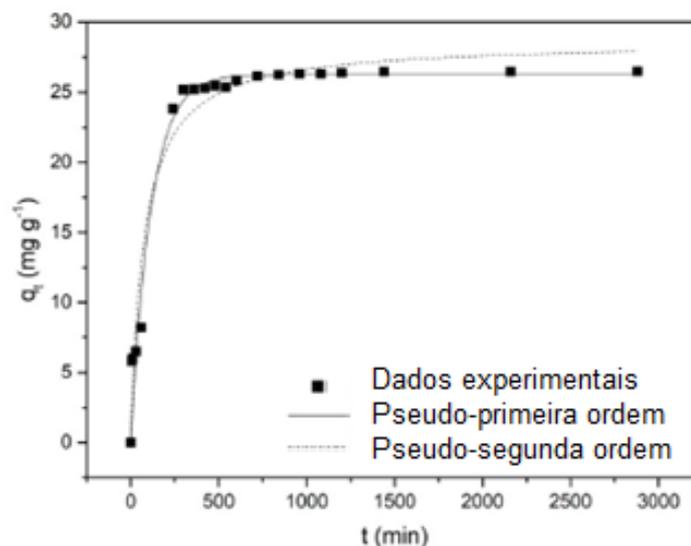


Fonte: Autoria própria (2024).

Ao analisarmos o Gráfico 7, a qual demonstra os resultados da cinética de adsorção referente aos experimentos e ajustes de pseudo-primeira ordem e modelos de pseudo-segunda ordem, referentes aos dados obtidos para adsorção do AM. O tempo de agitação variou de 1 a 3.000 min e 50 mg L<sup>-1</sup> da solução AM foram utilizados em pH 6,03, conforme previamente estabelecido.

Assim, observando o Gráfico 8, a adsorção de AM somente alterou após 300 min, atingindo assim o estado de equilíbrio com concentração constante de aproximadamente 26,4 mg g<sup>-1</sup>.

**Gráfico 8 - Cinética da esponja para remoção do AM**



Fonte: Autoria própria (2024).

Em relação aos parâmetros dos modelos cinéticos demonstrados na Tabela 4, entre eles: modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem, que apresentaram valores de  $R^2$  superiores a 0,950. Mesmo assim, analisando a capacidade de adsorção calculada e a estatística  $\chi^2$ , constatou-se que o modelo de pseudo-primeira ordem é melhor e ajustou-se aos dados experimentais. Este modelo indica que a adsorção de AM ao longo do tempo é diretamente proporcional à diferença na concentração de saturação de AM bem como, seus locais ativados disponíveis na superfície do adsorvente utilizado (HO; MCKAY, 1991; HO; MCKAY, 1998).

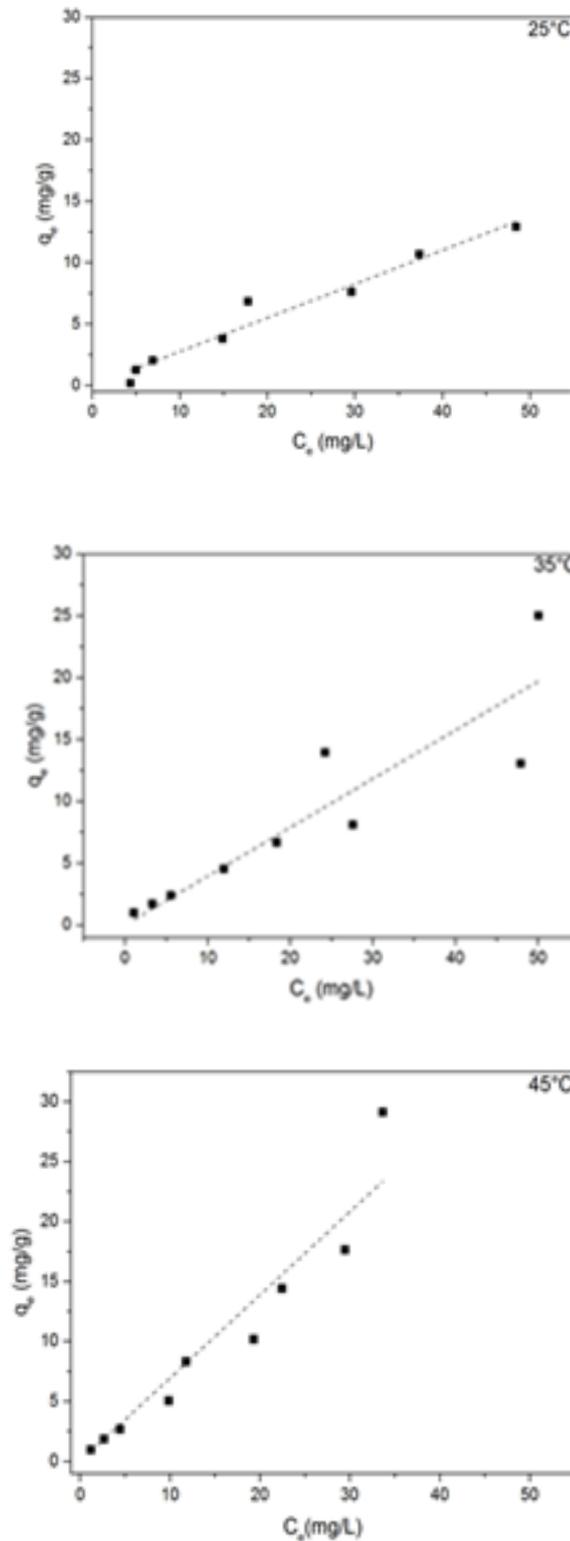
**Tabela 4 - Remoção de azul de metileno utilizando esponja**

<b>Modelos</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
pseudo-primeira ordem	$q_{e, \text{calc}}$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	26,261
	$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0,009
	$R^2$	0,970
	$\chi^2$	2,503
pseudo-segunda ordem	$q_{e, \text{calc}}$ ( $\text{mg g}^{-1}$ )	28,620
	$k_2$ ( $\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$ )	4,721
	$R^2$	0,958
	$\chi^2$	3,553

**Fonte: Autoria própria (2024).**

Entretanto, é importante afirmar que o modelo de pseudo-primeira ordem, a equação é válida somente quando: a adsorção está no método de Henry faixa de concentrações ou quando a massa biossorvente é alta (HO; MCKAY, 1998; TRAN; YOU, 1997).

As isotermas foram ilustradas traçando a quantidade de AM adsorvido na esponja de lavar louças em equilíbrio ( $q_e$ ) versus a concentração de equilíbrio de AM em solução ( $C_e$ ). Os dados de absorção de equilíbrio obtidos a 288K, 298K e 308K, conforme demonstrado no Gráfico 9.

**Gráfico 9 - Isotermas de adsorção de azul de metileno**

Fonte: Autoria própria (2024).

Portanto, é possível verificar a aplicabilidade do Modelo de Henry para todas as temperaturas ( $R^2 > 0,954$ ), corroborando com a sugestão do modelo de pseudo-

primeira ordem. Além disso, isso o aumento da temperatura favorece a capacidade de adsorção do o material, sugerindo que o processo de adsorção do AM é endotérmico, pelo valor da constante de Henry e aumento da temperatura de 288K para 308K.

#### 4.5 Custos da demanda por unidade de esponja

A sustentabilidade é obtida mediante a procedimentos atribuídos a obtenção de matéria prima que poderá ser tratada evitando novas contaminações caso ocorra, seu lançamento ao meio ambiente. Assim, um empreendimento utiliza para produção um custo que deverá ser tratado como custo fixo e variável conforme demonstrado na Tabela 5.

Entretanto, a diluição dos custos medidos pelo controle da quantidade de esponjas de louças e sua aplicação como um adsorvente eficiente para descontaminação de contaminantes químicos presentes em águas, solo, entre outras aplicações.

**Tabela 5 - Gastos mensal obtido pelos custos diretos e indiretos pela coleta seletiva e processo da fabricação do adsorvente**

<b>Gastos VARIÁVEIS</b>	<b>R\$</b>	<b>Gastos FIXOS</b>	<b>R\$</b>
Transporte da esponja de louças (matéria prima)	75.845,82	Aluguel do prédio administrativo e fábrica	12.113,20
Custos das demais matérias primas produção adsorvente	505,66	Energia elétrica fábrica	2.018,82
Manutenção equipamentos laboratório	501,83	Seguro e vigilância	302,81
Salários funcionários	94.634,38		
<b>Total</b>	<b>171.487,69</b>		<b>14.434,83</b>
<b>Total dos Gastos</b>	<b>185.922,52</b>		

Fonte: Autoria própria (2024).

Ao atribuímos o custeio por absorção, trata-se de uma apropriação de todos os custos de produção aos bens elaborados, da produção, onde os gastos relativos ao esforço de fabricação são distribuídos em todo o contexto produtivo envolvendo seus custos de produção, como os fixos ou variáveis, considerados no cálculo do custo do produto. Assim, para os gastos não fabris, ou seja, despesas, são excluídas

deste cálculo, onde o custeio por absorção é um processo de apuração de custos, voltado a ratear todos os elementos utilizados em cada fase da produção.

Para o nosso estudo, o custeio por absorção, é um método de apuração dos custos unitários, onde envolvemos os critérios da quantidade de esponjas de louças que poderão ser coletadas, a qual consideramos apenas os gastos incorridos no processo produtivo conforme apresentado na Tabela 6.

Entretanto, a Tabela 6 visa a representação dos custos atribuídos ao longo dos processos realizados pelo órgão coletor bem como, a inclusão da proposta de adsorvente relacionado ao contexto investigativo da relação do custo total e unidades coletadas conforme informado visando, obter custo unitário.

**Tabela 6 - Custeio de absorção utilizando o procedimento de coleta seletiva**

<b>Custeio por absorção</b>	<b>R\$</b>
Total dos custos	185.922,52
Produção mensal (unidades)	376.234
Custo por unidade - (absorção)	0,49

**Fonte: Autoria própria (2024).**

## 5 CONCLUSÃO

A contextualização do estudo abordou a reutilização de esponjas de lavar louças, consideradas de grande impacto ambiental devido a sua composição química, formada basicamente por Poliuretano. Assim, sua utilização mediante a prática conscientes de sustentabilidade como a coleta seletiva para sua obtenção e posterior utilização como adsorvente visando a remoção de compostos considerados contaminantes emergentes como o diclofenaco (fármaco) e azul de metileno (corante), ambos de grande agravo no impacto ambiental após tratamentos relacionados a adsorção são reduzidos suas concentrações.

Assim, a aplicação cinética com o uso de um adsorvente de baixo custo financeiro e tratamento químico, possibilitou a redução máxima de aproximadamente  $40 \text{ mg g}^{-1}$ , comprovando a relação ótima entre o diclofenaco e o material provindo de esponjas de lavar louças, desenvolvido ao longo do estudo. No entanto, sua aplicação direcionada ao corante azul de metileno trouxe novos horizontes especialmente pela redução do contaminante com capacidade adsorptiva de  $26,4 \text{ mg g}^{-1}$

Dentro do quesito, sustentabilidade e gestão de custos os processos envolvidos para sua retirada do ambiente mediante a coleta seletiva, acarreta em um avanço, pois seus custos são reduzidos devido as ações que já complementam a coleta de outras formas de materiais recicláveis como papelão e plásticos. Assim, os custos fixos e variáveis estão diluídos e atrativos para tal aplicação com valores de coleta por unidade de esponjas em torno de R\$ 0,49 centavos de reais.

Neste sentido, podemos concluir que o material é sustentável, ecologicamente correto e viável, contribuindo para uma sociedade, economia e melhoria do meio ambiente de forma geral.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos sólidos – Classificação**, ABNT/NBR 10.004, 2004.
- BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS**. (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010).
- ABRELPE - Associação de empresas de limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama de resíduos sólidos no Brasil - 2011**. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br/panorama/panorama2011.pdf>>.
- ANDRADY, A. L.; NEAL, M. A. Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 364, n. 1526, p. 1977–1984, 2009.
- ADOGAYE, S. B. B.; *et al.* Assessment of Domestic Water Sources Safety: Application of the Micro Biological Survey Method and Microbiological Profile of the Contaminating Bacteria. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 13:5, p. 237-242, 2021.
- ALI, I.; ASIM, M.; KHAN, T. A. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 113, p. 170–183, 2012.
- ALVER, E.; METIN, A. Ü.; BROUERS, F. Methylene blue adsorption on magnetic alginate/rice husk bio-composite. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 154, p. 104–113, jul. 2020.
- BAPTISTA, A.T.A.; *et al.* Coagulation-Flocculation Process with Ultrafiltered Saline Extract of Moringa Oleifera for the Treatment of Surface Water. **Chemical Engineering Journal**, 276, 166–173, 2015.
- BOLONG, N.; *et al.* A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. **Desalination**, v. 239, p. 229-246, 2009.
- BOUND, J. P.; VOULVOULIS, N. Predicted and measured concentrations for selected pharmaceuticals in UK rivers: Implications for risk assessment. **Water Research**, v. 40, p. 2885-2892, 2006.
- BOULAMANTI, A.; MOYA, J. A. Production costs of the chemical industry in the EU and other countries: Ammonia, methanol and light olefins. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68:2, p. 1205-1212, 2017.
- BUI, T. X.; CHOI, H. Adsorptive removal of selected pharmaceuticals by mesoporous silica SBA-15. **Journal of Hazardous Materials**, v. 168, n. 2-3, p. 602-608, 2009.
- CASTRO, R. H. R.; MURAD, B. B. S.; GOUVÊA, D. Influence of the acid–basic character of oxide surfaces in dispersants effectiveness. **Ceramics International**, v.

30, n. 8, p. 2215-2221, 2004.

CALDWELL, D. J. *et al.* An integrated approach for prioritizing pharmaceuticals found in the environment for risk assessment, monitoring and advanced research. **Chemosphere**, v. 115, p. 4-12, 2014.

COLE, M.; *et al.* The impact of polystyrene microplastics on feeding, function and fecundity in the marine copepod *Calanus helgolandicus*. **Environmental Science and Technology**, v. 49:2, p. 1130–1137, 20 jan. 2015.

COLDEBELLA, P. F.; *et al.* Potential effect of chemical and thermal treatment on the Kinetics, equilibrium, and thermodynamic studies for atrazine biosorption by the *Moringa oleifera* pods. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 95:5, p. 961–973, 2017.

CUSIOLI, L. F.; *et al.* Modified *Moringa oleifera* Lam. Seed husks as low-cost biosorbent for atrazine removal. **Environmental Technology**, v.42:7, p. 1092-1103, 2019.

CHIBOWSKI, E.; SZCZEŚ, A. Zeta potential and surface charge of DPPC and DOPC liposomes in the presence of PLC enzyme. **Adsorption**, v. 22, p. 775-765, 2016.

CRINI, G.; BADOT, P. Application of chitosan , a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature. **Progress in polymer science**, v. 33, p. 399–447, 2008.

DAS, A.; MAHANWAR, P. A brief discussion on advances in polyurethane applications. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 3, n. 3, p. 93–101, 2020.

SILVA SPINACÉ, M. A.; PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, v. 28:1, p. 65–72, 2005.

DALHOUMI, W.; *et al.* Therapeutic strategies of *Moringa oleifera* Lam. (Moringaceae) for stomach and forestomach ulceration induced by HCl/EtOH in rat model. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29:6, p. 103284, 2022.

DAUGHTON, C. G. Cradle-to-cradle stewardship of drugs for minimizing their environmental disposition while promoting human health. I. Rational for and avenues toward a green pharmacy. **Environmental Health Perspectives**, v. 111:5, 757-774, 2003.

CARMO, K. M.; SILVA, M. C.; MORELLI, C. L. Reaproveitamento de resíduo de espuma rígida de poliuretano em uma matriz termoplástica de poliuretano. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. e127932695-e127932695, 2020.

DONG, ZHAO.; *et al.* Prioritizing environmental risk of prescription pharmaceuticals. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, v. 29:8, p. 1649–1657, 2013.

SOUZA, R.M.; *et al.* Occurrence, Impacts and General Aspects of Pesticides in Surface Water: A Review. **Process Safety Environmental. Protection.** v. 124, p. 22-37, 2020.

European Pharmacopoeia, Supplement, p. 715-715, 2001.

FARRÉ, M. LA *et al.* Fate and toxicity of emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment. **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, v. 27:11, p. 991–1007, 2008.

GOMEZ, J.; *et al.* Determination of pharmaceuticals of various therapeutic classes by solid-phase extraction and liquid chromatography–tandem mass spectrometry analysis in hospital effluente wastewaters. **Journal Chromatography.** v. 1114, p. 224-233, 2006.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, 5 jul. 2017.

GEISSEN, V.; *et al.* Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3:1, 57-65, 2015.

GUIMARÃES, E. F. N.; *et al.* Effects of polystyrene nanoplastics on *Ctenopharyngodon idella* (grass carp) after individual and combined exposure with zinc oxide nanoparticles. **Journal Of Hazardous Materials**, v. 403, p. 123879, fev. 2021.

GILMAN, A. G.; R.T.W., NIES A. S.; PALMER T., **As bases farmacológicas da terapêutica.** 8a. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1991.

HAMAD, K.; KASEEM, M.; DERI, F. Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 12, p. 2801– 2812, 2013.

HO, Y.S.; MCKAY, G. Pseudo-second-order model for sorption processes. **Process Biochemistry.**, v. 34:5, p. 451–465, 1991.

HO, Y.S.; MCKAY, G. A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. **Process Safety Environmental. Protection.** 76, 332–340, 1998.

HOWARD, G. T. Biodegradation of polyurethane: A review. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 49, n. 4, p. 245–252, 2002.

HUGHES, S. R.; KAY, P.; BROWN, L. E. Global synthesis and critical evaluation of pharmaceutical data sets collected from river systems. **Environmental Science and Technology**, v. 47:2, 661-77, 2013

JOHNSON, S. B.; *et al.* Surface chemistry–rheology relationships in concentrated mineral suspensions. **International Journal of Mineral Processing**, v. 58, n. 1–4, p.

267-304, 2000.

JOGA RAO, H. Characterization studies on adsorption of lead and cadmium using activated carbon prepared from waste tyres. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 20:2, p. 561-568, 2021.

LAGERGREN, S. Y. Zur Theorie der Sogenannten Adsorption Gelöster Stoffe, Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens. **Handlingar**, v. 4, n. 24, p. 1–39, 1898.

KLOSS, J.; *et al* Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. **Water**, v.14:2, p. 242-249, 2022.

KOVÁCS, G. Combination of Lean value-oriented conception and facility layout design for even more significant efficiency improvement and cost reduction. **International Journal of Production Research**, v. 58:10, p. 2916-2936, 2020.

LANGMUIR, I.; The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. **Journal of the American Chemical Society**, v. 38, n. 11, p. 2221–2295, 1916.

LONAPPAN, L.; *et al*. Diclofenac and its transformation products: Environmental occurrence and toxicity - A review. **Environment International**, v. 96, p. 127-138, 2016.

LITHNER, D.; LARSSON, A.; DAVE, G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 18, p. 3309–3324, 2011.

LIN, P. C.; *et al*. Techniques for physicochemical characterization of nanomaterials. **Biotechnology advances**, v. 32, n. 4, p. 711-726, 2014.

LUO, L.; *et al*. Adsorption Species Distribution and Multicomponent Adsorption Mechanism of SO<sub>2</sub>, NO, and CO<sub>2</sub> on Commercial Adsorbents. **Energy and Fuels**, v. 59, 5, p. 1556–1563, 2017.

MOREIRA, S. A.; *et al*. Removal of Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> ions from aqueous solutions using cashew peduncle bagasse as an eco-friendly biosorbent. **Desalination and Water Treatment**, v. 57: 22, p. 1-14, 2016.

METCALFE, C. D.; *et al*. Distribution of acidic and neutral drugs in surface waters near sewage treatment plants in the lower Great Lakes, Canada. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 22: 12, p. 2881-9, 2003.

NAMASIVAYAM C.; RADHIKA, R.; SUBA S. Uptake of dyes by a promising locally available agricultural solid waste: coir pith, promising locally available agricultural solid waste: coir pith. **Waste Management**. v. 21, p. 381–387, 2001.

NASCIMENTO, R. F.; *et al*. **Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Imprensa Universitária, Fortaleza, CE, 2014.

OLADOYE, P. O.; *et al.* **Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater** *Results in Engineering*, 16(6): p.100678, 2022.

PETROVIĆ, M.; GONZALEZ, S.; BARCELÓ, D. Analysis and removal of emerging contaminants in wastewater and drinking water. **TrAC - Trends in Analytical Chemistry**, v. 22, p. 685-696, 2003.

QUESADA, H. B.; *et al.* Surface water pollution by pharmaceuticals and an alternative of removal by low-cost adsorbents: A review. **Chemosphere**, v. 222, p. 766–780, 2019.

RODRIGUEZ-NARVAEZ, O. M.; *et al.* Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review **Chemical Engineering Journal**, v. 323, p. 361-380, 2017.

SOUNDARARAJAN, K.; JANARDHAN REDDY, K. Cost-reduction and quality improvement using DMAIC in the SMEs. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 68: 8, p. 1528-1540. 2019.

TRAN, H. N.; YOU, S. J. A. Hosseini-Bandegharaei, H.P. Chao, Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: a critical review, **Water Research.**, 120, 88–116, 2017.

SIMÓN D.; *et al.* Recycling of polyurethanes from laboratory to industry, a journey towards the sustainability. **Waste Management**. 2018;76:147–171.

VIZCAYA, C. D. **Estudio** Del Proceso De Crecimiento Lento De Grieta En El Polietileno De Alta Densidad Para Su Aplicación En Tubería. Universidad Rey Juan Carlos, 2009.

VIENO, N.; SILLANPAA, M. Fate of diclofenac in municipal wastewater treatment plant - A review. **Environment International**, v. 69, p. 28-39, 2014.

SINGH, I.; *et al.* Recent Advancement in Plant Oil Derived Polyol-Based Polyurethane Foam for Future Perspective: A Review. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 122, n. 3, p. 1–23, 2020.

ZHANG, D.; *et al.* Removal of pharmaceuticals and personal care products in aquatic plantbased systems: A review. **Environmental Pollution**, v. 184, p. 620-639, 2014.