



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE BACHARELADO EM QUÍMICA INDUSTRIAL**

ANNA LAURA MENDONÇA DA TRINDADE SILVA

**ANÁLISE DO PODER ADSORTIVO DO RESÍDUO DE MALTE EM
SOLUÇÕES CONTAMINADAS COM GASOLINA E DIESEL**

CAMPINA GRANDE – PB

2021

ANNA LAURA MENDONÇA DA TRINDADE SILVA

**ANÁLISE DO PODER ADSORTIVO DO RESÍDUO DE MALTE EM
SOLUÇÕES CONTAMINADAS COM GASOLINA E DIESEL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
da Paraíba - UEPB, como requisito
parcial à obtenção do Título do
Bacharelado em Química Industrial.

Orientadora: Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz

Coorientadora: Profa. MsC. Fernanda Vieira Amorim

CAMPINA GRANDE – PB

2021

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

S586a Silva, Anna Laura Mendonca da Trindade.
Análise do poder adsorptivo do resíduo de malte em
soluções contaminadas com gasolina e diesel [manuscrito] /
Anna Laura Mendonca da Trindade Silva. - 2021.
47 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.

"Orientação : Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz ,
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Adsorção industrial. 2. Resíduo orgânico. 3. Cevada. 4.
Agroindústria. I. Título

21. ed. CDD 338.1

ANNA LAURA MENDONÇA DA TRINDADE SILVA

**ANÁLISE DO PODER ADSORTIVO DO RESÍDUO DE MALTE EM
SOLUÇÕES CONTAMINADAS COM GASOLINA E DIESEL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade
Estadual da Paraíba - UEPB, como
requisito parcial à obtenção do Título
do Bacharelado em Química
Industrial.

Aprovada em: 02/06/2021.

BANCA EXAMINADORA



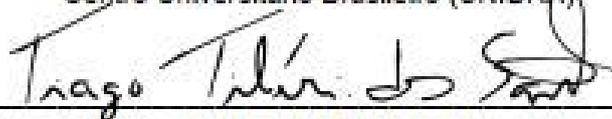
Prof. Dra. Márcia Ramos Luiz

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



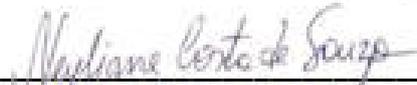
Profa. MsC. Fernanda Vieira Amorim

Centro Universitário Brasileiro (UNIBRA)



Prof. Dr. Tiago Tibério dos Santos

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dra. Neyliane Costa de Souza

Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me acompanhar e me dar forças nessa caminhada.

A minha família, que mesmo distante, nunca mediram esforços para que meus sonhos fossem realizados, me apoiando e me incentivando sempre.

A minha orientadora, Profa. Dra. Márcia Ramos Luiz, por todos os ensinamentos, pela dedicação, paciência e por acreditar no meu potencial.

À banca examinadora por todas as sugestões, correções, conselhos e valiosas contribuições na finalização deste trabalho.

Às amigadas que eu construí durante a graduação, em especial minhas colegas de profissão, Raquel Kethy e Andreza Oliveira, que me ajudaram bastante no desenvolvimento deste trabalho.

E a todos envolvidos direta ou indiretamente que auxiliaram na conclusão deste trabalho.

RESUMO

O avanço da tecnologia industrial e conseqüentemente o aumento das produções, vem gerando muitos resíduos e o seu descarte impróprio tem resultado na geração de águas contaminadas, assim como na produção de resíduos industriais e agrícolas, como o resíduo da cevada. O processo de adsorção utilizando resíduos agroindustriais como adsorvente, vem se tornando uma alternativa potencialmente atrativa e econômica para o tratamento de diversos tipos de efluentes. Esse trabalho visou buscar formas alternativas para o aproveitamento do resíduo gerado na produção de cerveja, utilizando-os como resíduos seco para servir como bioadsorvente de compostos orgânicos. Para tanto, foram realizadas avaliações de cinética e isoterma de equilíbrio para avaliar o potencial adsorvivo do resíduo de cevada na remoção de gasolina e diesel. No estudo da cinética de adsorção foram realizados três experimentos, cada uma com 12 amostras de soluções com 8,6mL; 12,0mL e 15,6mL de contaminante com 40mL de água. No estudo da isoterma de equilíbrio, foram realizadas 10 concentrações diferentes do agente contaminante com variação de 5 a 50% com água. Modelos matemáticos foram utilizados para representar os dados experimentais de isoterma de adsorção. Na cinética da gasolina a quantidade adsorvida para o resíduo foram aproximadamente 8,0; 7,5 e 7,0 mL/g, respectivamente e na cinética do diesel a quantidade adsorvido para o resíduo foram de aproximadamente 6,3; 6,7 e 7,2 mL/g, respectivamente. Na isoterma da gasolina os resultados se ajustaram melhor ao modelo pré-estabelecido de Langmuir-Freundlich.

Palavras-Chaves: Adsorção, cevada, gasolina, diesel.

ABSTRACT

The advancement of industrial technology and, consequently, the increase in production, has been generating a lot of waste and its improper disposal has resulted in the generation of contaminated water, as well as in the production of industrial and agricultural waste, such as barley residue. The adsorption process using agro-industrial waste as an adsorbent has become a potentially attractive and economical alternative for the treatment of various types of effluents. This work aimed to find alternative ways to use the residue generated in the production of beer, using them as dry residues to serve as a bio-adsorbent of organic compounds. For this purpose, kinetic and equilibrium isotherm evaluations were carried out to evaluate the adsorption potential of barley residue in the removal of gasoline and diesel. In the study of the adsorption kinetics, three experiments were carried out, each with 12 samples of solutions with 8.6mL; 12.0mL and 15.6mL of contaminant with 40mL of water. In the study of the equilibrium isotherm, 10 different concentrations of water were made with contaminant with a variation of 5 to 50% of the contaminating agent. Mathematical models were used to represent the experimental data of the adsorption isotherm. In the kinetics of gasoline the amount adsorbed to the residue was approximately 8.0; 7.5 and 7.0 mL / g, respectively and in the kinetics of diesel the amount adsorbed to the residue was approximately 6.3; 6.7 and 7.2 ml / g, respectively. In the gasoline isotherm, the results were better adjusted to the pre-established Langmuir-Freundlich model.

Keywords: Adsorption, barley, gasoline, diesel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cevada.....	13
Figura 2 - Resíduo de malte oriundo da fabricação de cerveja.....	15
Figura 3 - Tipos de isotermas de BET	19
Figura 4 - Cevada seca à temperatura ambiente.	24
Figura 5 - (a) Pesagem do resíduo de cevada e (b) Recipientes com o resíduo para serem adicionados aos frascos erlenmeyers.	25
Figura 6 - (a) Recipientes contendo a mistura água. (b) Amostras na mesa agitadora com dispersão água/contaminante/resíduo.	26
Figura 7 - Provetas com dispersão obtida após à adsorção, para quantificar a água/contaminante adsorvida por análise volumétrica.	26
Figura 8 - Fluxograma da metodologia do estudo da cinética.....	27
Figura 9 - Fluxograma da metodologia do estudo da isoterma.	28
Figura 10 - Cinética de adsorção para 8,6mL de gasolina e 40,0mL de água ..	30
Figura 11 - Cinética de adsorção para 12,0mL de gasolina e 40,0mL de água	31
Figura 12 - Cinética de adsorção para 15,6mL de gasolina e 40,0mL de água	31
Figura 13 - Cinética de adsorção para 8,6mL de diesel e 40,0mL de água.	32
Figura 14 - Cinética de adsorção para 12,0mL de diesel e 40,0mL de água. ...	33
Figura 15 - Cinética de adsorção para 15,6mL de diesel e 40,0mL de água. ...	33
Figura 16 - Isoterma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando a gasolina como adsorvente, comparada com o modelo de Langmuir	35
Figura 17 - Isoterma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando o diesel como adsorvente, comparada com o modelo de Langmuir.	36
Figura 18 - Isoterma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando a gasolina como adsorvente, comparada com o modelo de Freundlich.	37
Figura 19 - Isoterma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando o diesel como adsorvente, comparada com o modelo de Freundlich.	38

Figura 20 - Isotherma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando a gasolina como adsorvente, comparada com o modelo de Langmuir-Freundlich.	39
Figura 21 - Isotherma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando o diesel como adsorvente, comparada com o modelo de Langmuir-Freundlich.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da gasolina brasileira.....	23
Tabela 2 - Variação de concentração água/contaminante.....	28
Tabela 3 - Valores dos coeficientes de correlações para os modelos de Langmuir, Freundlich e Langmuir-Freundlich utilizando a gasolina como adsorvato.....	40
Tabela 4 - Valores dos coeficientes de correlações para os modelos de Langmuir, Freundlich e Langmuir-Freundlich utilizando o diesel como adsorvato.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	11
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.2 Cevada (<i>Hordeum Vulgare</i> L.)	12
2.3 Cerveja	14
2.4 Adsorção	15
2.4.1 <i>Tipos de Adsorção</i>	17
2.4.2 <i>Fatores que Influenciam no Processo de Adsorção</i>	17
2.4.3 <i>Cinética de Adsorção</i>	18
2.4.4 <i>Equilíbrio de Adsorção</i>	19
2.6.4.1 <i>Isoterma de Freundlich</i>	20
2.6.4.2 <i>Isoterma de Langmuir</i>	20
2.6.4.3 <i>Isoterma de Langmuir-Freundlich</i>	21
2.5 Impactos Ambientais Decorrentes de Poluentes Orgânicos	21
2.6 Contaminantes Orgânicos	22
2.6.1 Gasolina	22
2.6.2 Diesel	23
3 METODOLOGIA	24
3.1 Adsorvente e Adsorvatos Utilizados	24
3.2 Preparação da Biomassa Cevada	24
3.3 Cinética de Adsorção	25
3.4 Isoterma de Equilíbrio	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4.1 Cinética de Adsorção	30
4.2 Isoterma de Equilíbrio	34
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem se aumentado bastante a preocupação da sociedade quanto à preservação do meio ambiente. Uma vez que, o avanço desenfreado das indústrias tem refletido fortemente na contaminação das águas, seja pela negligência do seu tratamento antes de despejá-las nos rios, ou por acidente e descuidos cada vez mais frequentes que propiciam o lançamento de muitos poluentes nos ambientes aquáticos. Isso é um fato preocupante, sendo essencial o levantamento das condições de qualidade e o tratamento dos corpos aquáticos, que representa um risco potencial para os seres vivos (CARDOSO, 2018).

Muitas águas residuárias apresentam hidrocarbonetos originados dos processos de produção nas indústrias de plásticos, borrachas sintéticas, tintas, corantes, adesivos, solventes, detergentes, explosivos, produtos farmacêuticos, que derivam do petróleo. Além disso, pode-se citar a contaminação causada pelo petróleo, ocasionada por seu derramamento ou de seus produtos refinados, decorrentes de problemas nos tanques de armazenamento ou plataformas, vazamentos em navios ou explosões de poços (OLIVEIRA, 2017).

A toxicidade de hidrocarbonetos é amplamente estudada, uma vez que está relacionada à sua estrutura química e sua hidrofobicidade, ou seja, os hidrocarbonetos mais solúveis em água são menos tóxicos (SOUZA *et al.*, 2011).

Devido a estas implicações ambientais, novas tecnologias têm sido pesquisadas para a degradação ou imobilização destes compostos. O processo de adsorção tem demonstrado ser um método eficaz e econômico no tratamento de efluentes com poluentes orgânicos, sendo necessária a pesquisa de materiais de baixo custo para ser utilizado industrialmente (AMORIM, 2016).

O efeito das biomassas vem sendo estudado para a remoção de metais pesados de efluentes industriais e também efluentes contendo compostos orgânicos, como é o caso dos efluentes de petróleo e derivados (CARVALHO, 2014). Diante deste cenário, várias vias de tratamento podem ser citadas para a destinação final adequado dos efluentes industriais, como pode ser citado a flotação-coagulação, fitorremediação e degradação eletroquímica e a adsorção. A adsorção vem sendo um dos melhores métodos de tratamento destes efluentes por possuir várias vantagens como baixo custo, eficiência e simplicidade (BEZERRA *et al.*, 2014).

O presente estudo tem grande relevância, pois possibilitará o aproveitamento dos resíduos da produção de cerveja tendo se mostrado uma alternativa viável, eficaz e econômica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a cinética e isoterma de adsorção para verificar o poder adsorvente do resíduo gerado na produção da cerveja como biomassa adsorvente com combustíveis em matrizes aquosas com compostos orgânicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a cinética de adsorção do sistema resíduo/gasolina e resíduo/diesel.
- Obter as curvas de equilíbrio, para formação das isotermas de adsorção.
- Avaliar o modelo matemático para análise da influência das variáveis do processo para isoterma de adsorção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Utilização de Resíduos Agroindustriais

A evolução do agronegócio e o desenvolvimento dos processos de transformação de alimentos levaram à geração de muitos resíduos, sendo estes um dos principais problemas ambientais, não só do Brasil, mas do mundo como um todo (GIORDANO, 2000).

Os resíduos gerados nos processos agroindustriais representam perdas econômicas no processo produtivo e, se não receberem destinação adequada, podem proporcionar problemas ambientais, em razão da sua carga poluidora. Dentre estes resíduos vários podem ser utilizados na alimentação de ruminantes, dentre eles o resíduo úmido de cervejaria, que tem se destacado, uma vez que é gerado em grande volume durante o ano todo (BROCHIER, 2007).

O resíduo úmido de cervejaria é resultante da fase inicial do processo de fabricação de cervejas e apresenta-se na forma de cascas ou de farelo, com umidade em torno de 80% (BROCHIER e CARVALHO, 2009).

O resíduo de cervejaria pode se apresentar na forma de resíduo úmido, resíduo prensado, resíduo seco e levedura de cerveja (PARPINELLI, 2016). Nas condições brasileiras, predomina a geração do resíduo úmido, uma vez que o processo de secagem é economicamente inviável.

A cevada tem alguns subprodutos úteis, o mais valioso é o bagaço que é utilizado principalmente para compostagem nos países desenvolvidos, mas também alimentar animais nos países em desenvolvimento e subdesenvolvidos. A cevada é o preferido por alguns fabricantes de alimentos devido ao seu baixo preço em comparação com o trigo e seu valor nutricional (AKAR *et al.*, 2004).

2.2 Cevada (*Hordeum Vulgare L.*)

De acordo com a Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) a cevada é um grão produzido, principalmente, nos meses de inverno, utilizado de forma variável na alimentação humana e animal, além de ser usado na indústria farmacêutica. Ela também é utilizada para a fabricação de bebidas como a cerveja e em destilados (BRASIL, 2019). Em ordem de importância econômica ocupa a quinta

posição entre os grãos, sendo superado apenas pelo arroz, milho, trigo e soja (MINELLA, 2015).

A cevada está entre os três carboidratos mais equilibrados, juntamente com a batata e o arroz, pois contém carboidratos complexos. No Oriente Médio a cevada ainda é considerada “remédio para o coração”, devido a quantidade de fibras que auxiliam na diminuição de colesterol LDL, regulam o trânsito intestinal e podem controlar o desenvolvimento de cânceres (COLBERT, 2006).

Borém (2013) descreve a planta, como sendo herbácea anual pertencente à família das gramíneas. Seus colmos ou caules crescem cerca de um metro e são mais grossos que os das espécies afins.

Existem dois tipos principais de cevada: a de duas e a de seis fileiras. A cevada de duas fileiras tem duas fileiras de grãos na mesma espiga e é a mais utilizada, porque contém grãos maiores e mais uniformes (Figura 1). Essa mesma se subdivide em dois subgrupos principais: a cevada de haste ereta (*Hordeum distichum erectum*) e a cevada de haste curta (*Hordeum distichum nutans*) (CARVALHO, 2007).

Figura 1 – Cevada



Fonte: MINELLA, 2019.

De acordo com Kruklis (2019) a cevada é encontrada em grandes plantações comerciais ou pequenas lavouras nos quintais das casas de roça. Pode ser adquirida em casas que vendem produtos naturais e em sites que comercializam vários tipos de alimentos; sendo encontrada em forma de grão, farelo e cápsulas.

No Brasil seu cultivo ganhou notoriedade do ponto de vista comercial em meados de 1930 (MINELLA, 1999) e desde então, a produção se direcionou quase que unicamente para produção cervejeira. As áreas nacionais de produção encontram-se restritas basicamente aos três estados da região sul, que atende, atualmente, em torno de 50% da demanda industrial, fato que pode ser explicado pela temperatura amena, necessária para seu cultivo e que pode ser encontrada, no outono e inverno nessas regiões (MORI e MINELLA, 2012).

A produção nacional de cevada (*Hordeum vulgare* L.) teve uma redução de 15,0% quando comparada aos dados de produtividade obtidos nas safras de 2019 e 2020, passando de 429,1 mil toneladas para 364,8 mil toneladas, respectivamente. Fato que pode ser explicado pela geada e estiagem (CONAB, 2020).

A cevada, além de ser um dos cereais mais utilizados na produção da cerveja, é um cereal que apresenta ainda na forma de grão, 95% da energia do milho. Como subproduto da cervejaria, sendo também chamado de resíduo de cervejaria, ela é classificada como suplemento proteico, sendo comparada ao farelo de soja em valor nutricional (FARIA, 2003).

2.3 Cerveja

Cerveja é definida como a bebida resultante da fermentação, mediante levedura cervejeira, do mosto de cevada malteada ou do extrato de malte, submetido previamente a um processo de cocção, adicionado de lúpulo. Uma parte da cevada malteada ou do extrato de malte poderá ser substituído por adjuntos cervejeiros (MAPA, 2001).

O resíduo de malte, como apresentado na Figura 2, representa 85% do total de subprodutos produzidos a partir do processo de fabricação de cerveja, sendo considerado o mais abundante (MAIA, 2020). Este subproduto encontra-se disponível em grande quantidade o ano todo, com baixo ou sem custo e é gerado não apenas pelas grandes indústrias, mas também pelas pequenas (MUSSATTO *et al.*, 2006).

A cerveja é uma bebida de ampla produção e consumo no mundo, conhecida desde os tempos remotos em diversos países. Chegou ao Brasil trazida pela família real Portuguesa em 1808. Obtida pela fermentação alcoólica do mosto cervejeiro oriundo do malte de cevada e água potável, por ação da levedura com ação do lúpulo. O perfil sensorial da cerveja produzida no país tem sido gradualmente modificado, o

resultado é uma cerveja mais leve e mais refrescante, menos encorpada e amarga (CASTRO e SERRA, 2012).

Figura 2 - Resíduo de malte oriundo da fabricação de cerveja.



Fonte: Krukliis (2019).

O ano de 2019 encerrou-se mostrando a consolidação do crescimento deste mercado no país, chegando a cerca de 1.209 estabelecimentos com cervejarias legalmente instaladas, e cerveja é o produto com maior número de registros no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) com 27.329 produtos registrados (MARCUSO e MÜLLER, 2020).

De acordo com o que foi apresentado verificou-se a viabilidade desse material como bioadsorvente para componentes químicos.

2.4 Adsorção

A contaminação química da água a partir de poluentes orgânicos e inorgânicos, dentre eles os hidrocarbonetos simples ou policíclicos aromáticos (HPAs), desencadeou a necessidade de desenvolver tecnologias com a finalidade de remover esses poluentes encontrados em resíduos líquidos e gasosos (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

De acordo com os mesmos autores para a remoção dessas substâncias, geralmente os métodos de degradação biológica não são eficazes e ainda não são removidos efetivamente por métodos de tratamento físico-químicos. Com isso, a adsorção tornou-se, um dos métodos mais populares para este fim, ganhando importância como um processo de separação e purificação, nas últimas décadas.

Adsorção é um fenômeno físico-químico de superfície onde ocorre transferência de massa entre duas fases imiscíveis (SCHNEIDER, 2008). O constituinte de uma das fases que pode estar no estado líquido ou gasoso, é transferido rapidamente para a fase sólida, sendo que as substâncias que se unem à superfície da fase sólida são denominadas de adsorbato ou adsorvato, enquanto que a fase sólida receptora destas substâncias é denominada de adsorvente (CRUZ JUNIOR, 2010).

A migração destes componentes de uma fase para outra tem como força motriz a diferença de concentrações entre o seio do fluido e a superfície do adsorvente (SILVA, 2015). Usualmente o adsorvente é composto de partículas que são empacotadas em um leito fixo por onde passa a fase fluida continuamente até que não haja mais transferência de massa. Assim, quanto maior a superfície do adsorvente maior será também a eficiência da adsorção (LEITE, 2017).

A técnica de adsorção se tornou uma alternativa de grande uso no tratamento de efluentes residuais. Isso acontece principalmente porque os processos de adsorção têm a capacidade de remover cor, odor e sabor no tratamento e purificação de águas, óleos, efluentes de processos, dentre outros setores industriais (CECHINEL, 2013).

De acordo com o Ruthven (1984) que é considerado o precursor da adsorção, essa operação lida com a transferência de massa, estudando a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes nos fluidos líquidos ou gasosos, viabilizando a separação dos componentes desses fluidos. Quanto maior for a superfície externa por unidade de massa sólida, mais favorável será a adsorção. Por essa razão, geralmente os adsorventes são sólidos com partículas porosas. Durante o processo, as moléculas que são encontradas na fase fluida são atraídas para a zona interfacial devido à existência de forças atrativas, tais quais ligações de hidrogênio, ligações covalentes, interações dipolo-dipolo, forças de Van der Waals e ligações eletrostáticas (CAMARGO, 2005). A quantidade total adsorvida normalmente varia entre 5 e 30% do peso do sólido adsorvente e pode atingir na superfície do sólido; quanto maior for esta superfície por unidade de peso, mais favorável será a adsorção (AMORIM, 2016).

Os adsorventes são, geralmente, caracterizados pelas propriedades da sua superfície, como área total e polaridade. Um adsorvente com grande área superficial possui maior capacidade de adsorção, pois permite um maior contato das moléculas do adsorbato com os sítios ativos do adsorvente.

O tamanho dos poros determina a acessibilidade das moléculas de adsorbato ao interior do adsorvente; logo a distribuição de tamanho dos poros é outra importante

propriedade para caracterizar a capacidade de adsorção. Os adsorventes podem ser classificados em:

- Higroscópicos: adsorventes com superfície polar, e que por isso têm afinidade com substâncias polares como a água. Eles os aluminossilicatos, as aluminas porosas, a sílica-alumina, etc.
- Hidrofóbicos: adsorventes não-polares que não possuem afinidade com água. São eles os adsorventes carbonáceos, os adsorventes poliméricos e silicatos.

2.4.1 Tipos de Adsorção

Existem dois tipos de adsorção, a física e a química, dependendo do tipo de forças responsáveis pelo fenômeno. Quando as forças entre o adsorvato e adsorvente são apenas do tipo Van der Waals, a adsorção física é também chamada de fisissorção. As moléculas são fracamente adsorvidas e o calor envolvido é baixo e da ordem da entalpia de vaporização do adsorvato. Um aumento de temperatura diminui consideravelmente a adsorção física (CARDOSO, 2018).

De acordo com o mesmo autor, quando as moléculas adsorvidas reagem quimicamente com o adsorvente, a adsorção é considerada química e também chamada de quimissorção. Neste tipo de adsorção o calor envolvido é da mesma ordem que as entalpias de reação química, variando de até 400 kJ/mol.

2.4.2 Fatores que Influenciam no Processo de Adsorção

A adsorção depende, principalmente das propriedades do adsorbato e da estrutura química da superfície do adsorvente. Nos processos industriais, os principais parâmetros a serem considerados são: concentração da solução, temperatura, pH, tempo de contato e velocidade de agitação. Então, faz-se necessário investigar as relações entre a eficiência de adsorção e os parâmetros que a afetam (ROCHA et al., 2012).

A natureza físico-química do adsorvente é fator determinante, pois a capacidade e a taxa de adsorção dependem da área superficial específica, porosidade, volume específico de poros, distribuição do tamanho de poros, dos grupos funcionais presentes na superfície do adsorvente e da natureza do material precursor (DOMINGUES, 2005).

A temperatura tem grande influência nas relações de equilíbrio, ela afeta a agitação das moléculas do sistema e interfere nas forças de atração e repulsão entre as moléculas na fase fluida e entre o adsorbato e o adsorvente (SCHIMMEL, 2008).

O aumento da temperatura aumenta a velocidade de difusão das moléculas de soluto como consequência da diminuição da viscosidade da solução. O aumento da temperatura contribui para o aumento na difusão das moléculas na camada periférica externa e nos poros internos das partículas do adsorvente. Dessa forma, uma mudança na temperatura provoca uma alteração na capacidade de adsorção de um adsorvente por um adsorbato (ADAMSON et al., 1997).

A velocidade de agitação do sistema solução/adsorvente pode influenciar a adsorção graças à redução da resistência da camada periférica ao redor da partícula do adsorvente. Quando as partículas do adsorvente e as moléculas do adsorbato são agitadas, elas adquirem movimentação na solução, resultando em uma chance ainda maior de ocorrer a adsorção (SILVA, 2020).

2.4.3 Cinética de Adsorção

Cinética de adsorção se refere a taxa com que adsorbato será removido na fase fluida em relação ao tempo, envolvendo a transferência de massa do componente em solução para o interior da partícula do adsorvente. Todas as informações cinéticas fornecidas permitem avaliar a natureza das etapas determinantes da velocidade. Calcular e entender os parâmetros cinéticos é importante, pois permite calcular a velocidade de adsorção, além de descrever o tempo necessário para remover o contaminante (SANTOS, 2017).

O processo de cinética de adsorção depende de características físicas e químicas, como: porosidade, área específica e tamanho de partícula do material adsorvente e da concentração da solução do adsorbato a serem utilizados (KEHL, 2015).

Há vários modelos elaborados para determinação das constantes intrínsecas das taxas de cinética de adsorção, sendo estes modelos classificados e descritos pelas expressões de Lagergren, em que os mais utilizados são os modelos de pseudo-primeira ordem e de pseudo-segunda ordem (MORAES, 2007; CARDOSO, 2010).

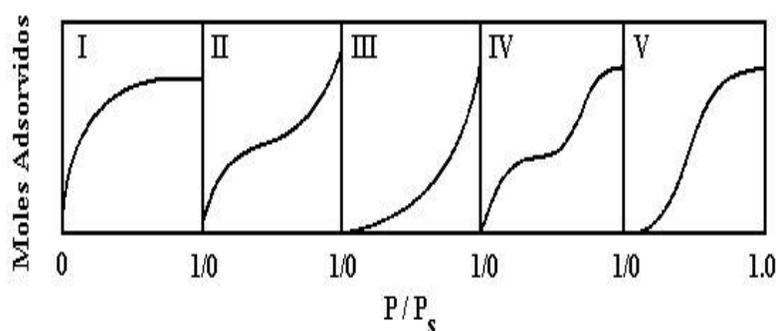
2.4.4 Equilíbrio de Adsorção

Em um processo de adsorção, o equilíbrio do sistema é alcançado quando não há mudanças líquidas nas concentrações do adsorvato na fase sólida e do soluto na solução. O equilíbrio reflete a capacidade e/ou a afinidade de um adsorvente por um soluto, sob um dado conjunto de condições em que o sistema é submetido, termodinamicamente é apresentado pelas isothermas de adsorção. As isothermas relacionam a quantidade de soluto adsorvido por grama de adsorvente, q_e (mg.g^{-1}), em equilíbrio com a quantidade de soluto que permanece em solução, C_e (mg.dm^{-3}) a uma dada temperatura (SILVA, 2005).

A obtenção das isothermas é sem dúvida, a maneira mais conveniente para se especificar o equilíbrio de adsorção e o seu tratamento teórico. Portanto, as isothermas constituem a primeira informação experimental que se utiliza para escolher entre diferentes adsorventes, o mais apropriado para uma aplicação específica (FERNANDES, 2005).

As informações das isothermas de equilíbrio podem fornecer a estimativa da quantidade aproximada de adsorvente necessária para um dado processo e conseqüentemente, o tamanho do equipamento requerido para a operação de adsorção em condições de equilíbrio. Brunauer, Emmett e Teller, em 1938, destacaram que as isothermas de equilíbrio poderiam ser classificadas em cinco tipos, conforme ilustração contida na Figura 3 (RUTHVEN, 1984).

Figura 3 - Tipos de isothermas de BET



Fonte: Ruthven (1984).

Materiais microporosos com superfícies externas relativamente pequenas produzem isothermas do tipo I, em que a quantidade adsorvida depende do volume dos microporos, tendendo a um valor limite em relação à pressão relativa. No caso de

materiais macroporosos ou não porosos em que a quantidade adsorvida tende ao infinito quando a pressão relativa tende a 1, indicando uma adsorção em múltiplas camadas sobrepostas; geram isotermas do tipo II e III (SOUSA, 2015).

As isotermas do tipo IV e V são relativas a um material mesoporoso, nos quais há a condensação capilar; desta forma, a quantidade adsorvida tende a um valor máximo finito, correspondendo ao completo preenchimento dos poros (SOUSA, 2015).

2.6.4.1 Isoterma de Freundlich

A isoterma de Freundlich é caracterizada por uma equação empírica, aplicável a sistemas caracterizados por heterogeneidade. Segundo Suzuki (1990), não há limite para a capacidade de adsorção, pois a quantidade adsorvida tende ao infinito, ou seja, não prevê a saturação, de acordo com a Equação (1).

$$q_e = K_f C_e^{\left(\frac{1}{n_f}\right)} \quad (1)$$

Onde q_e representa a quantidade adsorvida por grama de adsorvente no equilíbrio mg.g^{-1} , K_f é a constante de capacidade de adsorção de Freundlich, $1/n_f$ representa a constante relacionada à heterogeneidade da superfície, C_e a concentração de equilíbrio em solução (NASCIMENTO, 2018).

2.6.4.2 Isoterma de Langmuir

Segundo Schneider (2008), este foi o primeiro modelo de isoterma a demonstrar durante o processo de adsorção, o surgimento de uma monocamada na superfície do material adsorvente. Foi proposta por Langmuir em 1918, onde destaca pontos importantes como: a adsorção de todas as moléculas sobre sítios definidos do adsorvente; cada molécula do adsorvato pode ocupar apenas um sítio de adsorção; a energia de adsorção não difere de um sítio para outro permanecendo sempre igual e não ocorre interação entre as moléculas adsorvidas em sítios vizinhos, de acordo com a Equação (2).

$$q_e = \frac{K_L Q_0 C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2)$$

Onde q_e é a quantidade de adsorvato adsorvida no equilíbrio (mg.g^{-1}), K_L é a constante de Langmuir (L.g^{-1}), Q_0 é a quantidade máxima de adsorção (mg.g^{-1}) e C_e é a concentração de equilíbrio do adsorvato no líquido (mg.L^{-1}).

A teoria de Langmuir foi inicialmente usada para adsorção de moléculas de gás sobre superfícies metálicas, porém esse modelo tem sido aplicado com sucesso a muitos outros processos de adsorção em fase aquosa (BARROS, 2001).

2.6.4.3 Isoterma de Langmuir-Freundlich

Com as limitações do modelo de Langmuir em prever com sucesso o equilíbrio de misturas, muitos autores modificaram a equação e introduziram a forma de Freundlich (MORAIS, 2005).

Para componentes puros tem-se as Equações (3) e (4) a seguir para representar o modelo de isotermas de Langmuir-Freundlich:

$$\frac{q_1}{q_{s1}} = \frac{b_1 p_1^{n_1}}{1 + b_1 p_1^{n_1}} \quad (3)$$

$$\frac{q_2}{q_{s2}} = \frac{b_2 p_2^{n_2}}{1 + b_2 p_2^{n_2}} \quad (4)$$

2.5 Impactos Ambientais Decorrentes de Poluentes Orgânicos

Nas últimas décadas, os ecossistemas aquáticos têm sido alterados de maneira significativa em função de diversos impactos ambientais oriundos de atividades antrópicas, tais como: mineração, construção de barragens e represas, desvio do curso natural de rios, lançamento de efluentes domésticos e industriais não tratados, desmatamento de mata ciliar, superexploração de recurso pesqueiro, introdução de espécies exóticas, entre outros (PEREIRA *et al.*, 2020).

Nos ecossistemas aquáticos, o que inclui rios, lagos e córregos, acredita-se que a maior representatividade, tanto no que diz respeito ao volume quanto a carga, é de origem orgânica, principalmente porque a matéria orgânica está associada aos componentes presentes nos efluentes domésticos e industriais (LEE *et al.*, 2017). A indústria, em especial, influencia diretamente na poluição dos recursos hídricos, por meio do descarte de resíduos que possuem potencial tóxico (NETO *et al.*, 2020).

O tratamento de efluentes industriais tóxicos é assunto de extremo interesse, devido à magnitude dos impactos que são causados quando ocorre um gerenciamento inadequado dos mesmos. Assim, tem-se notado uma tendência crescente por parte das empresas, em buscar alternativas que levem a soluções cada vez mais eficazes no que diz respeito ao destino dos contaminantes gerados nos seus processos de produção (ROZAS *et. al.*, 2016).

A remoção desses poluentes orgânicos no meio ambiente tem sido um grande desafio tecnológico, pois, inúmeras vezes, tecnologias de tratamento convencionais não são capazes de fazê-lo de forma eficiente. Por este motivo, tem crescido a busca de tecnologias efetivas para destruí-los.

2.6 Contaminantes Orgânicos

2.6.1 Gasolina

A gasolina é um dos mais importantes produtos derivados do petróleo, obtida a partir dos processos de refino, sendo o segundo combustível mais consumido no Brasil, perdendo apenas para o óleo diesel. É um combustível líquido, volátil, inflamável, apresenta pH aproximado a 6,0 e densidade de 0,75 g/mL (TEIXEIRA, 2017), constituído por mais de 400 diferentes compostos, cuja composição final depende da origem do petróleo, dos processos de produção (destilação, alquilação, hidrocraqueamento, craqueamento catalítico, craqueamento térmico, reforma catalítica, entre outros) (CARVALHO & FILHO, 2014).

De acordo com a composição química da gasolina (Tabela 1), os hidrocarbonetos presentes na gasolina pertencem principalmente às classes das parafinas (normal e ramificado), olefinas, naftenos e aromáticos, e em menores quantidades, por compostos oxigenados; formados basicamente por moléculas com cadeias de 4 a 12 átomos de carbono, com pontos de ebulição variando entre 30 a 220°C (CARVALHO & FILHO, 2014).

Alguns hidrocarbonetos tais como, benzeno, tolueno e xileno, que possuem o anel benzênico em sua estrutura, são os primeiros constituintes da gasolina que atingem o lençol subterrâneo em casos de vazamentos (RODRIGUES *et al.*, 2017). Além dos hidrocarbonetos, a gasolina também possui contaminantes tóxicos naturais em baixas concentrações, formados por compostos contendo Enxofre, Oxigênio, Benzeno, Metais e Nitrogênio (CARVALHO & FILHO, 2014).

Tabela 1 - Composição da gasolina brasileira.

Constituintes	Concentração % (m/m)
Hidrocarbonetos saturados	27 – 47
Hidrocarbonetos olefínicos	15 – 47
Hidrocarbonetos aromáticos	26 – 35
Benzeno	< 1
Álcool etílico anidro combustível	13 – 25

Fonte: PETROBRAS (2014).

2.6.2 Diesel

O óleo diesel é um combustível de aspecto oleoso obtido a partir da destilação fracionada (refino) do petróleo. Sua composição é considerada complexa porque possui substâncias como hidrocarbonetos (em maior quantidade) e compostos orgânicos como Nitrogênio, Oxigênio e Enxofre. De todos os produtos derivados do petróleo, o óleo diesel é o mais abundante, ou seja, é a fração em maior quantidade no petróleo (DIAS, 2019).

Ele é constituído principalmente por hidrocarbonetos saturados (parafínicos e naftênicos) e aromáticos, que destilam na faixa de temperatura de 130 a 380 °C (SPEIGHT, 2006). Os compostos aromáticos presentes no óleo diesel incluem os alquilbenzenos, indanos, naftalenos, tetralenos, bifenís, acenaftenos, fenantrenos, crisenos e pirenos, sendo que os presentes em maior abundância são os diaromáticos com estrutura do tipo naftaleno (MENEZES et al., 2006).

Um dos principais problemas relacionados à utilização do óleo diesel como combustível é o teor de Enxofre (S) nele contido. O Enxofre é um elemento químico indesejável para o meio ambiente e para os motores diesel (MELO, 2013).

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Pesquisa em Ciências Ambientais do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba (LAPECA/CCT/UEPB) – *Campus I*, Campina Grande – PB.

3.1 Adsorvente e Adsorvatos Utilizados

A cevada, resíduo oriundo de uma cervejaria localizada na cidade de Bananeiras – PB, foi utilizada in natura, como bioadsorvente, e os contaminantes orgânicos utilizados foram a gasolina comum e o diesel do tipo S-10 (adsorbatos) de um posto de combustível da cidade de Campina Grande – PB, na forma de efluente sintético simulando a dispersão água/gasolina e água/diesel.

3.2 Preparação da Biomassa Cevada

A biomassa (resíduo da produção de cerveja) foi seca à temperatura ambiente por 24 horas. Sem pré-tratamento granulométrico prévio, pois o intuito foi avaliar o quão eficaz seria o adsorvente em sua estrutura natural com uma área superficial maior. O resíduo seco está representado na Figura 4.

Figura 4 - Cevada seca à temperatura ambiente.



Fonte: Própria autoria (2021).

3.3 Cinética de Adsorção

O estudo da cinética de adsorção foi realizado em três experimentos, em triplicata, onde para cada experimento foi necessário a pesagem de 1,2 g de resíduo seco, totalizando 12 amostras para cada quantidade de contaminante utilizado, seja ele gasolina e diesel, como é apresentado na Figura 5. A concentração inicial foi igual a 8,6 mL de contaminante, a segunda concentração foi igual a 12 mL e a terceira foi de 15,6 mL de contaminante (gasolina e diesel) para 40 mL de água.

Figura 5 - (a) Pesagem do resíduo de cevada e (b) Recipientes com o resíduo para serem adicionados aos frascos erlenmeyers.



(a)

(b)

Fonte: Própria autoria (2021).

As concentrações de água/gasolina e água/diesel foram transferidos para *erlenmeyers* de 125 mL, em seguida, foram colocados sob agitação a 55 rpm por 5 minutos até a máxima mistura das duas substâncias. Posteriormente, adicionou-se o resíduo seco aos *erlenmeyers* tampando-os com papel alumínio, como apresentado na Figura 6, e levando-se a agitação, onde a cada 5 minutos uma amostra foi retirada, por um tempo percorrido máximo de 60 minutos. Logo após, as amostras foram transferidas para provetas de 100,0 mL (Figura 7), para realizar uma análise volumétrica, com auxílio de uma peneira e um funil para reter o agente adsorvente, para que assim, houvesse a leitura do volume de cada substância. Essa quantificação foi feita através de análise volumétrica, utilizando proveta graduada. Essa metodologia foi adaptada de Amorim (2016) utilizando o bagaço em uma

granulometria maior para se obter mais eficiência, e assim tentarmos obter melhores resultados na adsorção de adsorbato por grama de adsorvente.

Figura 6 - (a) Recipientes contendo a mistura água. (b) Amostras na mesa agitadora com dispersão água/contaminante/resíduo.



(a)

(b)

Fonte: Própria autoria (2021).

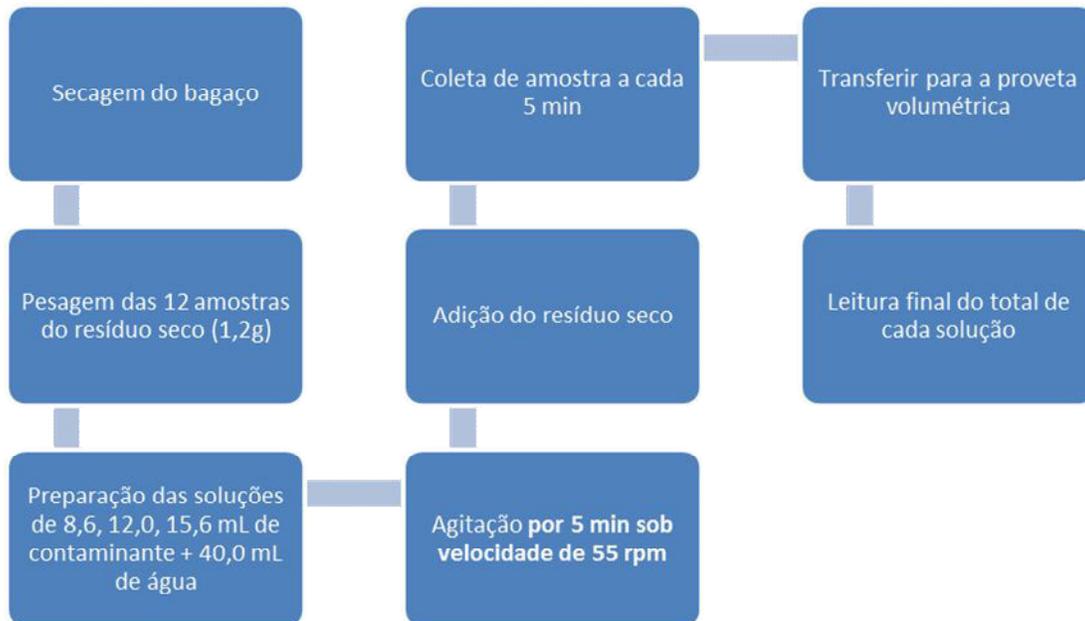
Figura 7 - Provetas com dispersão obtida após à adsorção, para quantificar a água/contaminante adsorvida por análise volumétrica.



Fonte: Própria autoria (2021).

A Figura 8 ilustra o fluxograma que representa o esquema de como foi realizado o experimento.

Figura 8 - Fluxograma da metodologia do estudo da cinética.



Fonte: Própria autoria (2021).

3.4 Isoterma de Equilíbrio

Os experimentos foram realizados com 1,2g de resíduo seco, com diversas concentrações de água e agente contaminante (gasolina e diesel), onde foram medidos 10 concentrações diferentes de água/gasolina e água/diesel com variação de 5% a 50% do contaminante em um total de 52,0 mL de volume total da mistura, apresentada na Tabela 2.

A solução foi transferida para um *erlenmeyer* de 125 mL com as concentrações de água e gasolina e água e diesel submetendo em agitação por 5 minutos até a máxima mistura das duas substâncias, em seguida, adicionou-se o resíduo seco ao *erlenmeyer* tampando-o com papel alumínio e deixando em agitação por 60 minutos para que o resíduo adsorva o agente contaminante. Após passado o tempo de agitação, transferiu-se o conteúdo do *erlenmeyer* com o auxílio de uma peneira e um funil para reter o agente adsorvente, transferindo o conteúdo para uma proveta (50mL) para realização da leitura do volume de cada substância.

Tabela 2 - Variação de concentração água/contaminante.

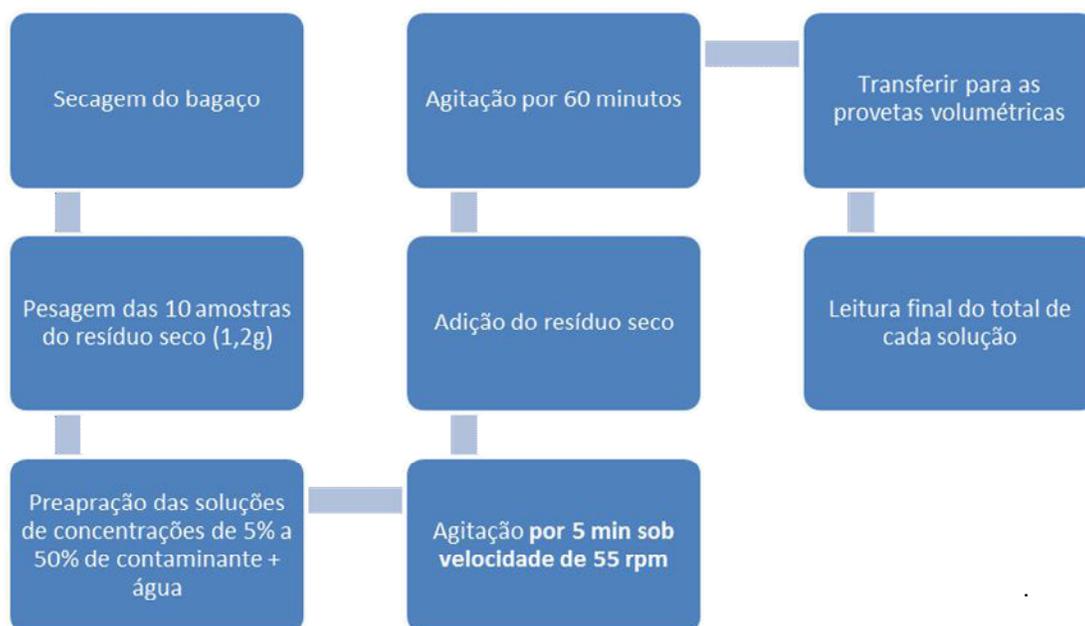
Concentrações (%)	Contaminante (mL)	Água (mL)
5	2,6	49,4
10	5,2	46,8
15	7,8	44,2
20	10,4	41,6
25	13,0	39,0
30	15,6	36,4
35	18,2	33,8
40	20,8	31,2
45	23,4	28,6
50	26,0	26,0

Fonte: Própria autoria (2021).

Oliveira (2017) utilizou o sisal do gênero agave como biomassa adsorvente para separação de contaminante pelo processo de adsorção. O contaminante estudado foi gasolina, e na isoterma de adsorção obteve melhor ajuste apenas ao modelo de Langmuir, assim como, Cavalcante (2018) que fez o uso da casca da palma como adsorvente.

A Figura 9 ilustra o fluxograma que representa o esquema de como foi realizado o experimento.

Figura 9 - Fluxograma da metodologia do estudo da isoterma.



Fonte: Própria autoria (2021).

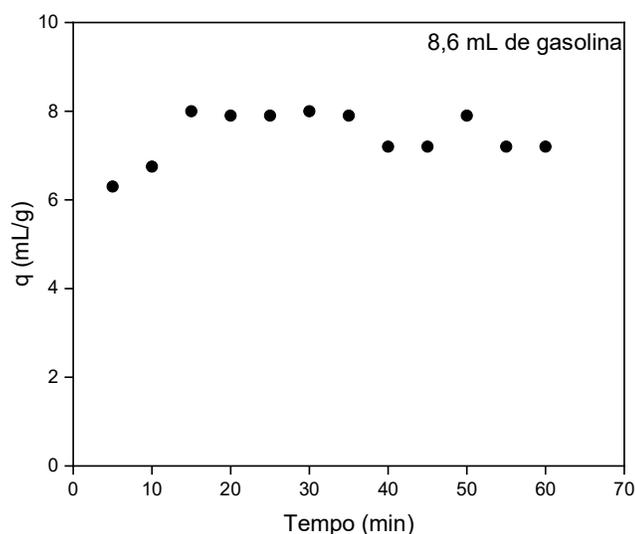
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cinética de Adsorção

De acordo com os experimentos realizados, após o tempo de contato entre água/gasolina e água/diesel e verificação do volume total da mistura heterogênea foi possível observar um volume final de gasolina inferior ao inicial de cada amostra, sendo assim considerado que a adsorção ocorreu como esperado com uma adsorção da gasolina e do diesel sendo incorporado no resíduo da cevada.

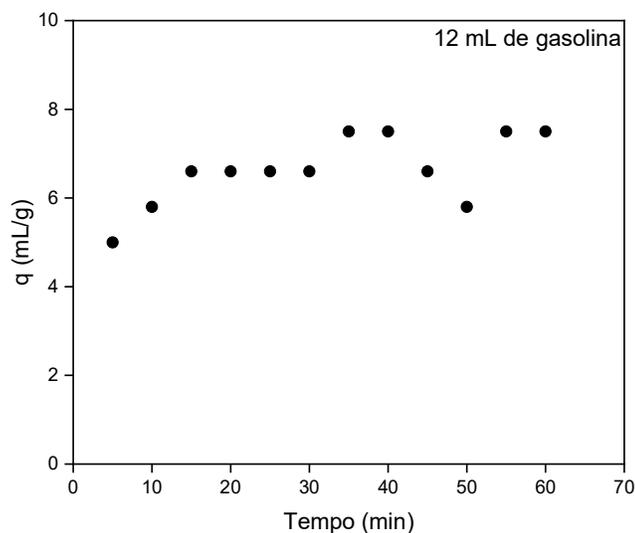
As curvas cinéticas de adsorção para cada experimento água/gasolina e água/diesel foram apresentadas na forma de capacidade de adsorção do resíduo em incorporar o contaminante, ou seja, quantos mL de gasolina e diesel foram retirados por cada g de biomassa, em função do tempo de contato, de soluções com 8,6; 12,0; 15,6 mL de gasolina e diesel com 40,0 mL de água representados pelos Figuras 10, 11 e 12 para o contaminante gasolina e Figuras 13, 14 e 15 para o contaminante diesel, no tempo de 60 minutos.

Figura 10 - Cinética de adsorção para 8,6mL de gasolina e 40,0mL de água



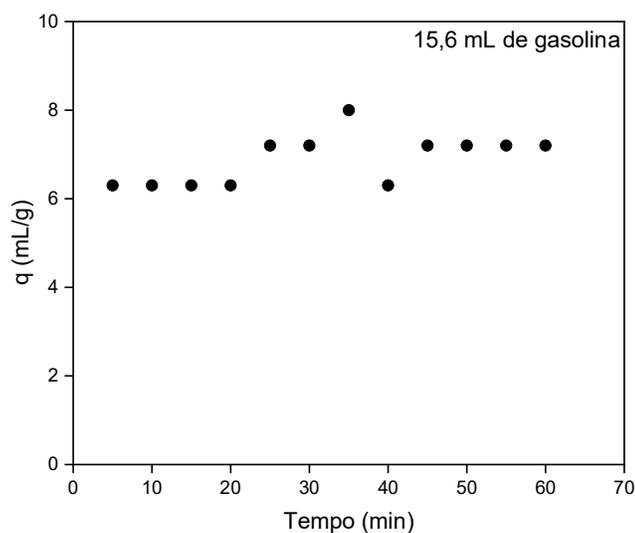
Fonte: Própria autoria (2021).

Figura 11 - Cinética de adsorção para 12,0mL de gasolina e 40,0mL de água



Fonte: Própria autoria (2021).

Figura 12 - Cinética de adsorção para 15,6mL de gasolina e 40,0mL de água



Fonte: Própria autoria (2021).

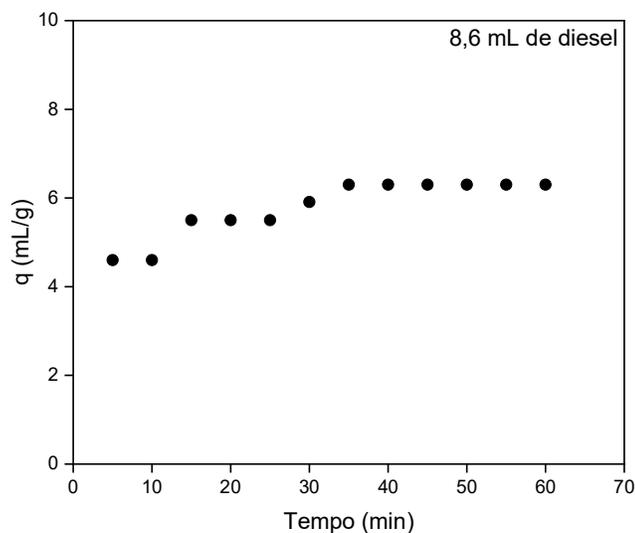
Através das ilustrações das curvas cinéticas foi possível observar para o resíduo de cevada, utilizando o adsorvato gasolina, que a cinética foi bastante rápida e a quantidade de gasolina adsorvida para o resíduo foram aproximadamente 8,0;

7,5 e 7,0 mL/g, respectivamente. Amorim (2016), obteve valores de adsorção para gasolina inferiores, na ordem de grandeza de 4,0, 5,0 e 6,0 mL/g. A não-linearidade encontradas nas quantidades adsorvidas podem ter ocorrido devido ao não pré-tratamento e à manipulação ou a adsorção de água pelo resíduo de cevada.

Cardoso (2018) estudou a cinética de adsorção usando a palha de milho, na forma particulada, com adsorvente de gasolina, obteve valores para capacidade adsortiva em torno de 6,0 mL de gasolina por grama de biomassa.

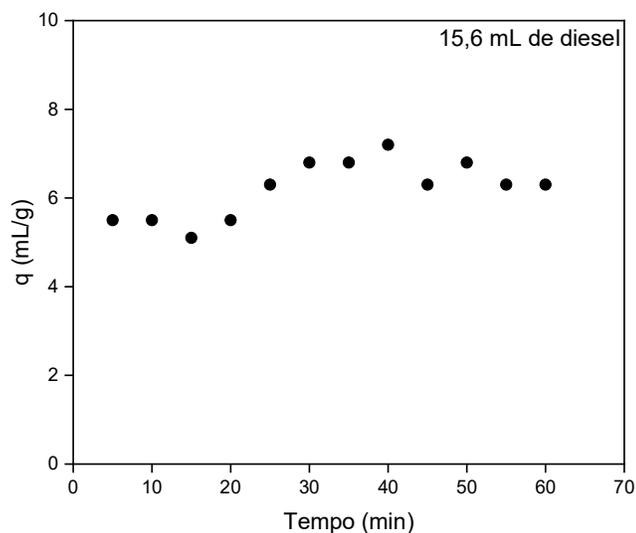
Fazendo o estudo também do bagaço de cerveja com granulometria de 1,00 a 2,38 mm, Amorim (2018) obteve resultados de aproximadamente 4, 5 e 6 mL de gasolina retirados da solução por cada grama de biomassa.

Figura 13 - Cinética de adsorção para 8,6mL de diesel e 40,0mL de água.



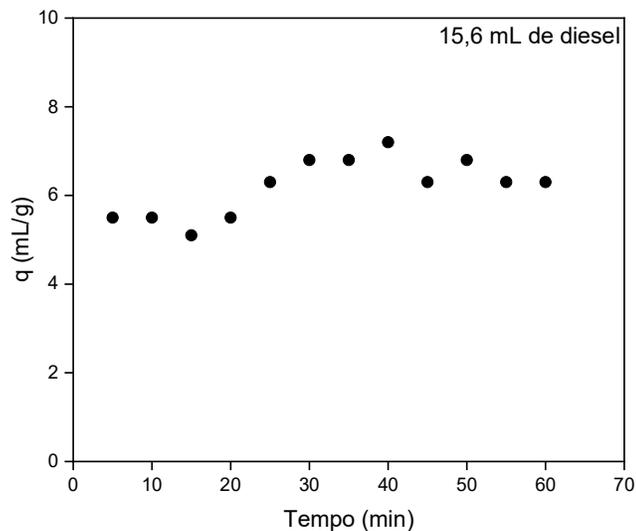
Fonte: Própria autoria (2021).

Figura 14 - Cinética de adsorção para 12,0mL de diesel e 40,0mL de água.



Fonte: Própria autoria (2021).

Figura 15 - Cinética de adsorção para 15,6mL de diesel e 40,0mL de água.



Fonte: Própria autoria (2021).

Para as ilustrações das curvas cinéticas apresentadas foi possível observar para o resíduo de cevada, utilizando o adsorvato diesel, que a cinética foi bastante

rápida e a quantidade de diesel adsorvido para o resíduo foram de aproximadamente 6,3; 6,7 e 7,2 mL/g, respectivamente.

Os desvios encontrados nas quantidades adsorvidas podem ter ocorrido devido à manipulação ou a adsorção de água pelo resíduo de cevada.

Souza (2016) estudou o poder da adsorção de óleo diesel em resíduos finos de esteatito gerados por oficinas de artesanato do distrito de Santa Rita de Ouro Preto – MG bem como estudos de incorporação do resíduo e do resíduo adsorvido de óleo diesel em corpos de prova cerâmicos. Os resultados mostraram que os testes de adsorção de óleo diesel em resíduo de esteatito na presença de água não é um adsorvente eficiente para derramamentos de óleo em água, diferente do bagaço de cevada.

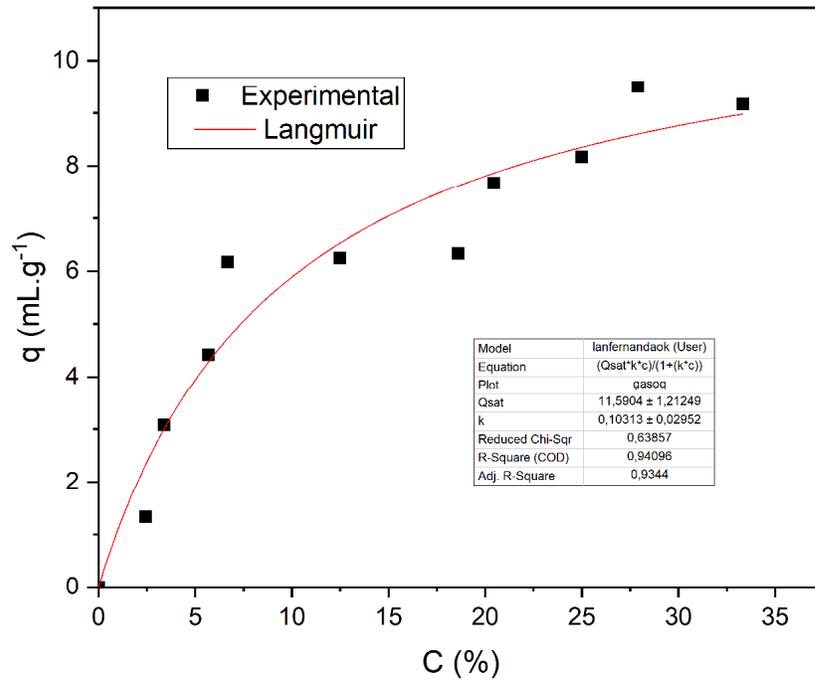
4.2 Isoterma de Equilíbrio

A isoterma de adsorção é o requisito básico para a concepção de qualquer sistema de adsorção. A adsorção é um dos principais fenômenos de superfície e, por isso, é importante que seja feita uma descrição satisfatória do estado de equilíbrio do sistema representando a adsorção de um composto presente no fluido para a fase sólida (XING *et al.*, 2008). Este equilíbrio pode ser expresso pela quantidade de soluto adsorvido por unidade de massa de adsorvente, em função da concentração do soluto remanescente na solução.

Nas Figuras 16 a 21, estão apresentadas as curvas das isotermas de equilíbrio de adsorção de gasolina e diesel dispersa em água, usando o resíduo da cevada como adsorvente. Os gráficos foram expressos na forma de capacidade de adsorção da biomassa, ou seja, quantos mililitros (mL) de gasolina e diesel foram retirados por cada grama (g) de biomassa, em função da concentração final de cada adsorbato no fluido.

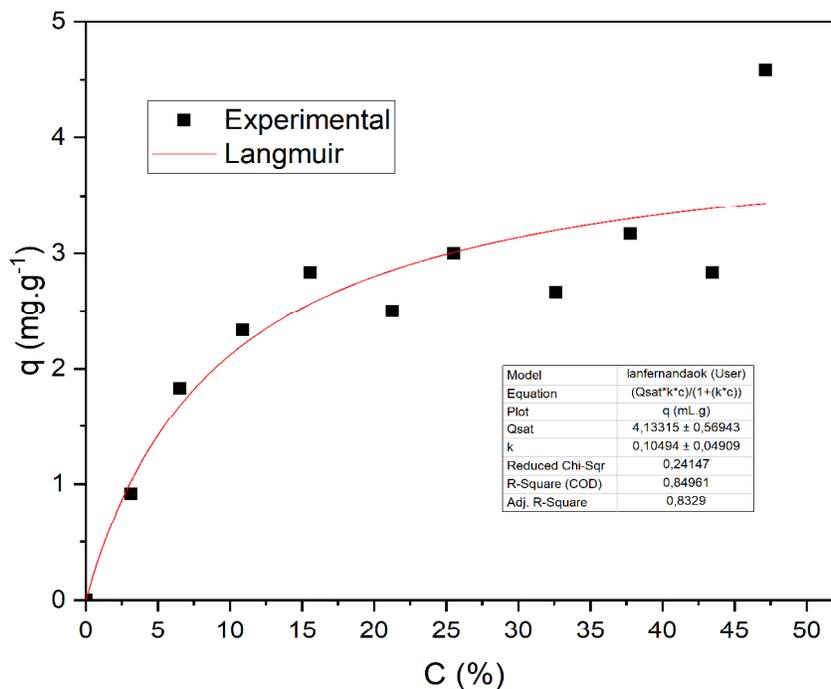
Modelos matemáticos de Langmuir, Freundlich e Langmuir-Freundlich foram utilizados para representar os dados experimentais. Os ajustes para todos os modelos foram realizados pelo método de regressão não linear com o uso do programa Microcal Origin®.

Figura 16 - Isoterma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando a gasolina como adsorvente, comparada com o modelo de Langmuir.



Fonte: Própria autoria (2021).

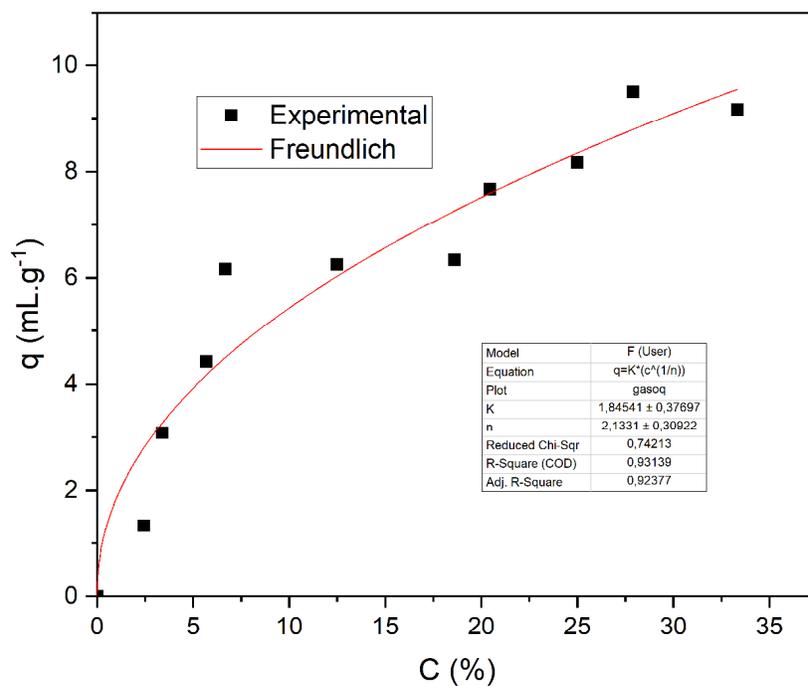
Figura 17 - Isoterma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando o diesel como adsorvente, comparada com o modelo de Langmuir.



Fonte: Própria autoria (2021).

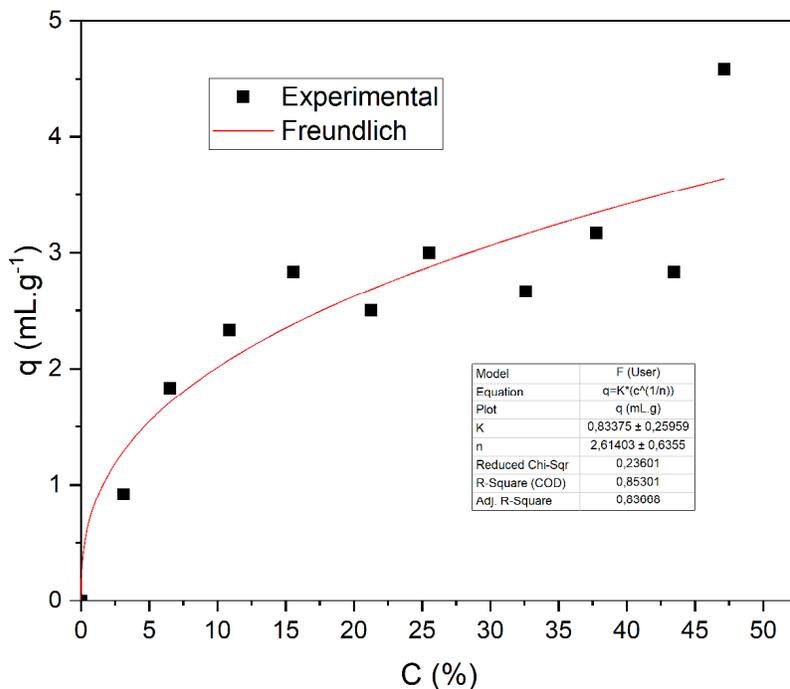
Nas Figuras 18 e 19, estão apresentadas as curvas das isotermas de equilíbrio de adsorção de gasolina e diesel dispersa em água, usando o resíduo da cevada como adsorvente, comparado com o modelo de Freundlich.

Figura 18 - Isoterma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando a gasolina como adsorvente, comparada com o modelo de Freundlich.



Fonte: Própria autoria (2021).

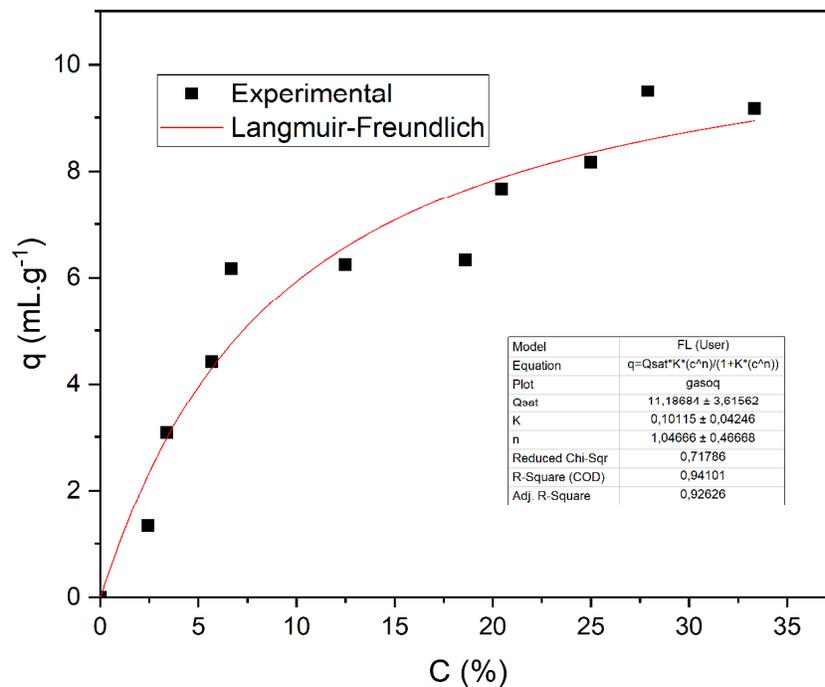
Figura 19 - Isoterma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando o diesel como adsorvente, comparada com o modelo de Freundlich.



Fonte: Própria autoria (2021).

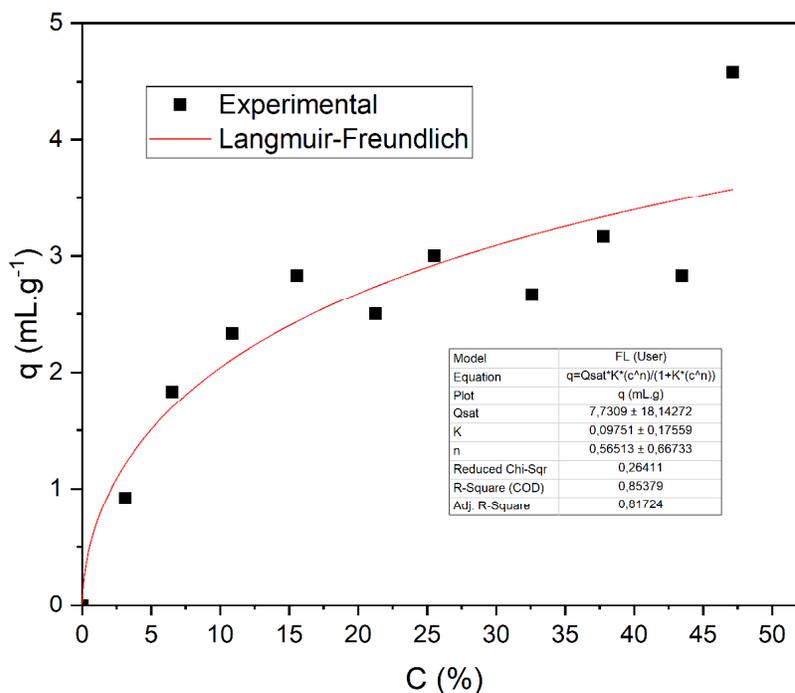
Nas Figuras 20 e 21, estão apresentadas as curvas das isotermas de equilíbrio de adsorção de gasolina e diesel dispersa em água, usando o resíduo da cevada como adsorvente, comparado com o modelo de Langmuir-Freundlich.

Figura 20 - Isoterma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando a gasolina como adsorvente, comparada com o modelo de Langmuir-Freundlich.



Fonte: Própria autoria (2021).

Figura 21 - Isoterma de equilíbrio para adsorção do resíduo de cevada utilizando o diesel como adsorvente, comparada com o modelo de Langmuir-Freundlich.



Fonte: Própria autoria (2021).

Analisando as Figuras de 16 – 21, pode-se observar que tratam de isotermas favoráveis, uma vez que todas as curvas analisadas apresentam concavidades voltadas para baixo, correspondendo ao Tipo I da classificação BET (RUTHVEN, 1984), corroborando com Moraes (2005) e Amorim (2016).

Nas Tabelas 3 e 4 estão representados os resultados encontrados para o coeficiente de correlação aplicado aos modelos utilizados no presente trabalho com seus respectivos adsorbatos.

Tabela 3 - Valores dos coeficientes de correlações para os modelos de Langmuir, Freundlich e Langmuir-Freundlich utilizando a gasolina como adsorvato.

Modelos	R ²
Langmuir	0,94096
Freundlich	0,93139
Langmuir-Freundlich	0,94101

Fonte: Própria autoria (2021).

Tabela 4 - Valores dos coeficientes de correlações para os modelos de Langmuir, Freundlich e Langmuir-Freundlich utilizando o diesel como adsorvato.

Modelos	R²
Langmuir	0,84961
Freundlich	0,85301
Langmuir-Freundlich	0,85379

Fonte: Própria autoria (2021).

Utilizando a gasolina como adsorvato, observou-se que a biomassa teve um bom ajuste ao modelo de adsorção de Langmuir-Freundlich, pois apresentou o coeficiente de correlação $R^2 = 0,94101$, bem próximo de 1, o que reflete que o processo de adsorção se ajusta bem ao modelo de Langmuir-Freundlich. Já utilizando o diesel como adsorvato, observou-se também que a biomassa teve um bom ajuste ao modelo de adsorção de Langmuir-Freundlich, pois apresentou o coeficiente de correlação $R^2 = 0,85379$, o que significa que os resultados experimentais, estão bem ajustados ao modelo de Langmuir-Freundlich.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Para Cinética de adsorção conclui-se que, a melhor concentração para ser utilizada é a de 15,6 mL, pois os dois adsorvatos apresentaram uma adsorção eficaz em relação a concentração de 8,6 mL.
- Na isoterma utilizando o resíduo de cevada como adsorvente, observou-se que a biomassa, utilizando a gasolina e diesel como adsorvatos, teve um bom ajuste ao modelo de adsorção de Langmuir-Freundlich, pois a gasolina apresentou o coeficiente de correlação $R^2 = 0,94101$ e o diesel $R^2 = 0,85379$, bem próximos de 1.
- Esses resultados indicam que a biomassa cevada, na forma natural, pode ser utilizada como adsorvente na remoção de derivados do petróleo, como a gasolina e o diesel. Podendo ser, a ampliação de escala desse sistema, para aplicação em escala industrial.

Assim, sugere-se para estudos futuros, variações nas concentrações para melhor análise da máxima adsorção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMSON, A. W.; GAST, A. P. *Physical Chemistry of Surfaces*. New York: Wiley, 1997.
- AKAR, T.; ACVI, M.; DUSUNCELI, F. *Barley: Post-harvest operations*, 2004.
- AMORIM, F. V. **Estudo do poder adsortivo do resíduo gerado na produção de cerveja utilizando sistema em leito diferencial**. Monografia de conclusão do curso de Química Industrial. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, PB, 50 p., 2016.
- AMORIM, F. V., SOUZA, E. S., SILVA, V. L. M. de M., LUIZ, M. R. **Avaliação da viabilidade do bagaço de cerveja para remoção de contaminante gasolina presentes em corpos aquáticos utilizando sistema de adsorção em leito diferencial**, 12º Encontro Brasileiro sobre Adsorção, Gramado, RS, 2018.
- BARROS, A. R. B. **Remoção de íons metálicos em água utilizando diversos adsorventes**. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Química. Florianópolis: Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, 89 p. 2001.
- BEZERRA, A. T. C.; GAMA, M. S.; AGUIAR, J. E.; SILVA JR., I. J. **Adsorção multicomponente de corantes reativos empregando quitosana/alginato epoxilada como adsorvente, 2014**.
- BÓREM, R. A. T. **A utilização de cevada na alimentação humana**. São Paulo: Ática, 2013.
- BRASIL. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Cultivo e Cevada*. Brasília, DF. 2019.
- BROCHIER, M.A. **Aproveitamento de resíduo úmido de cervejaria na alimentação de cordeiros confinados em fase de terminação**. 2007. 120f. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) - Centro Universitário Feevale, Novo Hamburgo, 2007.
- BROCHIER, M.A.; CARVALHO, S. **Aspectos Ambientais, produtivos e econômicos do aproveitamento do resíduo úmido de cervejaria na alimentação de cordeiros em sistema de confinamento**. *Ciência e Tecnologia*. vol.33 n.5, 2009.
- CAMARGO, J. R.; GODOY J.R, E.; EBINUMA, C. D. **An evaporative and desiccant cooling system for air conditioning in humid climates**. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.* v. 27, n. 3, p. 243-247, 2005.
- CARDOSO, N. F. **Remoção do Corante Azul de Metileno de Efluentes Aquosos Utilizando Casca de Pinhão in Natura e Carbonizada como Adsorvente**. 2010. 164 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2010.
- CARDOSO, R. K. P.; **AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE ADSORTIVA DA PALHA DO MILHO NA ADSORÇÃO DE COMPOSTOS HIDROGENOCARBONADOS EM SISTEMA DE LEITO DIFERENCIAL**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2018.
- CARVALHO, E. da S. **Reuso do Mesocarpo de Coco na Remoção de Contaminantes Derivados de Petróleo Presentes em Corpos D'água, Utilizando**

Sistema de Adsorção em Leito diferencial. Trabalho de Conclusão de Curso em Química Industrial, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.

CARVALHO, F. I. M.; FILHO, H. A. D. **ESTUDO DA QUALIDADE DA GASOLINA TIPO A E SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA EMPREGANDO ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS.** Química Nova, Vol. 37, No. 1, 33-38, 2014.

CARVALHO, L. G. Dossiê Técnico. **Produção de cerveja.** Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, mar. 2007.

CASTRO, M. P.; SERRA, S. G. **COMPARAÇÃO DE QUATRO MARCAS DE CERVEJAS BRASILEIRAS.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, 2012.

CAVALCANTE, L. E. **Aplicação da adsorção utilizando casca da palma forrageira (opuntia ficus) como adsorvente na descontaminação de corpos d'água e da técnica de biopilhas para o solo, contaminados com gasolina.** Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia de Biotecnologia e Bioprocessos, Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Universidade Federal de Campina Grande, Sumé – Paraíba, 2018.

CECHINEL, M. A. P. **Aplicação de processo adsorativo na remoção de chumbo de efluentes petroquímicos sintéticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 91 p. 2013.

COLBERT, D. **A dieta de Jesus e de seus discípulos.** Rio de Janeiro: Thomas Nelson Brasil, 2006.

CONAB, 2020. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos.** V.5 – Safra 2020/2021, nº2, 2020.

CRUZ JUNIOR, O. F. **Produção de carvão ativado a partir de produtos residuais de espécies nativas da Região Amazônica.** 2010. 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR.

DIAS, Diogo Lopes. **"Óleo diesel";** *Brasil Escola.* Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/oleo-diesel.htm>>. Acesso em 11 de novembro de 2019.

DOMINGUES, V. M. F. **Utilização de um produto natural (cortiça) como adsorvente de pesticidas piretróides em águas.** 2005. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 2005.

FARIA, M. S. CEVADA – **Bagaço de Cevada pode ser usado o ano todo.** 2003.

FERNANDES, R. **Adsorventes alternativos para remoção de fenol em solução aquosa.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 78 p., 2005.

GIORDANO, S.R. **Gestão ambiental no sistema agroindustrial.** In: ZYLBERSZTAJN, D.; NEVES, M.F. (Orgs.). Economia e gestão de negócios agroalimentares: indústria de alimentos, indústria de insumos, produção agropecuária, distribuição. São Paulo: Pioneira, p. 255-281, 2000.

- KEHL, C. C. P. L. **Remoção de nitrogênio amoniacal por adsorção em carvão ativado**. 2015. 43 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2015.
- KRUKLIS, K. L. **Cevada: importância da utilização na alimentação humana e a aplicabilidade na gastronomia**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Júi, 2019.
- LEE, I.; HWANGB, H.; LEEC, J.; YUB, N.; YUNB, J.; KIMA, H. **Modeling approach evaluation of environmental impacts on river water quality: A case study with Galing River, Kuantan, Pahang, Malaysia**. Ecological Modelling. V.353, p. 167-173, 2017.
- LEITE, N. S. **DESENVOLVIMENTO DE UM ADSORVENTE DERIVADO DA CASUARINA EQUISETIFOLIA PARA REMOÇÃO DE HIDROCARBONETOS DE EFLUENTES AQUOSOS**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- MAIA, I. C. **Avaliação de compostos bioativos de bagaço de malte de cervejaria artesanal e a influência da fermentação em estado sólido**. Dissertação (Mestrado em Alimentos e Nutrição). Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, RJ, 60 p. 2020.
- MAPA. Ministério da Agricultura, **Pecuária e Abastecimento**. Instrução Normativa N° 54, 2021.
- MARCUSSO, E. F.; MÜLLER, C. V. **Anuário da cerveja no Brasil 2019: Crescimento e inovação**. 2020.
- MELO, J. M. M.; LOPES, I.; GUIRRA, I. C.; AMORIM, M. C. C. **Diagnóstico dos impactos ambientais provocados pelo desenvolvimento urbano sobre as margens do rio São Francisco, um estudo de caso da cidade de Santa Maria da Boa Vista/PE**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 4. Anais. Salvador, p.1-6, 2013.
- MENEZES E.W., R.da Silva, R. Cataluña, R. J.C. Ortega. **Effect of ethers and ether/ethanol additives on the physicochemical properties of diesel fuel and on engine tests**. Fuel, 2006, 85, 815–822.
- MINELLA, E. **Cevada Brasileira: Situação e Perspectiva**. 1999.
- MINELLA, E. et. al., **Indicações Técnicas para a produção de cevada cervejeira nas safras 2015 e 2016**. Passo fundo, RS: Embrapa, 2015.
- MINELLA, E. **Indicações Técnicas para a produção de cevada cervejeira nas safras 2019 e 2020**. Passo Fundo, RS. 116p. 2019.
- MORAES, W. de A. **Estudos de sorção de um corante aniônico modelo em partículas de quitosana reticulada**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007.
- MORAIS, V. L. M. **Purificação de Efluentes Contaminados com Hidrocarbonetos por Adsorção em Leito Fixo de Biomassa**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, p. 104, 2005.
- MORI, C.; MINELLA, E. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da cevada**. Embrapa Documentos Online. 2012.

- MUSSATTO, S.I.; DRAGONE, G. ROBERTO, I.C. **Brewers spent grain: generation, Characteristics and potencias applications.** *Journal of Central Scienc*, 2006.
- NASCIMENTO, A. P. S.; **AVALIAÇÃO DO PODER ADSORTIVO DA PALHA DE MILHO PARA REMOÇÃO DE AZUL DE METILENO PRESENTE EM CORPOS AQUÁTICOS.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2018.
- NASCIMENTO, R. F.; LIMA, A. C. A; VIDAL, C. B.; MELO, D. Q.; RAULINO, G. S.C. **Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais.** Imprensa Universitária, Fortaleza, CE, 255 p., 2014.
- NETO, I. F. S.; SOUZA, M. N. C.; ALMEIDA, S. C. X. **Degradação de corantes por processos fotocatalíticos no tratamento de efluentes industriais: Uma revisão integrativa.** *Journal of Biology & Pharmacy and Agricultural Management*, v. 16, n.4, 2020.
- OLIVEIRA, E. D. C, **REMOÇÃO DE GASOLINA EM CORPOS D'ÁGUA UTILIZANDO SISAL (Agave sisalana) COMO ADSORVENTE EM SISTEMA DE ADSORÇÃO EM LEITO DIFERENCIAL.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2017.
- PARPINELLI, W. **Utilização de resíduo seco de cervejeira na alimentação de frangos em diferentes fases.** Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, PR, 101p, 2016.
- PEREIRA, C.S.; RODRIGUES, M.O.S.; BARROS, C. L. S.; ALMEIDA, B. L. N.; DIOGO, M. L. S. **A. Identificação de impactos ambientais provocados pelo lançamento de resíduos sólidos e líquidos no Rio Itapecuru.** *Nature and Conservation*, v. 13, n. 2, p. 58-66, 2020.
- ROCHA, O. R. S. et al. **Avaliação do processo adsorptivo utilizando mesocarpo de coco verde para remoção do corante cinza reativo BF-2R.** *Revista Química Nova*. v. 35. p. 1369-1374. 2012.
- RODRIGUES, K., OLIVEIRA, P. C. C., MOREIRA, I. C. Q., FIRMINO, S. F. G., WANDERLEY, C. R. P., ARAUJO, R. S., MARINHO, G. **Remoção de BTEX por fungos em reator aeróbico de escoamento contínuo.** *Eng Sanit Ambient* | v.22 n.4, jul/ago 2017, 809-820.
- ROZAS, O., VIDAL, C., BAEZA, C., JARDIM, W. F., ROSSNER, A., MANSILLA, H. D., **Organic Micropollutants (OMPs) in Natural Waters: Oxidation by UV/H₂O₂ Treatment and Toxicity.** *Water Research*. 2016.
- RUTHVEN, D. M. **Principles of adsorption and adsorption process.** *United States of America: Wiley – Interscience Publication*, p. 1–13, 221–270, 1984.
- SANTOS, L. K. **ESTUDO DO PROCESSO DE ADSORÇÃO PARA REMOÇÃO DE CAFEÍNA UTILIZANDO A ARGILA BENTONITA.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- SCHIMMEL, Daiana. **Adsorção dos corantes reativos azul 5G e azul turquesa QG em carvão ativado comercial.** 2008. 83 f. Dissertação (Mestrado) – PósGraduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, 2008.

- SCHNEIDER, E. L. **Adsorção de compostos fenólicos sobre carvão ativado**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.
- SILVA, A. T. **Influência da temperatura na adsorção do corante azul de metileno utilizando serragem de *Pinus elliottii* como um adsorvente alternativo: um modelo para o tratamento de efluentes têxteis**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- SILVA, M. A. O. **Bioadsorventes alternativos para remoção de contaminantes orgânicos (gasolina)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, PB, 50 p. 2020.
- SILVA, N. P. **Utilização de diferentes materiais como adsorventes na remoção de nitrogênio amoniacal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Maria, RS, p. 146, 2015.
- SOUSA, D. D. **Produção e avaliação da farinha da casca de banana como bioadsorvente na remoção de corantes têxteis em águas residuárias**. 2015. 86f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA) - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2015.
- SOUZA, H. N. **Adsorção de óleo diesel em resíduo de esteatito e sua incorporação em cerâmica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Universidade Federal de Ouro Preto. 76 p. 2016.
- SOUZA, R. S.; LIMA, L. M. R.; SILVA, V. L. M. M. **Adsorção de óleo diesel em sistema de leito diferencial com biomassa bagaço de cana-de-açúcar**. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos - REMAP*, v. 6, p. 123-126, 2011.
- SPEIGHT J. G., **The Chemistry and Technology of Petroleum**, 4 ed. CRC Press: Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2006.
- SUZUKI, M. **Adsorption Engineering. Chemical engineering monographs**, vol. 25. Japan: Kodansha, 1990.
- TEIXEIRA, A.S. **Isolamento e caracterização de bactérias degradadoras de gasolina comercial**. Dissertação (Programa de pós-graduação em ciência do solo) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2017.
- XING, W.; NGO, H. H.; KIM, S. H. **Adsorption and bioadsorption of granular activated carbon (GAC) for dissolved organic carbon (DOC) removal in wastewater**. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 18, p. 8674–8678, 2008.