



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



**BIOADSORÇÃO COMO TRATAMENTO PARA REMOÇÃO DE METAIS
PESADOS: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE PAPEL E
CELULOSE**

Maria Isabel Barcelos Ferreira
Orientadora: Professora Dra. Thamayne Valadares de Oliveira

Universidade Federal de Uberlândia
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



BIOADSORÇÃO COMO TRATAMENTO PARA REMOÇÃO DE METAIS PESADOS: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

Maria Isabel Barcelos Ferreira

Orientadora: **Professora Dra. Thamayne Valadares de Oliveira**

Trabalho de Conclusão de Curso submetida ao Programa de Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Uberlândia - MG
2024

Maria Isabel Barcelos Ferreira

BIOADSORÇÃO COMO TRATAMENTO PARA REMOÇÃO DE METAIS PESADOS: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador(a): Prof. Dra. Thamayne Valadares de Oliveira

Banca Examinadora:

Uberlândia, 26 de Setembro de 2024

Prof. Dra. Thamayne Valadares de Oliveira
Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia - MG

Prof. Dra. Patrícia Angélica Vieira
Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia – MG

M. Sc. Warlen Angelo Dias
Universidade Federal de Uberlândia – Uberlândia - MG

AGRADECIMENTOS

Ter chegado até aqui, representa uma grande conquista na minha vida, mas com certeza eu não teria chegado tão longe sem diversas pessoas e situações que cruzaram o meu caminho nesse tempo. Desde o início, pude contar com o apoio dos meus pais, Elza e Carlos, que me inspiraram, e me incentivaram a ser independente e correr atrás dos meus sonhos, e sempre se doaram muito para que a Duda e eu pudéssemos ter diversas oportunidades. É muito bom estar perto de vocês três. Sou muito grata por tê-los comigo, amo muito vocês! Agradeço também ao João Vítor, a melhor companhia que eu poderia ter, obrigada por sempre acreditar e cuidar de mim, e por ter me apoiado tanto nessa trajetória, espero poder compartilhar várias outras conquistas ao seu lado!

Além disso, não poderia deixar de citar a minha família, que sempre foi muito próxima e me deu forças em todos os momentos, tios, primos, madrinhas (Altina e Lucimar), avós e, em especial, minha avó Maria Antônia, que me deu exemplo de como ser uma pessoa melhor, e mesmo de longe, e sempre me fez sentir bem-vinda quando eu me sentia distante. Agradeço também aos meus amigos de Franca, em especial Ana Maria, Leticia, Carol, Lucas e Guilherme, é muito bom poder evoluir com vocês e poder tê-los comigo há tanto tempo, com vocês, sempre soube que eu teria um lugar para voltar e que seria bem recebida de volta, obrigada por tudo!

Ter perdido tantos eventos e momentos com a minha família e amigos foi uma parte muito difícil nessa caminhada, mas, graças à Deus, tive a sorte de encontrar pessoas que se tornaram minha família de Uberlândia, e que foram essenciais para que eu pudesse ter vivido esses 5 anos da melhor forma possível, com muitos momentos bons e muitas histórias para contar. Desde 2019 tenho os Amigos Lindos comigo, que fazem parte da minha história, obrigada Angellus, Antônio, Gabriel, Heitor, Julia M., Julia P., Lucas, Rangel e Selis, por terem me acolhido e terem feito tudo ser mais leve, e obrigada também ao meu Top1: Bárbara, e Mafer. Gostaria de também ressaltar a importância dos projetos de extensão: ConsultEQ, AICHe, Núcleo Triângulo e Enactus, que me trouxeram novas visões, aprendizados e amigos. Foi graças à Enactus que meu caminho se cruzou com o da Advânia e da Vitória, amigas que surgiram no meio da faculdade e que trazem conforto e felicidade para os meus dias. Obrigada por todos os cafés e momentos juntas!

Por fim, gostaria de agradecer aos profissionais da UFU, em especial à minha orientadora, professora Thamayne, que desde 2020 acreditou em mim com um projeto de Iniciação Científica, me ensinou muito, me ajudou em decisões difíceis e me deu um grande apoio para que esse trabalho fosse concluído. Obrigada.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso traz um estudo sobre a adsorção e a bioadsorção como técnica para o tratamento de efluentes industriais, com ênfase na remoção de metais pesados. O objetivo deste estudo é promover a conscientização da responsabilidade ambiental e social, especialmente no que se refere ao reuso e aproveitamento da água, em conformidade com os parâmetros de concentração estabelecidos pelos órgãos reguladores. O desenvolvimento do presente trabalho foi conduzido por meio de uma revisão bibliográfica e de um estudo de caso. O artigo selecionado para o estudo apresenta os mecanismos de adsorção e a definição das isotermas de Freundlich e Langmuir. Os autores avaliam a casca mole de pistache como possível agente bioadsorvente para tratamento de efluentes industriais da indústria de papel e celulose. Os melhores resultados foram observados utilizando o modelo de Langmuir, sendo que para o Cu, obteve-se um erro R^2 de 0,9842 e q_e (quantidade adsorvida) experimental de 4,95 mg/g, já para o Pb, o resultado foi de R^2 de 0,9910 e q_e experimental de 24,00 mg/g. Ademais, a casca mole de pistache trouxe resultados satisfatórios como floculante natural, chegando a 98% de remoção de Pb, e 97% de remoção de Cu, nas condições consideradas ótimas. Assim, foi possível perceber que a bioadsorção e floculação são mecanismos com potencial de serem utilizados para o tratamento de efluentes industriais, com vantagens ligadas a viabilidade econômica e operacional e ambientalmente favoráveis.

PALAVRAS-CHAVE: bioadsorção, metais pesados, efluentes.

ABSTRACT

The following thesis presents a study on adsorption and bioadsorption as techniques for the treatment of industrial effluents, with emphasis in the removal of heavy metals. The aim of this study is to promote the awareness of environmental and social responsibility, especially with regard to the reuse and utilization of water, in accordance with the parameters established by the regulatory agencies. The following work was performed with the through a literature review and a case study. The selected article for the case study presents the adsorption mechanisms and the definition of the Freundlich and Langmuir isotherms. The authors evaluate the pistachio soft shell as an option of bioadsorption agent for the treatment of industrial wastewater from the pulp and paper industry. The best outcomes were observed using the Langmuir model, in which for Cu it was obtained an R^2 error of 0.9842 and an experimental q_e (amount adsorbed) of 4.95 mg/g, while for Pb, the result was an R^2 of 0.9910 and an experimental q_e of 24.00mg/g. In addition, the pistachio soft shell as a natural flocculant, lead to satisfactory results, reaching 98% Pb removal and 97% Cu removal, under optimal conditions. Thus, it was possible to observe that bioadsorption and flocculation are mechanisms with the potential to be used for industrial effluent treatment, with advantages linked to economic viability and being operationally and environmentally promising.

KEYWORDS: bioadsorption, heavy metals, effluents.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. MATERIAIS E MÉTODOS	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1 Adsorção	5
4.1.1 Cinéticas de Adsorção.....	6
4.1.2 Isotermas de Adsorção	8
4.2 Bioadsorção	10
5. ESTUDO DE CASO.....	12
5.1 CONCLUSÃO DO ESTUDO DE CASO	22
6. CONCLUSÃO GERAL.....	23
7. REFERÊNCIAS	24

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A química verde, conceito definido a partir da década de 90, marca a mudança das tendências gerais do modo de definição e solução de problemas gerados pelos produtos químicos. A química verde é, em resumo, um conjunto de processos e princípios que buscam, por meio do planejamento e de estratégias eficientes, minimizar e evitar problemas ambientais. Por isso, uma frente importante desses processos é o tratamento de efluentes para redução da presença de substâncias tóxicas e bioacumulativas (Andrade et al., 2024).

Devido à tendência bioacumulativa de metais como Níquel, Chumbo e Mercúrio, eles representam uma série de ameaças ao meio ambiente e à saúde humana, quando encontrados em concentrações maiores do que as permitidas. No entanto, é comum que diversas indústrias como a farmacêutica, petroquímica, têxtil e mineradora produzam efluentes com a presença desses metais em concentrações além do que é exigido por legislações, por isso, é importante que esses efluentes sejam devidamente tratados antes de serem descartados (Feisther, 2018).

A seguir, a Tabela 1 define esses metais, seus potenciais danos e suas concentrações máximas permitidas pelas legislações do Brasil (Portaria N° 2914/2011) e dos Estados Unidos (US EPA – United States Environmental Protection Agency).

Tabela 1: Metais tóxicos e suas concentrações máximas permitidas pelas legislações e potenciais danos que os compostos podem trazer.

Composto Tóxico	Concentração permitida (mg/L) PORTARIA N° 2914/2011	Concentração permitida (mg/L) US EPA	Potenciais danos à saúde em casos de exposição acima do permitido (EPA)
Cádmio	0,005	0,005	Danos renais
Chumbo	0,01	0	Em crianças: atraso no desenvolvimento físico ou mental. Em adultos: pressão alta e problemas renais
Cromo	0,05	0,1	Dermatite alérgica
Mercúrio	0,001	0,002	Danos renais

Fonte: (Feisther et al, 2019).

Diante do exposto na Tabela 1, para a remoção dos metais pesados de efluentes industriais diversas técnicas podem ser aplicadas como a separação por membranas e a adsorção (Feisther et al, 2019).

A indústria do setor de papel e celulose tem grande influência na poluição industrial, tanto pela alta demanda de água requerida pela produção, com processos que podem chegar em até 100 m^3/t , quanto pelas diferentes substâncias advindas do processo produtivo, como por exemplo os metais pesados gerados durante a produção do papel e as substâncias orgânicas, como a lignina, provenientes da madeira (Bender et al, 2019).

Em paralelo a isso, o setor de papel e celulose possui grande representatividade na economia e empregabilidade brasileira, sendo que em 2016 foram estimados aproximadamente 3,7 milhões postos de trabalhos florestais, diretos e indiretos (Bender et al, 2019). Isso reforça a necessidade da atenção para o tratamento dos efluentes desse setor, visando o reaproveitamento da água, que é amplamente utilizada.

Além disso, os benefícios do reuso da água são muitos, abrangendo esferas ambientais, econômicas e sociais (Marques, L., 2019), os quais estão descritos na Tabela 2:

Tabela 2: Listagem dos principais benefícios do reuso da água.

Ambiental	Econômico	Social
Melhoria da qualidade da água de regiões industrializadas por conta da redução do lançamento de efluentes industriais em cursos d'água	Mudança nos padrões de produção e consumo	Criação de oportunidade de negócio para empresas que fornecem serviços e produtos relacionados ao tratamento de água
Redução da utilização de águas de rio e lençóis freáticos.	Aumento da competitividade do setor ambiental	Maior reconhecimento do setor pela sociedade devindo a responsabilidade ambiental da empresa
Aumento da água disponível para usos com critérios mais rígidos, como água de uso hospitalar.	Redução dos custos de produção	Mais empregos diretos e indiretos gerados

Fonte: FIESP/CIESP (2004)

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste estudo é conseguir avaliar opções de tratamento sustentável e economicamente viável para remoção de metais pesados e tratamento de efluentes industriais por meio de revisão da literatura e com base no estudo de caso do artigo “*An environmentally friendly approach for industrial wastewater treatment and bio-adsorption of heavy metals using Pistacia soft shell (PSS) through flocculation-adsorption process*”, em tradução livre: “Uma abordagem ambientalmente positiva para tratamento e bioadsorção de metais pesados utilizando Casca Macia de Pistache (CMP) através do processo de floculação e adsorção”, de Nazari et al., publicado em 2023.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer uma revisão bibliográfica sobre a relevância e necessidade do tratamento de efluentes, especialmente com relação as concentrações de metais pesados, e sobre a influência da adsorção nesses processos;
- Avaliar as cinéticas, isotermas da adsorção e mecanismos que descrevem o tratamento do efluente;
- Avaliar os resultados e desenvolvimento do estudo da Casca Macia de Pistache.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

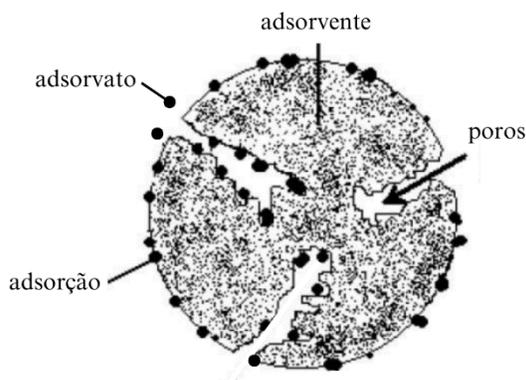
A elaboração do presente trabalho iniciou-se a partir de uma revisão da literatura sobre a utilização e aplicação da adsorção e da teoria de isotermas para o tratamento e remoção de metais pesados de efluentes industriais. Dessa forma, para a elaboração da revisão bibliográfica e do estudo de caso, teve-se como critério a seleção de artigos científicos, capítulos de livros e sites confiáveis. As buscas dos artigos utilizados neste trabalho foram realizadas nas seguintes plataformas: Periódicos Capes, Science Direct e Google Academic.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Adsorção

A adsorção é um processo de separação que se resume à uma transferência dos componentes sólidos presentes em um fluido, para a superfície de um material adsorvente (Oliveira, T. V. de, 2018). No processo de adsorção, o adsorvente (ou adsorbente) é o agente responsável pela separação, sendo geralmente um sólido com partículas porosas, no qual o adsorbato a ser removido se difunde, e o adsorbato ou adsorbato é o material que, na adsorção, tende a se acumular na interface do adsorvente, conforme a Figura 1 (Do Nascimento, R. F., et al., 2020).

Figura 1: Elementos da Adsorção



Fonte: Adaptado de (Da Silva, 2020).

Esse mecanismo de separação é amplamente utilizado em aplicações diversas, que vão desde remoção de componentes químicos de efluentes (Oliveira, A.R., 2023) até remoção de corantes na indústria têxtil (Siqueira et al., 2022), pois mesmo em concentrações baixas metais pesados, corantes, compostos farmacêuticos, fertilizantes/pesticidas, entre outros contaminantes, são uma preocupação para os seres humanos (Dhokpande et al., 2024). Vários adsorventes foram estudados, até hoje, com o intuito de remover diferentes tipos de contaminantes incluindo carvão ativado, zeólitas de troca iônica, nano adsorventes, aluminas ativadas, estruturas metal-orgânicas (MOFs), líquidos iônicos, entre outros; além de uma vasta gama de bioadsorventes (Singh, S. et al., 2020).

Com relação às variáveis de processo, tem-se diferentes fatores que influenciam no desempenho do processo de adsorção. Dentre eles estão:

- pH do meio: O pH influencia a adsorção por determinar resultado da química da solução na qual os metais pesados estão presentes, de forma que o pH que favorece um ambiente químico com maior presença de íons positivos, favorece também a adsorção de ânions. Da mesma forma, o pH que gera maior carga superficial negativa, é favorável à adsorção de cátions. (Cechinel, M. A. P., 2013) (Do Nascimento, R. F., et al., 2020).
- Temperatura: O aumento da temperatura pode ocasionar a diminuição do grau de adsorção, uma vez que as reações de adsorção são exotérmicas em sua maioria (Oliveira, T. V. de, 2018).
- Tempo de contato do adsorvente com a solução: é preciso garantir que o tempo de contato seja suficiente para que a remoção do contaminante aconteça (Cechinel, M. A. P., 2013).
- Área superficial do adsorvente: com o aumento da área superficial tem-se o consequente aumento do número de sítios ativos, assim, aumenta-se também a capacidade de adsorção (Oliveira, T. V. de, 2018).

4.1.1 Cinéticas de Adsorção

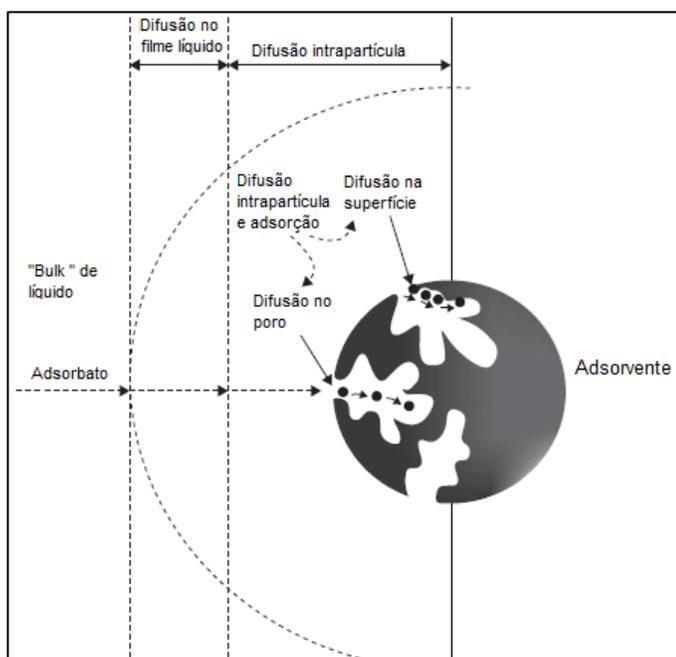
Para os estudos sobre adsorção, é necessário considerar a cinética da reação, visto que esse processo é dependente da taxa e da velocidade da reação, permitindo, assim, que seja realizada uma avaliação acerca do desempenho da adsorção para remoção do componente (Cechinel, M. A. P., 2013).

A cinética da adsorção depende da velocidade das seguintes etapas descritas:

- Transporte no seio da solução: onde acontece o contato inicial da camada limite do adsorvente com a solução líquida contendo o adsorbato, na Figura 2, esse processo é descrito como o “Bulk de líquido” que demonstra esse início no qual o adsorbato vai em direção ao adsorvente (De Carvalho, P. C. A. P. 2016).
- Transporte por difusão externa: ocorre a difusão do adsorbato em direção aos poros do adsorvente e representado na Figura 2 como “Difusão no filme líquido”.

- Transporte entre poros: nessa etapa acontece a difusão interna, na qual o líquido contido nos poros do adsorvente se transporta pela difusão molecular, representado na Figura 2 como parte da “Difusão intrapartícula”, mais especificamente, a “Difusão na superfície” (De Carvalho, P. C. A. P. 2016).
- Ligação do adsorvato ou “Difusão no poro”: momento da adsorção em que há a ligação do adsorvato em um sítio disponível do adsorvente (De Carvalho, P. C. A. P. 2016).

Figura 2: Demonstração das etapas do mecanismo de adsorção



Fonte: do Vale, L. B. (2015)

A seguir são apresentadas nas Equações de 1 a 3 os modelos mais utilizados para descreverem a cinética do processo (Nazari et al., 2023):

- Modelo de cinéticas de pseudo primeira ordem:

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

- Modelo de cinéticas de pseudo segunda ordem:

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (2)$$

- Modelo de cinéticas de difusão intrapartícula:

$$q_t = k_{in} \sqrt{t} + C \quad (3)$$

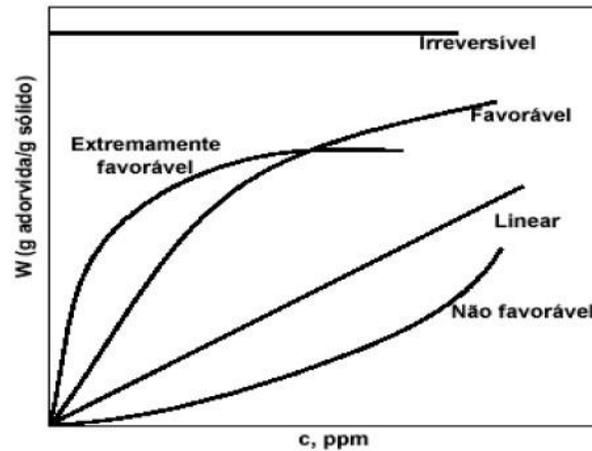
Sendo que q_t representa, em mg/g a capacidade de adsorção dos íons pelo adsorvente no equilíbrio e q_e representa a capacidade de adsorção porém no tempo t ; t é o tempo de contato em minutos enquanto k_1 , k_2 e k_{in} são as constantes de taxa de adsorção das cinéticas: de pseudo primeira ordem (min^{-1}), pseudo segunda ordem ($g.mg^{-1}.min^{-1}$) e de difusão intrapartícula (min^{-1}), respectivamente (Nazari et al., 2023).

4.1.2 Isotermas de Adsorção

Quando o adsorvente entra em contato com certo volume do adsorvato a adsorção ocorre até chegar no ponto de equilíbrio, o qual é representado pela concentração de soluto na fase fluida (C_e) constante, assim, determina-se o ponto de capacidade de adsorção do adsorvente (q_e) (Oliveira, T. V. de, 2018). As isotermas de adsorção podem ser descritas como equações usadas para descrever a adsorção de solutos por sólidos a temperaturas constantes (Muranka, 2010), funcionando como indicadores quantitativos da adsorção, e podem indicar esses pontos de equilíbrio além de demonstrar: a aproximação do valor máximo de soluto que poderá ser adsorvido pela capacidade do adsorvente, a previsão estimada da purificação a ser obtida e informações de viabilidade da adsorção, por meio da análise dos indicadores das isotermas (De Carvalho, P. C. A. P., 2016).

Na Figura 3 são apresentadas formas comuns de isotermas e observa-se o quão efetivas serão as adsorções em cada isoterma formada (De Carvalho, P. C. A. P., 2016):

Figura 3: Isotermas de Adsorção e descrições de eficiência



Fonte: MacCabe et al., (1993)

O modelo de isoterma de adsorção teórico em monocamada mais simples é a isoterma de Langmuir (Oliveira, T. V. de, 2018). A equação desse modelo se baseia nos seguintes princípios:

- A adsorção ocorre em sítios específicos e sem interações com as moléculas do soluto;
- A superfície da adsorção é homogênea;
- O ponto máximo da adsorção acontece quando a monocamada é formada, ou seja, quando é totalmente preenchida pelo adsorvente.

A isoterma de Langmuir é representada pela Equação 4:

$$q_e = \frac{q_{m\acute{a}x} k_l C_e}{1 + k_l C_e} \quad (4)$$

Sendo: q_e a quantidade de soluto adsorvido na fase sólida, em mg/g; $q_{m\acute{a}x}$ o máximo de soluto adsorvido na monocamada em mg/g; k_l é a constante de equilíbrio de adsorção em L/mg e C_e se refere à concentração de equilíbrio na fase fluida em mg/L (L.R.F. ALLEONI, 1999).

O modelo isotérmico de adsorção de Freundlich pode ser representado pela Equação 5:

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

Na qual C_e representa a concentração de equilíbrio dos íons de a serem adsorvidos pela adsorção na solução (mg/L), K_L é a contante de equilíbrio da adsorção, K_F é a capacidade de adsorção e n é o fator de heterogeneidade do adsorvente (Nazari et al.,2023). Esse modelo de isoterma é geralmente utilizado para análise de compostos orgânicos e espécies químicas que

possam interagir facilmente com carvão ativado, por exemplo, que é um dos adsorventes utilizados para o processo de adsorção (Milhomen, M. P. S., 2018). Essa tendência de utilização tem relação com a faixa limitada de pressão em que o modelo pode ser aplicado, visto que, em condições de pressões mais extremas, os resultados podem se tornar inconclusivos (Freundlich, 1932).

4.2 Bioadsorção

A bioadsorção é um tipo específico de adsorção, que consiste em atrações eletrostáticas e interações físico-químicas entre os sítios ativos, que se encontram na superfície de algum tipo de material de origem biológica, utilizada como adsorvente e o contaminante que se deseja remover (Teixeira, T. M., et al., 2021).

O processo da bioadsorção tem como vantagem o baixo custo agregado dos materiais que podem ser usados como bioadsorventes, baixo custo operacional, boa afinidade com íons metálicos e minimização do volume de lodo gerado (BARROS, A. 2012). Os bioadsorventes têm aplicações generalizadas na remoção de corantes, metais pesados, adsorção de efluentes industriais tóxicos, remoção de fertilizantes/pesticidas, poluentes atmosféricos e resíduos nucleares e no tratamento de água produzida (Singh, S. et al., 2024). Tem-se como exemplo de materiais bioadsorventes: a biomassa obtida de sementes como a semente de flamboyant, cascas de nozes e frutas, como banana, tamarindo, coco e laranja; biomassa de produtos agrícolas; argilas e também microrganismos (CARVALHO et al., 2016) (Teixeira, T. M., et al., 2021) (Singh, S. et al., 2024).

Para aumentar a eficácia da remoção especificamente de metais pesados, os investigadores têm se concentrado na criação de técnicas híbridas, que integram várias modalidades de tratamento diferentes.

Geralmente a adsorção é utilizada após o efluente ter sido previamente tratado, isso porque o efluente estará mais diluído, apesar de ainda ter concentrações de metais acima dos limites, e a remoção ser favorecida pela afinidade entre íons metálicos e o adsorvente, e não somente pelas altas concentrações do contaminante presente (BARROS, A. 2012). Várias tecnologias como a coagulação, filtração com membranas, precipitação, floculação; entre outras podem ser utilizadas na primeira etapa de tratamento (Singh, S. et al., 2024). Floculação é uma técnica comum e eficaz para eliminar íons de metais pesados de fontes de águas residuárias. Quando os floculantes são adicionados à água, as partículas coloidais, incluindo íons de metais pesados, agregam-se e sedimentam-se em flocos maiores. A água pode então ser facilmente

separada destes flocos através de filtração ou sedimentação. A facilidade de utilização, a relação custo-eficácia e a compatibilidade com a atual infraestrutura de tratamento de água são apenas alguns dos benefícios da floculação. Os floculantes naturais têm sido bastante utilizados, são originários de plantas, fungos e animais, apresentando a vantagem de serem renováveis e biodegradáveis, além de não serem prejudiciais aos seres humanos (Sonali, R. D. et al, 2024).

Diversos trabalhos citam processos combinados para tratamento de efluentes, tem-se como exemplo o trabalho de Costa et al. (2020), que estuda coagulação-floculação-sedimentação seguida de adsorção, para remoção de corantes têxteis, que trouxe um resultado de 97.3% de remoção final. Outro exemplo é demonstrado em Santos, T. R. T., (2013), que utiliza uma combinação de coagulação, floculação e adsorção. A quitosana, por exemplo, apresenta comportamento de adsorvente e floculante em diferentes estudos, e é um exemplo de material que dependendo do contaminante a ser removido pode ser utilizado em técnica híbrida (Sonali, R. D. et al, 2024), assim como a casca macia de pistache que será abordada no estudo de caso a seguir por Nazari et al., 2023.

5. ESTUDO DE CASO

O artigo de Nazari et al. (2023) mostra o perfil da indústria de papel e celulose como uma das que mais utiliza água e que mais produz efluentes, e, que além disso, é uma produção que gera efluentes com altos níveis de demanda química de oxigênio (DQO), concentração de metais pesados como Cobre (Cu) e Manganês (Mn) e altos níveis de turbidez. Portanto, o descarte indevido desse tipo de efluente pode gerar consequências ambientais relevantes como a contaminação de água e solo.

No trabalho em questão são citados diversos outros artigos que propuseram diferentes métodos para o tratamento de efluentes originários da indústria de papel e celulose. No entanto, os métodos convencionais de tratamento de efluentes de celulose e papel carregam certas desvantagens atreladas às complexidades operacionais e altos custos. Tem-se como exemplo a remoção de metais pesados utilizando nanopartículas (Zhang et al., 2021), que apesar da eficiência, tem um alto custo atrelado. Outros tipos de processos são citados como: utilização de membranas, microalgas, adsorção e processos de oxidação avançados. Um dos métodos de remoção com vantagens atrativas é o de utilização de coagulantes/floculantes para sedimentação de partículas, especialmente por conta da facilidade operacional e baixo custo, no entanto, os floculantes químicos podem gerar altas quantidades de lodo além de terem um custo elevado (Krishna et al., 2014). Para contornar as desvantagens citadas desse processo, existe a alternativa dos floculantes naturais (Y. Teh et al., 2014).

O artigo de Nazari et al. (2023) teve como objetivo avaliar a Casca Macia de Pistache (CMP) como um adsorvente e floculante natural no tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose, visando, especialmente, a remoção de: metais pesados (cobre e chumbo), demanda química de oxigênio (DQO) e turbidez para o atingimento dos padrões de qualidade do efluente, de forma que ele possa ser devidamente reaproveitado. Para isso, as amostras da casca mole de pistache foram caracterizadas e utilizadas em diferentes quantidades nas amostras do efluente da indústria de papel e celulose, a fim de avaliar e comparar sua performance nas diferentes condições reproduzidas nos testes.

O Pistache foi escolhido como floculante/bioadsorventes, pois desde 2020 tem apresentado um constante aumento na sua produção, segundo Hosseinzaei et al. (2022), o crescimento na produção anual de pistache no mundo foi de 70%, comparando-se a produção de 2020 com a de 2015 (Shaikhiev, 2023). Com o aumento da produção, houve um consequente

aumento na produção da casca do pistache, considerado um *foodwaste* - componente geralmente pouco aproveitado. Esse aumento também refletiu em maior quantidade de publicações e estudos sobre seus benefícios e utilização, visto que é um material rico em proteínas e polissacarídeos, o que indica que a casca pode ter um alto poder de remoção de DQO e de turbidez, por meio da adsorção (Igwegbe et al., 2021; Arjeh et al., 2020)

Para o início da pesquisa descrita em Nazari et al. (2023), foram utilizadas amostras de efluentes de papel e polpa (EPP), oriundos de uma fábrica de polpa e papel situada no Irã, as quais eram coletadas semanalmente no mesmo horário. Além disso, o armazenamento foi feito em refrigeradores de forma a evitar atividades microbiológicas que causassem a biodegradação das amostras.

As amostras de EPP foram diluídas, caracterizadas e medidas em triplicatas. Nas amostras foram encontradas altas concentrações de metais pesados como Chumbo ($48,52 \pm 2,21$ mg/L), Cobre ($5,86 \pm 0,87$ mg/L) e DQO de $1250 \pm 129,03$ mg/L; o que pode ser uma consequência da utilização de produtos químicos durante a produção do papel.

A preparação do floculante natural de pistache realizada por Nazari et al. (2023) iniciou-se com a coleta, separação, higienização e secagem das amostras de Casca Macia de Pistache (CMP), demonstradas na Figura 4, que seriam utilizadas. Em seguida, as amostras passaram por uma peneira de 70 mesh, garantindo que as partículas fossem menores do que $200\mu m$. O protocolo utilizado como base para a obtenção da solução de CMP foi desenvolvido por Bouchareb et al. (2021).

Figura 4: Casca Mole de Pistache (CMP) ou PSS que foi separado para preparação do floculante.



Fonte: Nazari et al. (2023).

Os testes de coagulação-floculação foram realizados em um rotor de seis pás em escala de laboratório. Nestes, os béqueres foram preenchidos com 200ml do efluente coletado e diferentes quantidades de CMP foram adicionadas, além de sulfato de alumínio $Al_2(SO_4)_3$ como sal inorgânico, para que a performance pudesse ser analisada e comparada. As quantidades de Casca Macia de Pistache adicionadas foram: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 2,5 g/L. Paralelamente, o efeito do pH também foi observado, para isso, o pH inicial do efluente foi ajustado em: 3, 5, 7, 9 e 11.

Os béqueres foram agitados por 5 minutos a 200rpm. Em seguida, ficaram por 60min parados e as amostras foram retiradas de cada recipiente para medições de: turbidez, DQO e concentração de metais pesados.

Para a análise da adsorção cinética dos íons de Cu^{2+} e Pb^{2+} , foram utilizados modelos de cinéticas de pseudo primeira ordem, pseudo segunda ordem e difusão intrapartícula sendo cada uma representada, respectivamente, pelas Equações 1, 2 e 3, citadas anteriormente.

Inicialmente, a adsorção dos íons de metais pesados pelo CMP foi analisada utilizando os modelos de isoterma de Langmuir, já definidos anteriormente pela Equação 4, e Freundlich, definido na Equação 5.

A filtração das amostras foi realizada com o auxílio de um filtro de seringa em conjunto com uma membrana hidrofílica de PVDF com poros de 0,45µm, em seguida, as amostras foram centrifugadas por 20 minutos a 3500 rpm, e lidas em um espectrofotômetro a 600 nm para medidas de DQO pelos métodos padrão descritos em (Association et al., 2017). Ademais, a turbidez foi medida utilizando um medidor portátil de turbidez. A concentração de íons de metais pesados (Cobre e Chumbo) foi obtida pela análise espectroscópica de absorção atômica por digestão ácida e foi feita nas amostras de efluentes antes e depois do tratamento com o CMP e a eficiência da remoção foi obtida pela Equação 6:

$$R = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad (6)$$

De forma que o C_0 e C_t representam, respectivamente, a concentração inicial e final dos parâmetros a serem analisados: concentração de DQO (mg/L), concentração de metais pesados (mg/L), e turbidez (NTU).

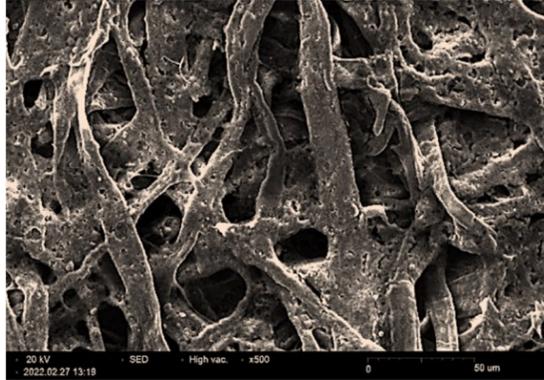
Para a análise da morfologia foi utilizada microscopia eletrônica de varredura.

E, por meio de um Espectrômetro Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foram feitas análises de espectroscopia da Casca Mole de pistache (CMP), do efluentes de papel e polpa (EPP) e dos flocos em dois momentos diferentes: antes e depois do tratamento, utilizando um espectrofotômetro de infravermelho por transformada de Fourier (Nicolet FT-IR Avatar 360, Germany).

Através do modelo de isoterma de BET (Brunauer-Emmett-Teller) foi possível determinar a área superficial e a porosidade do CMP com adsorção-dessorção de N_2 a 77 K.

O floculante de Casca Macia de Pistache teve sua superfície caracterizada utilizando o método de microscopia eletrônica de varredura, os resultados obtidos evidenciaram características favoráveis para a remoção de metais pesados e o potencial do CMP como agente adsorvente por conta da superfície porosa com estrutura de matriz polimérica. As análises obtidas são demonstradas na Figura 5. O diâmetro médio obtido dos polímeros estavam entre 0,5 e 5µm e comprimento entre 50 e 100µm.

Figura 5 — Resultado das análises microscópicas da superfície do CMP.

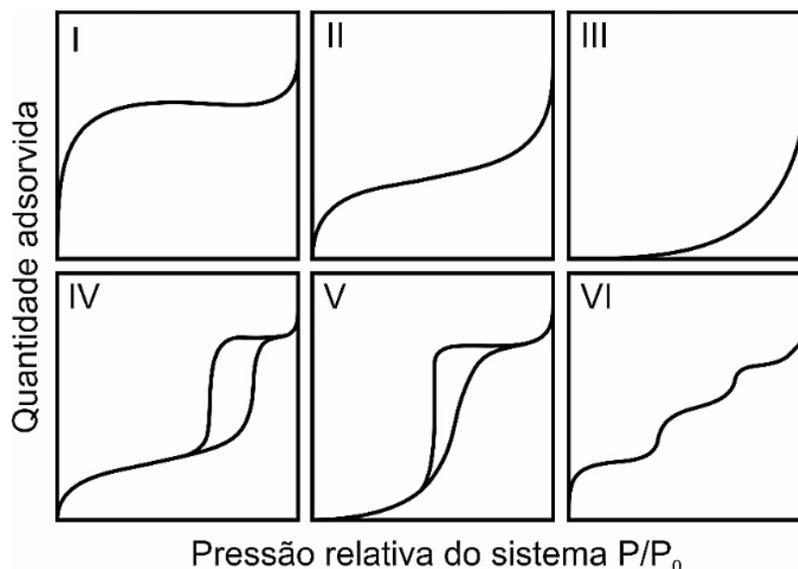


Fonte: Nazari et al. (2023).

As análises FTIR foram conduzidas para definição dos grupos funcionais e indicaram a alta capacidade do CMP como agente no processo de floculação, devido à presença de polissacarídeos que favorecem o mecanismo de ponteamento e bioadsorção de metais pesados. O pico do CMP foi localizado em torno de 3342 cm^{-1} , o que corresponde às vibrações de estiramento das ligações de Oxigênio (O) e Hidrogênio (H) e que são atribuídas as ligações intramoleculares como fenóis ácidos carboxílicos dos grupos funcionais (confirmar no artigo esta informação).

Com a análise de área superficial BET, foi possível observar no CMP uma isoterma tipo III, conforme a classificação da IUPAC, demonstradas conforme a Figura 6, indicando uma estrutura macroporosa com área superficial de aproximadamente $17,28\text{ m}^2/\text{g}$. Além disso, o volume total dos poros de CMP obtido foi de $0,012\text{ cm}^3/\text{g}$ e diâmetro médio de poro de $11,295\text{ nm}$. Com esses indicadores, é possível reforçar o potencial do CMP como possível bioadsorvente para metais pesados por conta da alta área superficial específica.

Figura 6: Classificação das Isotermas de acordo com a IUPAC

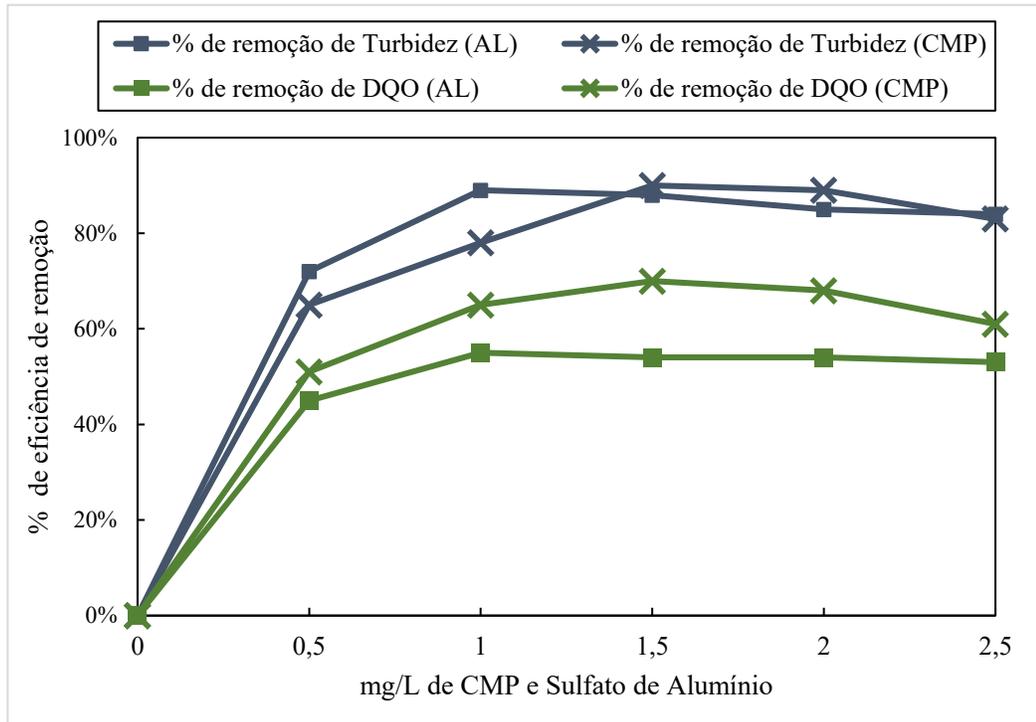


Fonte: Araújo et al. (2018).

Para a avaliação da eficácia do tratamento do efluente os parâmetros foram medidos depois de 60 minutos de tratamento com diferentes dosagens do floculante natural CMP e sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$). Os parâmetros analisados foram: remoção de DQO, turbidez e remoção dos metais pesados Cobre e Chumbo.

Os resultados mostraram que a remoção de DQO observada foi influenciada pela suspensão da matéria orgânica no processo de coagulação-floculação. Para a remoção de turbidez, a Figura 7 mostra o efeito da alteração das dosagens, conforme as linhas azuis, para esse parâmetro, e nas linhas verdes foi apresentado a eficiência de remoção de DQO, tanto para o CMP quanto para o Sulfato de Alumínio (AL). Vale ressaltar que foi possível observar que acontece uma diminuição na eficiência da remoção da turbidez à medida que mais coagulante é adicionado.

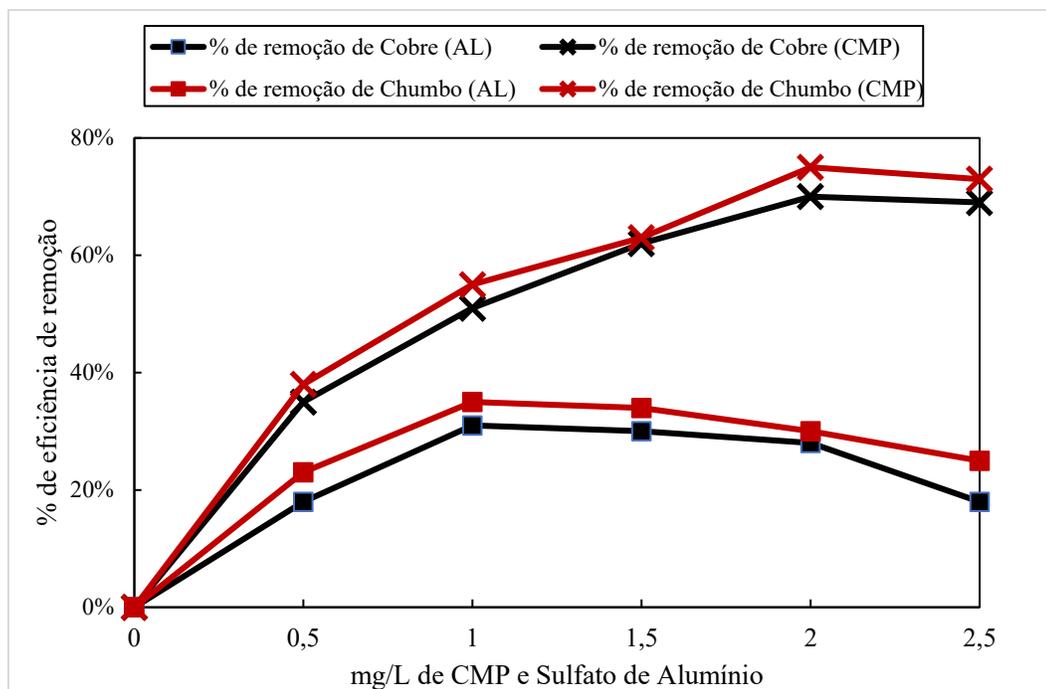
Figura 7 – Remoção de DQO e turbidez conforme a adição de coagulante.



Fonte: adaptado de Nazari et al. 2023.

Na Figura 8 observa-se o efeito das diferentes concentrações de coagulante na porcentagem de remoção dos metais pesados: cobre e chumbo. Assim, percebe-se que há um aumento na remoção conforme o aumento da dosagem de CMP, tal fator pode ser uma consequência da atração eletrônica gerada entre os íons positivos de metais pesados e íons negativos do floculante da casca macia de pistache, gerando a adsorção dos íons de metais pesados.

Figura 8: Porcentagem da remoção de Cu (c) e de Pb (d) em diferentes dosagens de CMP e Sulfato de Alumínio.



Fonte: adaptado de Nazari et al. 2023.

Os principais resultados, utilizando as dosagens de CMP a: 1,0; 1,5; e 2,0 mg/L e sulfato de alumínio a 1mg/L, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados de remoção obtidos para diferentes concentrações de CMP

Parâmetro	CMP 2,0 mg/L	CMP 1,5 mg/L	CMP 1,0 mg/L	$Al_2(SO_4)_3$ 1,0 mg/L
Remoção de DQO	68%	70%	65%	55%
Remoção de turbidez	89%	90%	78%	88%
Remoção de Cu	70%	62%	51%	31%
Remoção de Pb	74%	63%	55%	35%

Fonte: adaptado de Nazari et al. 2023.

Analisando o efeito do pH nos parâmetros de qualidade do tratamento do efluente, Nazari et al. (2023) observou que a eficiência de remoção da DQO e da turbidez melhoraram com a diminuição do pH, isso se deve ao fato de que os íons presentes no efluente do papel e celulose

fazem com que as mudanças nos íons de H^+/OH^- interrompam o equilíbrio eletrostático. A remoção de turbidez e DQO tem uma porcentagem maior de remoção quando o pH estava próximo de 2, chegando em 38% de remoção na DQO e 63% na turbidez. Isso também é explicado pelo potencial zeta, que quando o pH é 2, chega em quase 0 e, dessa forma, mais íons H^+ estão presentes nessas condições e favorece a coagulação.

Em contrapartida, o mesmo efeito não é observado para a remoção dos metais pesados, os quais atingem o auge de remoção apenas em pHs mais altos, crescendo de forma mais acentuada em pHs próximos de 7,5 e chegando ao pico no $pH = 10$. Isso acontece pelo fato de superfícies altamente adsorptivas atraem os íons negativos e favorecem a floculação. Já o pH abaixo de 6 para a remoção de cobre e chumbo, pode gerar repulsão entre os íons positivos dos metais e de hidrogênio, justificando a baixa eficiência de remoção nesse caso. Os melhores resultados de eficiência de remoção para a turbidez e DQO também foram observados no pH maior do que 6, o que também é explicado pelo mecanismo de varredura que acontecem por conta da precipitação dos hidróxidos gerados pela reação entre os metais pesados e os íons de OH^- .

Com os resultados observados, o pH igual a 9 foi definido como ideal por Nazari et al. (2023), visto que pHs maiores do que esse não podem ser reutilizados para fins agropecuários. Portanto a eficiência máxima a ser alcançadas nas remoções foram de 55% para o Cu, 59% para o Pb, 60% para turbidez e 30% para DQO.

Foram analisadas as isotermas dos íons de Pb^{2+} e do Cu^{2+} , pela bioadsorção, formada pelo CMP nas condições consideradas ótimas do experimento.

Para as análises de cinética dos metais em questão, foi utilizada a condição ótima inicial de $pH=9$, CMP a 2g/L, $Pb = 48,5mg/L$ e $Cu=2,84mg/L$ e as análises podem ser observadas na Figura 10, onde percebe-se que nos 5 primeiros minutos de teste a adsorção tem-se uma taxa de adsorção maior até permanecer aproximadamente constante e atingir o equilíbrio em $t=10min$, com capacidade máxima de adsorção de 23,05mg/g. O ajuste dos dados demonstrou que a cinética da isoterma que melhor se ajustou aos dados foi a de Pseudo Segunda Ordem, atingindo um R^2 para o Cu de 0,9988 e 0,9957 para o Pb, isso sugere que o principal mecanismo da adsorção do cobre e do chumbo é a adsorção química e que há transferência de elétrons entre a superfície do CMP e dos metais pesados.

Em seguida, utilizando o modelo de isoterma de Langmuir e Freundlich, Nazari et. al. (2023) avaliaram os dados para capacidade de adsorção dos metais pesados em função da concentração de equilíbrio dos metais pesados, demonstrada na Figura 11 e foi observado que a capacidade adsortiva do CMP aumentou à medida que a concentração inicial dos metais aumentava. As análises de isotermas foram realizadas em condições iniciais de Chumbo a 10,20,30,40 e 50mg/L e Cobre a 2,4,6,8,10 e 12 mg/L.

A máxima capacidade foi alcançada para o Pb a uma concentração de equilíbrio de 2,1 mg/L e chegando à capacidade de adsorção de 12 mg/g. Para o Cu, a máxima capacidade de 4,95 mg/g foi atingida com concentração de equilíbrio de 24 mg/L. E, conforme o tratamento dos dados demonstrados na Tabela 6, o modelo de isoterma que melhor se ajusta aos dados foi a Isoterma de Langmuir quando comparada com o modelo de Freundlich, assim, sugere-se que a adsorção acontece principalmente na monocamada.

Tabela 6: Resultados das isotermas avaliadas na adsorção de metais pesados

Metal	Modelo isoterma	q_e mg /g(exp)	q_e mg/g(modelo)	K	R^2
Cu	Langmuir	4,95	4,48	4,5	0,984
Cu	Freundlich	4,95	5,38	4,2	0,929
Pb	Langmuir	24,00	23,16	2,3	0,991
Pb	Freundlich	24,00	26,06	15	0,964

Fonte: adaptado de Nazari et al. 2023.

5.1 CONCLUSÃO DO ESTUDO DE CASO

De acordo com Nazari et al. (2023), conclui-se com as análises dos resultados obtidos, que foi possível observar a caracterização do CMP com os modelos de isoterma de Langmuir e Freundlich e assim foram feitas as análises que demonstraram o CMP como uma opção sustentável e eficiente de floculante natural, com potencial para ser usado no tratamento de efluentes industriais. Além de demonstrar uma eficiência 10% maior na remoção de DQO e turbidez quando comparado ao sulfato de alumínio (floculante químico), a casca macia de pistache também levou a um aumento de 40% na eficiência de remoção de metais pesados do efluente de papel e celulose, também em comparação ao sulfato de alumínio.

Por fim, foi observado que o CMP junto com o ajuste de pH também teve uma performance relevante nas eficiências de remoção.

6. CONCLUSÃO GERAL

Dessa forma, observou-se a alta eficiência dos floculantes naturais no tratamento de efluentes industriais. Além disso, a casca macia de pistache, um resíduo alimentar frequentemente descartado, pode ser reutilizada nesse processo, e, por conta da cresce produtiva, tem um potencial para ser utilizada como bioadsorvente para outros metais pesados. Essa abordagem não apenas proporciona uma destinação mais adequada para o resíduo, mas também promove uma economia sustentável e financeira. Assim, conclui-se que a bioadsorção, utilizando floculantes naturais, representa uma alternativa promissora para o tratamento eficiente de efluentes, melhorando a qualidade da água e possibilitando seu reuso em atividades específicas.

7. REFERÊNCIAS

- Andrade, C. C. et al. Uso de reator de micro-ondas para guanilação de tioureias. *Química Orgânica: Conceitos, Fundamentos e Avanços*, p. 86–115, 2024.
- Araújo, Paulo & Júnior, Degival & Filho, Lucio & Santos, Edilson & Marques, José. (2018). Uso de carvão ativado na remoção de CO₂. *Scientia Plena*. 14. 10.14808/sci.plena.2018.054201.
- Arjeh, E., Akhavan, H., Barzegar, M., Carbonell-barrachina, A.A., ' 2020. Bio-active compounds and functional properties of pistachio hull: a review. *Trends Food Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.031>.
- BARROS, A. M. Bioadsorção e dessorção dos íons Cd²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, Pb²⁺ e Zn²⁺ pela macrófita aquática azolla pinnata. 2012. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Bender, Ana Flávia, et al. “Tecnologias Avançadas de Tratamento Visando à Remoção de Cor E Fenol de Efluente de Indústria de Celulose E Papel.” *Ciência Florestal*, vol. 29, 2019, pp. 571–582, www.scielo.br/j/cflo/a/cmgbkKSLFbDGBXtZz69mmRf/?lang=pt, <https://doi.org/10.5902/1980509832503>. Acesso em 2024.
- Bouchareb, R., 2021. Optimization of active coagulant agent extraction method from Moringa Oleifera seeds for municipal wastewater treatment. *Kerroum Derbal* 84, 393–403. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.234>.
- Carvalho, L. R. *Et Al.* Bioadsorção De Crômio (Vi) Em Casca De Banana Nanica (Musa Paradisiaca L.) Em Pó Em Frascos Agitados E Em Leito Fixo. **Xxi Congresso Brasileiro De Engenharia Química**, [S. L.], 25 Set. 2016.
- Cechinel, M. A. P. Aplicação de processo adsorptivo na remoção de chumbo de efluentes petroquímicos sintéticos 2013.
- Costa, G. F. Da; Sawaguchi, M. Y. De A.; Júnior, V. G. Da A. Remoção De Corantes Têxteis Por Coagulação-Floculação-Sedimentação E Adsorção. *Colloquium Exactarum*. Issn: 2178-8332, V. 12, N. 2, P. 77–88, 3 Dez. 2020.
- Chu, R.L., S, V., S, A., 2021. Aloe vera as a natural flocculant for palm oil mill effluent (POME) treatment - characterisation and optimisation studies Aloe vera as a natural flocculant for palm oil mill effluent (POME) treatment – characterisation and optimisation studies. *Symp. Malaysian Chem. Eng.* 32 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1195/1/012035>.
- Da Silva, T. Técnicas De Remediação Utilizadas No Tratamento Da Contaminação De Solo E Água Subterrânea Por Vazamentos Em Postos De Combustíveis. T. T. São Paulo, 2020.
- De Carvalho, p. C. A. P. (2016.). Universidade federal do rio grande do norte centro de tecnologia

departamento de engenharia química programa de pós-graduação em engenharia química tese de doutorado tratamento combinado da água produzida de petróleo: filtração, adsorção e foto-fenton.

Do Nascimento, R. F. et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. E-book. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária. 2020. (Estudos da pós-graduação). Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/53271>. Acesso em 2024.

Do Vale, L. B.. (2015). Remoção de Desreguladores Endócrinos em Estações de Tratamento de Água e de Esgoto: Estudo Comparativo das Técnicas Disponíveis e Projeto Preliminar de Uni-dade de Tratamento. 10.13140/RG.2.2.30165.32484.

Feisther, V. A.; Filho, J. S. ; Hackbarth, F. V. ; Mayer, D. A.; de Souza, A. A. U.; Selene M.A.; de Souza, G. U.. Raw leaves and leaf residues from the extraction of essential oils as biosorbents for metal removal, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343719301708> . Acesso em 2024.

FREUNDLICH, H. Of the adsorption of gases. section ii. kinetics and energetics of gas adsorption. introductory paper to section ii. Transactions of the Faraday Society, v. 28, p. 195–201, 1932.

Hosseinzaei, B., Jafar, M., Aghabarari, B., García-roll, M., 2022. Bioresource Technology Reports Pyrolysis of Pistachio Shell , Orange Peel and Saffron Petals for Bioenergy Production, vol. 19. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101209>.

Igwegbe, C.A., Ighalo, J.O., Ghosh, S., Ahmadi, S., Ugonabo, V.I., 2021. Pistachio (*Pistacia vera*) waste as adsorbent for wastewater treatment: a review. Biomass Convers. Biorefinery. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01739-9>.

Krishna, K.V., Sarkar, O., Mohan, S.V., 2014. Bioresource Technology Bioelectrochemical treatment of paper and pulp wastewater in comparison with anaerobic process : integrating chemical coagulation with simultaneous power production. Bioresour. Technol. 174, 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.141>.

L.R.F. ALLEONI, O. C. (1999). Isotermas de langmuir e de freundlich na descrição da adsorção de boro em solos altamente intemperizados.

Marques, L.. “O Reúso de Água Residual: Uma Análise Legal Das Possibilidades E Desafios Para O Setor Agroindustrial de Sousa – PB.” *Ufcg.edu.br*, 2019, dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/4844, <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4844>. Acessado em 2024.

MILHOMEM, Mateus Pereira de Sousa. Estudos de isotermas no processo de adsorção – revisão.

2021. 38 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2018.
- Muniz, G.L., Pereira, S., Borges, A.C., 2021. Dairy Wastewater treatment with organic coagulants: a comparison of factorial designs. *Water* 13, 1-18. [http://refhub.elsevier.com/S0013-9351\(23\)01399-3/sref48](http://refhub.elsevier.com/S0013-9351(23)01399-3/sref48)
- MURANAKA, C. T. Combinação de adsorção por carvão ativado com processo oxidativo avançado (POA) para tratamento de efluentes contendo fenol. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) -Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-20082010-145336/publico/Tese_Cinthia_Tiemi_Muranaka.pdf. Acesso em 2024.
- NAZARI, Bahman et al. An environmentally friendly approach for industrial wastewater treatment and bio-adsorption of heavy metals using Pistacia soft shell (PSS) through flocculation-adsorption process. *ELSEVIER*, [s. l.], 13 jul. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/environmental-research>.
- Oliveira, A. R. de, Barbosa, T. A., & Mendonça, L. C. (2023). Adsorção de poluentes em águas residuárias utilizando biocarvão: revisão sistemática. *Research, Society and Development*, 12(4), e23712441228. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i4.41228>
- Oliveira, T. V. (2018) Thamayne Valadares de Oliveira Remoção de compostos sulfurados e nitrogenados presentes em combustível diesel utilizando processos adsorptivos.
- Santos, T. R. T. dos; Vieira, M. F.; Bergamasco, R. Uso do coagulante natural Moringa Oleifera lam no processo combinado de coagulação/floculação/adsorção para minimização da formação de trihalometanos tássia rhuna tonial dos santos. N. 9, p. 131–141, 2013.
- Singh, S. et al. Current advancement and future prospect of biosorbents for bioremediation. **ELSEVIER**, 2020.
- Siqueira, A. M. de O., Chaves, G. L., Tanure, J. de S., Dutra, L. V., Souza, N. B. de, & Vianna, T. C. (2022). Determination of the diffusion coefficient in sodium chloride solution at different concentrations. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 8(3), 14053–01e. <https://doi.org/10.18540/jcecvl8iss3pp14053-01e>
- Shaikhiev, I.G., 2023. Review of pistachio (pistacia) shell use to remove pollutants from. *Aqua Media* 13, 1–11.
- Sonali R. Dhokpande; Satyajit M. Deshmukh; Ajinkya Khandekar; Amaya Sankhe. A review outlook on methods for removal of heavy metal ions from wastewater. [s.l.] **ELSEVIER**, 2024.
- Subramonian, W., Wu, T.Y., Chai, S., 2014. A comprehensive study on coagulant performance and floc characterization of natural Cassia obtusifolia seed gum in treatment of raw pulp and paper mill effluent. *Ind. Crop. Prod.* 61, 317–324.

- Taghavijelouidar, M., Park, J., Han, M., Taghavi, A., 2019. A new approach for modeling flux variation in membrane filtration and experimental verification. *Water research* 166, 115027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115027>.
- Taghavijelouidar, M., Farzinfar, B., Yaqoubnejad, P., Khaleghzadeh Ahangar, A., 2022. A novel approach for microalgal cell disruption and bioproducts extraction using non-thermal atmospheric plasma (NTAP) technology and chitosan flocculation. *Sep. Purif. Technol.* 302, 122142 <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122142>.
- Teixeira, Thaís Moreira, et al. “BIOADSORÇÃO DO CROMO HEXAVALENTE ATRAVÉS DA BIOMASSA DA SEMENTE de FLAMBOYANT.” *Journal of Innovation and Science: Research and Application*, vol. 1, no. 1, 1 Dec. 2021, pp. 9 p.–9 p., joins.emnuvens.com.br/joins/article/view/37/30, <https://doi.org/10.56509/joins.2021.v1.37>. Acesso em 2024.
- Teh, Y., Wu, C., Yeong, T., Juan, Ching, J., 2014a. Potential use of rice starch in coagulation – flocculation process of agro-industrial wastewater : treatment performance and flocs characterization. *Ecol. Eng.* 71, 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.005>.
- Zhang, M., Han, N., Fei, Y., Liu, J., Xing, L., 2021. TiO₂/g-C₃N₄ photocatalyst for the purification of potassium butyl xanthate in mineral processing wastewater. *J. Environ. Manag.* 297 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113311>.