

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**

**Coordenação de Engenharia Química/CCET**

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC



**RAQUEL DA SILVA NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE BIOSSORVENTES DE  
FIBRA DE COCO NA REMOÇÃO DO METAL COBRE EM  
EFLUENTES**

São Luís  
2021

**RAQUEL DA SILVA NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE BIOSSORVENTES DE  
FIBRA DE COCO NA REMOÇÃO DO METAL COBRE EM  
EFLUENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique da Silva Leite Coelho  
Co-orientador: Eng. Lucas de Andrade Fernandes

São Luís  
2021

Nascimento, Raquel da Silva.

Avaliação da eficiência de biossorventes de fibra de coco na remoção do metal cobre em efluentes / Raquel da Silva Nascimento. - 2021.

54 f.

Coorientador(a): Lucas de Andrade Fernandes.

Orientador(a): Paulo Henrique da Silva Leite Coelho.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2021.

1. Adsorção. 2. Cobre (II). 3. Efluentes. 4. Fibras de coco. I. Fernandes, Lucas de Andrade. II. Leite Coelho, Paulo Henrique da Silva. III. Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DA SILVA LEITE COELHO  
Orientador – DEEQ/CCET/UFMA

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. AUDIRENE AMORIM SANTANA  
DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO PEREIRA RODRIGUES  
DEEQ/CCET/UFMA

**30 de abril de 2021**

*Dedico este trabalho a minha mãe Maria Hildenê e meus irmãos Josué e Josimar, que sempre acreditaram no poder transformador da educação e me apoiaram em toda essa trajetória.*

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus, razão de tudo e de todos nós.

A minha mãe Maria Hildenê que sempre esteve ao meu lado me dando forças e me apoiando em tudo, sempre acreditando no meu potencial. Minha maior incentivadora.

Ao meu irmão Josué Nascimento por ser mais que um irmão, ser um pai para mim. Sempre se doou, me incentivou e ajudou em tudo que precisei.

Ao meu irmão Josimar Nascimento por sempre me apoiar e estar disponível para ajudar com tudo que estivesse ao seu alcance.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Coelho, pelo incentivo, disponibilidade em ajudar, orientação e auxílio.

À Alquimia Produtos Químicos para Indústria LTDA, pela cessão de meios para que esse estudo fosse concluído, em particular ao meu co-orientador e engenheiro químico Lucas Fernandes por sempre estar disponível em ajudar e ser um grande exemplo para mim.

À banca examinadora composta pelos professores Dr. José Roberto Pereira Rodrigues e Dra. Audirene Amorim Santana, gratidão por todo conhecimento, incentivo e conselhos no decorrer do curso, vocês foram peças fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Ao professor Dr. Harvey Alexander Villa Velez por toda ajuda e disponibilidade dentro e fora de sala de aula. Foi o responsável por eu não ter desistido em um momento em que estava em início de depressão e que quase abandonei, chegando a trancar o curso. Suas palavras fizeram eu tomar a atitude correta no momento em que quase desisti de tudo.

Ao meu namorado Alan Michel por todo apoio e companheirismo nas longas noites de estudo.

Aos meus amigos irmãos Carolina Saboia, Marcelo José, Leila Nascimento e Neto Verga por todo apoio, preocupação e por permanecerem ao meu lado até hoje, vibrando sempre com minhas conquistas.

Minha eterna gratidão a todos!

***“O fim determina o valor do esforço”  
(Frases Judaicas)***

NASCIMENTO, Raquel da Silva. **Avaliação da eficiência de biossorventes de fibra de coco na remoção do metal cobre em efluentes**. 2021. 54p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

## RESUMO

Conhecidos por serem altamente tóxicos em baixíssimas concentrações na água, os metais pesados têm sido alvo de muitos estudos, sendo eles dedicados à sua remoção a limites aceitáveis do ponto de vista ambiental, baixo custo e eficiência. A técnica de adsorção tem se mostrado relevante e atraente na área de tratamento de efluentes, principalmente pelo baixo custo e sua afinidade com os conceitos de química verde. Neste contexto, a fibra de coco apresenta características que apontam como um potencial biossorvente, como, alto teor de carbono, presença de lignina e resistência mecânica, além de oferecer facilidade natural de ser encontrado e manejado. Neste trabalho avaliou-se a capacidade de adsorção da fibra do coco verde, para futuras aplicações na descontaminação de efluentes aquosos contendo o metal cobre. Para o estudo da eficiência no processo de adsorção foi realizada uma metodologia onde, em batelada, variou-se a concentração das fibras, o pH, a velocidade e o tempo de agitação. Um planejamento fatorial  $2^4$  completo foi utilizado para avaliar a significância estatística destas variáveis, na qual obteve-se um ajuste de 98% do modelo, com uma média geral de 77% de remoção de cobre. O parâmetro de maior relevância foi o efeito do pH em função da remoção, pois a média de remoção das amostras submetidas em meio alcalino foi de 80,17%, enquanto que em meio ácido foi de 73,78%. Já para o efeito da concentração de adsorvente, as amostras com menores concentrações de fibras mostraram-se mais eficientes, apresentaram uma média de remoção de 78,76%, sendo 5% mais eficientes que as amostras com 1000 mg. A análise estatística revelou que o tempo de contato e velocidade de agitação são irrelevantes estatisticamente, mas que a concentração e pH foram determinantes na eficiência da adsorção.

**Palavras-chave:** Fibras de coco. Adsorção. Cobre (II). Efluentes.



NASCIMENTO, R. S. **Evaluation of coconut fiber biosorbents efficiency in the copper metal removal in effluents.** 2021. 54p. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

### ABSTRACT

Known for being highly toxic in very low concentrations in water, heavy metals have been the subject of many studies, being dedicated to their removal to acceptable limits from an environmental point of view, low cost and efficiency. The adsorption technique has been shown to be relevant and attractive in the area of wastewater treatment, mainly due to its low cost and its affinity with the concepts of green chemistry. In this context, coconut fiber has characteristics that point out as a biosorbent potential, such as high carbon content, the presence of lignin and mechanical resistance, in addition to offering natural ease of being found and handled. In this work, the adsorption capacity of green coconut fiber was evaluated for future applications in the decontamination of aqueous effluents containing copper metal. For the study of efficiency in the adsorption process, a methodology was carried out where, in batch, the fiber concentration, pH, speed and agitation time were varied. A complete factorial design  $2^4$  was used to assess the statistical significance of these variables, in which an adjustment of 98% of the model was obtained, with an overall average of 77% of copper removal. The most relevant parameter was the effect of pH as a function of removal, since the average removal of samples submitted in alkaline media was 80.17%, while in acidic media it was 73.78%. For the effect of the adsorbent concentration, the samples with lower concentrations of fibers proved to be more efficient, showed an average removal of 78.76%, being 5% more efficient than the samples with 1000 mg. Statistical analysis revealed that the contact time and agitation speed are irrelevant statistically, but that the concentration and pH were determinant in the adsorption efficiency.

**Keywords:** Coconut fibers. Adsorption. Copper (II). Effluents.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coco e seus constituintes .....	9
Figura 2 - Fibras de coco antes e após processo de moagem .....	11
Figura 3 - Equipamento Jarrest Analógico .....	12
Figura 4 - Espectrofotômetro Digital Hach DR900 Colorímetro .....	13
Figura 5 - Velocidade de rotação do Jarrest .....	14
Figura 6 - Gráfico da modelagem da curva de rotação do equipamento Jarrest.....	15
Figura 7 - Processo de filtração das fibras de coco após ensaio.....	16
Figura 8 - Leitura dos resultados em triplicata no equipamento DR900.....	17
Figura 9 - Metal removido em função da concentração de fibras de coco .....	20
Figura 10 - Coloração de todas as amostras que foram analisadas .....	21
Figura 11 - Metal removido em função do pH.....	22
Figura 12 - Metal removido em função da velocidade de agitação.....	23
Figura 13 - Metal removido em função do tempo de agitação .....	24
Figura 14 - Relação dos valores preditos pelos valores observados.....	26
Figura 15 - Gráfico de Pareto .....	27
Figura 16 - Superfície de resposta da concentração e pH em relação a remoção do metal	28
Figura 17 - Superfície de resposta da concentração e tempo em relação a remoção do metal .....	29
Figura 18 - Superfície de resposta do pH e velocidade de agitação em relação a remoção do metal .....	30
Figura 19 - Biossorção versus Floculação .....	31

## SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO .....	ii
	DEDICATÓRIA .....	iv
	AGRADECIMENTOS .....	v
	EPÍGRAFE .....	vi
	RESUMO .....	vii
	ABSTRACT.....	viii
	LISTA DE FIGURAS.....	ix
1	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA</b> .....	1
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	4
2.1	Objetivo geral .....	4
2.2	Objetivos Específicos .....	4
3	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	5
3.1	Metais pesados .....	5
3.2	Métodos de remoção de metais pesados.....	5
3.2.1	ADSORÇÃO .....	6
3.2.1.1	Propriedades dos materiais adsorventes .....	7
3.2.1.1.1	Método de Biossorção .....	7
3.2.1.2	Fatores que afetam a adsorção.....	7
3.3	Coco da praia ( <i>Cocos nucifera L.</i> ).....	8
3.3.1	CARACTERÍSTICAS BOTÂNICAS.....	8
3.3.1.1	Fibras de coco.....	9
3.4	Análise estatística .....	10
3.4.1	PLANEJAMENTO FATORIAL $2^k$ .....	10
4	<b>METODOLOGIA</b> .....	11
4.1	Matéria Prima .....	11
4.2	Preparação do sistema adsorvente .....	11
4.3	Preparação das soluções .....	12
4.3.1	SOLUÇÃO DE COBRE .....	12
4.3.2	SOLUÇÃO DE NaOH A 10% (M/V) PARA O AJUSTE DE pH.....	12
4.4	Planejamento dos experimentos por análise fatorial $2^4$ completo.....	12
4.5	Realização dos ensaios .....	16

4.6	Experimento de adsorção .....	17
4.6.1	MÉTODO DE ANÁLISE DO COBRE NO EQUIPAMENTO DR900 .....	17
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	19
5.1	Estudo da adsorção .....	19
5.1.1	EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE FIBRAS DE COCO NA REMOÇÃO DO ÍON $\text{Cu}^{2+}$ .....	19
5.1.2	EFEITO DO pH NA REMOÇÃO DO ÍON $\text{Cu}^{2+}$ EM SOLUÇÃO .....	21
5.1.3	EFEITO DA VELOCIDADE DE AGITAÇÃO NA REMOÇÃO DO ÍON $\text{Cu}^{2+}$ EM SOLUÇÃO .....	23
5.1.4	EFEITO DO TEMPO DE AGITAÇÃO NA REMOÇÃO DO ÍON $\text{Cu}^{2+}$ EM SOLUÇÃO .....	24
5.2	Análise Estatística .....	25
5.2.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	25
5.2.2	GRÁFICO DE PARETO .....	26
5.2.3	SUPERFÍCIES DE RESPOSTA .....	27
5.2.4	COMPARAÇÃO DO MÉTODO DE ADSORÇÃO USANDO AS FIBRAS DE COCO COM TRATAMENTO QUÍMICO .....	30
6	<b>CONCLUSÃO</b> .....	32
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	33

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Devido ao crescimento acelerado das cidades, atividades antrópicas, como é o caso das industriais, têm consumido recursos naturais e gerado resíduos que contêm substâncias nocivas que afetam intensamente o meio ambiente (SILVA *et al.*, 2013). Diante dessa situação, a pesquisa acadêmica tem priorizado o estudo da utilização de materiais que, além de serem mais favoráveis ao meio ambiente, também sejam economicamente viáveis.

Segundo a Organização dos Estados Americanos (OEA), as indústrias que mais poluem o meio ambiente são as dos ramos de mineração e metalurgia, que lançam diretamente no meio ambiente grandes volumes de gases, resíduos aquosos ou sólidos, contendo uma ampla variedade de elementos tóxicos (SILVA *et al.*, 2013).

Os metais pesados encontram-se presentes nesses resíduos gerados e destacam-se pelos seus elevados níveis de toxicidades. São espécies químicas não degradáveis e podem acumular-se nos componentes do ambiente onde manifestam sua toxicidade, tornando-se muito difícil acompanhar o destino destas espécies metálicas depois de introduzidas no ecossistema (SILVA *et al.*, 2013).

O cobre é um micro mineral essencial e realiza funções importantes no nosso organismo. Depois do zinco e do ferro, o cobre é o terceiro oligoelemento mais abundante no corpo. Porém, a elevada taxa desse mineral no organismo humano pode ocasionar sérios riscos de saúde. A toxicidade crônica do cobre é rara e afeta principalmente o fígado. O excesso de cobre no organismo pode resultar em várias doenças hepáticas, como é o exemplo da doença de Wilson, uma doença hepática crônica grave que resulta da predisposição genética ao acúmulo de cobre (DONALD *et al.*, 2002).

A remoção destes metais pesados é realizada através de métodos convencionais de tratamentos físico-químicos, tais como: coagulação, floculação, precipitação, filtração, adsorção e troca iônica (BISHNOI *et al.*, 2004).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão ambiental responsável por determinar as condições e padrões de lançamentos de efluente de qualquer fonte poluidora, com a finalidade de preservar o meio ambiente e a saúde humana. Para seguir os protocolos estabelecidos pelo CONAMA, desenvolveram-se diversas técnicas objetivando a remoção de metais pesados da água, onde entre eles

destaca-se o processo de adsorção, método utilizado com base em uma biomassa, o que a torna de baixo custo e limpa. Segundo Monteiro (2010), o processo de adsorção consiste na capacidade de alguns materiais como biomassas em combinar-se com íons ou moléculas em meio aquoso ou gasoso. A biossorção utiliza-se de materiais biodegradáveis que são residuais e abundantes na natureza. Existe uma diversidade de biomassas que podem ser utilizadas nesse processo, entre elas: bagaço de cana, pó da casca de coco, palha da casca de coco e *Sargassum sp* (Alga marinha de coloração castanha) (ALBERTINI; CARMO; PRADO, 2007).

Assim, resíduos agroindustriais vêm sendo utilizados na elaboração de tecnologias de tratamento de efluentes, auxiliando empresas a se adequarem às leis ambientais em vigor, de tal forma que seus efluentes estejam em conformidade aos padrões exigidos, sendo economicamente viável ao processo produtivo e principalmente sem agressão ao meio ambiente (ROSSATO *et al.*, 2014).

Adsorção é um processo de transferência de massa que estuda a capacidade de certos sólidos de condensar certas substâncias em fluidos líquidos ou gasosos em sua superfície, de forma que os componentes desses fluidos possam ser separados. Após adsorção dos componentes do fluido, estes se concentram na superfície externa do adsorvente que favorecerá o processo de adsorção ao se ter uma maior superfície externa por unidade de massa sólida. Portanto, adsorvente ou adsorbente é geralmente um sólido com partículas porosas e adsorvato ou adsorbato são as substâncias que se acumulam na interface do material (RUTHVEN, 1984).

A utilização de resíduos agroindustriais como adsorventes para a recuperação de efluentes industriais tem se tornado uma prática cada dia mais viável (POLLARD; THOMPSON; CONNACHIE, 1995). Um dos principais adsorventes utilizado para a remoção de compostos orgânicos e íons metálicos é o carvão ativado, no entanto, o alto custo deste material é um sério problema (GUPTA; PATHANIA; SHARMA, 2003; POLLARD; THOMPSON; CONNACHIE, 1995). A busca por novos materiais de origem biológica, de fonte renovável, baixo custo, fácil manuseio e menor impacto ambiental vem sendo incentivada para este objetivo (SAEED; AKHTER; IQBAL, 2005; HORSFALL; ABIA; SPIFF, 2006; AGARWAL; BHUPTAWAT; CHAUDHARI, 2006). Como exemplo, podemos encontrar na literatura trabalhos com resíduos de cenoura; cascas de amendoim; arroz; nozes; bagaço de cana-de-açúcar, entre outros

(NASERNEJAD *et al.*, 2005; SINGH; HASAN; RASTOGI, 2005; KIM *et al.*, 2001; JUNIOR *et al.*, 2007).

No Brasil o desperdício de coco verde é muito elevado. Segundo o boletim de informações BBC News (2014), Francisco Porto, presidente do Sindcoco, diz que por volta de 1 bilhão de cocos verdes são produzidos, mas apenas 10% é reciclado, tornando-se necessário buscar meios relevantes para destinação do montante que não é utilizado.

Assim, o uso do pó da casca de coco verde como bioissorvente de metais, para o tratamento de efluentes, é uma forma de aproveitamento viável tanto na reutilização de resíduos sólidos quanto no tratamento de efluentes (SOUSA *et al.*, 2007).

Além da importância da aplicação destes novos materiais adsorventes de metais pesados na área da engenharia, o desenvolvimento de estudos acadêmicos gera um importante aporte na inovação tecnológica no tratamento de efluentes, principalmente oriundos de indústrias do Estado do Maranhão. Na literatura são observados poucos estudos realizados por pesquisadores do Estado, o que motivou o desenvolvimento deste trabalho, focando na obtenção de resultados promissores para o fortalecimento da área em Ciência e Tecnologia no Estado de Maranhão.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a capacidade de adsorção da fibra de coco para aplicação na descontaminação de efluentes aquosos contendo o metal cobre.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar a eficiência da fibra de coco verde na remoção do íon metálico cobre por processo em batelada;
- Estudar os efeitos da concentração das fibras, do pH, da velocidade de agitação e do tempo na adsorção de cobre;
- Avaliar a significância estatística nos efeitos das variáveis, bem como a otimização dos níveis empregados no planejamento.



### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Metais pesados

A indústria tem cada vez mais se preocupado em reduzir os impactos causados ao meio ambiente por intermédio de seus processos químicos industriais. Diante disso, a comunidade científica vem cada vez mais se preocupando em adequar esses processos à química verde diminuindo impactos ambientais. A busca por novas técnicas para reutilização e recuperação de efluentes está acelerada e as indústrias buscam se adaptar ao cenário para reduzir problemas ambientais, como a poluição. Os metais pesados são considerados poluentes de elevada toxicidade, pois mesmo em baixas concentrações já representam riscos à saúde humana e podem comprometer a capacidade autodepurativa das águas (ROE UTVIK, 1999; OGP, 2005).

Metais pesados na tabela periódica, são aqueles situados entre o Cobre (Cu) e o Chumbo (Pb) cujas densidades é superior a  $6\text{g/cm}^3$  (GIMBERT *et al.*, 2007). Por conta de sua natureza química, como reatividade, por exemplo, o organismo humano não consegue eliminá-los de maneira eficaz. Metais pesados podem ser perigosos ao ser humano e seu grau de perigo depende da concentração presente no organismo (COLACIOPPO, 2001; YOKEL, 2006).

#### 3.2 Métodos de remoção de metais pesados

Dois fatores principais são levados em consideração no que diz respeito a escolha de um método de remoção, são eles: economia e concentrações de metais pesados. As técnicas mais utilizadas na remoção de metais pesados são: oxidação, redução, biorremediação, osmose reversa, tratamento eletroquímico, coagulação, amaciamento de cal, precipitação, filtração de membrana, permuta iônica e adsorção (FU, WANG, 2011; AWUAL *et al.*, 2013; PERIC, TRGO, MEDVIDOVIC, 2004; AL-RASHDI, SOMERFIELD, HILAL, 2011).

### 3.2.1 ADSORÇÃO

Com o nível elevado de contaminações com substâncias orgânicas e inorgânicas causadas pela ação do homem, criou-se a necessidade de se desenvolver novas tecnologias para remoção desses poluentes encontrados em resíduos líquidos e gasosos (GAMA, 2016).

Diante de uma política ambiental cada vez mais severa, na qual se tem buscado o estabelecimento de padrões de concentração cada vez menores para os poluentes presentes nos efluentes, as indústrias têm sido levadas a ajustar os processos existentes, por meio da adoção de procedimentos que visam a menor geração ou a remoção de elementos tóxicos dos efluentes industriais (JIMENEZ, DAL BOSCO; CARVALHO, 2004, p. 734).

Essas medidas têm se tornado cada vez mais rigorosas, afim de diminuir esses impactos causados pela ação humana ao meio ambiente e a sociedade. Segundo Abreu (1999), a definição de adsorção resume-se a um processo de transferência de componentes de um fluido (líquido ou gás) para a superfície de um sólido, muito visto em processos de separação, remoção de impurezas, catálise, dentre outros. Há uma grande disponibilidade de materiais que podem ser utilizados como adsorventes, porém, faz-se necessário um estudo aprofundado a despeito de cada um deles para a seleção correta do adsorvente para cada situação (CARVALHO, 2005).

Segundo Liu *et al.* (2006) a adsorção se sobressai das demais técnicas por possuir uma maior eficácia e por ser economicamente viável. Os biossorventes entram em cena como uma excelente alternativa para essa técnica, tornando-se mais atraente por se alinhar aos conceitos da química verde, principalmente ao se tratar de um resíduo orgânico. Biomateriais (EKMEKYAPAR *et al.*, 2006), bagaço de cana-de-açúcar (GURGEL; GIL, 2009) e fibras de coco (GONZALEZ *et al.*, 2008) são exemplos de adsorventes naturais que apresentaram elevado potencial na técnica de redução de íons metálicos da água. Sua eficácia se dá pela presença de grupos ácidos (carboxílicos e fenólicos) e grupos poliméricos (celulose, hemicelulose, lignina, pectina e proteínas) com centros ativos para receber o metal (CASTRO *et al.*, 2011).

O uso de fibras de coco para o método de adsorção se mostra muito eficaz, pois estas, além de estarem alinhadas aos conceitos da química verde, são economicamente

viáveis (LIU *et al.*, 2006; MOBASSHERPOUR *et al.*, 2012). No Brasil o desperdício deste produto é muito elevado, chegando a bilhão de cocos verdes sendo produzidos e apenas 10% sendo reciclado (BBC NEWS, 2014).

Assim, o uso do pó da casca de coco verde como bioissorvente de metais, para o tratamento de efluentes, é uma forma de aproveitamento viável tanto na reutilização de resíduos sólidos quanto no tratamento de efluentes (SOUSA *et al.*, 2007).

### 3.2.1.1 Propriedades dos materiais adsorventes

Nos resíduos orgânicos encontram-se polissacarídeos (polímeros estéreo-regulares de açúcares), conhecidos por biopolímeros estáveis, modificáveis e hidrofílicos. Segundo Wang *et al.* (2006) esses componentes são: quelantes, quirais, atóxicos, biodegradáveis, altamente reativos e com capacidade de adsorção. A adsorção está associada a alta hidrofílicidade do polímero devido a grupos hidroxila, presença de muitos grupos funcionais (hidroxila, grupo acetamido), elevada reatividade destes grupos e uma estrutura flexível.

#### 3.2.1.1.1 Método de Bioissorção

A procura por novas tecnologias de tratamento de efluentes tem tido o foco no uso de biomassa como material bioissorvente e vem ganhando credibilidade por apresentar um bom desempenho (MONTEIRO, 2009). O uso desses bioissorventes tem sido destaque devido sua eficiência e por contribuir positivamente junto as necessidades ambientais. Além de tratar com praticidade problemas de poluição hídrica, ainda se encaixam no aproveitamento dos resíduos industriais que poluem o meio ambiente (DA SILVA; PIRES, 2014). Por definição, bioissorção é a remoção de espécies, compostos e particulados metálicos de uma solução por material biológico (bioissorvente) (CALFA; TOREM, 2007).

### 3.2.1.2 Fatores que afetam a adsorção

Dentre alguns fatores que podem influenciar no processo de adsorção, podemos citar: pH, área superficial, velocidade de agitação e tempo de agitação.

O efeito do pH pode ocasionar em uma maior ou menor distribuição das espécies químicas, segundo a natureza de cada material adsorvente. De acordo com Toledo *et al.* (2005), o pH determina a carga da superfície do adsorvente, sendo que também conduz interações elétricas e estáticas entre adsorvato e adsorvente. O pH da solução é um dos fatores predominantes do processo quando o assunto é adsorção de metais pesados por biomassa, sendo que a especiação do metal na solução depende do pH e a carga dos sítios ativos na superfície pode mudar dependendo deste valor (ESPOSITO; PAGNANELLI; VEGLIO, 2002; LOUKIDOU *et al.*, 2003).

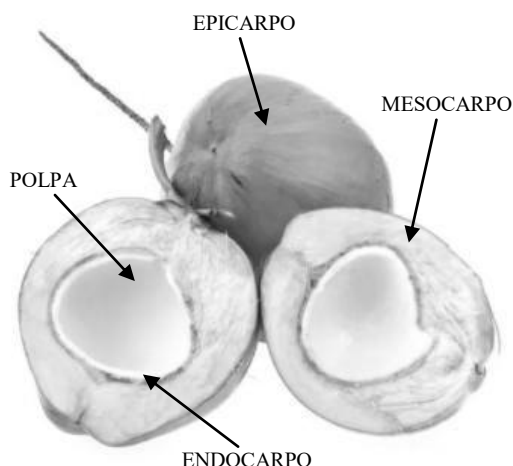
A capacidade máxima do processo de adsorção é proporcional à área superficial, tendo em vista que a adsorção é um fenômeno de superfície. A resistência a difusão é menor quando se tem partículas maiores e grande parte da superfície interna da partícula não se disponibiliza para adsorção (SEKAR; SAKTHI; RENGARAJ, 2004).

### **3.3 Coco (*Cocos nucifera L.*)**

#### **3.3.1 CARACTERÍSTICAS BOTÂNICAS**

Pertencente à família Palmae, o coqueiro (*Cocos nucifera L.*) é uma das mais importantes da classe Monocotyledoneae. O endocarpo é a camada que envolve a semente, que possui aspecto lenhoso e a medida do seu amadurecimento vai tornando-se rígido. A polpa também é chamada de albumén ou endosperma sólido, é a parte interna carnosa, branca, consistente ou gelatinosa, depende do grau de maturação do fruto. O albumén líquido é a água do coco (SANTANA, 2012). A casca do coco, tanto faz se verde ou maduro, é composta por uma fração de fibras e outra denominada de pó (CORRADINI *et al.*, 2009). A fibra é lignocelulósica obtida a partir do mesocarpo fibroso do coco, fruto do coqueiro (*Cocos nucifera L.*) (ISHIZAKI *et al.*, 2006). A Figura 1 demonstra o fruto do coqueiro e suas partes constituintes.

Figura 1 - Coco e seus constituintes



Fonte : Pesquisa direta, EMBRAPA (2021)

### 3.3.1.1 Fibras de coco

As fibras de coco são constituídas por celulose, lignina, hemicelulose, pectina e minerais. A celulose é o constituinte que mais se destaca, dando resistência as fibras. Já a lignina é um polímero que liga as fibras celulósicas entre si, responsável pela resistência à compressão ao tecido que envolve o coco e também as fibras, auxiliando na proteção aos carboidratos (açúcares) contra danos físicos e químicos que possam ocorrer. Já a hemicelulose faz a ligação entre a celulose e a lignina, enquanto que a pectina possui função aglutinante (ROCHA *et al.*, 2015).

Essas fibras também possuem importantes funções na molhabilidade e tensão superficial. Comparadas com outras fibras citadas na literatura, as fibras de coco possuem maior concentração de átomos de carbono, fato esse que pode ser explicado por duas características do material: conter cera rica em hidrocarbonetos na cutícula da fibra e lignina presente na superfície (BLEDZKI; MAMUN; VOLK, 2010). Materiais lignocelulósicos apresentam características importantes como: isolantes elétrico e térmico, pouca contração e expansão térmica, propriedades acústicas e resistência a forças aplicadas sobre a fibra (HON, 1996).

### 3.4 Análise estatística

#### 3.4.1 PLANEJAMENTO FATORIAL $2^k$

Dentre os variados tipos de planejamentos experimentais, os sistemas de planejamento fatoriais são destaques, pois os mesmos permitem uma avaliação simultânea dos efeitos de uma quantidade grande de variáveis, a partir de um número reduzido de análises experimentais, com relação aos processos univariados (PERALTA-ZAMORA *et al.*, 2005).

O planejamento fatorial  $2^k$  é muito útil em estágios iniciais de trabalhos experimentais, quando muitos fatores são passíveis de investigação e amplamente usado em ensaios para seleção de fatores (MONTGOMERY, 2005). No caso do planejamento fatorial  $2^4$  se tem 4 variáveis,  $2^4 = 16$ , ou seja, 16 experimentos devem ser realizados.

O planejamento fatorial apresenta inúmeras vantagens, dentre elas destacam-se as seguintes (BUTTON, 2005):

- número de ensaios reduzidos sem prejuízo da qualidade da informação;
- estudo simultâneo de várias variáveis, especificando seus efeitos;
- determinação da confiabilidade dos resultados;
- seleção das variáveis que influenciam um processo com número reduzido de ensaios;
- representação do processo em estudo por meio de expressões matemáticas;
- conclusões elaboradas a partir de resultados qualitativos.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Matéria Prima

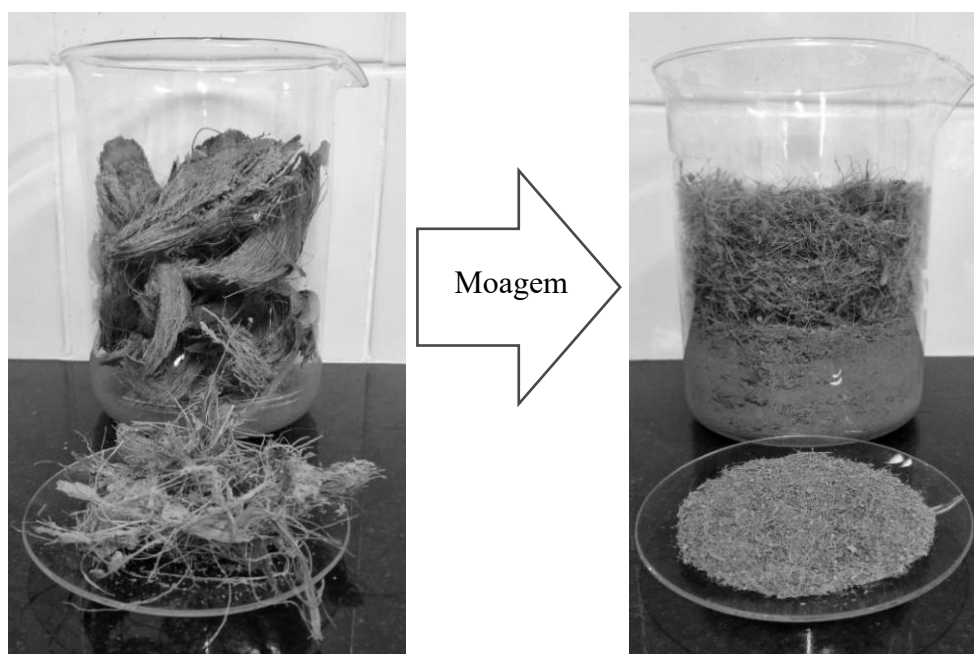
As fibras de coco foram extraídas de frutos adquiridos em quiosques no Anel Viário, região central de São Luís - MA.

### 4.2 Preparação do sistema adsorvente

Foram extraídas fibras de oito cocos, do mesocarpo, parte espessa fibrosa do fruto e então foram levadas a uma estufa para serem secas. O processo de secagem se deu por uma semana a temperatura de aproximadamente 60°C.

Após o processo de secagem, as fibras foram levadas para moagem, com a finalidade de se obter um estado em pó. O moinho utilizado foi o moinho do tipo martelo TECNAL modelo TE-330. A Figura 2 demonstra as fibras de coco antes e depois de serem moídas.

Figura 2 - Fibras de coco antes e após processo de moagem



Fonte: Própria autora (2021)

## 4.3 Preparação das soluções

### 4.3.1 SOLUÇÃO DE COBRE

Preparou-se uma solução padrão contendo 4,54 mg/L de cobre a partir do reagente analítico Sulfato de Cobre II (ICO) Anidro ( $\text{CuSO}_4$ ), industrializado por ISO FAR.

Pesou-se 0,058 g de sulfato de cobre em uma balança analítica e diluiu-se com água destilada para um volume total de 5L. Agitou-se e deixou-se em repouso durante 24 horas.

### 4.3.2 SOLUÇÃO DE NaOH A 10% (M/V) PARA O AJUSTE DE pH

O preparo da solução alcalina para correção de pH foi realizado em um balão volumétrico de 100 mL, na qual diluiu-se 40 g de hidróxido de sódio 50% em 60 mL de água destilada e aferiu-se para o volume total de 100 mL.

## 4.4 Planejamento dos experimentos por análise fatorial $2^4$ completo

O planejamento se deu por análise fatorial  $2^4$  completo, através do *software Statistica*, utilizando-se como variáveis independentes a concentração das fibras, pH, velocidade de agitação e o tempo de agitação. As análises foram realizadas por batelada no equipamento Jartest Analógico, marca Alfakit, modelo AT-403, fabricado no Brasil, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Equipamento Jartest Analógico



Fonte: Própria autora (2021)



Foram realizados 17 experimentos e as leituras de concentração foram feitas em triplicata no equipamento espectrofotômetro, marca HACH, modelo DR900, fabricado nos Estados Unidos, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Espectrofotômetro Digital Hach DR900 Colorímetro



Fonte: Própria autora (2021)

A Tabela 1 mostra o planejamento fatorial  $2^4$  detalhado com as variáveis independentes de estudo.

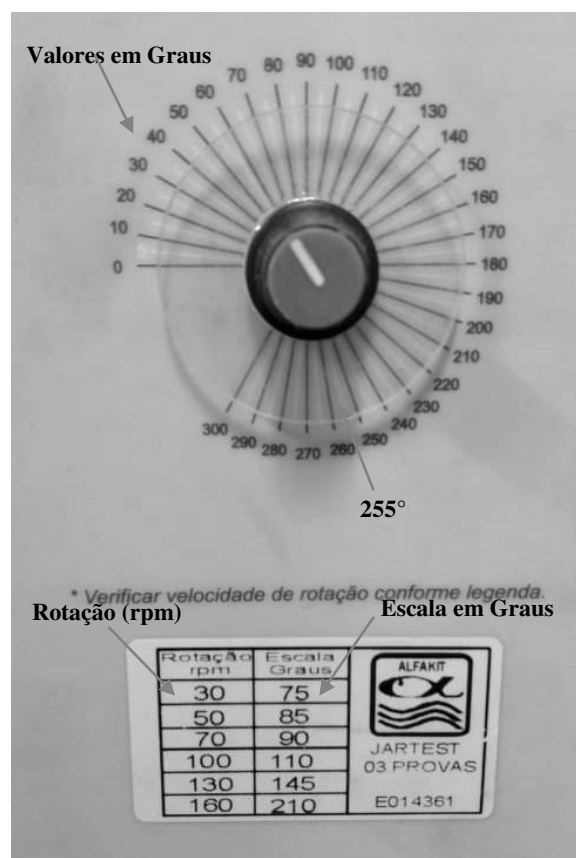
Tabela 1 - Planejamento fatorial  $2^4$  completo

Amostras	Concentração de fibra (mg)	pH	Velocidade de agitação (rpm)	Tempo de agitação (min)
1	500	5	50	120
2	1000	5	50	120
3	500	9	50	120
4	1000	9	50	120
5	500	5	165	120
6	1000	5	165	120
7	500	9	165	120
8	1000	9	165	120
9	500	5	50	240
10	1000	5	50	240
11	500	9	50	240
12	1000	9	50	240
13	500	5	165	240
14	1000	5	165	240
15	500	9	165	240
16	1000	9	165	240
17 (C)	750	7	107	180

Fonte: Própria autora (2021)

A rotação em rpm do equipamento Jarrest possui correspondência com escala em graus ( $^{\circ}$ ). No planejamento inicial, a velocidade de agitação referente as análises 5, 6, 7, 8, 13, 14, 15 e 16 foi de 150 rpm e no ponto central foi de 100 rpm. Houve um equívoco no início dos experimentos que fez com que as análises das amostras 5, 6 e 7, no qual a rotação de análise deveria ser 150 rpm, fosse realizada na Escala em Graus, valor este, sem correspondência a uma rotação em rpm dos pontos calibrados do equipamento, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Velocidade de rotação do Jarrest



Fonte: Própria autora (2021)

Devido a essa situação, fez-se uma modelagem, analisando-se a linha de tendência dos pontos calibrados do equipamento, através do método FOPDT (First-Order-Plus-Dead-Time), que é uma estratégia utilizada em controle de processos quando se tem uma variável dependente a ser controlada e não se sabe como ela é influenciada por outra variável independente, ou seja, não há uma equação explícita desta relação. Para tal processo, se faz uma perturbação degrau na variável independente e analisa-se a consequência na variável dependente (OGUNNAIKE; RAY, 1994).

Utilizando esta metodologia, avaliou-se a equivalência em rpm que é apresentada pelo modelo da Equação (1), correspondente a 255°, obtendo um valor de aproximadamente 165 rpm, como mostrado na Figura 6.

$$y(t) = \begin{cases} 0; & t < \alpha \\ AK \left(1 - e^{-\frac{t-\alpha}{\tau}}\right); & t \geq \alpha \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

$y(t)$  = representa a função do sistema;

$K$  = é o ganho, parâmetro inerente ao processo;

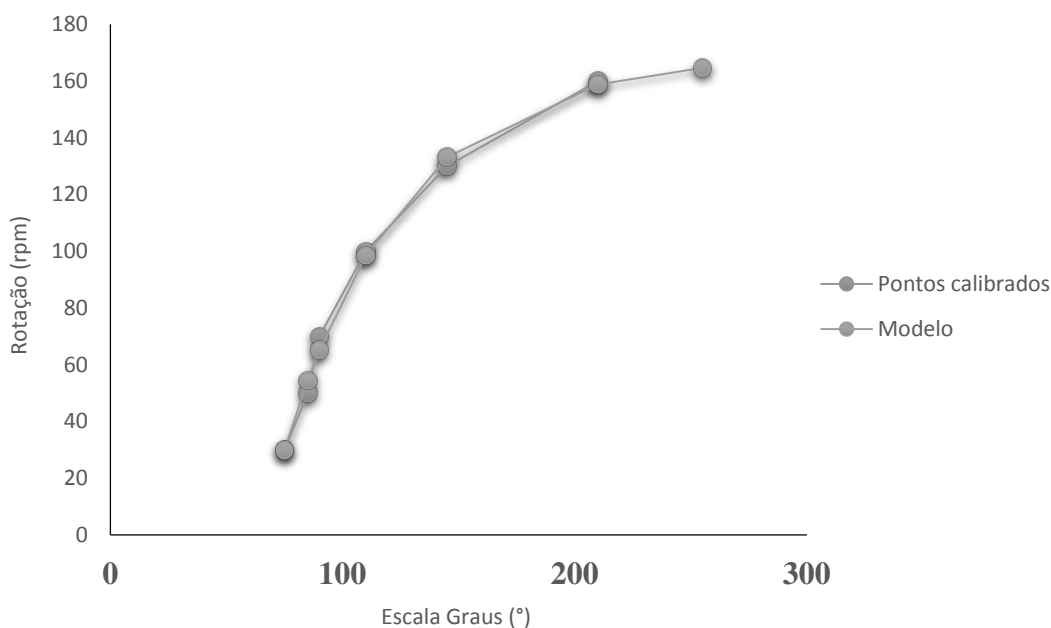
$A$  = degrau feito na variável independente;

$\alpha$  = tempo morto;

$\tau$  = é a constante de tempo, parâmetro inerente ao processo;

$t$  = tempo

Figura 6 – Gráfico da modelagem da curva de rotação do equipamento Jartest



Fonte: Autoria própria (2021)

Após realizado a análise de modelagem, analisou-se a viabilidade de se repetir as três análises com a rotação do planejamento inicial ou se alteraria a rotação equivalente dos ensaios seguintes. Foi levada em consideração a quantidade de amostra padrão disponível, o tempo de análise, e os reagentes para determinação de cobre do

equipamento DR900 e concluiu-se que o melhor a se fazer seria alterar a rotação equivalente dos experimentos seguintes e alterar a rotação do ensaio que corresponderia ao ponto central, tendo em vista que a rotação deste é a média das demais rotações, onde no planejamento inicial era 100 rpm, após modelagem da curva passou a ser 107 rpm, como mostra a Tabela 1.

#### 4.5 Realização dos ensaios

Seguindo rigorosamente o planejamento pré-estabelecido, foram feitos 17 experimentos em batelada no equipamento Jartest, variando-se em cada batelada uma determinada rotação e o tempo de agitação das amostras, como previstas no planejamento. Antes de submeter as amostras a agitação, corrigiu-se o pH para 9 com a solução a 10% de NaOH das amostras 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15 e 16. O volume utilizado da solução padrão de cobre por amostra foi de 250 mL.

Em béqueres de 1 L, foram adicionados 250 mL da solução padrão de cobre. Em seguida, adicionou-se as massas equivalentes à cada concentração de fibra (em cada béquer) e os submeteu a agitação constante, pelo tempo determinado pelo planejamento mostrado na Tabela 1.

Para finalizar, as soluções foram filtradas, Figura 7, para posterior análise de concentração no equipamento DR900. As leituras de absorbância foram feitas em triplicata.

Figura 7 - Processo de filtração das fibras de coco após ensaio



Fonte: Própria autora (2021)

## 4.6 Experimento de adsorção

Os resultados das análises de adsorção do metal foram verificados através das medidas de absorbância das soluções filtradas, utilizando o Espectrofotômetro DR900, cujo comprimento de onda variou de 420 a 610 nm. As análises em triplicata estão evidenciadas na Figura 8.

Figura 8 - Leitura dos resultados em triplicata no equipamento DR900



Fonte: Própria autora (2021)

### 4.6.1 MÉTODO DE ANÁLISE DO COBRE NO EQUIPAMENTO DR900

O método utilizado para detecção de cobre no equipamento Hack DR900 foi o Método 8506 Cobre, que consiste em adicionar o reagente em pó da marca Hack, que faz com que o cobre reaja com o sal do ácido bicinconínico, formando um complexo de coloração púrpura proporcional à concentração de cobre, como pode-se observar na Figura 8. Os resultados do teste foram medidos a **560 nm** e os limites de leitura de concentração de cobre do equipamento são de 0,04 a 5,00 mg/L.

Não foi necessário fazer uma curva de calibração para precisão da leitura dos resultados, pois o equipamento DR900 já vem com um conjunto robusto e completo de programas armazenados, onde o comprimento de onda é feito automático, baseado na seleção do método (HACH, 2. ed. Estados Unidos da América. p. 49, 51. 2013). Entretanto, há possibilidade de alteração da curva seguindo o método 8506 que explica a comprovação de precisão do método, instrui como é feito a coleta, armazenamento,

preservação de amostras e método de preparo de soluções padrões. O método descreve as substâncias interferentes, os níveis de interferência dessas substâncias e tratamentos sugeridos para reagentes em pó.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Estudo da adsorção

O estudo da remoção de íons de cobre por fibra de coco partiu do estudo prévio realizado conforme o planejamento experimental fatorial 2<sup>4</sup>, descrito na Tabela 1. No planejamento foram analisados o pH, a velocidade de agitação (rpm), concentração de adsorvente (mg/mL) e o tempo de contato (min). A concentração do metal nas soluções aquosas foi quantificada por espectrofotômetro (GREGG; SING, 1982) e a porcentagem de remoção foi calculada usando a Equação (2):

$$\text{Metal Removido (\%)} = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

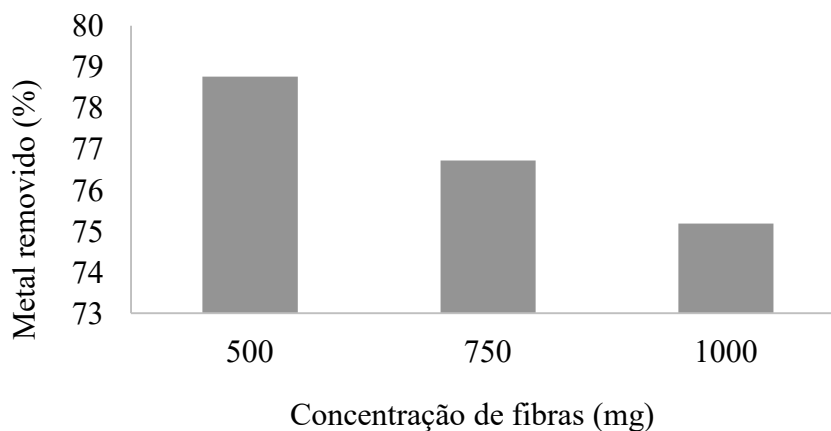
$C_o$  = Concentração inicial de íons metálicos (mg.L<sup>-1</sup>) na solução, antes do contato com o biossorvente;

$C_f$  = Concentração final de íons metálicos (mg.L<sup>-1</sup>) na solução após o contato com o biossorvente.

#### 5.1.1 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE FIBRAS DE COCO NA REMOÇÃO DO ÍON Cu<sup>2+</sup>

Observa-se na Figura 9 que o aumento da concentração de fibras não foi favorável para o aumento da taxa de adsorção. O aumento da quantidade de fibras de 500 mg para 1000 mg na solução fez com que a média de remoção do metal tivesse um decréscimo de 78,76% para 75,18%, revelando que uma menor quantidade de adsorvente refletiu em uma maior quantidade de metal adsorvido. Entretanto, Ermekyapar *et al.* (2012) fizeram um estudo sobre a remoção de chumbo, na qual utilizaram biomassa de líquens em diferentes concentrações, e constataram que a adsorção aumenta com o aumento da concentração de adsorvente, apresentando valores percentuais de adsorção superiores a 80%. Roumié *et al.* (2019) também demonstraram em seu estudo uma análise da adsorção de ferro pelo adsorvente de fibras de coco, mostrando que ao aumentar a concentração de fibras, aumentou-se a capacidade adsortiva do metal.

Figura 9- Metal removido em função da concentração de fibras de coco



Fonte: Própria autora (2021)

Essa variação de resultados pode ser explicada levando-se em consideração a área superficial do adsorvente, pois a máxima adsorção é proporcional à área superficial específica. Para partículas maiores, a resistência à difusão é menor e grande parte da superfície interna da partícula do adsorvente não é disponibilizada para adsorção (SEKAR; SAKTHI; RENGARAJ, 2004). Embora, aumentando-se a concentração de adsorvente se tenha um maior número de sítios ativos, esse aumento pode resultar na aglomeração das fibras pela quantidade de solução, dificultando a entrada do adsorvato no adsorvente.

Na pesquisa apresentada por Roumié *et al.* (2019), foi estudada a adsorção de fibra de coco para adsorção de Fe(II) em solução. A concentração de fibras utilizada variou de 200 mg a 400 mg e mostrou ter um aumento de adsorção ao aumentar a concentração do adsorvente, indo de 57,23% para 67% de adsorção. Neste estudo, a concentração de fibras variou de 500 mg a 1000 mg e mostrou que ao aumentar a concentração de adsorvente, diminuiu-se a adsorção do metal, variando de 78,76% para 75,18%. Pela análise desses dados, percebe-se que há um limite de concentração de fibras para que se tenha um ponto ótimo na remoção de metais, um equilíbrio de adsorção. Esse ponto ótimo pode estar na faixa de concentração de fibras em torno de 500 mg que foi onde obteve-se maior adsorção do metal em estudo. Segundo Nascimento *et al.*, (2014), quando um sólido (adsorvente) entra em contato com um certo volume de líquido que contém um soluto adsorvível (adsorvato), a adsorção vai acontecer até que o equilíbrio seja atingido.



A Figura 10 mostra a imagem de todas as amostras que foram analisadas no experimento. As de coloração mais intensa são as que continham maior concentração de adsorvente. Pela coloração dessas amostras de maior concentração, percebeu-se que houve uma maior extração dos constituintes das fibras na solução, o que pode ter influenciado no potencial de adsorção do metal presente na solução. Segundo Cooney (1999) a adsorção depende de muitos fatores e entre estes está a natureza do adsorvente, que abrange área superficial, tamanho do poro, densidade, grupos funcionais presentes na superfície e hidrofobicidade do material. Por outro lado, a natureza do adsorvato que inclui a polaridade, o tamanho da molécula, a solubilidade e a acidez ou basicidade.

Figura 10 – Amostras que foram analisadas



Fonte: Própria autora (2021)

Embora que inicialmente o pH lido tenha estado na variação entre 5 e 9, o que pode ter acontecido com as amostras de maior concentração de fibras é a diminuição do pH após o processo de agitação, onde o maior número dos constituintes desprendidos e presentes em solução tenham acidificado o meio e dificultado a adsorção do metal, pois segundo Espasandin *et al.* (2019) a fibra bruta é um material achatado e com baixa porosidade e que ao ser submetida em meio mais acidificado, as paredes da fibra entra em colapso por conta da desidratação, ocasionando assim o fechamento dos poros.

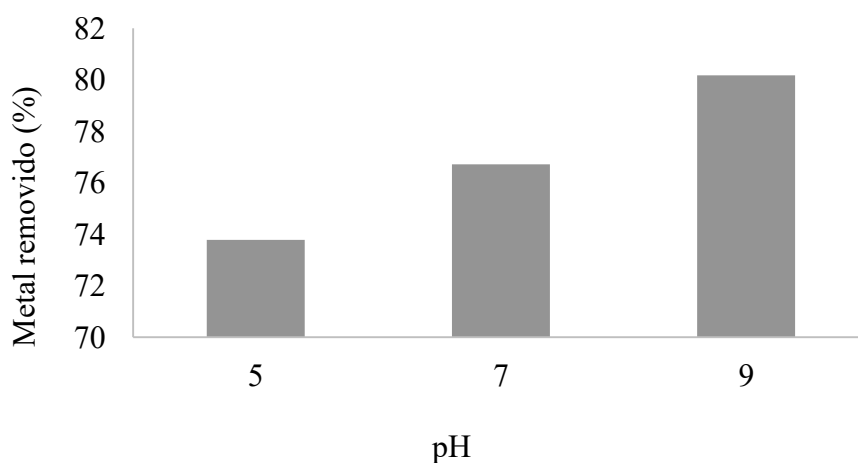
### 5.1.2 EFEITO DO pH NA REMOÇÃO DO ÍON $\text{Cu}^{2+}$ EM SOLUÇÃO

A Figura 11 mostra que a alteração para o meio básico levou a um aumento considerável da taxa de adsorção do metal removido, mostrando uma disparidade de 10% na adsorção, atingindo valores superiores a 80% para o pH 9. Uma das justificativas para tal diferença, está no pH ser um fator decisivo para a eficiência no

processo de adsorção, pois a carga superficial do adsorvente depende de sua composição e características intrínsecas. Se a carga superficial do adsorvente é positiva, o processo é propício para a adsorção de ânions, mas se a carga superficial do adsorvente é negativa, o processo torna-se propício para a adsorção de cátions (APEEL *et al.*, 2003).

Outra discussão pertinente, foi apresentada pelos autores Espasandin *et al.* (2019), que após um estudo de caracterização da fibra de coco, relataram que a fibra bruta é um material achatado e com baixa porosidade, e ao ser submetida ao meio ácido, as paredes da fibra entram em colapso por conta da desidratação, ocasionando assim o fechamento dos poros. Já em meio alcalino, os poros se expandem, contribuindo para o processo de adsorção. Em consonância a isto, o material fibroso ao entrar em contato com a solução aquosa pode adsorver íons  $\text{OH}^-$  ou  $\text{H}^+$ , alterando a carga superficial das partículas fazendo com que os grupos de superfície de cada sítio ativo do adsorvente possam dissociar ou associar prótons da solução. Em condições ácidas, quando associado a prótons na solução, a superfície do sítio ativo é carregada positivamente; em condições alcalinas, quando o próton é perdido para a solução, a superfície do sítio ativo é carregada negativamente (ČEROVIĆ *et al.*, 2007).

Figura 11 - Metal removido em função do pH.



Fonte: Própria autora (2021)

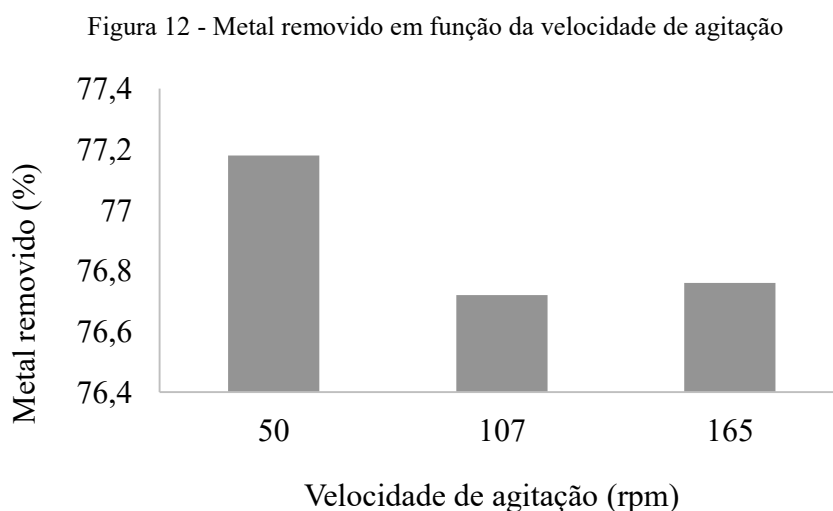
Outro fator importante está diretamente relacionado às características do adsorvente, como por exemplo, a área superficial e os grupos funcionais presentes na superfície (SOUSA, 2007). Solução de NaOH remove compostos, como a lignina, a pectina, gorduras e taninos, que cobrem a superfície do material (GU, 2009; BRÍGIDA; ROSA, 2003). A fibra de coco possui alto teor de lignina e celulose nas quais possuem

grupos hidroxila, metóxi e carboxílicos. Ao submeter o material celulósico em meio alcalino de solução de NaOH os compostos fenólicos solúveis presentes na fibra celulósica são retirados e os sítios ativos ficam mais disponíveis, melhorando o processo de adsorção (GURGEL, 2007; SALVADOR, 2009).

De modo de geral, o cobre, por ser um metal carregado positivamente, sujeita o favorecimento da remoção em meio alcalino, mostrando que a oposição das cargas do adsorvato e do adsorvente gerou uma maior interação eletrostática entre ambos, pois, se as cargas forem iguais, o processo de adsorção não seria eficiente devido à repulsão eletrostática (TOLEDO *et al.*, 2005; MUHAMAD *et al.*, 2010). Esta conclusão corrobora os resultados da Figura 11, e mostra a importância do parâmetro no processo de biossorção.

### 5.1.3 EFEITO DA VELOCIDADE DE AGITAÇÃO NA REMOÇÃO DO ÍON $\text{Cu}^{2+}$ EM SOLUÇÃO

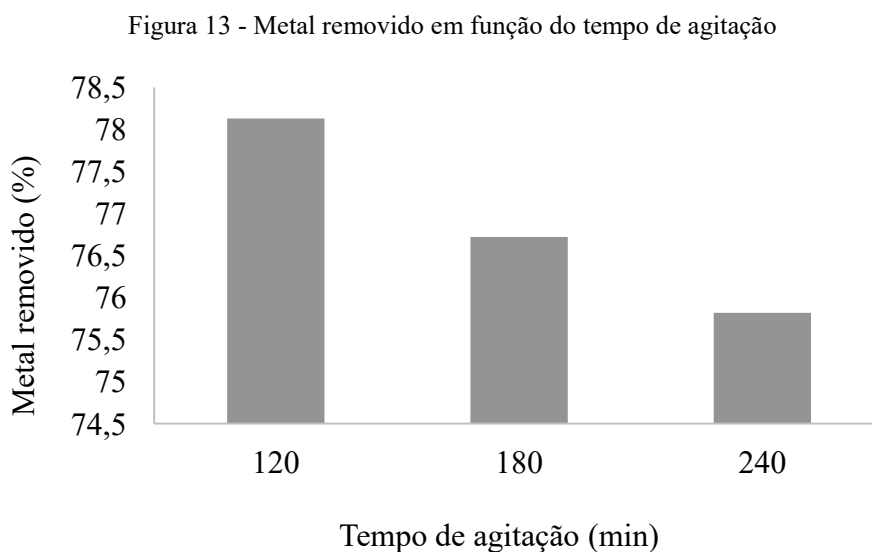
A Figura 12 representa a relação entre a quantidade de metal adsorvido pela velocidade de agitação do processo (rpm). Como pode-se observar, a velocidade de agitação influenciou positivamente na rotação de 50 rpm. Entretanto, ao alterar a velocidade de 165 rpm para 107 rpm, a velocidade influenciou negativamente. Estas constatações divergentes mostram que a difusividade interna é a etapa controladora do processo, pois segundo Fogler (1999) quando a etapa que controla o processo é a difusividade interna, a velocidade de agitação não será significativa na adsorção.



Fonte: Própria autora (2021)

#### 5.1.4 EFEITO DO TEMPO DE AGITAÇÃO NA REMOÇÃO DO ÍON $\text{Cu}^{2+}$ EM SOLUÇÃO

A Figura 13 representa a relação entre a quantidade de metal adsorvido pelo tempo de contato (min) da solução com o adsorvente. Pode-se observar que a taxa de metal removido diminui cerca de 5% quando se analisa os níveis extremos, 120 para 240 min, sugerindo que possivelmente os tempos utilizados no planejamento pertencem ao domínio no qual o equilíbrio do processo de adsorção acontece. A literatura (PERIC *et al.*, 2004; MOREIRA, 2010) sugere utilizar um tempo coerente para que o processo em estudo entre em equilíbrio, e segundo Nascimento *et al.* (2014) o tempo de contato é um parâmetro muito importante, pois este indica o comportamento cinético da adsorção de determinado adsorvente numa determinada concentração de adsorvato. Logo, para cada reação há um tempo no qual o sistema entra em equilíbrio.



Fonte: Própria autora (2021)

Os mesmos, Nascimento *et al.* (2014), mostraram o efeito do tempo de contato para a adsorção dos íons cobre no adsorvente de bagaço de coco em solução, e verificaram que a remoção do metal aumentava rapidamente nos estágios iniciais de adsorção do cobre e as taxas de remoção menores alcançam o equilíbrio após 40 minutos. Nos primeiros 2 minutos a remoção chegou aproximadamente a 50%. Em 10 minutos a remoção foi de 63%, correspondendo a um aumento de 26% em relação aos dois minutos iniciais, e em 20 minutos a remoção chegou a aproximadamente 65,5%,

correspondendo a um aumento menor, apenas 4% em relação ao tempo de 10 minutos. A cinética de adsorção para o cobre utilizando bagaço de coco chegou ao equilíbrio em 40 minutos com 69% de remoção e um aumento de 6% em relação ao tempo de 20 minutos.

Os resultados e as discussões literárias mostram que o tempo de contato das cargas do metal com a fibra de coco deve ser reavaliado através de um cinético do processo de adsorção.

## 5.2 Análise Estatística

### 5.2.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A análise estatística da remoção de íons de cobre por fibra coco partiu do estudo prévio realizado conforme o planejamento experimental fatorial  $2^4$ , descrito na Tabela 1. No planejamento foram analisados o pH, a velocidade de agitação (rpm), concentração de adsorvente (mg/mL) e tempo de contato (min), para nível de confiança de 95%.

Ao analisar os efeitos estatísticos estimados pelo programa *Statistica*, observou-se resultados promissores, pois a média geral do efeito de todo o experimento foi de aproximadamente 77%. O programa também mostrou que todas as variáveis são significativas estatisticamente, mostrando evidências substanciais de que as mudanças nos níveis empregadas para cada variável geraram respostas válidas nas alterações da variável dependente, remoção de metal. A equação 3 mostra o modelo estatístico que representa esse experimento, cujo coeficiente de determinação foi de 98%. O nível de confiança do planejamento foi de 95%.

$$MR(x_1, x_2, x_3, x_4) = (76,96 - 1,79x_1 + 3,19x_2 - 0,21x_3 - 1,16x_4 - 0,24x_1x_2 + 0,05x_1x_3 - 0,27x_1x_4 - 0,49x_2x_3 - 0,08x_2x_4 + 0,11x_3x_4) \quad (3)$$

Onde:

$MR$  = Metal removido (%);

$x_1$  = Concentração das fibras (mg);

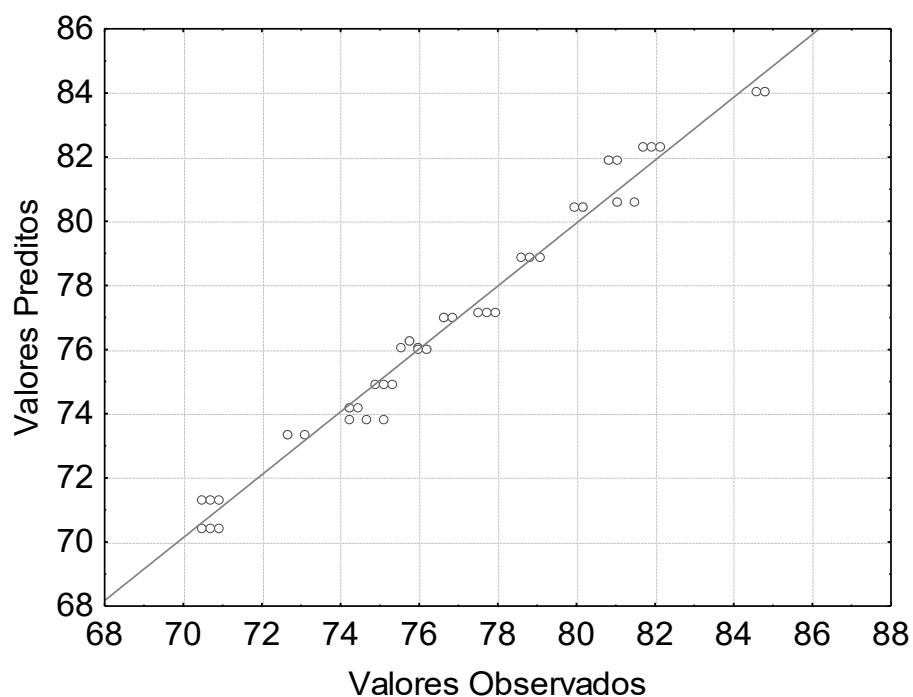
$x_2$  = pH;

$x_3$  = Velocidade de agitação (rpm);

$x_4$  = Tempo de agitação (min).

O gráfico da Figura 14 corrobora o modelo, mostrando a relação dos valores preditos pelos valores observados, e evidenciando o bom ajuste do modelo, com os valores dos dados experimentais próximos à curva.

Figura 14 - Relação dos valores preditos pelos valores observados.



Fonte: Própria autora (2021)

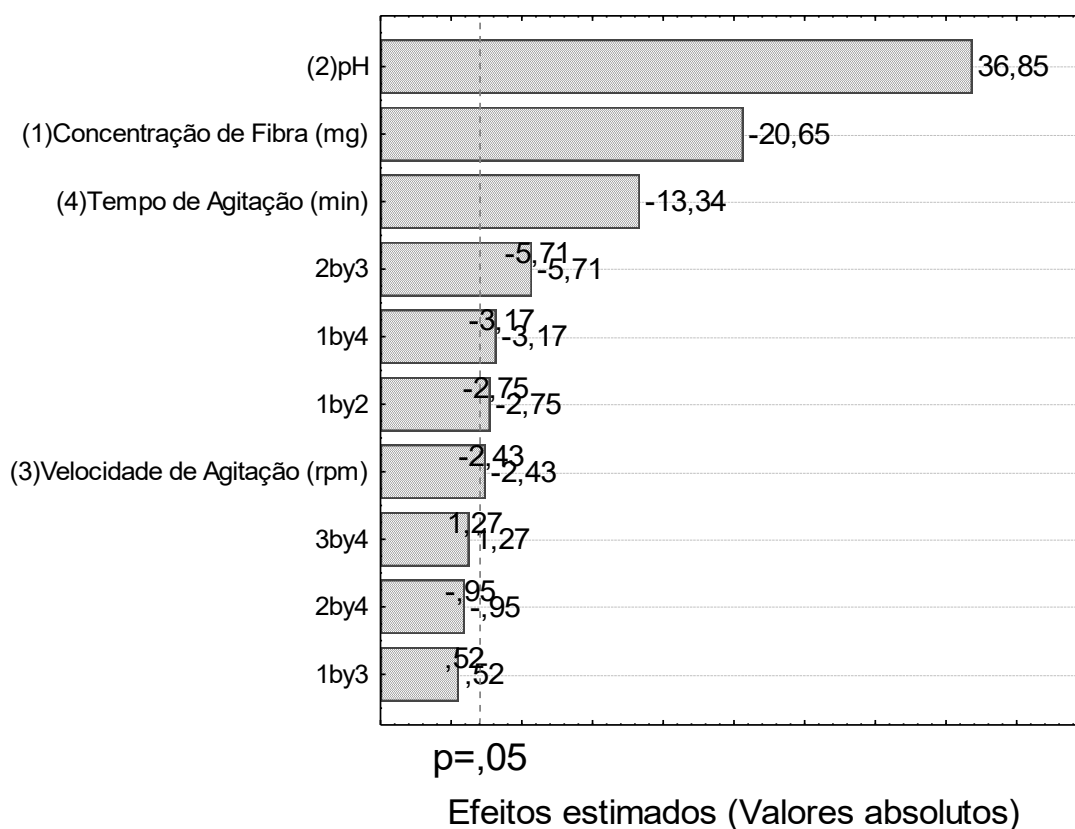
### 5.2.2 GRÁFICO DE PARETO

A Figura 15 mostra a análise estatística do gráfico de Pareto referente ao planejamento fatorial experimental  $2^4$  proposto, com o objetivo de avaliar a significância estatística das variáveis nos resultados de adsorção. Pode-se perceber que, para uma significância de 98%, a variação do pH, concentração de fibras, tempo de agitação e velocidade de agitação, influenciaram significativamente nos resultados. Observou-se que quem mais contribuiu para o aumento da remoção de cobre foi a mudança no pH, evidenciando o favorecimento da adsorção no pH básico. A variável

que menos favoreceu a remoção foi a concentração de fibras, visto o valor negativo no gráfico, confirmando a hipótese de aglomeração das fibras no processo.

As combinações das variáveis por pares, velocidade de agitação pelo tempo de agitação (3 por 4), pH pelo tempo de agitação (2x4) e concentração de fibras pela velocidade de agitação (1x3), não mostraram uma contribuição relevante no processo de adsorção, evidenciado que os parâmetros atuaram de forma independente, não havendo uma relação estatística de proporcionalidade que justificasse uma análise mais minuciosa dos parâmetros em conjunto. As combinações estatisticamente significantes serão discutidas nos gráficos de Superfície de Resposta.

Figura 15 - Gráfico de Pareto.



Fonte: Própria autora (2021)

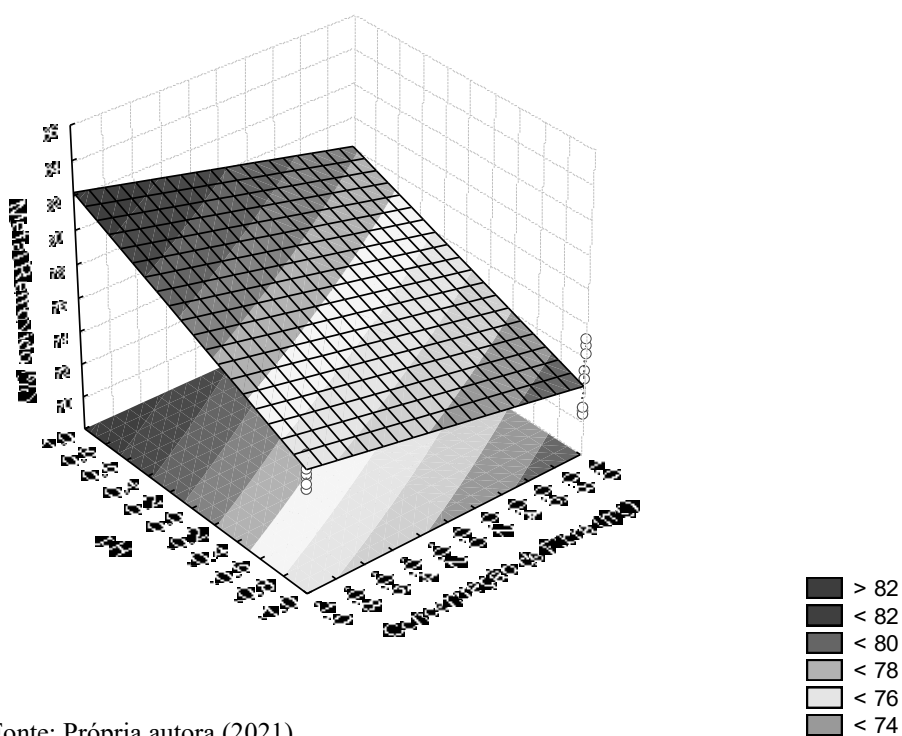
### 5.2.3 SUPERFÍCIES DE RESPOSTA

Os gráficos de Superfície de Resposta indicam as melhores orientações experimentais para a otimização das propriedades de adsorção na solução. A superfície vermelha corresponde à combinação ideal entre duas variáveis que levam ao aumento de

adsorção do metal, para as diferentes combinações das variáveis em estudo. Para esta discussão analisou-se os gráficos de Superfície de Resposta 1 por 2 (concentração x pH x metal removido), 1 por 4 (concentração x tempo x metal removido) e 2 por 3 (pH x velocidade x metal removido) que foram as relações que se mostram significativas estatisticamente na análise do gráfico de Pareto.

A Figura 16 mostra o gráfico de superfície de resposta da concentração e pH em relação a remoção de metal. Pode-se observar que o gráfico indica uma otimização do valor da remoção, quando os valores da concentração de fibra decaem, e a solução torna-se mais básica. Esta interpretação mostra a importância de um estudo cinético, visando encontrar um limite da concentração de fibras para o equilíbrio de adsorção do metal,

Figura 16 - Superfície de resposta da concentração e pH em relação a remoção do metal.



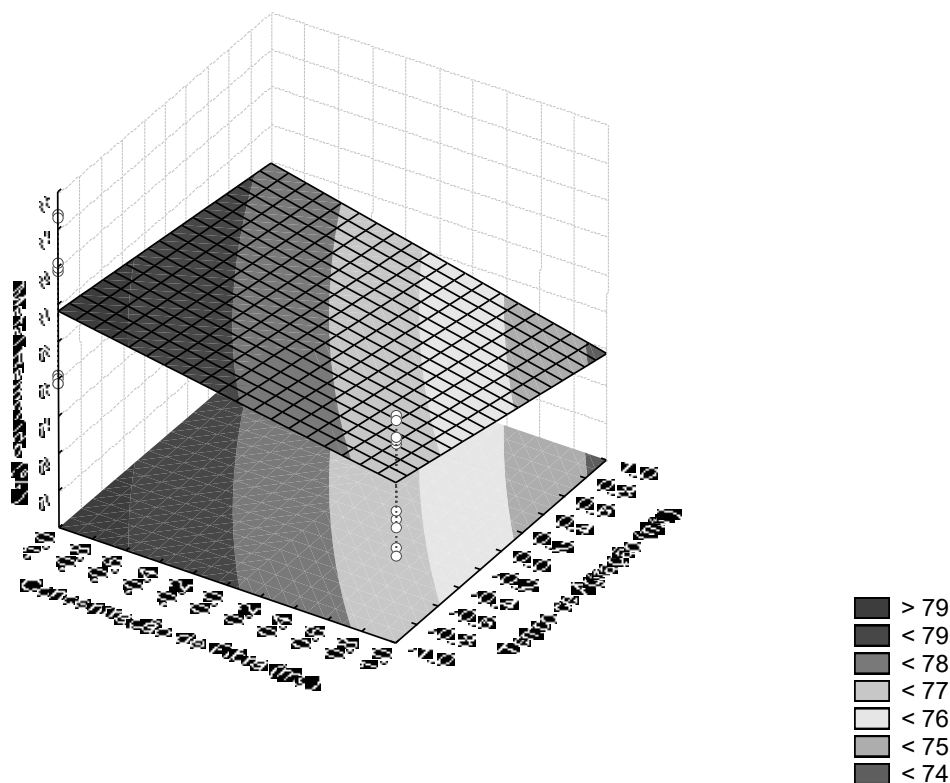
Fonte: Própria autora (2021)

A Figura 17 mostra o gráfico de superfície de resposta da concentração e tempo em relação à remoção de metal. Pode-se observar que o indicativo proposto pelo gráfico mostra que o ponto de otimização da remoção tende a se alcançar quando os valores de fibra e tempo estão nos níveis inferiores. Isso evidencia que o acréscimo na remoção não necessariamente deve-se à uma maior concentração de fibras, e que também, não há necessidade de se colocar o processo à tempos muito estendidos,



mostrando que há um equilíbrio de adsorção para o sistema, onde nesse meio há um ponto ótimo de adsorção.

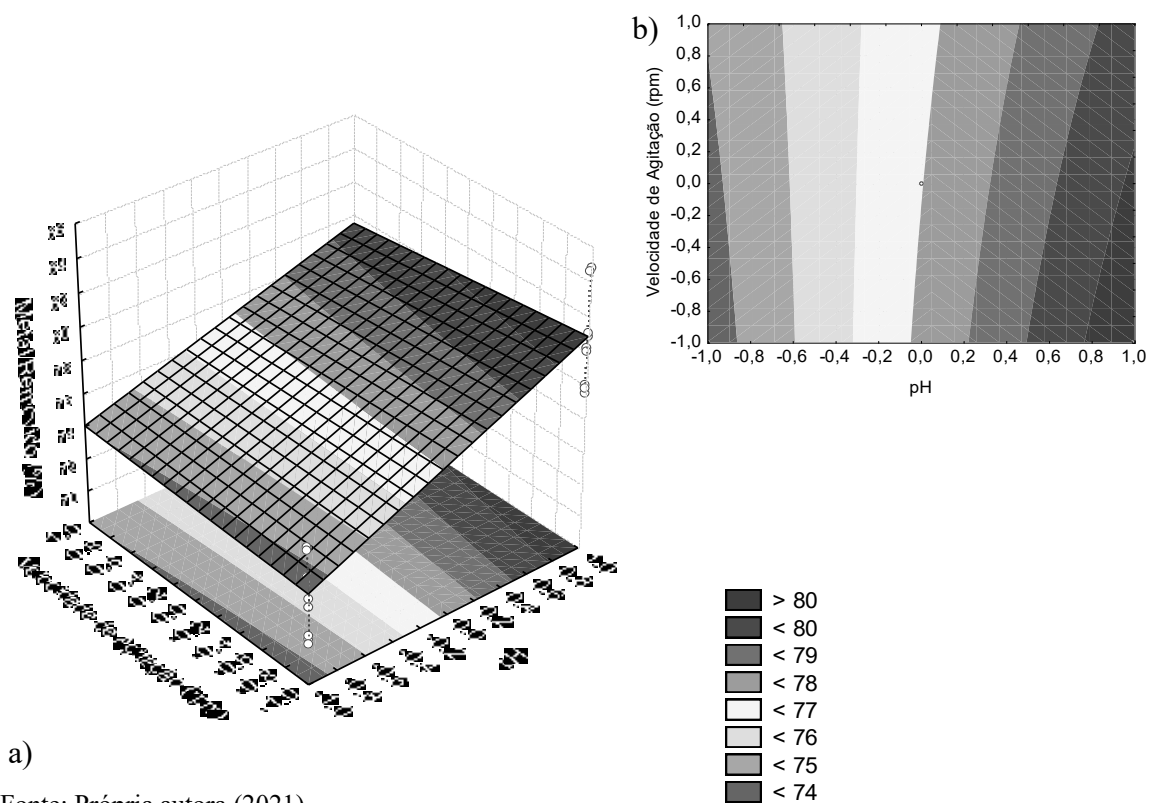
Figura 17 - Superfície de resposta da concentração e tempo em relação a remoção do metal.



Fonte: Própria autora (2021)

A Figura 18 mostra os gráficos de superfície de resposta do pH e velocidade de agitação em relação à remoção de metal. Pode-se observar que o gráfico indica uma otimização do valor da remoção quando os valores de pH aumentam independente dos valores de agitação. Observa-se que o ponto ótimo foi indicado para o nível superior da variável, evidenciando que no processo de adsorção em solução contendo o metal cobre, o meio alcalino proporciona melhores índices de remoção. Esta afirmação foi relatada pelos autores Gurgel (2007) e Salvador (2009) que explicaram em seus estudos que a fibra de coco possui alto teor de lignina e celulose nas quais possuem grupos hidroxila, metóxi e carboxílicos, e ao submeter o material celulósico em meio alcalino de solução de NaOH, os compostos fenólicos solúveis presentes na fibra celulósica são retirados e os sítios ativos ficam mais disponíveis, melhorando o processo de adsorção.

Figura 18 – Superfície de resposta (a) e curva de nível (b) do pH e velocidade de agitação em relação a remoção do metal.



Fonte: Própria autora (2021)

#### 5.2.4 COMPARAÇÃO DO MÉTODO DE ADSORÇÃO USANDO AS FIBRAS DE COCO COM TRATAMENTO QUÍMICO

A Figura 19 faz uma análise comparativa entre o percentual de remoção de cobre de uma solução feita em laboratório simulando um efluente contaminado com 4,54 ppm do metal, utilizando como material adsorvente fibras de coco, com o percentual de remoção de um efluente com 5,25 ppm de cobre, feito pelo método tradicional de tratamento físico-químico de coagulação/floculação. Os dados referentes ao resultado do processo de coagulação/floculação foram fornecidos por em uma empresa privada de São Luís – MA.

Figura 19 - Bioissorção versus Floculação



Fonte: Autoria própria (2021)

Ao comparar os métodos de bioissorção de fibras de coco com o método de floculação, observou-se que a bioissorção tem alta eficiência na remoção do cobre em efluentes, apresentando uma taxa em torno de 80% de remoção no seu ponto ótimo, 500 mg, 120 min, pH = 9 e 50 rpm, delineado pela análise estatística do planejamento, tendo em vista que a fibra não passou por nenhum tipo tratamento químico antes do processo. O método de floculação mostrou maior eficiência, em torno de 89% para a remoção do metal, porém, ao comparar os dois métodos, o estudo sugere que a mudança nas variáveis do planejamento sugerido pelas superfícies de otimização tendem à elevar a eficiência da fibra, podendo levar a valores igualitários ou superiores, como já relatado com outros metais na literatura. O método de floculação apresenta um maior custo, por depender do uso diversos produtos químicos, pois os tipos de coagulantes baseiam-se na sua eficiência, nos seus custos globais e no volume do lodo gerado após todo o processo (LIBÂNIO, PÀDUA, DI BERNARDO, 1997). Já para o processo de adsorção utilizando a fibra de coco, é uma forma de aproveitamento tanto na reutilização de resíduos sólidos, quanto no tratamento de efluentes, além de ser economicamente viável devido ao alto desperdício de coco no Brasil.

## 6 CONCLUSÃO

O uso de biossorventes como solução para o tratamento de efluentes vem crescendo cada dia mais e os resultados do presente trabalho confirmam sua total relevância, comprovando que a aplicação das fibras de coco como biossorvente possuem alta capacidade de adsorção de cobre em efluente, podendo ser utilizado para fins ambientais e econômicos, tendo em vista sua alta disponibilidade nacional.

A utilização de fibras de coco como material adsorvente em solução de Cu(II) possui maior capacidade de adsorção a baixas concentrações de fibra e meio alcalino. O maior potencial de adsorção se deu a  $\text{pH} = 9$ , onde a média da quantidade removida chegou a 80,17 %. As análises da influência dos parâmetros tempo de contato e velocidade de agitação mostraram-se inconclusivas e estatisticamente irrelevantes para o estudo.

Comparando-se o método de adsorção utilizando fibras de coco como material adsorvente com o método de floculação para tratamento de efluentes, o processo de adsorção mostrou-se muito promissor, apresentando alta taxa de remoção de metal, eficiência no processo, além de ser ambiental e economicamente viável.

Para trabalhos futuros, recomenda-se ajuste dos parâmetros tempos de contato e velocidade de agitação. No primeiro caso, deve-se utilizar uma faixa de tempo em que o sistema já tenha atingido o equilíbrio. Para a velocidade de agitação, valores moderados devem ser levados em consideração, uma vez que a literatura sustenta que velocidades muito altas não são efetivas. Por observar que o efeito da concentração de fibras teve influência na remoção do metal presente na solução, um estudo cinético mais aprofundado levará à determinação do limite máximo de concentração de fibra, visando obter uma maior eficiência na remoção do metal em estudo.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A. M.; FILHO, L. N. **Adsorção**. Departamento de Engenharia Química da UFPE, 1999.
- AGARWAL, G. S.; BHUPTAWAT, H. K.; CHAUDHARI, S. Biosorption of aqueous chromium (VI) by Tamarindus indica seeds. **Bioresource Technology**, Bhopal, v. 97, p. 949-956, 2006. DOI: doi:10.1016/j.biortech.2005.04.030. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852405002294?via%3Dihub>. Acesso em: 16 abr. 2021.
- AGUIAR, M. R. M. P; NOVAES, A. C. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química Nova**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 6B, p. 1145-1154, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/qn/v25n6b/13130.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2021.
- ALBERTINI, S.; CARMO, L. F.; PRADO FILHO, L.G. Utilização de serragem e bagaço de cana-de-açúcar para adsorção de cádmio. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 113-118, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/cta/v27n1/19.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2021.
- AL-RASHDI, B.; SOMERFIELD, C.; HILAL, N. Heavy metals removal using adsorption and nanofiltration techniques. **Separation and Purification Reviews**, Swansea, v. 40, n. 3, p. 209–259. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1080/15422119.2011.558165>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15422119.2011.558165>. Acesso em: 03 mar. 2021.
- APEEL, C., *et al.* Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. **Geoderma**, San Luis Obispo, v. 113, p. 77-93, abr. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00316-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00316-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706102003166?via%3Dihub>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- AWUAL, M. R. *et al.* Trace copper (II) ions detection and removal from water using novel ligand modified composite adsorbent. **Chemical Engineering Journal**. Tsukubashi, v. 222, p. 67-76, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.042>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894713002088?via%3Dihub>. Acesso em: 03 mar. 2021.
- BABBITT, H. E. *et al.* **Abastecimento de água**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1973.
- BAIRD, C. **Química Ambiental**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2002.
- BISHNOI, N. R. *et al.* Adsorption of Cr (VI) on activated rice husk carbono and activated alumina. **Bioresource Technology**. Haryana, v. 91, p. 305-307, 2004.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852403002049>. Acesso em: 05 abr. 2021.

BLEDZKI, A. K.; MAMUN, A. A.; VOLK, J. **Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effect of fibre physical, chemical and surface properties**. *Composites Science and Technology*, v. 70, p. 840-846, 2010.

BONIOLO, M. R.; YAMAURA, M.; MONTEIRO, R. M. Biomassa residual para remoção de íons urânio. **Química Nova**. São Paulo, v. 33, n. 3, p. 547-551, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000300010>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422010000300010&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422010000300010&script=sci_arttext). Acesso em: 01 mar. 2021.

BRIGIDA, A. I. S.; ROSA, M. F. Determinação do teor de taninos na casca de coco verde (*Cocos nucifera*). **Process Interamerican Society for Tropical Horticulture**. Fortaleza, v. 47, p. 25-27, 2003. Disponível em: <https://pt.scribd.com/doc/309890678/Determinacao-Do-Teor-de-Taninos-Na-Casca-de-Coco-Verde-Cocos-Nucifera-2003>. Acesso em: 15 abr. 2021.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados**. Campinas: Apostila, 2005. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/pos-graduacao/IM317/apostila2012.pdf>. Acesso em 05 mar. 2021.

CALFA, B. A.; TOREM, M. L. **Uso de Biomassas em Processo Combinado Biossorção/Flotação para Remoção de Metais Pesados**. Rio de Janeiro: Relatório de Atividades do Projeto de Iniciação Científica, 2007. Disponível em: [https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio\\_resumo2007/relatorios/dcmm/dcmm\\_bruno\\_alfeu\\_clfas.pdf](https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2007/relatorios/dcmm/dcmm_bruno_alfeu_clfas.pdf). Acesso em: 14 abr. 2021.

CARVALHO, M. N. **Avaliação do processo de remoção de ferro em água de origem subterrânea por adsorção com materiais naturais**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 2005. Disponível em: [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6738/1/arquivo7911\\_1.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/6738/1/arquivo7911_1.pdf). Acesso em: 03 mar. 2021.

CASTRO R. S. D.; *et al.* Banana Peel Applied to the Solid Phase Extraction of Copper and Lead from River Water: Pre-concentration of Metal Ions with a Fruit Waste. **I and EC Research**. São Paulo, vol. 50, n. 6, p. 3446–3451, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie101499e>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ie101499e>. Acesso em: 05 abr. 2021.

ČEROVIĆ, L. S. *et al.* Point of zero charge of different carbides. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. Moscow, v. 297, p. 1-6, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.10.012>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775706007515>. Acesso em: 12 abr. 2021.

CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M.R.C.; RUSSO, C. Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção. **Química Nova**. São Paulo, v. 34, n.1, p. 59-63, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S010040422011000100012>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422011000100012](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422011000100012). Acesso em: 03 mar. 2021.

COLACIOPPO, S. **Higiene e Toxicologia Ocupacional**. 1. ed. São Paulo: ABHO, 2020. Disponível em: [https://www.abho.org.br/wp-content/uploads/2020/09/ABHO\\_2020\\_HIGIENE\\_E\\_TOXICOLOGIA.pdf](https://www.abho.org.br/wp-content/uploads/2020/09/ABHO_2020_HIGIENE_E_TOXICOLOGIA.pdf). Acesso em: 15 abr. 2021.

CONAMA-CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 1, de 23 de janeiro de 1986. **Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 17 fev. 1986. Seção 1, p. 2.548-2.549. Disponível em: <http://www.ima.al.gov.br/wizard/docs/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20N%C2%BA001.1986.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2021.

COONEY, D. O. **Adsorption Design for Wastewater Treatment**. Florida: CRC Press, 1999.

COPPER: USEPA Bicinchoninate Method 8506 (CuVer 1). **Hach Company World Headquarters**. 11 ed. U.S.A., 2017. Disponível em: <https://www.google.com/search?q=8506+dr900&oq=8506+dr900&aqs=chrome..69i57j33i160.4159j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8#>. Acesso em: 22 mar. 2021.

CORBITT, R. A. **Standard handbook of environmental engineering**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

CORRADINI, E. *et al.* Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**. v. 31, n. 3, p. 837-846, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452009000300030>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-29452009000300030&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-29452009000300030&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em: 12 abr. 2021.

DI BERNARDO, L. **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. Disponível em: <http://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/DiBernardo.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2021.

DONALD, Mc. *et al.* **Animal nutrition**. 6 ed. Pearson: Edinburgh, 2002.

EKMEKYAPAR F. *et al.* Biosorption of Pb(II) by nonliving lichen biomass of *Cladonia rangiformis* Hoffm. **International Journal of Science and Research**. Atatürk, v. 6, n. 2, p. 417-424, 2012. Disponível em: [https://ijer.ut.ac.ir/article\\_509\\_1eaae413ca7aa3edde012923eec9cb9c.pdf](https://ijer.ut.ac.ir/article_509_1eaae413ca7aa3edde012923eec9cb9c.pdf). Acesso em: 05 abr. 2021.

EKMEKYAPAR, F. *et al.* A. Biosorption of copper(II) by nonliving lichen biomass of *Cladonia rangiformis* hoffm. **Journal of Hazardous Materials**. Atatürk, vol. 137, n. 1, p. 293-298, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.02.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389406001270?via%3Dihub>. Acesso em: 06 abr. 2021.

ESPASANDIN, J. V. F. *et al.* Fatores que influenciam a capacidade de adsorção de cobre (II) no pó da casca de coco verde. **Revista Científica Perspectivas da Ciência e Tecnologia**. Rio de Janeiro, v. 11, p. 155-169, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2019.v11.p.155-169>. Disponível em: <https://revistascientificas.ifrj.edu.br/revista/index.php/revistapct/article/viewFile/1352/739>. Acesso em: 12 abr. 2021.

ESPOSITO, A.; PAGNANELLI, F.; VEGLIO, F. pH-related equilibria models for biosorption in single metal systems. **Chemical Engineering Science**. Genova, v. 57, n. 3, p. 307-313, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(01\)00399-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00399-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250901003992?via%3Dihub>. Acesso em: 07 abr. 2021.

FOGLER, H. S. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. 5 ed. p. 721-722, 2016.

FU, F.; WANG, Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. **Journal of Environmental Management**. Guangdong, v. 92, p. 407-418. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479710004147?via%3Dihub>. Acesso em: 03 mar. 2021.

GAMA, B. M. V. **Avaliação do uso de adsorventes preparados a partir de resíduo agroindustrial na adsorção de fenol e Cd<sup>+2</sup>**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/18438>. Acesso em: 03 mar. 2021.

GIMBERT, F. *et al.* Adsorption isotherm models for dye removal by cationized starch based material in a single component system: Error analysis. **Journal of Hazardous Materials**. Besançon, v. 157, n. 1, p. 34-46, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.12.072>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389407018560?via%3Dihub>. Acesso em: 07 abr. 2021.

GONZALES, M. H.; *et al.* Coconut Coir as Biosorbent for Cr(VI) Removal from Laboratory wastewater. **Journal of Hazardous Materials**. São Carlos, v. 159, n. 2-3, p. 252-256, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389408002422?via%3Dihub>. Acesso em: 07 abr. 2021.

GREGG, S. J.; SING, K. S. W. **Adsorption, surface area and porosity**. 2. ed. 1982. GU, H. Tensile behaviours of the coir fibre and related composites after NaOH treatment. **Materials and Design**. Tianjin, v. 30, n. 9, p. 3931-3934, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.035>. Disponível em:



<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0261306909000417?via%3Dihub>. Acesso em: 08 abr. 2021.

GUPTA, V. K.; PATHANIA, D.; SHARMA, S. Adsorptive remediation of Cu(II) and Ni(II) by microwave assisted H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> activated carbono. **Arabian Journal of Chemistry**. Rookree, v. 10, n. 2, p. S2836-S2844 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.11.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273122396008360>. Acesso em: 01 mar. 2021.

GURGEL, L. V. A. **Mercurização e modificação química da celulose e bagaço de cana-de-açúcar com anidrido succínico e trietanolamina: Preparação de novos materiais quelantes para adsorção de Pb (II), Cd (II), Cr (VI) e Cu (II)**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil, 2007. Disponível em: [https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2231/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O\\_Mercuriza%c3%a7%c3%a3oModifica%c3%a7%c3%a3oQu%c3%admica.pdf](https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2231/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_Mercuriza%c3%a7%c3%a3oModifica%c3%a7%c3%a3oQu%c3%admica.pdf). Acesso em: 15 abr. 2021.

GURGEL, L. V. A.; GIL, L. F. Adsorption of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) from Aqueous Single Metal Solutions by Succinylated Twice Mercerized Sugarcane Bagasse Functionalized with Triethylenetetramine. **Water Research**. Ouro Preto, v. 43, n. 18, p. 4479-4488, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135409004710>. Acesso em: 06 abr. 2021.

HACH. **Digital Spectrophotometer Hach DR900 Colorimeter**: User Manual. U.S.A. 2. ed. p. 49-51, 2013. Disponível em: [https://www.fondriest.com/pdf/hach\\_dr900\\_manual.pdf](https://www.fondriest.com/pdf/hach_dr900_manual.pdf). Acesso em: 22 mar. 2021.  
HON, D. N.-S. **Chemical modification of lignocellulosic materials**. New York: Marcel Dekker, 1996.

HORSFALL, M. J.; ABIA, A. A.; SPIFF, A. I. Kinetic studies on the adsorption of Cd<sup>+2</sup>, Cu<sup>+2</sup> and Zn<sup>+2</sup> ions from aqueous solutions by cassava (*Manihot sculenta* Cranz) tuber bark waste. **Bioresource Technology**. Port Harcourt, v. 97, n. 2, p. 283-291, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.016>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852405001264?via%3Dihub>. Acesso em: 09 abr. 2021.

IDOETA, P. A. Indústria do coco cresce, mas alto desperdício gera desafio tecnológico. **BBC News**, São Paulo, 2014. Disponível em: [https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/02/140207\\_coco\\_reciclagem\\_abre\\_pai#:~:text=Ind%C3%BAstria%20do%20coco%20cresce%2C%20mas%20alto%20desperd%C3%ADcio%20gera%20desafio%20tecnol%C3%B3gico,-Paula%20Adamo%20Idoeta&text=Em%20parte%20pelo%20calor%2C%20em,nacional%20dos%20produtores%20de%20coco](https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/02/140207_coco_reciclagem_abre_pai#:~:text=Ind%C3%BAstria%20do%20coco%20cresce%2C%20mas%20alto%20desperd%C3%ADcio%20gera%20desafio%20tecnol%C3%B3gico,-Paula%20Adamo%20Idoeta&text=Em%20parte%20pelo%20calor%2C%20em,nacional%20dos%20produtores%20de%20coco)). Acesso em: 01 mar. 2021.

ISHIZAKI, M. H. *et al.* Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura. **Polímeros**. São Carlos, v. 16, n. 3, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104->

14282006000300006. Disponível em:  
[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14282006000300006&lng=pt&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282006000300006&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 08 abr. 2021.

JIMENEZ, R.S.; DAL BOSCO, S.M.; CARVALHO, W.A. Remoção de metais pesados de efluentes aquosos pela zeólita natural escolécita – influência da temperatura e do pH na adsorção em sistemas monoelementares. **Química Nova**. São Paulo, v. 27, n. 5, p. 734-738, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000500011>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422004000500011&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422004000500011&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt). Acesso em: 02 abr. 2021.

JOHNSON, P. D. *et al.* A. Peanut hull pellets as a single use sorbent for the capture of Cu(II) from wastewater. **Waste Management**. Alabama, v.22, n. 5, p. 471-480, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(01\)00036-8](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00036-8). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X01000368?via%3Dihub>. Acesso em: 31 mar. 2021.

JUNIOR, O. K. *et al.* Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modified sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**. Ouro Preto, v. 98, n. 6, p. 1291-1297, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852406002100>. Acesso em: 16 abr. 2021.

KIM, J W. *et al.* Production of granular activated carbon from waste walnut shell and its adsorption characteristics for Cu<sup>2+</sup> ion. **Journal Hazardous Materials**. Kyounggido, v. 85, n. 3, p. 301-315, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00239-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00239-4). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389401002394?via%3Dihub>. Acesso em: 01 abr. 2021.

LIBÂNIO, M.; PÁDUA, L. V.; DI BERNARDO, L. Análise da influência da variação dos gradientes de velocidade no desempenho das unidades de floculação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 2, n. 2, p. 63-68, 1997.

LOUKIDOU, M. X.; *et al.* Removal of As (V) from wastewaters by chemically modified fungal biomass. **Water Research**. Thessaloniki, v. 37, n. 18, p. 4544-4552, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00415-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00415-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135403004159?via%3Dihub>. Acesso em: 03 abr. 2021.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, F. **Reúso da água**. 3. ed. Barueri: Manuelie, 2003.

MOBASHERPOUR, I.; SALAHI, E.; EBRAHIMI, M. Removal of divalent nickel cations from aqueous solution by multi-walled carbon nano tubes: equilibrium and kinetic processes. **Research on Chemical Intermediates**. Karaj, vol. 38, p. 2205–2222, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11164-012-0537-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11164-012-0537-6>. Acesso em: 12 abr. 2021.

- MONTEIRO, R.A. (2009). **Avaliação do potencial de adsorção U, Th, Pb, Zn, e Ni pelas fibras de coco verde**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisa Energético e Nucleares (IPEN) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 5. ed. New York: John Wiley, 2005.
- MOREIRA, D. R. **Desenvolvimento de adsorventes naturais para tratamento de efluentes de galvanoplastia**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- MUHAMAD, H.; DOAN, H.; LOHI, A. Batch and continuous fixed-bed column biosorption of Cd<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup>. **Chemical Engineering Journal**. Ontario, v. 158, n. 3, p. 369-377, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.12.042>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894709008985?via%3Dihub>. Acesso em: 11 abr. 2021.
- NAJA, G.; VOLESKY, B. Behavior of the Mass Transfer Zone in a Biosorption Column. **Environmental Science and Technology**. Quebec, v. 40, p. 3996-4003, 2006. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es051542p>. Acesso em: 14 abr. 2021.
- NASCIMENTO, R. F. *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, (Estudos da Pós - Graduação), 2014.
- NASERNEJAD, B. *et al.* A Comparison for biosorption modeling of heavy metals (Cr (III), Cu (II), Zn (II)) adsorption from wastewater by carrot residues. **Process Biochemistry**. Tehran, v. 40, p. 1319-1322, 2005. DOI: [doi:10.1016/j.procbio.2004.06.010](https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.06.010). Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/240176275\\_Camparison\\_for\\_biosorption\\_modeling\\_of\\_heavy\\_metals\\_CrIII\\_CuII\\_ZnII\\_adsorption\\_from\\_wastewater\\_by\\_carrot\\_residues](https://www.researchgate.net/publication/240176275_Camparison_for_biosorption_modeling_of_heavy_metals_CrIII_CuII_ZnII_adsorption_from_wastewater_by_carrot_residues). Acesso em: 16 abr. 2021.
- NETO, B. B.; SCARMINIO, I. B.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da Unicamp, 2001.
- OGP. Fate and effects of naturally occurring substances in produced water on marine environment. **The International Association of Oil and Gas Producers**. Report 364. February, 36p, 2005.
- OGUNNAIKE, B. A, RAY, W. H. **Process Dynamics, Modeling, and Control**. New York: Oxford University Press. New York, 1994.
- PERALTA-ZAMORA, P. Planejamento fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica. **Revistas UFPR Visão acadêmica**. Curitiba, v. 9, n. 1, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/acd.v9i1.14635>. Disponível em <https://revistas.ufpr.br/academica/article/view/14635>. Acesso em: 02 mar. 2021.

PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L.; NAGATA, N. Por que otimização multivariada? **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.10, n.2, p.106-110, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/esa/v10n2/a03v10n2>. Acesso em: 03 abr. 2021.

PERIC, J.; TRGO, M.; MEDVIDOVIC, N. V. Removal of zinc, copper and lead by natural zeolite – a comparison of adsorption isotherms. **Water Research**. Split, v. 38, n. 7, p. 1893–1899. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.12.035>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135403007255?via%3Dihub>. Acesso em: 03 mar. 2021.

PINO, G. A. H. **Biossorção de metais pesados utilizando pó da casca de coco verde (Cocos nucifera)**. 2005. Dissertação (Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

POLLARD. S. J. T.; THOMPSON. F. E.; CONNACHIE. G. L. Mc. Microporous carbons from Moringa oleifera husks for water purification in less developed countries. **Water Research**. Edinburgh, v. 29, p. 337-347, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)E0103-D](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)E0103-D). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0043135494E0103D>. Acesso em: 18 abr. 2021.

ROCHA, A. M. *et al.* Aproveitamento de fibra de coco para fins energéticos: revisão e perspectivas. **10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural**. São Paulo, 2015. Disponível em: [http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:ZNTXQXqRvAIJ:scholar.google.com/+APROVEITAMENTO+DE+FIBRA+DE+COCO+PARA+FINS+ENERG%C3%89TICOS:+REVIS%C3%83O+E+PERSPECTIVAS&hl=pt-BR&as\\_sdt=0,5](http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:ZNTXQXqRvAIJ:scholar.google.com/+APROVEITAMENTO+DE+FIBRA+DE+COCO+PARA+FINS+ENERG%C3%89TICOS:+REVIS%C3%83O+E+PERSPECTIVAS&hl=pt-BR&as_sdt=0,5). Acesso em: 04 mar. 2021.

ROE UTVIK. Chemical characterization of produced water from four offshore oil production platforms in North Sea. **Chemosphere**. Bergen, v. 39, n. 15, p. 2593-2606, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00171-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00171-X). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565359900171X>. Acesso em: 12 abr. 2021.

ROSSATO, M. V.; *et al.* Diagnóstico ambiental das atividades agroindustriais de Santa Maria-RS. **Revista de Administração e Negócios da Amazônia**. Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 01-15, 2014. Disponível em: <https://www.periodicos.unir.br/index.php/rara/article/download/757/877>. Acesso em: 02 mar. 2021.

ROUMIÉ, J. P. R. *et al.* A. Estudo de um sistema de adsorção de metais pesados por filtros de fibra de coco. In: xxxix congresso brasileiro de sistemas particulados ENEMP 2019, Belém. Anais eletrônicos. Campinas, GALOÁ, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/enemp2019/papers/estudo-de-um-sistema-de-adsorcao-de-metais-pesados-por-filtros-de-fibra-de-coco>. Acesso em: 05 abr. 2021.

RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption and Adsorption Process**. New York: John Wiley and Sons, 1984.

SAEED, A.; AKHTER, M. W.; IQBAL, M. Removal and recovery of heavy metal from aqueous solution using papaya wood as a new biosorbent. **Separation and Purification Technology**. Lahore, v. 45, n. 1, p. 25-31, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.02.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586605000936?via%3Dihub>. Acesso em: 11 abr. 2021.

SALVADOR, G. **Adsorção de cobre (II) pela casca de coco verde condicionada com solução de NaOH**. Relatório de estágio supervisionado. Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/99786/Graziela.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 17 abr. 2021.

SANTANA, I. A. **Avaliação química e funcional de polpa de coco verde e aplicação em gelado comestível**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2012.

SEKAR, M.; SAKTHI, V.; RENGARAJ, S. Kinetics and equilibrium adsorption study of lead (II) onto activated carbon prepared from coconut shell. **Colloid and Interface Science**. Hung Hom, v. 279, n. 2, p. 307-313, 15 nov. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.06.042>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979704005612>. Acesso em: 12 abr. 2021.

SILVA, H. B.; PIRES, J. L. Utilização de adsorvente natural da Amazônia como bioadsorvente para remoção de metais em soluções. **Revista Ponto de Partida**. Marabá, v.3, n. 3, p.39-48, 2014.

SILVA, M. S. P.; *et al.* Influência do método de preparo da casca do coco verde como bioadsorvente para aplicação na remoção de metais em soluções aquosas. *Revista DAE*. São Paulo, n. 193, p. 66-73, 2013. DOI: <http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/dae.2014.114>. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/45309>. Acesso em: 20 abr. 2021.

SINGH, K. K.; HASAN, S. H.; RASTOGI, R. J. H. Removal of cadmium from wastewater using agricultural waste 'rice polish'. **Journal of Hazardous Materials**. Varanasi, v. 121, n. 1-3, p.51-58, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.11.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438940400562X>. Acesso em: 10 abr. 2021.

SOUSA, F. W.; *et al.* Uso da casca de coco verde como adsorvente na remoção de metais tóxicos. **Química Nova**. São Paulo, v. 30, p. 1153 – 1157, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422007000500019>. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422007000500019](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000500019). Acesso em: 04 mar. 2021.

SUD, D.; MAHAJAN, G.; KAUR, M. P. Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions – A review. **Bioresource technology**. Longowal, v. 99, n. 14, p. 6017-6027, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.064>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852407010024?via%3Dihub>. Acesso em: 02 abr. 2021.

TARLEY, C. R. T.; ARRUDA, M. A. Z. Adsorventes naturais: potencialidade e aplicações da esponja natural (*Luffa cylindrica*) na remoção de chumbo em efluente de laboratório. **Analytica**. Unicamp, v. 2, p. 25-31, 2003. Disponível em: <https://revistaanalytica.com.br/adsorventes-naturais-potencialidades-e-aplicacoes-da-esponja-natural-luffa-cylindrica-na-remocao-de-chumbo-em-efluentes-de-laboratorio/>. Acesso em: 01 abr. 2021.

TEIXEIRA, I. Resolução CONAMA Nº 430 DE 13/05/2011. **LEGIS WEB – LTDA**, 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770> Acesso em: 01 mar. 2021.

TOLEDO, B. I. *et al.* Bisphenol a removal from water by activated carbon, Effects of carbon characteristics and solution chemistry. **Environmental Science Technology**. Granada, v. 39, p. 6246–6250, 2005. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es0481169>. Acesso em: 14 abr. 2021. Acesso em: 03 abr. 2021.

VOLESKY, B. Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. **Hydrometallurgy**. Québec, v. 59, p. 203-216, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00160-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X00001602>. Acesso em: 03 abr. 2021.

WANG, S. A.; *et al.* Physical and chemical regeneration of zeolitic adsorbents for dye removal in waste water treatment. **Chemosphere**. Perth, v. 65, p. 82-87, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.02.043>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653506002347>. Acesso em: 06 abr. 2021.

YOKEL, R.A. The Speciation of Metals in Mammals Influences their Toxicokinetics and Toxicodynamics and Therefore Human Health Risk Assessment. **Journal of Toxicology and Environmental Health-Part B-Critical Reviews**. Lexington, v. 9, p. 63-85, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/15287390500196230>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15287390500196230>. Acesso em: 12 abr. 2021.