

CENTRO PAULA SOUZA
Etec Prof. Carmelino Corrêa Júnior
Ensino Médio com Habilitação Profissional
de Técnico em Química

Nathally Gonçalves Lourenço Lopes

Rafael Barcelos Barbara da Silva

Sara Regina Bertolino Silva

**ESTUDO COMPARATIVO DA UTILIZAÇÃO DA FIBRA DO COCO
VERDE COMO BIODSORVENTE NA REMOÇÃO DE METAIS
PESADOS EM EFLUENTES INDUSTRIAIS**

FRANCA

2025

Nathally Gonçalves Lourenço Lopes

Rafael Barcelos Barbara da Silva

Sara Regina Bertolino Silva

**ESTUDO COMPARATIVO DA UTILIZAÇÃO DA FIBRA DO COCO
VERDE COMO BIODSORVENTE NA REMOÇÃO DE METAIS
PESADOS EM EFLUENTES INDUSTRIAIS**

Trabalho de Conclusão de curso, apresentado ao Curso Técnico em Biotecnologia Integrado ao Ensino Médio da Etec Prof. Carmelino Corrêa Júnior, orientado pela Profa. Dra. Joana D'Arc Félix de Sousa, como requisito parcial para obtenção do título de Técnico em Química.

FRANCA

2025

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos pais, colegas e professores pelo auxílio e suporte durante os estudos.

RESUMO

LOPES, Nathally Gonçalves Lourenço; **DA SILVA**, Rafael Barcelos Barbara; **SILVA**, Sara Regina Bertolino. **Estudo Comparativo da Utilização da Fibra do Coco Verde Como Biossorvente na Remoção de Metais Pesados em Efluentes Industriais**. Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado para Obtenção do Título de Técnico em Química Integrado ao Ensino Médio. ETEC Prof. Carmelino Corrêa Júnior, Franca/SP, 2025.

A preocupação crescente com o meio ambiente em relação à contaminação dos efluentes com os metais pesados, especialmente o cromo hexavalente (Cr^{6+}), que vem de resíduos industriais como curtidoras e galvanização, está levando a uma busca por métodos de tratamento eficazes e ecologicamente adequados. O íon Cr^{6+} é um poluente muito tóxico, que fica na natureza por muito tempo e pode se acumular nos organismos, colocando em risco a saúde das pessoas e dos ecossistemas. Este estudo apresenta uma comparação sobre o uso da fibra de coco verde como material natural capaz de remover metais pesados dos resíduos industriais. A pesquisa quer ver o quão bem o mesocarpo de coco (*Cocos nucifera*), um resíduo de madeira e celulose que é muito disponível e custa pouco, consegue ser um biossorvente eficaz na remoção de cromo. O estudo irá comparar a fibra de coco verde quando está na forma original com a forma que foi tratada quimicamente usando uma solução de ácido nítrico a 1 mol por litro. O objetivo principal é descobrir qual das formas adsorptivas é mais eficiente para remover íons Cr^{6+} da água, ajudando a melhorar os processos de biossorção. A metodologia usada incluiu a preparação de soluções de Cr^{6+} a partir de K_2CrO_4 em diferentes concentrações (de 25 a 250 mg/L) e a realização de testes de adsorção em batelada com os dois tipos de biossorvente. A quantidade de cromo restante foi medida usando um método chamado espectrofotometria. Assim, o trabalho explica os processos de adsorção como uma opção alternativa aos métodos tradicionais de tratamento de efluentes, sendo um estudo necessário para criar soluções ecologicamente corretas e com bons custos para tratar e preservar o meio ambiente.

Palavras-chave: Cromo Hexavalente. Biossorção. Fibra de Coco Verde. Tratamento de Efluentes. Adsorção.

ABSTRACT

LOPES, Nathally Gonçalves Lourenço; **DA SILVA**, Rafael Barcelos Barbara; **SILVA**, Sara Regina Bertolino. **Comparative Study of the Use of Green Coconut Fiber as a Biosorbent in the Removal of Heavy Metals from Industrial Effluents.**

Completion of Course Work Presented for Obtaining the Title of Technician in Chemistry Integrated to High School. ETEC Prof. Carmelino Correa Junior, Franca/SP, 2025.

Growing concern for the environment in relation to the contamination of effluents with heavy metals, especially hexavalent chromium (Cr^{6+}), which comes from industrial waste such as tanneries and galvanization, is leading to a search for effective and environmentally friendly treatment methods. The Cr^{6+} ion is a highly toxic pollutant that remains in nature for a long time and can accumulate in organisms, endangering the health of people and ecosystems. This study presents a comparison of the use of green coconut fiber as a natural material capable of removing heavy metals from industrial waste. The research aims to see how well coconut mesocarp (*Cocos nucifera*), a wood and cellulose waste product that is widely available and inexpensive, can be an effective biosorbent for removing chromium. The study will compare green coconut fiber in its original form with fiber that has been chemically treated using a 1 mol per liter nitric acid solution. The main objective is to find out which of the adsorbent forms is more efficient at removing Cr^{6+} ions from water, helping to improve biosorption processes. The methodology used included the preparation of Cr^{6+} solutions from K_2CrO_4 in different concentrations (from 25 to 250 mg/L) and the performance of batch adsorption tests with the two types of biosorbent. The amount of remaining chromium was measured using a method called spectrophotometry. Thus, the study explains the adsorption processes as an alternative option to traditional effluent treatment methods, which is necessary for creating environmentally friendly and cost-effective solutions for treating and preserving the environment.

Keywords: Hexavalent Chromium; Biosorption; Green Coconut Fiber; Effluent Treatment; Adsorption.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	7
DESENVOLVIMENTO.....	8
1. Tratamento de Efluentes	8
2. Potencial poluente.....	9
3. Parâmetros de Qualidade	9
4. Legislação Brasileira.....	10
5. Legislação Estadual.....	10 a 12
6. Principais Indústrias Poluentes.....	12 a 13
7. Impactos Ambientais dos Metais Pesados	13 a 14
8. Estratégias de Remediação	15
9. Metais Pesados.....	15 a 16
10. Processos Convencionais de Remoção de Metais Pesados.....	17
11. Processos de Adsorção	17 a 19
12. Adsorventes de Origem Orgânica.....	19 a 20
13. Capacidade Adsorptiva nos Tratamentos de Efluentes	21 a 23
14. Isotermas	23 a 25
15. Aplicações Práticas e Estudos de Casos	25
METODOLOGIA.....	26 a 29
RESULTADOS	30 a 31
CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativas

A presença de metais pesados em corpos hídricos tem se consolidado como uma das principais preocupações ambientais nas últimas décadas, em virtude de sua toxicidade, persistência no ambiente e capacidade de bioacumulação. Dentre esses poluentes, destaca-se o cromo em sua forma hexavalente (Cr^{6+}), cuja elevada solubilidade e mobilidade em meios aquosos, somadas aos efeitos carcinogênicos, mutagênicos e teratogênicos, representam risco significativo à saúde humana e aos ecossistemas. A principal fonte desse contaminante está associada às atividades industriais, como curtumes, galvanoplastia, produção de pigmentos e mineração.

Neste contexto, a busca por métodos eficientes, acessíveis e ambientalmente sustentáveis para o tratamento de efluentes contaminados por Cr^{6+} torna-se imperativa. A adsorção destaca-se como alternativa promissora, especialmente pela sua simplicidade operacional, baixo custo e alta eficiência de remoção. Dentre os materiais adsorventes de origem natural, os resíduos lignocelulósicos vêm sendo amplamente estudados, sobretudo por aliar viabilidade econômica e reaproveitamento de resíduos agroindustriais. O mesocarpo do coco (*Cocos nucifera*), nesse cenário, apresenta-se como um biossorvente potencial, devido à sua abundância, estrutura fibrosa e presença de grupos funcionais com afinidade por íons metálicos.

Diante disso, formula-se a seguinte questão norteadora desta pesquisa: qual é a eficiência comparativa do mesocarpo de coco in natura e do mesocarpo quimicamente tratado na adsorção de íons Cr^{6+} em solução aquosa?

A justificativa deste estudo reside na importância de se desenvolver alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para o tratamento de efluentes industriais, utilizando resíduos naturais com potencial de adsorção. A comparação entre o material in natura e aquele submetido à ativação química com ácido nítrico permitirá avaliar o impacto do tratamento químico sobre a eficiência de remoção do contaminante, fornecendo subsídios para a otimização de processos de biossorção.

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo comparativo da eficiência de adsorção do mesocarpo de coco in natura e do mesocarpo ativado quimicamente na remoção de Cr^{6+} em solução aquosa.

A metodologia utilizada baseou-se nos procedimentos descritos por Franguelli (2018) e Nascimento et al. (2020), incluindo o pré-tratamento do mesocarpo, a ativação química com solução de HNO_3 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, o preparo das soluções de Cr^{6+} com cromato de potássio (K_2CrO_4), a realização de ensaios em batelada com tempos definidos de agitação e, por fim, a análise espectrofotométrica para quantificação do cromo residual.

Dessa forma, o trabalho realizado visou reproduzir essas metodologias, para que, assim fosse concluído qual das formas adsorptivas é mais eficiente na remoção de Cromo Hexavalente nos efluentes industriais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Reproduzir metodologias e verificar qual das formas adsorptivas será mais eficiente na remoção de Cromo Hexavalente dos efluentes industriais.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Referencial Teórico

2.1.1. TRATAMENTO DE EFLUENTES

1. Conceitos e classificação dos efluentes

1.1 Efluentes

O efluente pode ser definido por todo e ou qualquer resíduo, líquido ou gasoso, oriundo de atividades de consumo ou produção humanas (indústrias, domicílio e etc). O mesmo, caso seja descartado de maneira imprópria, pode contaminar o solo e os corpos receptores, impactando a natureza ao seu redor. Quanto à composição, os efluentes são compostos por uma grande porcentagem de água e dependendo da origem pode ser encontrado sólidos, contaminantes, matérias orgânicas, metais pesados e nutrientes. (BARROS; OLIVEIRA; SANTOS, 2018).

1.2 Origem dos efluentes

A classificação dos efluentes é caracterizada pela sua origem antes do descarte, os efluentes podem ser derivados de resíduos domésticos, industriais e hospitalares. Assim eles são classificados por : (TORRES, 2019)

Líquidos

Os efluentes líquidos são resíduos provenientes de dois tipos de consumo , o domiciliar que é gerado por pias, lavabos, vasos e o segundo por consumo industrial, que é gerado pela produção de produtos em alta escala. (VON SPERLING, 1998)

Oleosos

Os efluentes oleosos são aqueles que contêm a presença de substâncias oleosas provenientes de resíduos industriais como indústrias alimentícia, petrolífera e etc. Os efluentes oleosos possuem um grande risco de contaminação dos corpos receptores sendo altamente poluentes para o meio ambiente.(BARROS et al. 2018)

Metais pesados

Os efluentes com a presença de metais pesados, são as águas oriundas de indústrias metalúrgica e galvânica, que apresentam um grande risco de contaminação ao meio ambiente devido a presença de metais instáveis como chumbo, cobre, mercúrio e etc. (AMBRÓSIO et al. 2021)

2.1.1.2. POTENCIAL POLUENTE

Os potenciais poluentes são a capacidade de um líquido como efluentes doméstico ou industrial, de poluir o meio ambiente onde ele é descartado. Para

calcular esse potencial é realizada algumas análises físico-químicas que determinam os níveis de poluição dos líquidos. Algumas das análises são o DQO, DBO e SST, que são imprescindíveis para essa determinação garantido a qualidade da água. (BUDEIZ; AGUIAR, 2020).

DQO- demanda química de oxigênio

A demanda química de oxigênio (DQO) é um parâmetro global utilizado como indicador de matéria orgânica presentes em águas residuais. Esse parâmetro é utilizado para controlar a quantidade de matéria orgânica nos efluentes impedindo que as vidas aquáticas morram pela falta de oxigênio.

DBO-demanda bioquímica de oxigênio

A demanda bioquímica de oxigênio é um parâmetro global utilizado para indicar a quantidade de oxigênio consumido por microorganismos pertencentes aos efluentes. Ao que, como a presença de microrganismos nos efluentes, os detritos liberados pelos mesmo , acabam por criar outros compostos que poluem os efluentes.

SST-sólidos suspensos totais

Os sólidos suspensos totais se referem à presença de sólidos suspensos na água que não são dissolvidos em água, o que acarreta a poluição e contaminação de efluentes pela presença desses sedimentos. Para isso, são realizados processos de retirada de sólidos, como a sedimentação, flotação, filtração e a centrifugação.

2.1.1.3. PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os parâmetros de qualidade das águas são utilizados para analisar e qualificar o descarte dos efluentes industriais e fiscalizar a regularidade desses corpos hídricos. Assim como exemplifica (GIRARDI, 2019.)

Figura 1- Tabela de parâmetros de qualidade CONAMA 357/2005 e CONAMA 430/2011

Físico-químicos	Nutrientes	Biológicos	Inorgânicos	Orgânicos
DBO (1;4264); Óleos Minerais (16;1243); Sólidos grosseiros e materiais flutuantes (244;0)	Nitrogênio amoniacal total (9;1927)	Não consta	Cobre dissolvido (31;651); Ferro dissolvido (34;588); Chumbo total(41;523); Bário total (59;192); Fluoreto total (60;190); Cianeto livre (67;137); Boro total (72;127)	Fenóis totais (14;1527); Benzeno (71;132); Tolueno (74;126); Xileno (77;113); Etilbenzeno (78;105); Tetracloroeto de carbono (81;95); Tricloroeteno (82;95); Estireno (91;66)

2.1.1.4. LEGISLAÇÃO BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ÁGUA

As legislações brasileiras oferecem um conjunto de normas e regulamentos a respeito da qualidade, classificação, descarte e destruição de águas e efluentes, entre elas temos a CONAMA nº 357/2005 e a CONAMA nº 430/2011.

4.1 Resolução CONAMA nº 357/2005.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 classifica os corpos de água em: doce, salgada e salobra. Os corpos hídricos de água doce são classificados em cinco categorias. A classe especial é a que possui melhor qualidade da água e usos mais restritivos. Em ordem decrescente de qualidade da água, há as classes 1, 2, 3 até a 4. As águas salobras possuem salinidade entre 0,5 a 30‰, e é dividida em quatro categorias, com a melhor qualidade para a classe especial e a pior para a classe 3. As águas salinas possuem salinidade igual ou superior a 30‰ e também são divididas em quatro classes, da mesma forma que as salobras. Quando um corpo hídrico for enquadrado como classe especial, deverão ser mantidas as condições naturais. Enquanto que as demais classes possuem seus padrões e condições que devem ser atendidos (BRASIL, 2005; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2013).

A Resolução CONAMA nº 430/2011 dispõe sobre “as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357/2005”. Esta Resolução destaca que “os efluentes não poderão conferir ao corpo receptor características de qualidade em desacordo com as metas obrigatórias progressivas, intermediárias e final, do seu enquadramento”

2.1.1.5. LEGISLAÇÃO ESTADUAL E MUNICIPAL

O Estado de São Paulo estabelece rigorosa legislação sobre os padrões de qualidade da água, algumas estão baseadas nas resoluções e tem suas próprias características. Em vista de tais normas o Estado estabelece na Lei n.º 997, de 31 de maio de 1976

Artigo 3.º — Considera-se poluente toda e qualquer forma de matéria ou energia lançada ou liberada nas águas, no ar ou no solo:

I — com intensidade, em quantidade e de concentração, em desacordo com os padrões de emissão estabelecidos neste regulamento e normas dele decorrentes;

II — com características e condições de lançamento ou liberação, em desacordo com os padrões de condicionamento e projeto estabelecidos nas mesmas prescrições.

III — por fontes de poluição com características de localização e utilização em desacordo com os referidos padrões de condicionamento e projeto;

IV — com intensidade, em quantidade e de concentração ou com características que direta ou indiretamente, tornem ou possam tornar ultrapassados os padrões de qualidade do meio ambiente estabelecidos neste regulamento e normas dele decorrentes;

V — que, independentemente de estarem enquadrados nos incisos anteriores, tornem ou possam tornar as águas, o ar ou o solo impróprios nocivos ou ofensivos à saúde; inconvenientes ao bem estar público danosos aos materiais à fauna e à flora; prejudiciais à segurança, ao uso e gozo da propriedade, bem como às atividades normais da comunidade.

Em relação à poluição das águas fica estabelecido que:

Da Poluição das Águas

CAPÍTULO I

Da Classificação das Águas

Artigo 7.º — As águas interiores situadas no território do Estado, para os efeitos deste regulamento, serão classificadas segundo os seguintes usos preponderantes:

I — CLASSE 1 — águas destinadas ao abastecimento doméstico, sem tratamento prévio ou com simples desinfecção;

II — CLASSE 2 — águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional, à irrigação de hortaliças ou plantas frutíferas e à recreação de contato primário (natação, esqui-aquático e mergulho);

III — CLASSE 3 — águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional, à preservação de peixes em geral e de outros elementos da fauna e da flora e à dessedentação de animais;

IV — Classe 4 — águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento avançado, ou à navegação, à harmonia paisagística, ao abastecimento industrial, à irrigação e a usos menos exigentes.

E por fim o Estado de São Paulo tem como critérios alguns padrões de qualidade :

SEÇÃO I

Dos Padrões de Qualidade

Artigo 10 — Nas águas de Classe 1 não serão tolerados lançamentos de efluentes, mesmo tratados.

Artigo 11 — Nas águas de Classe 2 não poderão ser lançados efluentes, mesmo tratados, que prejudiquem sua qualidade pela alteração dos seguintes parâmetros ou valores.

I — virtualmente ausentes:

- a) materiais flutuantes inclusive espumas não naturais;
- b) substâncias solúveis em hexana;
- c) substâncias que comuniquem gosto ou odor;
- d) no caso de substâncias potencialmente prejudiciais, até os limites máximos abaixo relacionados:

5. Cromo (total) — 0,05 mg/l (cinco centésimos de miligrama por litro)

II — Proibição de presença de corantes artificiais que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais

SEÇÃO II

Dos Padrões de Emissão

Artigo 17 — Os efluentes de qualquer natureza somente poderão ser lançados nas águas interiores ou costeiras, superficiais ou subterrâneas, situadas no território do Estado, desde que não sejam considerados poluentes, na forma estabelecida no artigo 3.º deste regulamento.;

Além das legislações estaduais, o município de Franca impõe normas para a regularização das águas em nossa cidade, tais legislações dizem respeito aos padrões de emissão e normas de saneamento básico o Município de Franca estabelece que:

LEI COMPLEMENTAR Nº 9, DE 26 DE NOVEMBRO DE 1996.

CAPÍTULO I

DO SANEAMENTO BÁSICO

Art. 3º A água destinada ao consumo humano será tratada de acordo com os modernos preceitos do sanitarismo, devendo ser entregue pelo poder público à população em quantidade suficiente nas condições estabelecidas na Portaria 36, de 19 de janeiro de 1990, do Ministério da Saúde, ou de outros instrumentos legais que a venha substituir.

Art. 4º Todo o esgoto doméstico produzido nos limites do perímetro urbano deverá ser lançado nas redes coletoras públicas e, obrigatoriamente, receber o devido tratamento antes do lançamento nos corpos d'água receptores, de acordo com a legislação vigente, observando-se o princípio do gradualismo nos graus de tratamento exigidos de forma a atender, simultaneamente, aos objetivos de desenvolvimento econômico e social com crescente qualidade ambiental na cidade

Art. 5º Os efluentes industriais somente poderão ser descartados após sofrerem tratamento que os tornem adequados ao lançamento no Meio Ambiente, de acordo com a legislação em vigor, ficando terminantemente proibido o seu lançamento na bacia do Rio Canoas e seus formadores.

2.1.1.6. PRINCIPAIS INDÚSTRIAS QUE CAUSAM A CONTAMINAÇÃO DE EFLUENTES

Muitas atividades industriais são responsáveis pela geração de efluentes contendo altas concentrações de cromo, como é o caso dos processos industriais de curtimento de couro, galvanoplastia, mineração, metalurgia, fabricação de aço e pigmentos da indústria têxtil (BAYAZIT e KERKEZ, 2014).

Na Tabela 1.1 são apresentados os metais de maior recorrência nas atividades industriais

Tabela 1.1 Metais tóxicos presentes nas atividades industriais

Atividade	Al	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Sn	Zn	Ni
Acabamento metálico			x	x	x						x	
Aço		x	x	x		x			x		x	x
Curtimento de couro				x								
Fertilizantes	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
Poipa e papel				x	x		x		x		x	x
Produtos químicos orgânicos	x	x	x	x		x	x		x	x	x	
Refino de Petróleo		x		x	x	x			x		x	x
Têxtil				x								

Fonte: Adaptado de Mohan e Pittman (2006)

As indústrias do segmento de galvanoplastia e metal mecânico têm sido consideradas como uma das principais fontes geradoras de efluentes contendo metais tóxicos, como é o caso do cromo. Nos processos de eletrodeposição, na indústria de galvanoplastia, o uso de um volume considerável de água de lavagem e soluções metálicas contendo principalmente os metais cromo, cobre, zinco, níquel, chumbo e cádmio; em altas concentrações, podem ocasionar contaminação em águas superficiais e subterrâneas além de suas propriedades tóxicas e capacidade de acumulação em tecidos vivos ao longo da cadeia alimentar (MOHAMMED et al., 2011). Entre os metais presentes no efluente do processamento galvânico, o cromo

na sua forma hexavalente tem sido enquadrado como o de maior potencial de poluição e contaminação, estando presente geralmente na forma de cromato (CrO_4^{2-}) e dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), (MOHAMMED et al., 2011).

O processo da indústria de galvanoplastia consiste em uma sequência de banhos da superfície de um material visando o aumento de sua durabilidade, sendo também, aplicado para fins decorativos. O recobrimento do material ocorre através da transferência de íons metálicos presente em uma solução para a superfície desejada, seja metálica ou não (LIU et al., 2016). O preparo do material para o tratamento galvânico pode ser dividido em quatro etapas. A primeira delas condiz ao polimento do material, cuja finalidade é proporcionar uma superfície mais lisa e homogênea sob o ponto de vista microscópico, com o intuito de diminuir a possibilidade de acúmulo de íons que possam vir a oxidar a peça em pontos específicos. A segunda etapa é referente ao desengraxe para que se tenha a remoção de materiais gordurosos. A etapa seguinte consiste na decapagem da superfície do material, a fim de se remover impurezas e óxidos por meio de soluções ácidas apropriadas. E por fim, tem-se a etapa de lavagem na qual o material é mergulhado em solução alcalina e posteriormente, em água (TEIXEIRA, 2015). O processo de eletrodeposição, após o preparo da superfície do material, consiste em uma série de banhos distintos, como a cobreação, cromação, niquelação e zincagem, de acordo com as características e propriedades finais desejadas.

1.2.1. Cromação A deposição do cromo na superfície de outros materiais é feita principalmente por meio de uma solução aquosa de ácido crômico (H_2CrO_4) na presença de catalisadores, sendo comumente utilizados, o sulfato e o fluoreto. (RAMANATHAN, 1990). O processo de cromação pode ser dividido entre as classes de cromo decorativo e cromo duro. O cromo decorativo consiste na aplicação de uma fina camada de metal sobre a superfície de outros materiais previamente tratados (banhos de cobre e níquel brilhante) com o objetivo de prevenir a formação de manchas e aumentar sua resistência. Já o cromo duro consiste na deposição de uma camada de metal mais grossa sob a superfície do material visando melhorar as propriedades de dureza e melhorar a resistência à corrosão, abrasão e calor. Esse processo tem sido utilizado em rolamentos, anéis, cilindros, eixos e ferramentas de corte (RAMANATHAN, 1990; LASHERAS et al., 2014).

2.1.1.7. IMPACTOS AMBIENTAIS DOS METAIS PESADOS

As indústrias em geral trouxeram diversos benefícios para os avanços ocorridos na sociedade, No entanto, é preciso lembrar dos diversos impactos que

ocorrem devido ao crescimento das indústrias. Um dos problemas é os altos níveis de contaminação da natureza, que pelo descarte incorreto dos efluentes residuais comprometem a integridade da população e das espécies locais. Essa contaminação ocorre pela presença de diversos metais pesados e sua característica de bioacumulação. (LEITÃO & LEITÃO, 2025; OKORO et al., 2023)



Figura 2- notícia sobre contaminação por metais pesados Fonte:jornal da usp 15/06/2023



Figura 3-Imagem Ilustrativa de contaminação por metais pesados

Assim, torna-se evidente que é necessário reverter tais estragos para a melhora na qualidade de vida e para o meio ambiente.

7.1 Casos de contaminação por Cromo.

BRASIL

No Brasil, a presença de cromo na água subterrânea do município de Urânia-SP foi registrada desde 1977, quando foram detectadas concentrações frequentemente acima do limite considerado seguro para consumo humano, que é de 0,05 mg/L. Essa situação ocorre devido às reações químicas que acontecem na natureza, chamadas de reações redox, que transformam o cromo III presente nas rochas em cromo VI. O mineral chamado diopsídio cromífero foi identificado como o mais provável responsável por contaminar essa região. (BERTOLO et al., 2011.)

Ainda no Brasil, em 2001, um caso chamou a atenção para uma área rural chamada Assentamento Monte Alegre, localizado no município de Motuca (SP). Nesse local, os moradores praticavam a agricultura familiar, plantando frutas,

legumes e criando animais. Entretanto, cerca de 200 toneladas de resíduos de curtumes, que contenham sais de cromo, foram descartadas ilegalmente nesta região. Os assentados não sabiam de onde esse material vinha e quais substâncias ele continha. Por isso, utilizaram as sobras do resíduo para incorporar ao solo e às cavas de plantio, pensando que isso ajudaria a fertilizar a terra. No entanto, isso acabou contaminando toda a biodiversidade subterrânea. (HELENE et al., 2016).

2.1.1.8. ESTRATÉGIAS DE REMEDIAÇÃO

As estratégias de remediação, são os processos realizados com o intuito de descontaminar e de restaurar os efluentes, solos e ambientes contaminados. Assim, o impacto do efluente no descarte será menor. No entanto tais estratégias não são as mais eficientes, ao que possuem técnicas pouco eficazes e ou que deixam resíduos de contaminantes no efluente, mesmo sendo em menor quantidade. (SILVA, 2024)

8.1 Os tipos de Estratégias

1. Remediação Química: Nesse eixo são utilizadas reações químicas para desacelerar ou remover os contaminantes. Um exemplo de remediação química é a técnica de precipitação dos metais, os transformando em compostos insolúveis, facilitando sua remoção por decantação ou filtração. (SILVA, 2024)

2. Remediação Física: Nesse eixo são utilizados processos físicos para separar os contaminantes dos ambientes. Uma técnica comumente utilizada é a adsorção em materiais como carvão ativado com o intuito de separar os metais pesados do contaminando. (ALBERTIN, 2019)

3. Remediação Biológica: Nesse eixo utiliza microrganismos, plantas ou algas para absorver, acumular ou transformar os contaminantes. Uma técnica utilizada nesse exemplo é a biorremediação que utiliza plantas para remover ou alterar a presença dos contaminantes. (NAVA et al., 2022)

2.1.1.9. METAIS PESADOS

Os metais pesados são elementos com massa atômica elevada e densidade superior a 5 g/cm³. Entre eles, destacam-se o **cromo (Cr)** e o **cobre (Cu)**, que, apesar de desempenharem funções fisiológicas em organismos vivos, quando em concentrações elevadas se tornam tóxicos. Esses metais são frequentemente encontrados em efluentes industriais, como os provenientes das indústrias de galvanoplastia, curtumes, mineração, eletroeletrônica, produtos de consumo e têxtil. Assim, a presença de metais pesados em diversas áreas mostra os altos riscos de contaminação do meio ambiente. Pois, a presença de metais pesados em altos níveis de concentração e ou descartados de maneira incorreta no meio ambiente

podem ser prejudiciais, ao que possuem propriedade acumulativa e um meio instável fazendo com que a contaminação seja instantânea e de difícil remoção. Dessa forma, gera um acúmulo desses metais na água, no ar, no solo, interfere na vida aquática e acarreta bioacumulação, podendo contaminar diversas espécies, inclusive os seres humanos. (BARROS et al. 2018; AMBRÓSIO et al. 2021)

9.1 Cromo hexavalente (Cr^{3+}) e Cromo Hexavalente (Cr^{6+})

O cromo é um dos vários metais pesados que prejudicam o meio ambiente quando são jogados junto com outros tipos de resíduos. Ele existe em duas formas de oxidação: o Cr^{3+} e o Cr^{6+} . As duas formas são tóxicas para o meio ambiente quando são descartadas de forma inadequada. O cromo trivalente é a forma mais segura desse elemento, ele é essencial para o corpo humano quando ingerido em quantidades corretas e é o mais seguro para ser descartado, desde que não esteja presente em grandes quantidades nos resíduos. (SHEKHAWAT; CHATTERJEE; JOSHI, 2015)

O cromo hexavalente é a forma mais perigosa do cromo, pois tem características que aumentam ainda mais a toxicidade no meio ambiente e na saúde humana.

Ele é solúvel em água, podendo contaminar rios e lagos. Além disso, ele pode se acumular no corpo dos seres vivos, tornando-se ainda mais perigoso. Ele também é biodegradável, o que significa que pode ficar por muito tempo nos ecossistemas. O cromo hexavalente é o mais usado nas indústrias, desde a produção de tintas até a proteção contra corrosão de materiais. (FERREIRA, 2023)

9.2 Estudos e exemplos de remoção de Cromo com biossorventes

Tendo em vista os impactos causados pela presença de cromo e de outros metais pesados nos efluentes foram criados diversos estudos de remoção dos mesmos. Alguns são:

Casca de jabuticaba: Estudos demonstraram que a casca da jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) possui alta afinidade por Cr^{6+} , com taxas de remoção superiores a 85% em pH 2,0 (NASCIMENTO et al., 2022).

Microalgas inativas (*Chlorella sorokiniana*): Uma biomassa inativa foi usada com sucesso na remoção de Cr^{6+} em solução aquosa, apresentando remoções de até 38% sem necessidade de pré-tratamento químico (FERREIRA, 2023).

Alga marinha modificada: Algas tratadas com agentes redutores e submetidas à luz UV apresentaram remoção superior a 70% de Cr^{6+} , combinando fotocatalise e biossorção (OLIVEIRA, 2022).

2.1.1.10. PROCESSOS CONVENCIONAIS DE REMOÇÃO DE METAIS PESADOS

A existência de metais pesados em águas residuais industriais representa um sério perigo tanto para o meio ambiente quanto para o bem-estar humano. Isso ocorre porque esses metais são tóxicos, permanecem no ambiente por muito tempo e podem se acumular em organismos vivos. Para combater isso, contamos com vários métodos de tratamento padrão, incluindo precipitação química, troca iônica, adsorção, filtração por membrana e eletrocoagulação. O objetivo dessas técnicas é reduzir os níveis desses poluentes a níveis seguros antes que a água seja descartada ou reutilizada. No entanto, como (BARROS et al. 2018) aponta, embora esses métodos tradicionais geralmente funcionam bem, eles têm desvantagens. Tais quais podem ser processos não muito seletivos, podem ser caros e podem gerar resíduos adicionais, muitas vezes exigindo etapas adicionais de tratamento.

2.1.1.11. PROCESSOS DE ADSORÇÃO

11.1 Adsorção

A adsorção é uma operação unitária de transferência de massa que consiste no assentamento de certos compostos disponíveis em uma fase fluida (como líquido ou gás) na superfície de uma partícula sólida, o que possibilita a separação das substâncias que antes estavam no fluido deste mesmo. Desse modo, para que a reação ocorra é necessária a presença de duas espécies: um adsorvente ou adsorbato (adS ou adsB) e adsorvato ou adsorbato (adV ou adB) que é o material que fornecerá a superfície para que ocorra o acúmulo de adsorvato e que equivale a parte que depositará na interface da primeira espécie, respectivamente (NASCIMENTO et al, 2014).

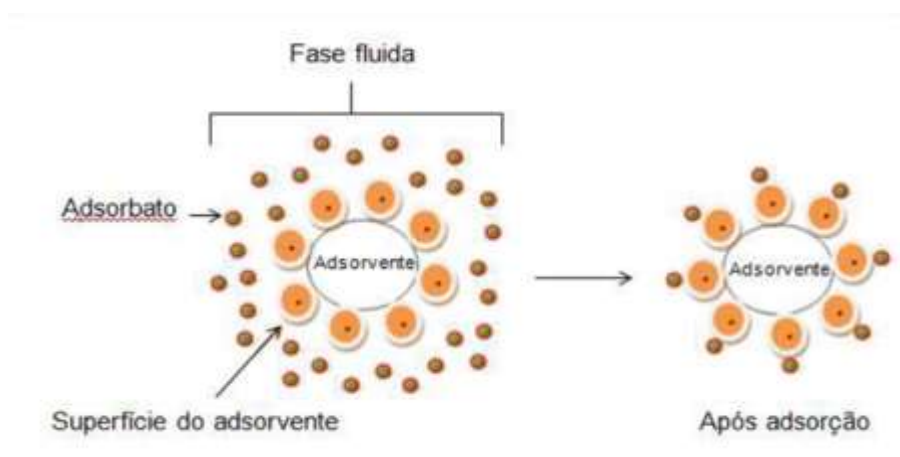


Figura 4 Processo adsortivo Fonte: Adaptado de FIBER, RAW COCONUT. POTENCIAL E CINÉTICA DE ADSORÇÃO DE CROMO HEXAVALENTE POR.

11.2 Biossorção

A biossorção é um processo adsortivo que utiliza biomassas microbianas ou não, para absorver contaminantes industriais sendo um processo importante no

tratamento de efluentes líquidos, no qual a biomassa é o adsorvente. Diante disso, os nanomateriais têm sido utilizados no tratamento de águas residuais, em função de suas propriedades específicas (elevada área superficial específica e alta reatividade química) e apresentam um considerável resultado em relação à qualidade da água no final do processo, embora muitas vezes apresentem um custo considerável em sua aplicação. Os principais nanomateriais utilizados no tratamento de águas residuais são baseados em materiais estruturados de carbono, como nanotubos de carbono, grafeno e óxido de grafeno. Além disso, esses materiais apresentam os efeitos de toxicidade não são completamente elucidados, com uma morfologia heterogênea que pode gerar certo grau de toxicidade para os organismos vivos e o meio ambiente.

Ademais, os principais métodos terciários de tratamento de águas residuais consistem em troca iônica, processo de separação por membrana e processos oxidativos avançados (POAs). Embora eficientes, estes processos estão associados a algumas desvantagens, como a remoção incompleta do poluente, elevada geração de lodo, alta demanda de reagentes e energia, lodos residuais com metais precipitados e incrustação de membranas.

Dessa forma, os biossorventes apresentam uma excelente alternativa na remoção de contaminantes presentes na água em grandes ou mínimas concentrações, pois oferecem alta eficiência, baixo custo operacional e a possibilidade de reutilização de materiais. A preparação de um biossorvente caracteriza-se pela fonte precursora de biomassa residual, podendo ser matéria viva ou matéria inativa .

No caso da biomassa inativa, os poluentes orgânicos ligam-se passivamente por meio de cargas iônicas à biomassa, enquanto na biomassa viva o processo apresenta maior complexidade. Os biossorventes de origem microbiológica (biomassa viva) atuam em um processo de bioacumulação, o qual é ativado e mediado pelo metabolismo do microrganismo presente, gerando o acúmulo de poluentes no interior das células vivas. Assim, a biossorção caracteriza-se por ser um processo de remoção de poluentes orgânicos, utilizando um material biológico (biossorvente), por meio da adesão dos poluentes na superfície da biomassa, seja por interações físicas e/ou reações químicas. Além disso, é um processo rápido, podendo ser irreversível ou reversível, conforme a interação poluente/biossorvente, existindo a possibilidade de recuperação da biomassa. (MUSTAPHA, M. U., HALIMOON, N, 2015)

11.2.1 Vantagens dos biossorventes em relação aos adsorventes comerciais

A principal vantagem dos biossorventes com relação aos adsorventes sintéticos, é que os adsorventes de origem natural são abundantes, e por serem resíduos de produtos agrícolas, não apresentam valor comercial. Estes biossorventes são fibrosos, de tal forma que seus sítios ativos ficam mais disponíveis para a adsorção de espécies químicas de interesse (adsorvato), desta forma, os biossorventes apresentam capacidades de adsorção comparáveis aos adsorventes comerciais.(DEMIRBAS, 2008); VALDMAN & LEITE (2000)

11.3 Quimissorção e Fisissorção

A literatura usada relata a existência de dois tipos de adsorção, sendo estas a Quimissorção e a Fisissorção. O que difere os dois tipos é a força das interações entre adsorbato e adsorvente. A adsorção química é constituída por ligações covalentes ou iônicas entre as espécies em reação, pois há troca ou compartilhamento de elétrons, dessa forma, é muito difícil revertê-la, já que exige uma quantidade de energia muito maior. É também focalizada, ou seja, só acontece em sítios ativos específicos e por isso que também é específica, nem todo adsorbato vai interagir com o adsorvente, pois fatores como a polaridade exigem um grau de particularidade para cada caso. Já a adsorção física, as interações são pelas forças de Van der Waals, assim, ela não exige tanta especificidade e é reversível, podendo até acomodar diferentes camadas em toda a superfície do adsorvente. (Ameri et al., 2020; Králik, 2014)

	Adsorção Física	Adsorção Química
Calor de adsorção	Baixo (< 20 kJ/mol)	Alto (> 20 kJ/mol)
Ligações	Van der Waals (fracas)	Covalente (fortes)
Camadas adsorvidas	Monocamada ou multicamada	Monocamada
Dissociação de espécies adsorvidas	Nenhuma	Pode ocorrer
Temperatura de ocorrência	Baixas	Baixas a altas (ampla faixa de ocorrência)
Cinética	Rápida e reversível	Pode ser lenta e irreversível
	Sem transferência de elétrons, podendo ocorrer polarização do adsorbato	Transferência de elétrons com formação de ligações entre adsorbato e adsorvente

Figura 6. Diferenças entre a adsorção física e adsorção química Fonte: Adaptado de FIBER, RAW COCONUT. POTENCIAL E CINÉTICA DE ADSORÇÃO DE CROMO HEXAVALENTE POR.

11.3.1 Energia de adsorção e reversibilidade

Conforme dito no tópico anterior, quimissorção consiste em interações fortes entre as duas espécies, e, concomitantemente liberam mais energia com a interação entre as duas espécies, em contrapartida a fisissorção se trata de interações fracas entre adS e adV, liberando menos energia. Nesse sentido, a energia liberada influencia diretamente a energia de dessorção (quebra da interação entre adS e adV), sendo as adsorções químicas quase irreversíveis por necessitarem de uma enorme quantidade de energia para o fazerem e as físicas completamente reversíveis, pois, são mais fracas. (SCHMAL, 2010; YAGUB et al., 2014)

2.1.1.12. ADSORVENTES DE ORIGEM ORGÂNICA

12.1 Caracterização de biomateriais como sabugo de milho, palha de café e fibra de coco

Os avanços das questões ambientais nas últimas décadas, face aos intensos processos de degradação generalizada do ambiente e dos recursos naturais no âmbito industrial, têm propiciado uma grande preocupação no que diz respeito ao descarte de resíduos tóxicos. Dentre os resíduos gerados nas indústrias, os metais pesados merecem toda a atenção, pois quando lançados na água como resíduos industriais podem ser absorvidos pelas células animais e vegetais. Os íons metálicos pesados podem causar muitas doenças e sérios problemas fisiológicos, já que são acumulativos no corpo humano. Os resíduos contendo cádmio, cromo, chumbo, manganês e níquel possuem alto poder de contaminação e, com facilidade, atingem os lençóis freáticos ou mesmo reservatórios e rios, que são as fontes de abastecimento de água das cidades. O contato com a pele pode causar dermatite alérgica e provocar ulcerações na pele, formando cicatrizes, perfurações do septo nasal, câncer, irritação neuromuscular, cefaleia, náuseas e desmaios. Há também suspeitas de que possam afetar o sistema imunológico de seres humanos (DAGNINO et al, 2012)

12.1.1 Fibra da casca de coco verde

A fibra da casca de coco verde destaca-se como biossorvente eficiente para remoção de metais pesados, ao possuir uma estrutura porosa e fibrosa desde o mesocarpo até partes da casca. A fibra também tem um alto nível de descarte, ao que a produção do n coco em alta escala gera muito lixo residual que acaba levando anos para se decompor devido a durabilidade desse material. Assim, considerando seu baixo custo, renovabilidade e excelente capacidade de remoção, a fibra de coco verde representa uma alternativa sustentável e viável aos métodos convencionais de tratamento de águas contaminadas por metais pesados. (GIRALDELLI et al. 2020)

12.1.1.1 Caracterização das fibras do coco verde na adsorção

A utilização do coco verde como material adsorvente, apresenta grande potencial devido ao seu elevado teor de matéria orgânica composta principalmente por lignina, cerca de 35 - 45%, e celulose, cerca de 23 - 43 % e estas substâncias possuem grupos hidroxila, metoxi e carboxílicos os quais são prováveis sítios de adsorção de metais. A celulose e a lignina são biopolímeros reconhecidamente associados à remoção de metais pesados (SOUZA, 2007)

Assim, define-se a celulose como um polímero de cadeia de glicose, assim elevados conteúdos de glicose representam elevados teores de celulose. A lignina é uma substância que age como aglutinante mantendo as cadeias de celulose unidas, a combinação das duas confere às plantas resistências e flexibilidade. A estrutura molecular confere à celulose as seguintes propriedades características: hidrofiliabilidade, quiralidade, degradabilidade e ampla variabilidade química iniciada pela alta reatividade dos grupos hidroxila (OH) (SALVADOR, G. 2009).

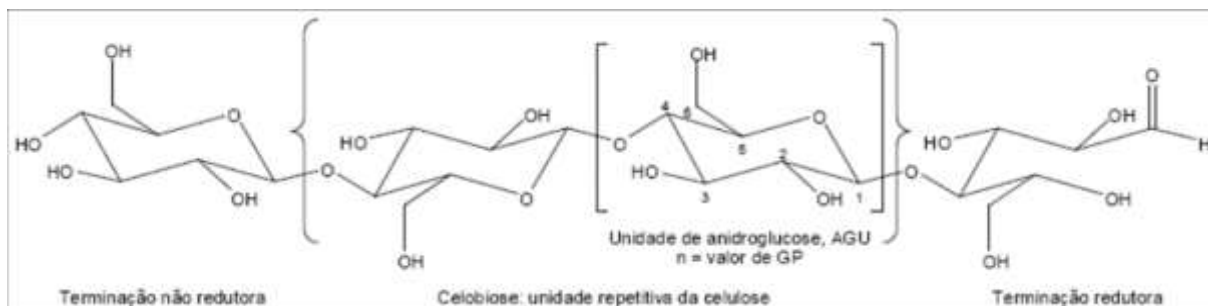


Figura 5. Molécula da celulose Fonte: Adaptado de SALVADOR, G. 2009.

2.1.1.13. CAPACIDADE ADSORTIVA NOS TRATAMENTOS DE EFLUENTES

Acredita-se que a adsorção seja um fenômeno de superfície no qual um adsorvente, frequentemente um suporte sólido, envolve as moléculas de gás ou líquido em sua superfície, em vez de em seu núcleo. Adsorbato refere-se às moléculas de líquido ou gás que são adsorvidas na superfície de um adsorvente. Dessorção é o processo oposto, que lida com a liberação de moléculas de gás ou líquido adsorvidas (moléculas de adsorbato). Para otimizar a capacidade adsortiva de um material (especialmente em contextos como adsorventes para remoção de contaminantes) ., são realizados métodos químicos que auxiliam na remoção de tais contaminantes.(FERRAZZO et al., 2018).

Nesse sentido, o descarte de águas residuais sem tratamento adequado ou apenas parcialmente tratadas em rios, lagos e outros corpos d'água pode causar grave poluição ambiental. Essas águas podem ter excesso de matéria orgânica, nutrientes, hidrocarbonetos, metais pesados e substâncias químicas que afetam o meio ambiente. Dessa forma, a presença desses componentes pode levar à eutrofização, problemas de saúde, impactos ambientais e problemas na economia. (FERRAZZO et al., 2018). Assim, realizar o tratamento de águas residuárias que garanta o atendimento aos padrões ambientais e conseqüentemente, segurança ao lançar nos corpos receptores, é um imbróglio, pois requer a integração de diferentes processos, considerando as características específicas de cada efluente e a viabilidade sob o ponto de vista técnico e econômico. (FERRAZZO et al., 2018)

13.1. Fatores de influência da adsorção

Para que ocorra a adsorção de maneira eficiente existem alguns fatores que influenciam nesse processo, tais como

Área superficial: A área superficial é essencial para que ocorra adsorção ao que por ser um fenômeno de superfície, ou seja, ocorre apenas na parte externa do adsorvente , quanto maior for a área de contato mais eficiente será o processo, visto que, aumentará a quantidade de sítios ativos disponíveis para fazerem interação. Logo, quanto maior a área superficial, maior a eficiência da reação (SEKAR et al., 2004).

Propriedades do Adsorvente: Fatores como granulometria, porosidade, tamanho, profundidade e quantidade dos poros da superfície, sítios ativos e grupos

funcionais na interface do adv influenciam diretamente na reação (DOMINGUES, 2005).

Propriedades do adsorvato: EM principal, a polaridade, é esta que determinará as interações eletrostáticas do sistema, é ela quem define o grau de afinidade entre adsorvato, adsorvente e solvente que o adsorvato se encontra. (NGAH; HANAFIAH, 2008).

Temperatura: A aplicação da energia térmica em um sistema de adsorção pode acelerar a reação por dar às partículas mais mobilidade. Além disso, o calor pode ajudar a dissolução do adsorvato no solvente ou auxiliar a desobstrução dos poros do adsorvente, fornecendo mais área de contato e sítios ativos disponíveis.(DOGAN; ALKAN; DEMIRBAS, 2008).

Potencial Hidrogeniônico (pH): O pH tem grande influência na adsorção pois é ele quem eletrifica a interface do adsorvente, deixando-o mais eletricamente positivo ou negativo. Isso se deve, pois, a superfície absorverá os hidrons (H^+) ou os complexos de hidroxilas (OH^-) primeiro e então adquirirá uma carga. (APEEL; MA; RHUEL, 2003).

Ponto Zero de Carga (PZC): O ponto de carga zero se trata da faixa do pH que a interface do adsorvente se encontra neutra (mesma quantidade de carga positiva e negativa). Nesse contexto, se o meio em que ocorrer a adsorção for ácido o número de H^+ será maior que a quantidade OH^- e o adsorvente absorverá mais carga positiva ficando positivamente carregado e podendo atrair ânions. Caso o meio esteja alcalino a situação se inverte e o número de hidroxilas se torna superior ao número de hidrons, por isso o adS adquire carga negativa, possibilitando-o atrair cátions livres na solução. (ČEROVIĆ et al., 2007).

Tempo e concentração: A maior parte da adsorção acontece nos primeiros minutos de interação, pois, há mais sítios ativos disponíveis e o gradiente de concentração é maior possibilitando maior chance de moléculas do adsorvato com o adsorvente. Conforme a reação caminha para o equilíbrio a adsorção tende a ficar mais lenta. A proporcionalidade entre a concentração de adsorvente e o tempo é diretamente proporcional, visto que, quanto mais adsorvente, mais sítios ativos e mais potencial adsortivo.(LANGMUIR I, 1916)

13.2 Processo de modificação química Coagulação e Floculação:

De acordo com Spinelli (2001), as etapas de coagulação e floculação representam uma das fases mais críticas no tratamento de água para abastecimento público. Qualquer falha nesse processo pode resultar em sérios prejuízos, tanto na qualidade da água distribuída quanto nos custos de produção. A finalidade principal

do processo de coagulação e da floculação é promover a agregação das impurezas presentes na água – sejam elas partículas em suspensão fina, substâncias em estado coloidal ou dissolvidas, além de microrganismos como bactérias, protozoários e plâncton – em partículas maiores, denominadas flocos. Esses flocos, podem então ser removidos por sedimentação, filtração ou, em determinados casos, por flotação.

O processo de coagulação, geralmente conduzido com sais de alumínio ou ferro, envolve dois fenômenos distintos. O primeiro é de natureza química e ocorre pela reação do coagulante com a água, resultando na formação de espécies hidrolisadas de carga positiva. Esse fenômeno depende da concentração do metal adicionado e do pH final da mistura. O segundo é de natureza física e corresponde ao transporte dessas espécies hidrolisadas, de modo que entrem em contato com as impurezas presentes na água. Trata-se de um processo extremamente rápido, variando de frações de segundo até cerca de 100 segundos, dependendo de fatores como pH, temperatura e concentração de impurezas. Em uma Estação de Tratamento de Água (ETA), esse fenômeno ocorre na unidade de mistura rápida (DI BERNARDO, 1993).

Assim, a coagulação se manifesta por meio de dois mecanismos principais: a coagulação eletrocinética, na qual ocorre a redução do Potencial Zeta através da ação de íons ou colóides de cargas opostas; e a coagulação ortocinética, em que as micelas se unem para formar flocos, agregando as partículas suspensas. O potencial Zeta, nesse contexto, corresponde à medida do potencial elétrico existente entre a superfície externa da camada compacta ao redor da partícula e o meio líquido no qual ela se encontra (DANTAS et al, 2007).

2.1.1.14. ISOTERMAS

O equilíbrio de adsorção é geralmente um requisito essencial para obtenção de informações relevantes sobre projeto e análise de um processo de separação por adsorção. Quando uma determinada quantidade de um sólido (m), este comumente chamado de adsorvente entra em contato com um dado volume (V) de um líquido contendo um soluto absorvível, este chamado adsorvato ou adsorbato, a adsorção ocorre até que o equilíbrio seja alcançado. Isto é, quando o adsorvato é colocado em contato com o adsorvente, as moléculas ou íons tendem a fluir do meio aquoso para a superfície do adsorvente até que a concentração de soluto na fase líquida (C_e) permaneça constante. Nesse estágio é dito que o sistema atingiu o estado de equilíbrio e a capacidade de adsorção do adsorvente (q_e) é determinada. Após as determinações de (q_e) C_e , pode-se construir um gráfico dos valores de q versus C_e (q na ordenada, ou eixo vertical, e C_e na abscissa, ou eixo horizontal) o qual tem como resultado um gráfico de uma isoterma de adsorção. A palavra isoterma está relacionada com o fato de que os ensaios são realizados em temperatura constante (isto é, sob condições isotérmicas) ((NASCIMENTO et al., 2020).)

$$q = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

Em suma, as isotermas são diagramas que mostram a variação da concentração de equilíbrio no sólido adsorvente com a pressão parcial ou concentração da fase líquida, em uma determinada temperatura. Os gráficos assim obtidos podem apresentar-se de várias formas, fornecendo informações importantes sobre o mecanismo de Adsorção. (NASCIMENTO et al., 2020).

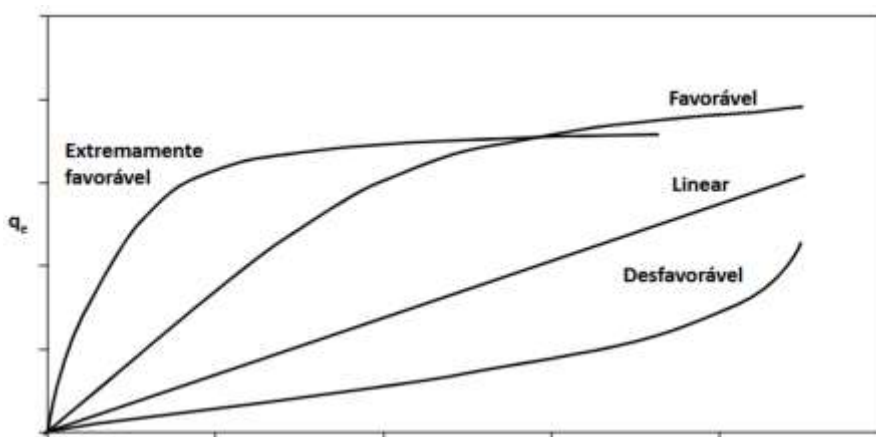


Figura 1.4 - Formas possíveis de isotermas de adsorção. Fonte: Adaptado de NASCIMENTO et al., 2020.

Muitas equações de isotermas foram propostas com dois ou mais parâmetros para ajustar os dados experimentais sobre os valores de q versus C_e . Dentre essas, podemos citar as equações de Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson, Temkin e Dubinin–Radushkevich. Dentre as mais comumente utilizadas, encontram-se as equações de Langmuir e Freundlich. Suas maiores utilizações são devido ao fato de se prever a capacidade máxima de adsorção do material (modelo de Langmuir) e capacidade de descrever o comportamento dos dados experimentais (NASCIMENTO et al., 2020).

14.1 Modelos de isotermas de adsorção

Isoterma de Langmuir

A equação modelo de Langmuir é uma das equações mais utilizadas para representação de processos de adsorção. Essa, por sua vez, apresenta os seguintes pressupostos:

- Existe um número definido de sítios.
- Os sítios têm energia equivalente e as moléculas adsorvidas não interagem umas com as outras.

- A adsorção ocorre em uma monocamada.
- Cada sítio pode comportar apenas uma molécula adsorvida.(NASCIMENTO et al., 2020)

$$q_e = \frac{q_{max}K_l C_e}{1+K_l C_e}$$

Em que: **q**: quantidade do soluto adsorvido por grama de adsorvente no equilíbrio (mg g⁻¹);

q_{max} : capacidade máxima de adsorção (mg g⁻¹);

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_l q_{max}} + \frac{C_e}{q_{max}}$$

K_l : constante de interação adsorvato/adsorvente (L mg⁻¹);

$$K_l = \frac{k_1}{k_2} * 1 \quad k_1 : \frac{C_e}{q_{max}} * 2 \quad k_2 : \frac{1}{K_l q_{max}}$$

1,2: constantes auxiliares derivadas da linearização, sem propriedades físicas do sistema

C_e : concentração do adsorvato no equilíbrio (mg L⁻¹). (NASCIMENTO et al., 2020)

14.1.1 Isoterma de Freundlich

O modelo proposto por Freundlich foi um dos primeiros a equacionar a relação entre a quantidade de material adsorvido e a concentração do material na solução em um modelo com características empíricas. Este modelo empírico pode ser aplicado a sistemas não ideais, em superfícies heterogêneas e adsorção em multicamada (CIOLA,1981; MCKAY, 1996). O modelo considera o sólido heterogêneo, ao passo que aplica uma distribuição exponencial para caracterizar os vários tipos de sítios de adsorção, os quais possuem diferentes energias adsortivas (FREUNDLICH, 1906 apud FEBRIANTO, 2009) (NASCIMENTO et al., 2020.).

$$\log \log q_e = \log \log K_f + \frac{1}{n} \log \log C_e$$

Em que:

q_e : quantidade de soluto adsorvido (mg g⁻¹);

C_e : concentração de equilíbrio em solução (mg L⁻¹);

1/n: constante relacionada à heterogeneidade da superfície;

K_f : constante de capacidade de adsorção de Freundlich (mg^{1-(1/n)}(g⁻¹)L^{1/n}) (NASCIMENTO et al., 2020.).

As constantes e/n podem ser obtidas através do intercepto e inclinação do gráfico de $\log \log q_e$ em função do $\log \log C_e$. O parâmetro n é um indicativo de favorabilidade do processo de adsorção, quando inserido no intervalo $1 < n < 10$ (BRDAR et al., 2012). O fator exponencial desta isoterma ($1/n$) normalmente varia entre 0 e 1, e relaciona-se à intensidade de adsorção e heterogeneidade da superfície do adsorvente, descrevendo um processo mais heterogêneo à medida que o valor se aproxima de zero. Se $1/n < 1$, as interações entre adsorvente-adsorbato são mais fortes, caracterizando uma adsorção química. No entanto para $1/n > 1$, as ligações entre adsorvente-adsorbato são mais fracas, o que caracteriza uma adsorção física (MATOUQ et al., 2015; FRANGUELLI, 2018.)

2.1.1.15. APLICAÇÕES PRÁTICAS E ESTUDOS DE CASOS

Tendo em vista os métodos apresentados anteriormente, buscamos mostrar maneiras alternativas e sustentáveis de realizar a remoção e detecção de cromo hexavalente e outros metais pesados através da adsorção com a fibra do coco verde, nesse sentido utilizaremos uma metodologia baseada em alguns estudos da literatura onde a utilização desse bioadsorvente trouxe resultados, a fim de comparar esses resultados e analisar quais tiveram a melhor eficiência na remoção de metais pesados. (NASCIMENTO et al. 2014)

2.2 Metodologia

2.2.1 Materiais e Métodos

2.2.1.1 Materiais

A metodologia e os materiais usados nela foram baseados nos trabalhos de (FRANGUELLI, 2018.) e (NASCIMENTO et al., 2020.) que forneceram a base das práticas para a execução da comparação, sendo assim, utilizamos todos os parâmetros e medidas relatados.

1. Mesocarpo do coco

Os cocos inteiros foram pegos, brevemente higienizados e postos no congelador para aumentar a porosidade e diminuir a dureza das fibras. Dois dias depois foram retirados do freezer, descongelados, cortados em cavacos de aproximadamente 2x2cm e desinfetados com a solução de desinfetante de NaClO de acordo com as especificações do rótulo.

2. Soluções de cromo

Inicialmente, foi feita uma solução 1000 mg/L de Cr⁶⁺ com o sal cromato de potássio (KCrO₄), onde, com o volume de 200 ml utilizamos uma massa de 0,347g. Em seguida, foi realizada a diluição dessa concentração nas seguintes faixas: 250 mg/L, 200 mg/L, 150 mg/L, 100 mg/L, 50 mg/L e 25 mg/L, todas com volume final de 200 ml.

3. Solução padrão de cromo

Uma solução padrão de cromo hexavalente da Fluka foi usada na detecção ao passar as amostras no espectrofotômetro.

4. Solução de ativação

Uma solução de 1M de HNO₃ foi feita para ser utilizada na ativação química do adsorvente, visto que, para adsorver o ânion "CrO₄⁻" a superfície do adsorvente deve estar impregnada de prótons (H⁺) que serão disponibilizados por meio da solução ácida em questão.

5. Solução de difenilcarbazida

Em um frasco âmbar foi posto 0,25 g de Difenilcarbazida -1-5 e em seguida 50 ml de acetona, a solução foi agitada até a dissolução total do indicador.

6. Solução de equilíbrio de ph

Soluções de 1M de H₂SO₄ e NaOH foram feitas a fim de promover o equilíbrio do ph nos momentos necessários

2.2.1.2 Métodos

2. PRÉ-TRATAMENTO

O mesocarpo do coco foi picado em cavacos de aproximadamente 2x2 com o auxílio de uma faca de cozinha bem amolada após remover a casca. Em seguida higienizado com uma solução de NaClO específica para desinfecção assim como informa o rótulo do fabricante.

Em decorrência da faca usada ser de ferro, o NaClO reagiu com o Fe e resultou num complexo marrom-alaranjado que concluiu-se que era muito provavelmente seria um pouco de Hidróxido de ferro, prosseguiu-se a prática pois foi confirmado numa pesquisa rápida que seria de muito pouca influência no objetivo final. As fibras foram lavadas em água corrente e adquiriram uma cor alaranjada em detrimento da oxidação. Em seguida, o produto foi posto para secar em estufa a 103° ± 5°C por 24 horas para remoção total da água.



Com o auxílio de um liquidificador, os cavacos tiveram sua gramatura diminuída a fim de aumentar a área de contato transformando-os em fibras. O produto final da trituração foi dividido em 3 partes com as seguintes massas: 125 g, 100g e 100g, o qual a primeira foi usada para o ativamento da fibra, a segunda para o semi-ativamento e terceira para o uso bruto, sendo então reservada.

TRATAMENTO QUÍMICO

O reservado de 200 gramas de massa foi dividido em dois Erlenmeyer de 250 ml e submetido ao dobro (em mililitros) da solução de 1M de ácido nítrico. Em seguida, foi posto em repouso por uma noite e ao dia seguinte foi para indução de calor através do banho maria a 60 °C por quatro horas, voltando ao repouso após o tempo estipulado.



Fonte: Imagem autoral

Depois, o excesso da solução ácida foi retirado com uma filtração a vácuo, onde o adsorvente foi lavado até que o eluente saísse com pH neutro (na faixa de 7); Por fim, o adsorvente quimicamente ativado secou a 105° C \pm 5°C por 24 horas em uma estufa da Nova Ética. A parte do adsorvente que não passou por tratamento ácido foi lavada a fim de remover tanino que poderiam comprometer a cor do eluente final

3. ADSORÇÃO

Preparação das soluções e ensaios de adsorção

Os experimentos de adsorção foram realizados em bateladas utilizando frascos de Erlenmeyer. Seis Erlenmeyers de 125 ml receberam 40 ml de soluções de cromo hexavalente (Cr^{6+}) com concentrações conhecidas de 25, 50, 100, 150, 200 e 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Em cada frasco, foi adicionado inicialmente 0,5 g de adsorvente.



O sistema foi submetido à agitação constante até que o equilíbrio de adsorção fosse atingido. Baseado em estudos prévios, os frascos com concentrações mais altas (100, 150, 200 e 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) permaneceram em agitação por 4 h e 40 min, enquanto aqueles com concentrações mais baixas (25 e 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) foram agitados por 1 h e 40 min. O mesmo procedimento foi repetido com o adsorvente previamente tratado, utilizando-se as mesmas quantidades de solução e adsorvente, nas mesmas faixas de concentração e tempos de equilíbrio.

Filtração e preparação das amostras

Após o término do tempo de adsorção, cada solução foi submetida à filtração a vácuo para separação do adsorvente. O eluente obtido foi diluído de acordo com a tabela abaixo em balões de 100 ml:

FAIXA	FATOR DE DILUIÇÃO	QUANTIDADE USADA (ML)
250 mg/L	500 vezes	0,20
200 mg/L	400 vezes	0,25
150 mg/L	300 vezes	0,33
100 mg/L	200 vezes	0,50
50 mg/L	100 vezes	1,0
25 mg/L	50 vezes	2,0

Em seguida, foi transferido 5 ml da diluição para ampolas, acidificado com 2 ml solução de H₂SO₄ 0,5 M e adicionado 2 ml do indicador difenilcarbazida 1,5. As amostras descansaram por 10 minutos até a completa reação.



Análise espectrofotométrica

As amostras foram analisadas em espectrofotômetro seguindo os parâmetros estabelecidos pela HAC para determinação de Cr⁶⁺ em solução aquosa. As leituras obtidas foram registradas e posteriormente utilizadas para a construção das isotermas de adsorção.

Construção das isotermas de adsorção com os resultados do espectrofotômetro, foram calculadas as concentrações residuais de Cr⁶⁺ e os respectivos teores adsorvidos pelo material, possibilitando a construção das isotermas de Langmuir e Freundlich para comparação entre o adsorvente bruto e o tratado.

2.3 Resultados e Discussão

ADSORVENTE BRUTO

FAIXA	ABSORBÂNCIA	DILUIÇÃO	RESULTADO
250 mg/L	0,206	500 vezes	103,0
200 mg/L	0,202	400 vezes	80,8
150 mg/L	0,199	300 vezes	59,7
100 mg/L	0,186	200 vezes	37,2
50 mg/L	0,172	100 vezes	17,2
25 mg/L	0,154	50 vezes	7,7

ADSORVENTE TRATADO

FAIXA	ABSORBÂNCIA	DILUIÇÃO	RESULTADO
250 mg/L	0,074	500 vezes	37,0
200 mg/L	0,040	400 vezes	16,0
150 mg/L	0,038	300 vezes	11,4
100 mg/L	0,022	200 vezes	4,4
50 mg/L	0,019	100 vezes	1,9
25 mg/L	0,006	50 vezes	0,3

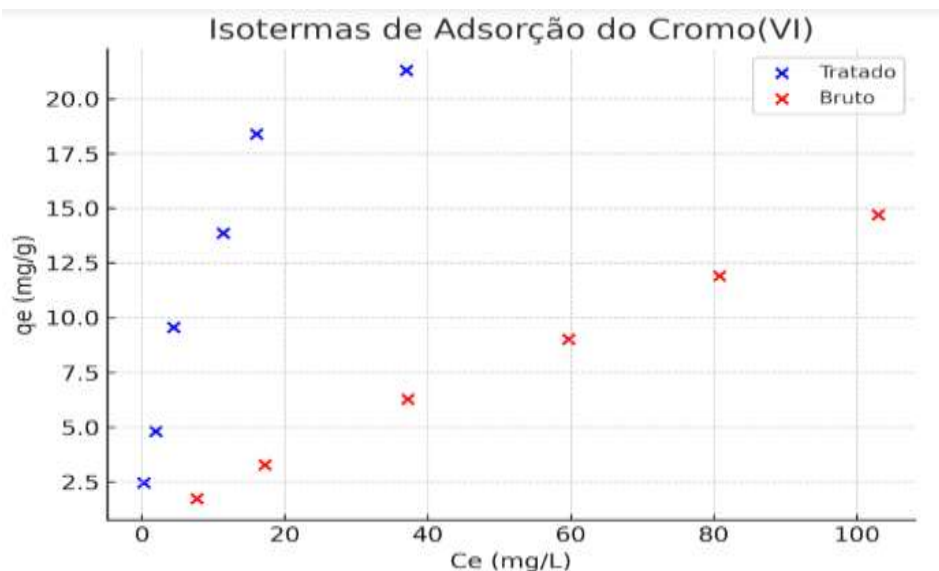
ADSORVENTE BRUTO

C0 (mg/L)	Abs	Fator diluição	Ce (mg/L)	qe (mg/g)
250.0	0.206	500.0	103.0	14.7
200.0	0.202	400.0	80.8	11.92
150.0	0.199	300.0	59.7	9.03
100.0	0.186	200.0	37.2	6.28
50.0	0.172	100.0	17.2	3.28
25.0	0.154	50.0	7.7	1.73

ADSORVENTE TRATADO

C0 (mg/L)	Abs	Fator diluição	Ce (mg/L)	qe (mg/g)
250.0	0.074	500.0	37.0	21.3
200.0	0.04	400.0	16.0	18.4
150.0	0.038	300.0	11.4	13.86
100.0	0.022	200.0	4.4	9.56
50.0	0.019	100.0	1.9	4.81
25.0	0.006	50.0	0.3	2.47

GRÁFICO DAS ISOTERMAS



O adsorvente tratado adquiriu valores mais altos e extremamente favoráveis em relação ao bruto, pois, devido ao tratamento ácido os poros da partícula orgânica se abriram e mais hidrões (h+) penetraram o adsorvente, deixando também mais funções orgânicas de interesse a mostra e atraindo mais das espécies de interesse. Ainda com pequenos desvios resultantes de diluição, ph e tempo, as amostras ainda apresentaram resultados proveitosos.

3 CONCLUSÃO

Conclui-se então que, realizar o tratamento ácido prévio nas adsorções torna mais efetivo o processo de remoção. Tal conclusão é indicada através da isoterma com uma curva extremamente favorável, o que torna útil a utilização do biossorvente tratado em futuros estudos a respeito da adsorção de Cr VI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTIN, Liliane Lazzari. Contribuições ao estudo de remediação de contaminantes de esgoto sanitário com o uso de lemnas. 2019

ALKAN, Mahir et al. Adsorption kinetics and mechanism of maxilon blue 5G dye on sepiolite from aqueous solutions. **Chemical Engineering Journal**, v. 139, n. 2, p. 213-223, 2008.

AMBRÓSIO, Natália et al. Remoção de metais pesados de efluentes utilizando líquidos iônicos: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 50189-50209, 2021.

AMERI, A.; TAMJIDI, S.; DEGHANKHALILI, F.; FARHADI, A.; SAATI, M. A. Application of algae as low cost and effective bio-adsorbent for removal of heavy

metals from wastewater: a review study. *Environmental Technology Reviews*, v. 9, n. 1, p. 85–110, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/21622515.2020.1831619>. Acesso em: 19 set. 2025.

BARROS, F. M.; OLIVEIRA, J. A.; SANTOS, R. P, Tratamento de efluentes contendo metais pesados: uma revisão dos métodos convencionais. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v. 25, n. 2, p. 45–56, 2018.

BAYAZIT, Şahika Sena; KERKEZ, Özge. Hexavalent chromium adsorption on superparamagnetic multi-wall carbon nanotubes and activated carbon composites. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 92, n. 11, p. 2725-2733, 2014.

BERTOLO, R.; BOUROTTE, C.; MARCOLAN, L.; OLIVEIRA, S.; HIRATA, R. Anomalous content of chromium in a Cretaceous sandstone aquifer of the Bauru Basin, state of São Paulo, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 31, n. 1, p. 69-80, 2011.

BRASIL. Estado de São Paulo. DECRETO Nº 8.468, de 8 de setembro de 1976

BRASIL. Lei Complementar nº 9, de 26 de novembro de 1996.

BRASIL. Lei n. 997, de 31 de maio de 1976. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente.

BRASIL, Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional.

BRASIL, Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011 Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 35, de 17 de março de 2005.

BRDAR, Mirjana et al. Comparison of two and three parameters adsorption isotherm for Cr (VI) onto Kraft lignin. *Chemical Engineering Journal*, v. 183, p. 108-111, 2012.

BUDEIZ, Victor; AGUIAR, André, Monitoramento e Relacionamento dos Parâmetros de DQO e DBO 5 em Afluente de e Esgoto Tratado das Cidades de Itajubá e Pedralva, MG. **Periódico Tchê Química**, v. 17, n. 34, 2020

DAGNINO, E. P.; CHAMORRO, E. R.; ROMANO, S. D.; FELISSIA, F. E.; AREA, M. C. Optimization of the acid pretreatment of rice hulls to obtain fermentable sugars for bioethanol production. *Industrial Crops and Products*, Elsevier. p.363-368, 2012;

DANTAS, A. D. B.; SLOBODA, E.; DI BERNARDO, L.; VIEIRA, E. M.; TROFINO, J. C. Influência da massa molar de substâncias húmicas aquáticas na coagulação com sulfato de alumínio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – ABES, 24., 2007, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABES, 2007. 1 CD-ROM.

DI BERNARDO, L. (1993) Métodos e técnicas de tratamento de água. v. 1. Rio de Janeiro: ABES

FERRAZZO, Suéllen Tonatto et al. Métodos físicos e químicos para o tratamento de efluentes. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 5, n. 11, p. 833-847, 2018.

FERREIRA, A. A. S. Estudo da remoção de cromo hexavalente (Cr^{6+}) por microalgas inativas *Chlorella sorokiniana*. UERGS, 2023. Disponível em: <https://repositorio.uergs.edu.br/handle/123456789/1689>. Acesso em: 9 jun. 2025.

FRANGUELLI, Fernanda Paiva. Potencial e cinética de adsorção de cromo hexavalente por fibra de coco in natura (*Cocos nucifera*) = Potential and adsorption kinetics of hexavalent chromium by raw coconut fiber (*Cocos nucifera*). 2018. Tese (Doutorado) — [S.l.]: [s.n.], 2018.

GIRALDELLI, Mariana Aparecida et al. Propriedade da Fibra de Coco: Uma Revisão Sistemática. **Uniciências**, v. 24, n. 1, p. 34-38, 2020.

GIRARDI, Rubia. Parâmetros de qualidade de água de rios e efluentes presentes em monitoramentos não sistemáticos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, n. 2019, 2019.

HELENE, L. P. I.; MOREIRA, C. A.; CARRAZZA, L. P. Applied geophysics on a soil contaminated site by chromium of a tannery in Motuca (SP). **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 34, n. 3, p. 309-317, 2016.

LEITÃO, Vítor Rocha; LEITÃO, Rafael Rocha. Contaminação Ambiental por Metais Pesados: Uma Revisão Sistemática de Revisões sobre Impactos Ecotoxicológicos, Riscos à Saúde Humana e Estratégias de Mitigação: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15807260>. *Journal of Convergent Scientific Inquiry* (ISSN 3085-8356), v. 1, n. 3, p. 1-12, 2025.

LIU, Ruimin et al. Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metals in Yangtze estuary sediment. *Marine pollution bulletin*, v. 110, n. 1, p. 564-571, 2016.

MATOUQ, Mohammed et al. The adsorption kinetics and modeling for heavy metals removal from wastewater by Moringa pods. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 3, n. 2, p. 775-784, 2015.

MIRANDA, D. A. et al. Remoção de Cu^{2+} de efluentes por bagaço de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 15, n. 3, p. 45–53, 2021.

MOHAMMED, Ali Seid; KAPRI, Anil; GOEL, Reeta. Heavy metal pollution: source, impact, and remedies. In: *Biomangement of metal-contaminated soils*. Springer, Dordrecht, 2011. p. 1-28.

MUSTAPHA, M. U., HALIMOON, N. Microorganisms and biosorption of heavy metals in the environment: A review paper. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, v. 7, n. 5, p. 253-256, 2015.

NASCIMENTO, G. F. do et al. Aplicação da casca de jabuticaba na bioadsorção de Cr^{6+} : estudo em batelada. *Revista de Tecnologia*, v. 27, n. 1, p. 1–12, 2022.

NASCIMENTO, R. F. et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. E-book, 256 p. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em: 10 set. 2021.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. ADSORÇÃO: aspectos teóricos e aplicações ambientais. E-book. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em: 22/06/2025

NAVA, Fernanda et al. Remediação do efluente da indústria de compensado: estudo biológico com uso do fungo *Lasiodiplodia theobromae* MMPI. 2022.

OKORO, Hussein K. et al. Potentially toxic elements in pharmaceutical industrial effluents: a review on risk assessment, treatment, and management for human health. *Sustainability*, v. 15, n. 8, p. 6974, 2023

OLIVEIRA, J. R. *Uso de algas marinhas modificadas para remoção fotocatalítica de Cr^{6+}* . UFSC, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216346>. Acesso em: 9 jun. 2025.

RAMANATHAN, L.V. *Corrosão e seu controle*. São Paulo: Ed. Lemus, 1990. 342 p.22

SALVADOR, G. Estudo da adsorção de cobre (II) usando como adsorvente pó da casca de coco verde ativada com hidróxido de sódio. Relatório de Estágio Supervisionado (Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009.

SCHMAL, M. Cinética e Reatores: aplicação na Engenharia Química: teoria e exercícios. 1 ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2010, 572 p.

SHEKHAWAT, K.; CHATTERJEE, S.; JOSHI, B. Chromium toxicity and its health hazards. *International Journal of Advanced Research*, v. 7, n. 3, p. 167-172, 2015.

SILVA, Wesley Domingos da. Remediação de um efluente da indústria de resina polifenólica: associação do processo fenton e tratamento biológico. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2024.

SOUSA, F. W. Adsorção de metais tóxicos em efluente aquoso usando pó da casca de coco verde tratado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Brasil, 2007.

TEIXEIRA, R. N. P. Remoção de Cu(II), Ni(II), Cd(II) e Pb(II) de efluentes de indústrias de galvanoplastia usando o sistema híbrido adsorção de eletroflotação-coagulação. 2015. 185f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

TOLÊDO, Camila Soares Silvestre; DA SILVEIRA BARROS, Sergio Ricardo. Tratamento de Efluentes Industriais: Uma Revisão de Fundamentos e Aplicações. Proceedings of the XVI CNEG Congresso Nacional de Excelência em Gestão; INOVARSE Simpósio de Inovação e Responsabilidade Social, Rio de Janeiro, Brasil, p. 14-16, 2022

TORRES, Dayana Melo. Tratamento de efluentes e produção de água de reúso para fins agrícolas. *Holos*, v. 8, p. 1-15, 2019.

VON SPERLING, M. Análise dos padrões brasileiros de qualidade de corpos d'água e de lançamento de efluentes líquidos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 1, p. 111-132, 1998