

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

VITÓRIA DE SOUZA PADILHA

**POTENCIAL DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS (FiME)
COM O USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA O TRATAMENTO E
REMOÇÃO DE METAIS PESADOS DA ÁGUA**

LONDRINA

2025

VITÓRIA DE SOUZA PADILHA

**POTENCIAL DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS (FiME)
COM O USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA O TRATAMENTO E
REMOÇÃO DE METAIS PESADOS DA ÁGUA**

**POTENTIAL OF THE MULTI-STAGE FILTRATION SYSTEM (FiME) USING
ALTERNATIVE MATERIALS FOR WATER TREATMENT AND HEAVY METAL
REMOVAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental

Área de Concentração: Engenharia Ambiental

Linha de Pesquisa: Saneamento Ambiental

Orientadora: Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira

Coorientadora: Profa. Dra. Alessandra Furtado da Silva

LONDRINA

2025



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

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina



VITORIA DE SOUZA PADILHA

POTENCIAL DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS (FIME) COM O USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS PARA O TRATAMENTO E REMOÇÃO DE METAIS PESADOS DA ÁGUA

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 27 de Fevereiro de 2025

Dra. Edilaine Regina Pereira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Luis Fernando Cusioli, Doutorado - Universidade Estadual de Maringá (Uem)

Dra. Rubiane Ganascim Marques, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 27/02/2025.

Dedico este trabalho a Deus, pois ele me deu a força, animo e perseverança necessária ao longo desta jornada, desde a graduação até o mestrado. Agradeço também a intercessão de minha mãe Virgem Maria, de São José e meu Santo Anjo da Guarda, que me guiaram e sustentaram em cada passo do caminho.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus, a minha mãe Virgem Maria, São José e meu Santo Anjo da Guarda por sempre estarem ao meu lado, me protegendo e por me ajudar a realizar mais um sonho.

Também quero agradecer a minha família, aos meus pais, Silvana e Ademir por todo apoio, a minha irmã Valentina por sempre me ajudar no laboratório, mesmo ficando até tarde da noite, sempre estando disposta a ajudar, sem vocês esse sonho não se tornaria realidade.

Ao meu noivo Thiers, minha imensa gratidão, pois estava sempre no laboratório me ajudando e auxiliando em tudo o que precisava, sem você tudo seria mais difícil. E a minha amiga Layla por todo auxílio, ajuda e incentivo. Agradeço a minha orientadora Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira e a Coorientadora Profa. Dra. Alessandra Furtado da Silva pela orientação e por todo ensinamento, foram muito importantes para a realização deste trabalho.

Também gostaria de agradecer aos Laboratórios Multiusuários do *campus* Londrina (LabMult-LD) e do *campus* Apucarana (Lamap), bem como ao Laboratório de Química pelas análises realizadas. E ao técnico de laboratório Me. Thiago Andrade Marques, por todo auxílio nos experimentos laboratoriais.

PADILHA, V. S. **Potencial do sistema de Filtração em Múltiplas Etapas (FiME) com o uso de materiais alternativos para o tratamento e remoção de metais pesados da água**. 2025. 101. Dissertação (mestrado em engenharia ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2025.

RESUMO

O acesso ao saneamento básico é um direito humano fundamental, mas ainda permanece inacessível para muitas pessoas. No Brasil, aproximadamente 15,1% da população não possui acesso à água potável. Diante desse cenário, este estudo busca avaliar o potencial do sistema de filtração em múltiplas etapas (FiME) no tratamento de água empregando o carvão ativado de fibra de coco em seu leito filtrante combinado com a técnica de adsorção para a remoção de cobre (Cu) e zinco (Zn), e a utilização do coagulante orgânico *Moringa oleifera*. O sistema é composto por um Pré-filtro Dinâmico (PFD), um Pré-filtro de Pedregulho (PFA) e um Filtro Lento (FL), utilizando um material não convencional, carvão ativado de fibra de coco, para compor o meio filtrante do FL. Também foi empregado o coagulante orgânico *Moringa oleifera* para melhorar as características físicas e químicas da água. Além disso, verificou a eficácia do carvão ativado como um adsorvente natural na remoção de metais pesados, como Cobre e Zinco. O adsorvente foi caracterizado através das técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), determinação da área de superfície BET, espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ). Durante a operação do FiME os parâmetros monitorados foram pH, cor aparente, turbidez, temperatura, série de sólidos, condutividade elétrica e metais pesados (Cu e Zn). Embora o FiME tenha apresentado bons resultados, não atendeu integralmente a Portaria GM/MS nº 888/2021, como não realizou a etapa de desinfecção a água filtrada do sistema não é considerada potável. A *Moringa oleifera* reduziu a turbidez da água entre 50% e 80% e a cor aparente entre 20% e 75%. O carvão ativado utilizado como camada suporte no FL, alcançou remoção superior a 95% para o Cu e acima de 75% para o Zn. Conclui-se que o carvão ativado de fibra de coco desenvolvido e empregado como meio filtrante, demonstrou grande potencial como adsorvente no sistema FiME, em conjunto com coagulante orgânico *Moringa oleifera*, apresentou-se como uma solução sustentável para o tratamento de água.

Palavras-chave: coagulantes orgânicos; tratamento de água; filtração; adsorção.

PADILHA, V. S. **Potential of the Multi-Stage Filtration system (FiME) using alternative materials for water treatment and heavy metal removal.** 2025. 101. Master's thesis in Environmental Engineering – Federal Technological University of Paraná, Londrina, 2025.

ABSTRACT

Access to basic sanitation is a fundamental human right, yet it remains inaccessible to many people. In Brazil, approximately 15.1% of the population lacks access to drinking water. Given this scenario, this study aims to evaluate the potential of the Multi-Stage Filtration System (FiME) for water treatment, using coconut fiber-activated carbon in the filter bed, combined with the adsorption technique for the removal of copper (Cu) and zinc (Zn), along with the organic coagulant *Moringa oleifera*. The system consists of a Dynamic Pre-Filter (PFD), a Gravel Pre-Filter (PFA), and a Slow Sand Filter (FL), utilizing an unconventional material, coconut fiber-activated carbon, as the filter medium in the FL. Additionally, the organic coagulant *Moringa oleifera* was employed to enhance the physical and chemical characteristics of the water. Furthermore, the study assessed the effectiveness of activated carbon as a natural adsorbent for removing heavy metals such as copper and zinc. The adsorbent was characterized using Scanning Electron Microscopy (SEM), BET surface area determination, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Point of Zero Charge (PZC) determination. During FiME operation, the monitored parameters included pH, apparent color, turbidity, temperature, solids series, electrical conductivity, and heavy metals (Cu and Zn). Although FiME demonstrated good results, it did not fully comply with Ordinance GM/MS N° 888/2021, as it did not include a disinfection step, meaning the filtered water from the system is not considered potable. *Moringa oleifera* reduced water turbidity by 50% to 80% and apparent color by 20% to 75%. The activated carbon used as a support layer in the FL achieved over 95% removal for Cu and above 75% for Zn. It is concluded that the coconut fiber-activated carbon developed and used as a filter medium demonstrated great potential as an adsorbent in the FiME system. Combined with the organic coagulant *Moringa oleifera*, it presents itself as a sustainable solution for water treatment.

Keywords: organic coagulants; water treatment; filtration; adsorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Imagens das partes da <i>Moringa oleífera</i> , localizada na UTFPR- <i>campus</i> Londrina.	30
Figura 2- Fluxograma da metodologia desenvolvida na pesquisa.....	32
Figura 3- Fibra de coco bruta.	33
Figura 4- Etapas do ensaio de adsorção.....	36
Figura 5- Imagem do sistema de filtração de múltiplas etapas deste estudo.	37
Figura 6- Fluxograma de operação do sistema FiME.....	38
Figura 7- Esquema ilustrativo do pré-filtro dinâmico.	39
Figura 8- Esquema ilustrativo do pré-filtro de pedregulho.	40
Figura 9- Esquema ilustrativo do filtro lento.	41
FIGURA 10- Imagens da superfície da fibra <i>in natura</i> obtidas do MEV, com aumento de 500 vezes.	44
Figura 11- Imagens da superfície do carvão de fibra de coco ativado obtidas do MEV, com aumento de (a) 2.000 vezes e (b) 500 vezes.....	45
Figura 12- Espectros vibracionais da fibra de coco <i>in natura</i>	47
Figura 13- Espectros vibracionais da fibra de coco ativada com H_3PO_4	48
Figura 14- Resultados de pH inicial e pH final obtidos a partir da análise de ponto de carga zero (PCZ) da fibra de coco.....	49
Figura 15- Resultados de remoção de Cobre, na concentração de $0,4\text{ mg.L}^{-1}$, no ensaio de adsorção.	51
Figura 16- Resultados de remoção de Cobre, na concentração de $2,0\text{ mg.L}^{-1}$, no ensaio de adsorção.	53
Figura 17- Resultados de remoção de Cobre, na concentração de $10,0\text{ mg.L}^{-1}$, no ensaio de adsorção.	54
Figura 18- Resultados de remoção de Zinco, na concentração de $1,0\text{ mg.L}^{-1}$, no ensaio de adsorção.	56
Figura 19- Resultados de remoção de Zinco, na concentração de $5,0\text{ mg.L}^{-1}$, no ensaio de adsorção.	58
Figura 20- Resultados de remoção de Zinco, na concentração de $25,0\text{ mg.L}^{-1}$, no ensaio de adsorção.	59
Figura 21- Resultados de remoção de Turbidez no teste com o coagulante orgânicos <i>Moringa oleífera</i>	61

Figura 22- Resultados de remoção de Turbidez no teste de tempo de aplicação do coagulante orgânico <i>Moringa oleifera</i>	62
Figura 23- Resultados do parâmetro Temperatura obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	63
Figura 24- Resultados do parâmetro Condutividade Elétrica obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	66
Figura 25- Resultados do parâmetro pH obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	69
Figura 26- Resultados do parâmetro Turbidez obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	72
Figura 27- Resultados de remoção de Turbidez da primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	75
Figura 28- Resultados do parâmetro Cor Aparente obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	76
Figura 29- Resultados de remoção de Turbidez da primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	79
Figura 30- Resultados do parâmetro Sólidos Totais obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	80
Figura 31- Resultados do parâmetro Sólidos em Suspensão Totais obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	83
Figura 32- Resultados do parâmetro Sólidos Dissolvidos Totais obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	86
Figura 33- Resultados do parâmetro Cobre obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	89
Figura 34- Resultados de remoção de Cobre da primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	90
Figura 35- Resultados do parâmetro Zinco obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	91
Figura 36- Resultados de remoção de Zinco da primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Concentrações dos metais pesados no ensaio de adsorção que foram aplicados simultaneamente nos tratamentos.	36
Tabela 2- Resultados obtidos na análise da área superficial BET da fibra de coco e do carvão ativado.	46
Tabela 3- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Cobre de 0,4 mg.L ⁻¹	51
Tabela 4- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Cobre de 2,0 mg.L ⁻¹	52
Tabela 5- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Cobre de 10,0 mg.L ⁻¹	53
Tabela 6- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Zinco de 1,0 mg.L ⁻¹	56
Tabela 7- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Zinco de 5,0 mg.L ⁻¹	57
Tabela 8- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Zinco de 25,0 mg.L ⁻¹	58
Tabela 9- Valores médio dos parâmetros analisados na água sintética.....	60
Tabela 10- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro temperatura em relação a primeira carreira de filtração.	64
Tabela 11- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro temperatura em relação a segunda carreira de filtração.	65
Tabela 12- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro condutividade elétrica em relação a primeira carreira de filtração.	67
Tabela 13- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro condutividade elétrica em relação a segunda carreira de filtração.	68
Tabela 14- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro pH em relação a primeira carreira de filtração.....	70
Tabela 15- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro pH em relação a segunda carreira de filtração.	71
Tabela 16- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro turbidez em relação a primeira carreira de filtração.....	73
Tabela 17- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro turbidez em relação a segunda carreira de filtração.	74

Tabela 18- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro cor aparente em relação a primeira carreira de filtração.	77
Tabela 19- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro cor aparente em relação a segunda carreira de filtração.	78
Tabela 20- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos totais em relação a primeira carreira de filtração.	81
Tabela 21- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos totais em relação a segunda carreira de filtração.	82
Tabela 22- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos suspensos totais em relação a primeira carreira de filtração.	84
Tabela 23- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos suspensos totais em relação a segunda carreira de filtração.	85
Tabela 24- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos dissolvidos totais em relação a primeira carreira de filtração.	87
Tabela 25- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos dissolvidos totais em relação a segunda carreira de filtração.	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANOVA	Análise de Variância
APHA	American Public Health Association
As	Arsênio
BET	Brunauer, Emmett, Teller
Cd	Cádmio
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CF1	Carreira de Filtração 1
CF2	Carreira de Filtração 2
CNM	Confederação Nacional de Municípios
Co	Cobalto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DAQUI	Laboratório de Química
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FiME	Filtração em Múltiplas Etapas
FL	Filtro Lento
FTIR	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier
Hg	Mercúrio
LabMult	Laboratório Multiusuário do Campus Londrina
LAMAP	Laboratório Multiusuário de Apoio à Pesquisa do Campus Apucarana
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mn	Manganês
Ni	Níquel
ONU	Organização das Nações Unidas
Pb	Chumbo
PCZ	Ponto de Carga Zero
PFA	Pré-filtro Pedregulho

PFD	Pré-filtro Dinâmico
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SST	Sólidos em Suspensão Totais
ST	Sólidos Totais
uH	Unidades Hazen
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VMP	Valor Máximo Permitido
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 USOS DA ÁGUA	19
2.2 ABASTECIMENTO DE ÁGUA.....	20
2.3 DEGRADAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	21
2.4 CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS POR METAIS PESADOS	22
2.5 SISTEMA DE FILTRAÇÃO DA ÁGUA.....	23
2.5.1 Filtração em Múltiplas Etapas	24
2.6 ADSORÇÃO	27
2.7 COAGULANTES ORGÂNICOS	28
2.8 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DO MATERIAL ADSORVENTE.....	33
3.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	33
3.1.2 Determinação da área de superfície BET	34
3.1.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	34
3.1.4 Determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ)	34
3.1.5 Ativação do material adsorvente e síntese do carvão ativado.....	35
3.2 ENSAIO DE ADSORÇÃO	35
3.3 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA FIME	37
3.3.1 Reservatório de água sintética para alimentação do FIME	38
3.3.2 Produção da água sintética	38
3.3.3 Pré-filtro dinâmico (PFD)	39
3.3.4 Pré-filtro de pedregulho (PFA).....	40
3.3.5 Filtração Lenta (FL)	41
3.4 PRODUÇÃO DOS COAGULANTES ORGÂNICOS	42
3.4.1 Coagulante a base de <i>Moringa oleifera</i>	42
3.5 MONITORAMENTO E ANÁLISE DE PARÂMETROS.....	42
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ADSORVENTE.....	44
4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	44
4.1.2 Determinação da área de superfície BET	46
4.1.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	46
4.1.4 Determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ).	48
4.2 ENSAIO DE ADSORÇÃO	50
4.2.1 Cobre.....	50
4.2.2 Zinco.....	55
4.3 OPERAÇÃO DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS (FIME)	60
4.3.1 Água Sintética	60
4.3.2 Definição da Dosagem de Aplicação do Coagulante Orgânico	60
4.3.3 Parâmetros Analisados	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
REFERÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

Saneamento básico, segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2022), é um conjunto de serviços públicos e dentre eles tem-se o abastecimento de água potável. No Brasil, o cenário atual mostra que 84,9% da população total é atendida por abastecimento de água, através de rede pública, o que indica que há ainda uma parcela significativa aguardando atendimento (SNIS, 2022). A carência de populações não atendidas por este serviço público deve-se a diversos fatores, sendo um deles, a localização de comunidades afastadas de centros urbanos, o que acaba inviabilizando a instalação de rede de abastecimento de água (Ribeiro, 2016).

Outro cenário brasileiro é a degradação da quantidade e qualidade da água, por diferentes usos, como a irrigação de lavouras, abastecimento público, atividades industriais, geração de energia, extração mineral, aquicultura, navegação, turismo e lazer (ANA, 2019). Diante deste cenário, é necessário aplicar tecnologias para abastecer comunidades que não estão consumindo água potável de sistemas convencionais, e realizar o tratamento adequados destas águas brutas que estão sujeitas a contaminações.

A utilização da filtração em múltiplas etapas (FiME) é uma tecnologia simples e de baixo custo que produz água filtrada adequada ao consumo humano, apresentando baixa turbidez, sem a presença de impurezas nocivas e livre de organismos patogênicos (Veras; DI Bernardo, 2008). A fim de aprimorar o sistema FiME podem ser empregados materiais alternativos para sua melhor eficiência na remoção de parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, podendo estes ser resíduo de madeira maravalha, rolhas de cortiça, resíduo cerâmico, fibra de coco e manta não-tecido geotêxtil (Lima, 2020).

A fibra de coco vem sendo explorada como um adsorvente orgânico, pois tem a capacidade de reter contaminantes em sua superfície quando presentes em líquidos. Logo, há um interesse significativo em utilizar a fibra de coco no tratamento de água, devido à sua baixa degradabilidade, custo acessível, abundância e eficácia na remoção de metais pesados (Sousa *et al.*, 2007; Freitas; Câmara; Martins, 2015).

Coagulantes orgânicos também podem ser utilizados no tratamento de água associados ao processo FiME, pois são de baixo custo, obtidos de plantas, e vêm mostrando grande eficiência no tratamento de água, removendo turbidez, matéria

orgânica dissolvida, alcalinidade, sólidos totais dissolvidos, microrganismos, compostos tóxicos presentes nas águas, fármacos, metais de transição, surfactantes aniônicos e corantes, além de gerarem lodo em menor quantidade e biodegradável (Lima; Abreu, 2018).

Neste contexto, é de grande importância pesquisar sobre tal tecnologia para o abastecimento de água em comunidades afastadas dos centros urbanos, muitas vezes carentes, com implementação de sistemas de baixo custo, de fácil operação e que utilize de forma racional os recursos hídricos sem degradá-los ainda mais.

Este trabalho tem a proposta de empregar o sistema de filtração em múltiplas etapas (FiME) combinado com material não convencional (carvão ativado de fibra de coco) como meio filtrante, além da associação com a técnica de adsorção e aplicação do coagulante orgânico *Moringa oleífera*, a fim de demonstrar alternativas econômicas e eficientes para o tratamento de água, buscando a sustentabilidade ao meio ambiente.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial do sistema de filtração em múltiplas etapas (FiME) no tratamento de água empregando o carvão ativado de fibra de coco em seu leito filtrante, combinado com a técnica de adsorção para remoção de Cobre (Cu) e Zinco (Zn), e a utilização do coagulante orgânico *Moringa oleífera*.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização físico-química da fibra de coco através das técnicas Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), determinação da área de superfície BET, espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ);
- Monitorar os parâmetros pH, cor aparente, turbidez, temperatura, série de sólidos, condutividade elétrica e metais pesados (Cu e Zn) durante o processo de tratamento de água pelo FiME;

- Avaliar a eficiência do coagulante orgânico *Moringa oleífera* na redução de cor aparente e turbidez durante o processo de tratamento de água pelo FiME;
- Avaliar a eficiência do carvão ativado de fibra de coco na remoção de metais pesados (Cu e Zn), empregando-o como camada suporte no leito filtrante do filtro lento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 USOS DA ÁGUA

A água é essencial para todos os organismos vivos. No decorrer dos anos, com aumento da população, do desenvolvimento econômico e padrões de consumo, a água passou a ser definida como um bem, ou seja, um recurso hídrico (EMBRAPA, 2023).

Quando trata-se de recursos hídricos, considera-se toda água aproveitada para determinado uso. Segundo ANA (2019), as atividades antrópicas que alteram as condições naturais dos recursos hídricos são definidas como uso. Esses diferentes usos são distribuídos em dois grupos, sendo uso não consuntivo e consuntivo.

Os usos não consuntivos são as atividades que utilizam o curso da água, mas não a consomem, sendo elas o lazer, a pesca, a navegação, turismo e entre outros. E os usos consuntivos são os que retiram água dos mananciais para determinada atividade (ANA, 2020).

De acordo com a ANA (2020), o total de consumo dos recursos hídricos para o ano de 2022 no Brasil foi de $1.211,90 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Os setores que mais demandam consumo de água no Brasil e no mundo são a agricultura e a pecuária.

- Irrigação- 66,47% ($805,56 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) do consumo total. Para o cálculo deste setor são considerados o balanço hídrico das áreas irrigadas, a cultura, tipo de irrigação e condições de manejo aplicadas.
- Uso animal- 11,51% ($139,45 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) do consumo total. Para o cálculo deste setor são considerados dessedentação animal, confinamento, operações lácteas, limpeza e manutenção de estruturas rurais.
- Indústria- 9,97% ($120,81 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) do consumo total. Para o cálculo deste setor são considerados dados de vazão média para cada tipo de indústria e consumo por empregado.
- Abastecimento urbano- 8,59% ($104,12 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) do consumo total. Para o cálculo deste setor são considerados os volumes médios *per capita* e estimativa das populações urbanas.

- Abastecimento rural- 2,18% ($26,44 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) do consumo total. Para o cálculo deste setor são considerados os volumes médios *per capita* das populações não atendidas pela rede de distribuição.
- Mineração- 0,98% ($11,83 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) do consumo total. Para o cálculo deste setor são considerados a produção mineral (em toneladas por ano), por tipo ou grupo de substância e volume de água médio utilizado para a produção de cada tonelada.
- Termelétricas- 0,3% ($3,69 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) do consumo total. Para o cálculo deste setor são considerados o volume de água por energia gerada.

2.2 ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Abastecimento de água potável é um dos serviços públicos que compõem o saneamento básico, e compreende desde a captação de água de determinado manancial, a infraestrutura até os instrumentos de medição, ou seja, é a captação da água bruta até a distribuição de água com quantidade e qualidade adequada a população (ANA, 2023).

Considerando que todos possuem direito a água, que devem ter acesso a mesma e o aumento acentuado de seu consumo em todos os setores, a Organização das Nações Unidas (ONU) criou na Agenda 2030 o Objetivo 6, “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável de água e saneamento para todos”. A meta é que todos tenham água e saneamento básico adequado até o ano de 2030 (ONU, 2023). Porém, atualmente no mundo 2,3 mil milhões de pessoas não dispõem de saneamento básico e 1,8 mil milhões de pessoas consomem água sem tratamento algum (ONU, 2023).

Segundo os dados disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (2021) apenas 84,2% da população brasileira é abastecida com água potável, sendo a Região Norte do país com menor porcentagem de atendimento (60%) e a Região Sul com maior porcentagem de atendimento (91,4%).

Os fatores que estão relacionados com a falta de água tratada que atinge 33,3 milhões de brasileiros são (Ribeiro, 2016; EOS, 2023):

- Perdas na distribuição de água: o qual está entorno de 40,3%, gerando prejuízos financeiros para as empresas prestadoras deste serviço e são causadas por vazamentos, ligações clandestinas e erros de medição;

- Construções em áreas irregulares: locais aonde não chegam as redes de distribuição de água por não fazerem parte do planejamento municipal e se tratar de zona de risco, suscetíveis a alagamentos e deslizamentos;
- Distribuição dos recursos hídricos: o Brasil possui grande disponibilidade hídrica, mas há locais como o Nordeste com menores taxas de concentração destes recursos e umas das maiores taxas de densidade demográfica, necessitando de melhor gestão destes mananciais;
- Comunidades isoladas: são as moradias encontradas nas zonas rurais, devido à distância dos centros urbanos, acabam inviabilizando a instalação de rede de abastecimento de água.

Exemplos de problemas que são gerados para a população a partir deste déficit são as doenças, falta de higiene, diminuição da frequência escolar e ao trabalho. Por isso é de suma importância prover a todos água tratada, visto que o saneamento básico é um dos caminhos para erradicação da pobreza.

2.3 DEGRADAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A degradação dos recursos hídricos se relaciona diretamente com o crescimento populacional, que não apenas elevou o consumo de água, mas também impactou sua qualidade (Ayach *et al.*, 2012; Filho *et al.*, 2013). Isso se deve ao uso desses recursos hídricos para fins humano, industrial e agropecuário, resultando na descarga incorreta de efluentes domésticos e industriais, escoamento superficial de nutrientes e agrotóxicos através das lavouras, poluição atmosférica, erosão, disposição de resíduos sólidos urbanos e de construção civil e desmatamento, levando a inúmeras consequências como a poluição microbiológica, física, química, térmica e de eutrofização dos recursos hídricos (Marques, 2002).

Segundo a ONU (2017), em escala global 80% das águas residuais retornam para os cursos d'água sem tratamento e 56% de toda água doce captada se torna efluente. Já no Brasil, apenas de 40% a 50% da água residuária gerada é tratada (CNM, 2017). Em razão disso, a qualidade dos recursos hídricos está se degradando. Uma pesquisa realizada pela Fundação SOS Mata Atlântica em 2022, mostrou que somente 6,9% dos 160 pontos amostrados possuem água de boa qualidade, o estudo

compreendeu 120 rios e corpos d'água em 74 municípios de 16 estados da Mata Atlântica, no qual que este bioma contempla 70% da população brasileira (SOS Mata Atlântica, 2023).

A degradação da qualidade da água implica na saúde da população. Estudos mostram que as pessoas que consomem água contaminada por efluentes industriais, que contém substâncias tóxicas em sua composição, como pesticidas, metais pesados e entre outros compostos tóxicos, podem apresentar problemas de saúde como náuseas, enxaquecas, diminuição das funções neurológicas, além dos danos genotóxicos, como o câncer, doenças cardíacas e anomalias congênitas e reprodutivas (Moraes; Jordão, 2002).

2.4 CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS POR METAIS PESADOS

Os metais pesados estão naturalmente presentes no ambiente, porém atividades industriais, da agricultura, de mineração, a poluição atmosférica e descarte de esgoto doméstico e industrial aumentam a concentração destes elementos no meio ambiente (Amado; Filho, 2015). Os agroquímicos (fertilizantes, corretivos, pesticidas, herbicidas, agrotóxicos e entre outros), por exemplo, possuem em sua composição metais pesados, como Cobre, Zinco, Chumbo, Arsênio, Cádmio, Manganês e Cobalto, e muitos deles são componentes ativos de agrotóxicos (Ramalho *et al.*, 2000; Saenger, 2018).

O uso frequente destes agroquímicos nas plantações, por sua vez se acumulam e adsorvem no solo e pelo processo de intemperismo, as partículas com os metais pesados são carregadas para os corpos d'água, sendo dissolvidos e transferidos para o sedimento (Ramalho *et al.*, 2000; Ribeiro *et al.*, 2012).

Ramalho, Sobrinho e Velloso (2000) pesquisaram a contaminação na água por Cádmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Chumbo (Pb) e Zinco (Zn), pelo recorrente uso de agroquímicos em áreas de cultivo na microbacia de Caetés em Paty do Alferes- RJ. Os autores verificaram que no córrego a jusante destas áreas de plantações, apresentou maior teor dos metais pesados, em comparação com o córrego a montante, principalmente para Zn, Pb, Cu e Mn, e os elementos Cd, Mn e Pb apresentaram concentrações acima dos padrões máximos estabelecido em água potável pelo Ministério da Saúde. A análise do sedimento do córrego também resultou em teores de metais pesados.

Ferraz *et al.* (2018) monitoraram a água subterrânea de seis poços tubulares no município de Vitória da Conquista- BA, todos localizados na área urbana da cidade e abastecem cerca de 18 mil pessoas. Os resultados apontaram a presença dos metais pesados analisados (Cr, Ni, Cd e Pb) em todos os poços, somente o Cr encontrava-se dentro do valor permitido pela legislação. Este é um resultado preocupante, pois a ingestão recorrente de metais pesados traz sérios riscos à saúde.

A contaminação da água por metais pesados é uma questão ambiental de grande preocupação devido aos riscos que esses elementos representam para a saúde humana e para os ecossistemas aquáticos (Assunção *et al.*, 2020; Zendron, 2015).

Os metais pesados mais comumente encontrados contaminando recursos hídricos, são: Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg), Cádmio (Cd), Arsênio (As), Cromo (Cr), além do Zinco (Zn) e Cobre (Cu) (Souza; Morassuti; Deus, 2018).

O metal pesado Zinco (Zn) se encontra na crosta terrestre, em rochas ígneas e é um micronutriente essencial para os organismos. Este elemento é utilizado na mineração, produção de ferro e aço, corrosão de estruturas galvanizadas, combustão de carvão e outros combustíveis, eliminação e incineração de resíduos e uso de fertilizantes e agrotóxicos (Duarte; Pasqual, 2000). O Cobre (Cu), é um metal abundante na natureza e também micronutriente e essencial aos seres vivos, é utilizado na fabricação de moedas, fios elétricos, tubulações, agricultura, preservação de madeira, couro, tecido e como aditivo em alimentos (CETESB, 2022).

Estes metais pesados, Zn e Cu, chegam aos seres humanos pela ingestão de água e alimentos contaminados, e podem estar de forma solúvel na água ou adsorvido em solo e sedimentos, com isso são absorvidos pelas plantas, transferindo-se aos herbívoros, carnívoros e aos humanos, desse modo percorrem toda a cadeia alimentar (CETESB, 2022). Segundo a Portaria GM/MS nº888/2021 (Brasil, 2021) o valor máximo permitido em água potável para o Zn é de 5 mg.L⁻¹ e para o Cu 2 mg.L⁻¹.

2.5 SISTEMA DE FILTRAÇÃO DA ÁGUA

No processo de tratamento de água potável, a etapa de filtração desempenha um papel fundamental. Nesse estágio, a água percorre um leito filtrante, responsável

pela efetiva remoção de partículas em suspensão, coloidais e microorganismos presentes na água (Lima, 2020).

Os filtros se distinguem por diversos fatores, como a vazão, o meio filtrante e o sentido de fluxo. Quanto à vazão, eles são classificados em dois grupos principais: os filtros lentos, com uma taxa de filtração abaixo de $15 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$, e os filtros rápidos, cuja taxa de filtração ultrapassa os $200 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$. No que diz respeito ao meio filtrante, existem os filtros compostos por areia e aqueles que combinam areia e carvão. Quanto ao sentido de fluxo, os filtros podem ser ascendentes ou descendentes (Lima; Stier, 2022).

Essa diversidade de características permite a adaptação do processo de filtração às necessidades específicas, garantindo a eficiência na remoção de impurezas e assegurando a produção de água dentro dos rigorosos padrões de potabilidade exigidos.

2.5.1 Filtração em Múltiplas Etapas

Como abordado nos tópicos anteriores, comunidades rurais estão vulneráveis a consumir águas contaminadas, devido ao uso intensivo de agroquímicos nas lavouras próximos aos córregos e pela presença de fossas sépticas perto dos poços e cursos d'água de captação. Portanto, se faz necessário aplicar tecnologias de tratamento de água que sejam econômicas, sustentáveis, de fácil operação e manutenção, adequada a cada região onde serão instaladas e que forneça água de qualidade e potável (Ministério da Saúde, 2020). Uma destas tecnologias é o sistema de Filtração de Múltiplas Etapas (FiME).

O sistema FiME opera com a passagem da água bruta por filtros com material granular de diferentes tamanhos, a fim de remover substâncias sólidas em cada etapa, diminuindo a sobrecarga do filtro posterior (Di Bernardo; Brandão; Heller, 1999; Vizibelli, 2021). O FiME é composto pelo pré-filtro dinâmico, pré-filtro de pedregulho e filtro lento.

Di Bernardo e Veras (2008) em seu trabalho com o emprego do FiME observaram uma redução no pré-filtro dinâmico 1 de 63% para turbidez, 53% para cor aparente, de 22% a 66% de sólidos suspensos totais 67,6% de coliformes totais, 41% de coliformes fecais e 15% para ferro. O pré-filtro de escoamento ascendente apresentou redução de 81% para turbidez, 54% para cor aparente, 44% para ferro,

entre 48% e 74% de sólidos suspensos totais e 93% para coliformes totais e fecais. Para o filtro lento houve redução entre 40% e 80% de sólidos suspensos totais, 92,7% de ferro, 96% de cor aparente, 98,6% de turbidez e 99% para coliformes totais e fecais. Com os resultados do trabalho supracitado, pode-se afirmar que a filtração em múltiplas etapas é uma tecnologia com grande potencial para aplicação no tratamento de água, sendo eficiente na redução de parâmetros como cor aparente, turbidez, microrganismos (bactérias, algas e protozoários), sólidos suspensos e dissolvidos.

Em outro estudo, Camplesi, Perez e Siqueira (2010) verificaram a eficiência do sistema FiME na remoção de coliformes totais e *Escherichia coli* e os resultados foram superiores a 95,0% para remoção de ambos, indicando que a filtração em múltiplas etapas é eficiente na remoção dos parâmetros analisados, podendo ser utilizada no tratamento de água para abastecimento.

Vizibelli (2021) em seu estudo, avaliou a eficiência do sistema FiME para tratar águas com maiores concentrações de partículas, utilizando diferentes coagulantes, como Sulfato de Alumínio e semente de *Moringa oleifera*. Os resultados mostraram que os coagulantes foram eficientes na redução da carga de sólidos na entrada dos filtros lentos, sendo a *Moringa oleifera* mais eficiente na remoção de turbidez, seguido por Sulfato de Alumínio. A adição de coagulantes contribuiu para amortizar picos de turbidez e aumentar a faixa de turbidez onde os filtros podem ser empregados.

2.5.1.1 Pré- filtração dinâmica

A primeira etapa, a pré-filtração dinâmica, tem por finalidade remover os sólidos grosseiros, mesmo em valores elevados de turbidez, garantindo a segurança do sistema (Veras; Di Bernardo, 2008). A água bruta pode escoar superficialmente ou infiltrar no sistema. A composição do meio filtrante é de pedregulho, sendo o de menor granulometria na superfície e o de maior granulometria na base (Vizibelli, 2021).

Com o sistema em operação, partículas de impurezas ficam retidas no filtro, isso faz com que diminua a vazão de escoamento e aumente a perda de carga, devido ao atrito gerado com as partículas (Di Bernardo; Brandão; Heller, 1999).

2.5.1.2 Pré-filtração de pedregulho

A pré-filtração de pedregulho retira parte de sólidos suspensos, sólidos dissolvidos e microrganismos que não foram possíveis de remover na pré-filtração dinâmica (Di Bernardo; Brandão; Heller, 1999). Sua composição é de pedregulho, com tamanho decrescente acompanhando a direção do fluxo de água (vertical ascendente ou descendente, ou horizontal). Ao longo do tempo de funcionamento, também ocorrera a retenção de partículas que aumentam a perda de carga.

2.5.1.3 Filtração lenta

Para que a filtração lenta seja eficaz, a água bruta que entra no filtro deverá apresentar teores baixos de turbidez, cor verdadeira e sólidos suspensos, e isto só será possível com as etapas antecedentes (Freitas, 2017). Visto que a pré-filtração dinâmica e pré-filtração de pedregulho remove os sólidos presentes na água, o sistema fornece uma água em condições apropriadas para a filtração lenta (Almeida *et al.*, 2021).

A composição do filtro lento é de material com menor permeabilidade, comumente utiliza-se a areia. A taxa de filtração é de até $6 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$, favorecendo um maior contato da água com o meio filtrante (Di Bernardo; Brandão; Heller, 1999).

No início da filtração a remoção das partículas é relativamente baixa, porém sobre o material filtrante forma-se uma camada biológica (biofilme), que através da adsorção retém minerais, matéria orgânica e microrganismos (bactérias, algas, protozoários, vírus, entre outros), aumentando a remoção destes na água (Freitas, 2017).

O biofilme demora de dias a semanas para se formar e conforme seu amadurecimento maior a eficiência desta etapa (Lima, 2020). No que diz respeito à remoção de microrganismo, considera-se fatores como: baixa taxa de filtração, aumento na temperatura, maior espessura do meio filtrante, menor granulometria do material do meio e idade do biofilme para obter melhores resultados (Di Bernardo; Brandão; Heller, 1999).

Como forma de otimizar o filtro lento, estudos vêm sendo realizados para utilizar em conjunto com a areia (material de menor permeabilidade) uma camada

suporte de materiais alternativos, dentre eles destacam-se as mantas não tecido geotêxtil e fibra de coco (Monaco *et al.*, 2009; Lima, 2020).

Paterniani e Conceição (2004) avaliaram a eficiência de um sistema de pré-filtração seguido de filtração lenta, utilizando pedregulho e areia de construção civil e manta não tecido para o tratamento de água de uma pequena propriedade rural e, os resultados mostraram que o sistema foi eficiente, reduzindo de 90% ou mais a turbidez, cor aparente e coliformes totais.

Freitas e Araújo (2017) verificaram em seu estudo a viabilidade de reutilizar água cinza proveniente de máquina de lavar tratada em filtro composto de camada suporte de fibra de coco, e obteve como resultado uma redução de 43% de sólidos totais, 89% de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e 92% de turbidez, concluindo que a fibra é eficaz na remoção destes parâmetros.

Almeida *et al.* (2021) avaliaram a eficiência do sistema FiME para tratamento de água adicionando nos filtros lentos materiais como manta não tecido, resíduo de cerâmica vermelha e fibras de coco, e resultou que a utilização de manta não tecido e fibra de coco apresentou maior estabilidade aos filtros. Os resíduos de cerâmica vermelha e fibras de coco reduziram a cor aparente e turbidez devido a característica de adsorção destes materiais.

2.6 ADSORÇÃO

A técnica de adsorção tem sido empregada no tratamento de água, visando à diminuição dos compostos tóxicos presentes (Nascimento *et al.*, 2014). A adsorção refere-se à habilidade de um sólido (adsorvente) em atrair e reter em sua superfície um elemento (adsorvato), seja um gás ou líquido. Esse processo resulta na efetiva separação desse elemento do meio circundante (Gomes, 2019; Ferreira, 2021).

A interação entre os adsorvato e adsorvente pode ocorrer por adsorção física e adsorção química. A adsorção física ocorre pela força de Van Der Waals, interação fraca onde as moléculas que serão adsorvidas ficam retidas na superfície interna dos poros do adsorvente (Pimentel *et al.*, 2022). Na adsorção química, a interação entre as moléculas do adsorvato e a superfície do adsorvente ocorre em sítios específicos, como por exemplo a atração eletrostática (Carvalho; Sampaio, 2023).

Os adsorventes mais comercializados são o carvão ativado, sílica em gel, zeólita e resinas sintéticas (Ferreira, 2021). Contudo, estudos estão analisando o

potencial de compostos orgânicos, como arroz, banana, coco, laranja, mamão, maracujá, melancia, melão e entre outros, na utilização como adsorventes para remoção de contaminantes de água para abastecimento e de efluentes industriais (Freitas; Câmara; Martins, 2015).

Souza *et al.* (2007) verificaram a capacidade da casca de coco como adsorvente na remoção de metais pesados (Pb^{+2} , Ni^{+2} , Cd^{+2} , Zn^{+2} e Cu^{+2}) de água residuária sintética. A remoção, pelo adsorvente, foi acima de 90% para todos os metais. Os autores consideraram que este resíduo agroindustrial, a casca de coco, é promissora para o tratamento de água e efluentes contaminados com metais tóxicos, visto que é de fonte renovável, alternativa viável e de baixo custo.

Santos (2021) em seu estudo, teve como objetivo comparar a eficiência de três filtros lentos no tratamento de água, sendo o Filtro 1 composto de areia misturada com resíduo cerâmico, o Filtro 2 de areia misturada com fibras de coco e o Filtro 3 sendo o filtro convencional de areia. Com os resultados, a autora verificou que o resíduo cerâmico apresentou maior capacidade de adsorção para redução de parâmetros físicos e a fibra de coco para redução de microrganismos patogênicos, além de auxiliar na estabilidade do filtro.

Na implementação da técnica de adsorção, é essencial realizar uma caracterização detalhada do adsorvente, uma vez que a área superficial, propriedades do adsorvente, temperatura e pH, desempenham papéis significativos na eficácia da adsorção. Essa caracterização pode ser conduzida por meio de análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), determinação da área superficial utilizando o método de Brunauer, Emmett, Teller (BET) e determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ) (Nascimento *et al.*, 2014).

2.7 COAGULANTES ORGÂNICOS

Coagulantes a base de plantas são denominados coagulantes orgânicos. Estes são uma tecnologia alternativa para aplicação em tratamento de água em relação aos coagulantes inorgânicos, pois são biodegradáveis, produzem lodos em menor quantidade, não são tóxicos aos seres vivos e possuem menores custos (Soares *et al.*, 2021).

Quando comparamos com os coagulantes inorgânicos comumente utilizados, Sulfato de Alumínio ($Al_2(SO_4)_3$), Cloreto Férrico ($FeCl_3$), Sulfato Ferroso ($FeSO_4$) e

Policloreto de Alumínio ($Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$), os coagulantes orgânicos apresentam a mesma eficiência e não dispõem de desvantagens como não biodegradáveis, geração de lodo ecotoxicológico, o qual deve ser tratado e receber disposição final adequada, sem risco a saúde humana, pois como estes são a base de Ferro (Fe) e Alumínio (Al), estão presentes na água de forma residual após o tratamento, principalmente o Al, e podem desencadear doenças neurodegenerativas (Lima; Abreu, 2018; Bazzo, 2016).

Estudos mostram que a utilização de semente de *Moringa oleifera* está resultando em valores satisfatórios para a clarificação da água. Esta atua neutralizando as partículas coloidais presentes, com isso se aglomeram e formam flocos densos que sedimentam (Lima; Almeida; Vicentini, 2020).

O coagulante a base da semente de *Moringa oleífera oleífera* (Figura 1), reduz parâmetros como turbidez, matéria orgânica dissolvida, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade, dureza e microrganismos (Paterniani; Mantovani; Sant'Anna, 2009).

Figura 1- Imagens das partes da *Moringa oleífera*, localizada na UTFPR- campus Londrina.



Árvore



Fruto



Folha



Flor



Semente

FONTE: O Autor (2025).

Lima, Almeida e Vicentini (2020) apresentam em seu trabalho que o uso de *Moringa oleífera* no tratamento de água reduz a turbidez, matéria orgânica dissolvida, alcalinidade, sólidos totais dissolvidos e dureza. Junior e Abreu (2018) também citam que o emprego do coagulante orgânico *Moringa oleífera* além dos parâmetros citados, também reduz microrganismos, como *Escherichia coli*, não altera o pH da água e gera lodo biodegradável. Já o coagulante Tanino também não altera o pH da água, produz lodo em menor quantidade e biodegradável, diminui compostos tóxicos presentes nas águas (como os produzidos por bactérias clorofiladas e cianofíceas), reduz fármacos, metais de transição, surfactantes aniônicos e corantes.

2.8 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

O Brasil é um país dotado de muitos recursos hídricos, e estes vem sofrendo com as intensas atividades antrópicas que modificam seu volume, curso, qualidade e biota. Portanto, é necessário criar legislações para assegurar que haverá água de qualidade e de quantidade adequada para as gerações presentes e futuras.

A Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, tem como objetivo assegurar água em quantidade e qualidade a geração atual e as futuras, utilização racional dos recursos hídricos, prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos e incentivar o uso e preservação de águas pluviais. Desta forma o principal foco desta lei é orientar a gestão das águas no Brasil.

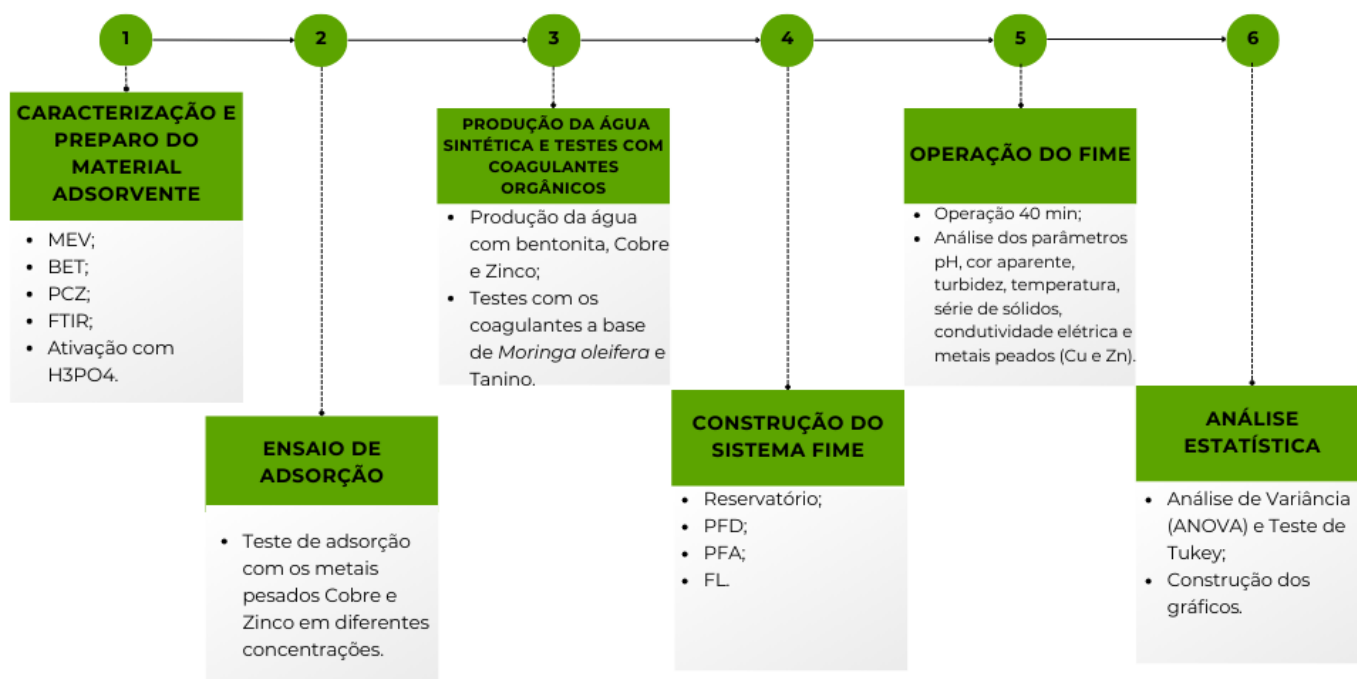
Com o intuito de determinar os usos permitidos nos cursos d'água, bem como condições e padrões de lançamento de efluentes, criou-se a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, a qual classifica as águas doces e salobras e estabelece valores máximos dos parâmetros em cada classe. Esta Resolução sofreu alterações e complementações pelas Resoluções CONAMA nº 393/2007, nº 397/2008, nº 410/2009 e nº 430/2011 (Brasil, 2005; Brasil, 2007; Brasil, 2009; Brasil, 2011).

No que diz respeito aos padrões de potabilidade da água, a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (Brasil, 2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 2 apresenta o Fluxograma com as etapas da metodologia desenvolvida.

Figura 2- Fluxograma da metodologia desenvolvida na pesquisa.



FONTE: O Autor (2025).

3.1 CARACTERIZAÇÃO E PREPARO DO MATERIAL ADSORVENTE

A fibra de coco adquiriu-se comercialmente, em loja de jardinagem, e sua composição pode ser observada na Figura 3.

Figura 3- Fibra de coco bruta.



FONTE: Grow Power (2023).

A fim de caracterizar o material adsorvente, realizou-se as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), determinação da área de superfície BET, Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ).

3.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para analisar a porosidade e rugosidade da superfície da fibra de coco bruta e do carvão ativado de fibra de coco. O equipamento utilizado foi o Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Tescan Vega, localizado no Laboratório Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)- *campus* Londrina (LabMult-LD). Este equipamento gera imagens por meio da interação entre os elétrons e a matéria, disparando um feixe de elétrons sobre a amostra e realizando uma varredura em sua superfície (Cambuim, 2009).

3.1.2 Determinação da área de superfície BET

Esta análise segue o método Brunauer, Emmett, Teller (BET), o qual permite encontrar a área superficial, volume e tamanho dos poros de um sólido através da adsorção de um gás em sua superfície (Cambuim, 2009). Assim, verificou-se a área superficial e a disponibilidade de sítios ativos da fibra de coco bruta e do carvão ativado de fibra de coco. Utilizou-se o equipamento Analisador de Sorção de Gás (Novatouch LX2, QuantaChrome), presente no Laboratório Multiusuário da UTFPR- *campus* Apucarana (LAMAP).

3.1.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Realizou-se a análise FTIR nas amostras de fibra de coco bruta e a fibra de coco ativada com ácido fosfórico (H_3PO_4), com intuito de identificar os grupos funcionais específicos nas amostras, além de compreender os efeitos da ativação química na fibra. O espectrômetro de infravermelho utilizado foi o Spectrum Two, localizado no Laboratório de Química (DAQUI) da UTFPR- *campus* Londrina.

3.1.4 Determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ)

Com intuito de identificar a carga da superfície do material adsorvente no qual haverá interação com os metais pesados Cobre (Cu) e Zinco (Zn), realizou-se o ensaio Ponto de Carga Zero. Esta análise permite encontrar em qual valor de pH a superfície da fibra de coco possuirá carga neutra. Sabendo-se disso, abaixo do PCZ a fibra estará carregada positivamente e adsorve ânions em sua superfície e, já acima do PCZ a superfície da fibra estará carregada negativamente e adsorve cátions (Freitas, Camara, Martins, 2015). A metodologia utilizada seguiu a proposta por Regalbuto e Robles (2004), denominada “experimento dos 11 pontos”.

Inicialmente, lavou-se a fibra de coco com água destilada e seca em estufa a 70°C durante 24 horas. Após a secagem, triturou-se a fibra em moinho de facas, para obter partículas menores. Em seguida, preparou-se a solução de NaOH com pH=12, 11, 10, 9 e 8, e a solução de HCl com pH=1, 2, 3, 4, 5 e 6.

Após as etapas precedentes, em cada béquer de 150 mL acrescentou-se 50 mg de fibra de coco e 50 mL da solução preparada, obtendo 11 amostras com pH

variando de 1 a 12. Essas amostras foram transferidas para uma incubadora *shaker* com agitação orbital (QUIMIS) a 10 rpm durante 24 horas. Depois do período estabelecido, utilizou um pHmetro de bancada (MS Tecnopron mPA-210) para medir o pH final.

Com o pH inicial e o pH final, foi possível construir a curva para encontrar o valor de PCZ.

3.1.5 Ativação do material adsorvente e síntese do carvão ativado

Com o intuito de aumentar a capacidade de adsorção, realizou-se tratamento com ácido fosfórico (H_3PO_4) 20% no material adsorvente, permitindo que a fibra de coco fique com os sítios ativos mais disponíveis.

Utilizou-se o moinho de facas, localizado no Laboratório de ensino do curso de Engenharia de Materiais da UTFPR- *campus* Londrina, para reduzir o tamanho da fibra de coco, aumentando a área de superfície.

Para ativação do material adsorvente, a quantidade de fibra de coco triturada foi adicionada a uma solução de H_3PO_4 a 20%, mantendo uma proporção igual a 2, entre os volumes de ácido e fibra. Depois, colocou-se a amostra sob agitação na incubadora *shaker* com agitação orbital (QUIMIS) a temperatura ambiente por 2 horas. Então, a fibra de coco foi filtrada e seca em estufa durante 6 horas a 70°C.

Passado o período de secagem, a amostra de fibra de coco foi inserida na mufla para a obtenção do carvão. O processo iniciou em temperatura ambiente e, ao atingir 400°C, esta foi mantida nessa temperatura por 3 horas (Souza; Junior; Felipe, 2022).

3.2 ENSAIO DE ADSORÇÃO

No ensaio de adsorção de Cobre (Cu) e Zinco (Zn) no carvão ativado de fibra de coco, as concentrações dos metais utilizadas foram determinadas conforme o valor máximo permitido (VMP) estabelecido pela Portaria GM/MS nº888/2021 (Brasil, 2021), sendo para o Cu VMP= 2,0 mg.L⁻¹ e o Zn VMP= 5,0 mg.L⁻¹. Foram usadas três concentrações crescentes dos metais, contendo doze replicatas de cada concentração, totalizando em trinta e seis amostras. Os valores das concentrações são apresentados na Tabela 1.

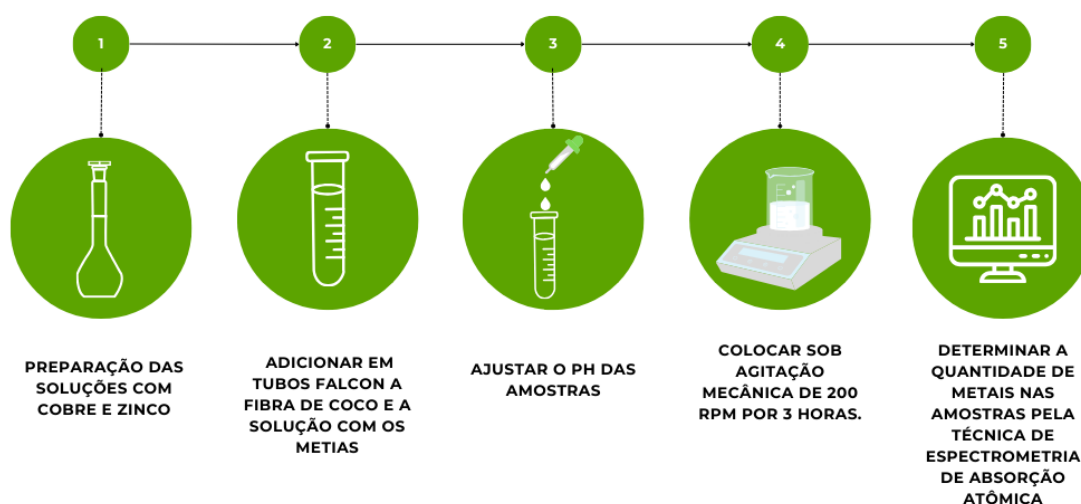
Tabela 1- Concentrações dos metais pesados no ensaio de adsorção que foram aplicados simultaneamente nos tratamentos.

Tratamento	Concentração de Cu (mg L ⁻¹)	Concentração de Zn (mg L ⁻¹)
C ₁ (VMP/5)	0,4	1,0
C ₂ (VMP)	2,0	5,0
C ₃ (5xVMP)	10,0	25,0

FONTE: O Autor (2025).

Após a preparação das amostras nas concentrações determinadas, realizou o ajuste do pH (acima do PCZ) e em seguida, submeteu-as a agitação mecânica de 200 rpm durante 3 horas (Figura 4).

Figura 4- Etapas do ensaio de adsorção.



FONTE: O Autor (2025).

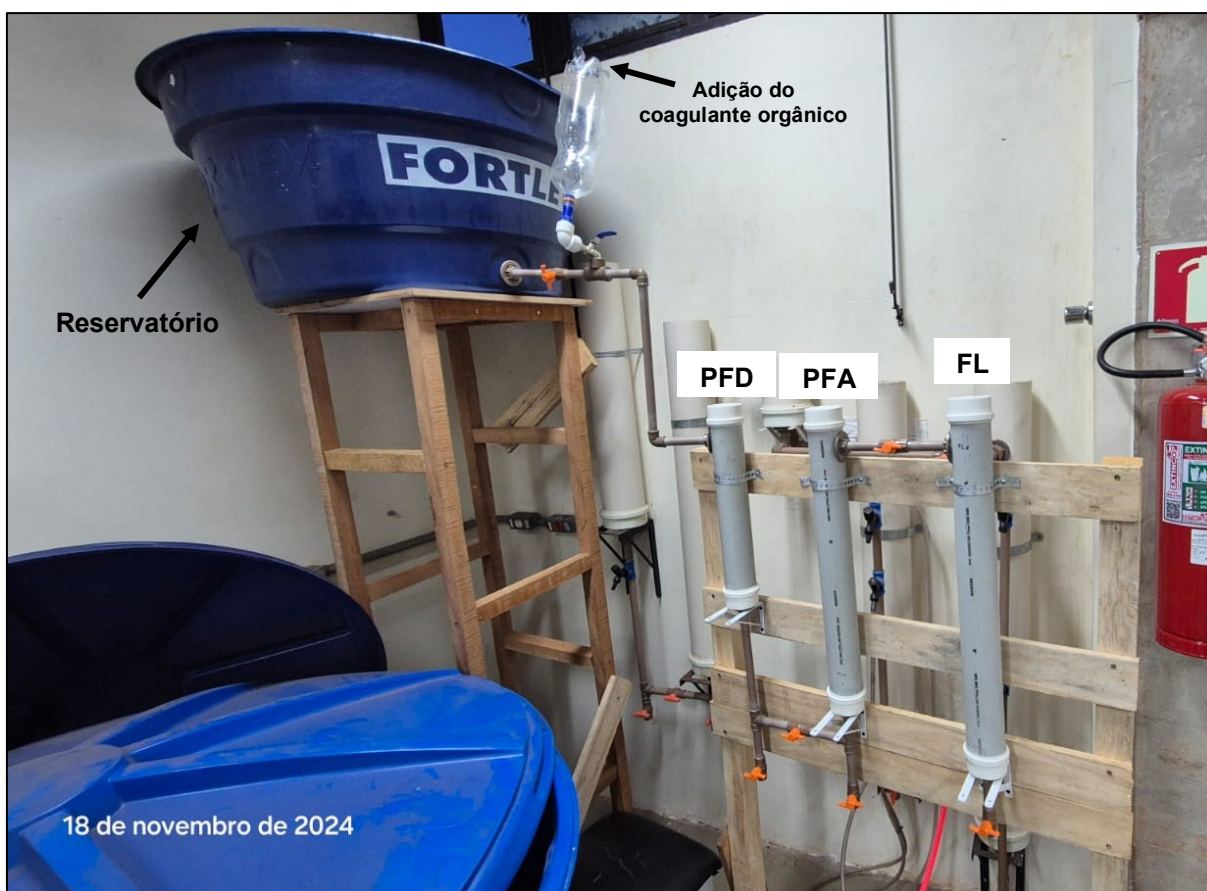
No decorrer do experimento, em intervalos de tempo pré-determinados (1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos), retirou-se amostras para determinação da concentração dos metais pesados Cu e Zn. As amostras foram preparadas previamente e determinadas pela técnica de espectrometria de absorção atômica no LAMAP. Essa técnica quantifica a concentração de determinado elemento em uma amostra, através da medida de energia absorvida de uma fonte de radiação com o comprimento de onda característico do elemento em análise (Bittar, 2008).

Calculou-se as concentrações dos metais adsorvidos pelo carvão ativado através da diferença entre a concentração inicial adicionada e a concentração remanescente após o período de contato.

3.3 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA FIME

Desenvolveu-se o estudo no Laboratório de Recursos Hídricos da UTFPR-*campus* Londrina. O sistema de filtração de múltiplas etapas (FiME) foi composto por um reservatório de polipropileno com volume de 0,25 m³, 1 pré-filtro dinâmico (PFD) de PVC, 1 pré-filtro pedregulho ascendente (PFA) também de PVC e 1 filtro lento (FL), apresentado na Figura 5.

Figura 5- Imagem do sistema de filtração de múltiplas etapas deste estudo.



Nota: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

O coagulante orgânico foi adicionado antes do pré-filtro dinâmico (PFD), conforme representado no fluxograma da Figura 6.

Figura 6- Fluxograma de operação do sistema FiME.



Nota: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

O sistema FiME foi operado duas vezes, com tempo de duração de 40 minutos cada processo.

3.3.1 Reservatório de água sintética para alimentação do FiME

O reservatório foi utilizado para o armazenamento da água sintética e para a alimentação do sistema com uma vazão de $0,002 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$. Este foi posicionado ao lado do sistema FiME, em uma altura superior, permitindo que o fluxo de água nos filtros ocorresse por força gravitacional (Mendes, 1989; Freitas, 2017).

3.3.2 Produção da água sintética

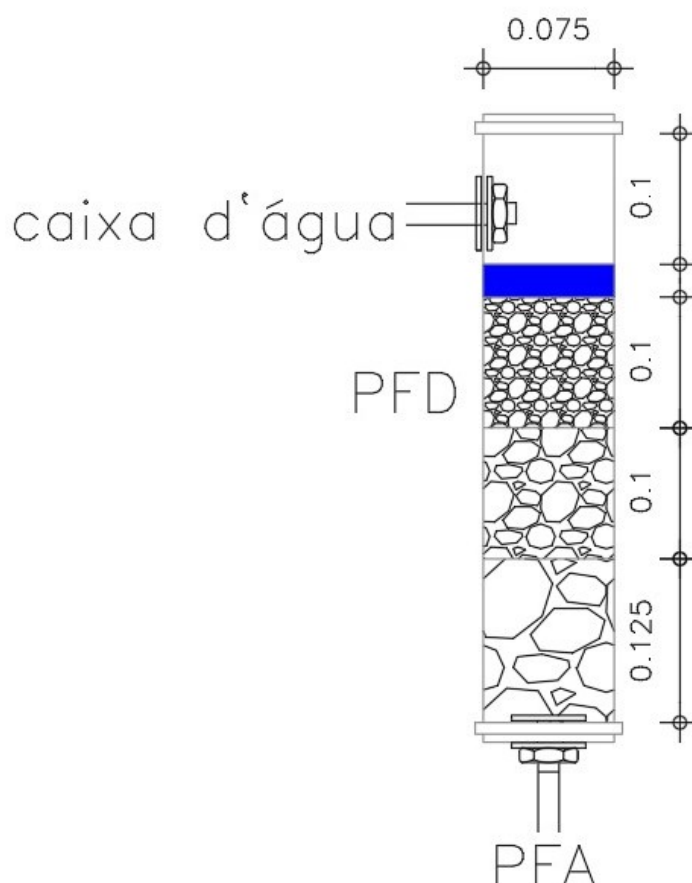
A água sintética foi preparada no Laboratório de Recursos Hídricos da UTFPR- *campus* Londrina, onde a adição de bentonita foi utilizada para gerar turbidez na água. A cada litro de água destilada, foram adicionados 400 mg de bentonita, mantendo a solução sob agitação durante 30 minutos no Jar-test. Após esse procedimento, a solução permaneceu em repouso por 24 horas e, ao final desse período, o material sobrenadante formado foi retirado (Arantes *et al.*, 2014).

Juntamente, foram adicionados o Cobre (Cu) e Zinco (Zn) para a contaminação da água sintética, utilizando concentrações de 10 mg.L^{-1} de Cu e 25 mg.L^{-1} de Zn. Esses valores, superiores aos limites estabelecidos pela legislação, foram escolhidos com o objetivo de verificar se a água filtrada pelo sistema FiME atendia aos requisitos da Resolução GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021).

3.3.3 Pré-filtro dinâmico (PFD)

Construiu-se o pré-filtro dinâmico (PFD) para operar com fluxo descendente, na composição do leito filtrante utilizou-se três camadas de material filtrante com granulometrias diferentes, sendo a camada superficial com granulometria na faixa de 4,75 – 9,50 mm e 0,10 m de espessura, a camada intermediária com granulometria na faixa de 9,50 – 19,00 mm e 0,10 m de espessura, e a camada próxima a base com granulometria na faixa de 19,00 – 25,00 mm e 0,125 m de espessura (Di Bernardo; Brandão; Heller, 1999; Vizibelli, 2021). O esquema do PFD pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7- Esquema ilustrativo do pré-filtro dinâmico.



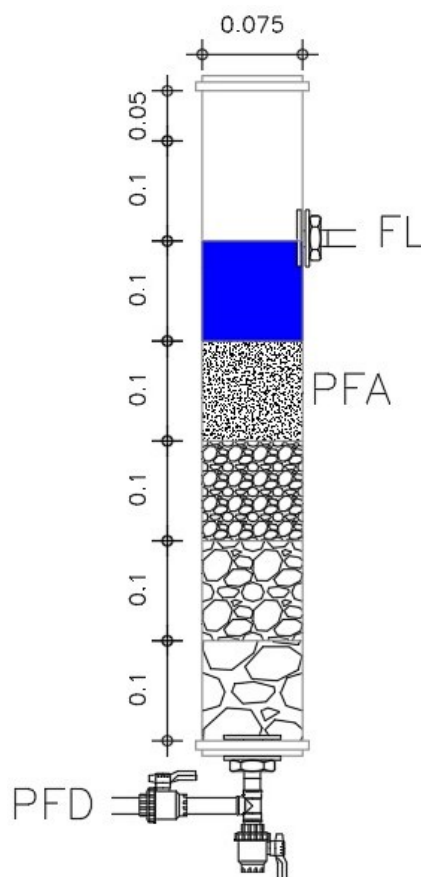
*os números estão expressos em metros.

FONTE: O Autor (2025).

3.3.4 Pré-filtro de pedregulho (PFA)

O pré-filtro pedregulho com fluxo de água ascendente (PFA), foi composto por quatro camadas dispostas de maneira decrescente, com materiais filtrantes de granulometria diferentes e de 0,10 m de espessura, onde a primeira camada na base do filtro possui granulometria na faixa de 9,50 – 19,00 mm, as camadas intermediárias com granulometria na faixa de 4,75 – 9,50 mm e 3,35 – 4,75 mm, respectivamente, e a última camada com granulometria na faixa de 1,18 – 3,35 mm. O esquema do PFA pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8- Esquema ilustrativo do pré-filtro de pedregulho.



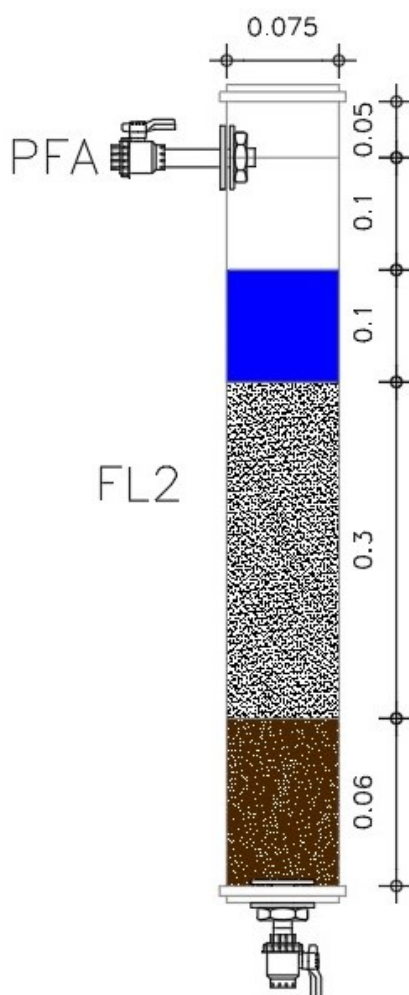
*os números estão expressos em metros.

FONTE: O Autor (2025).

3.3.5 Filtração Lenta (FL)

A água advinda dos filtros PFD e PFA posteriormente passou no filtro lento, sendo composto por uma camada de areia com granulometria na faixa de 0 – 1,18 mm e espessura de 0,30 m, e uma camada suporte de carvão ativado de fibra de coco com 0,06 m de espessura (Vizibelli, 2019, Vizibelli, 2021). O esquema do FL pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9- Esquema ilustrativo do filtro lento.



*os números estão expressos em metros.

FONTE: O Autor (2025).

3.4 PRODUÇÃO DOS COAGULANTES ORGÂNICOS

3.4.1 Coagulante a base de *Moringa oleifera*

Para preparação do coagulante utilizou-se sementes das árvores de *Moringa oleifera* presentes na UTFPR- *campus* Londrina. As sementes foram removidas das vagens e levadas com a casca para um dessecador por 24 horas, para remoção de sua umidade natural. Após esse período, triturou-se 10 g das sementes descascadas em um liquidificador com 58,44 g de NaCl e 1 L de água destilada. Em seguida, a solução foi coada com coador de pano, para remoção da matéria orgânica grosseira (Vizibelli, 2021).

Na determinação da dosagem de aplicação do coagulante, realizou-se ensaios no equipamento Jar-Test, aplicando as dosagens de 1, 5, 10, 15 e 20 mL da solução preparada. Após a aplicação dos coagulantes, realizou-se o teste de Jar-Test com agitação inicial a 150 rpm por 3 minutos, seguida de agitação a 15 rpm por 10 minutos. Ao término desse período, o equipamento foi desligado, a amostra foi coletada e a turbidez analisada (Vizibelli, 2021).

3.5 MONITORAMENTO E ANÁLISE DE PARÂMETROS

Durante a operação, coletou-se amostras desde o ponto de abastecimento do sistema até a saída de cada filtro (PFD, PFA e FL). Analisou-se os seguintes parâmetros: pH, Cor Aparente, Turbidez, Temperatura, Série de Sólidos, Condutividade Elétrica e Metais Pesados (Cu e Zn). As amostras foram coletadas nos tempos 0, 10, 20, 30 e 40 minutos.

Os parâmetros foram monitorados e analisados no Laboratório de Recursos Hídricos da UTFPR- *campus* Londrina, com exceção os metais pesados, que foram encaminhados ao LAMAP para análise. Todas as metodologias aplicadas para cada parâmetro seguiram as estabelecidas por APHA (2017).

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A fim de testar a hipótese de que há diferença significativa na remoção dos parâmetros em relação a cada carreira de filtração ao longo do tempo de tratamento, realizou-se a Análise de Variância (ANOVA) nos parâmetros pH, cor aparente, turbidez, temperatura, série de sólidos, condutividade elétrica e metais pesados (Cu e Zn), aplicando-se juntamente o teste de Tukey com nível de significância $p < 0,05$. O *software* RStudio® foi utilizado para processamentos dos dados.

Também construiu-se os Figuras *box plot* para comparar os parâmetros em cada carreira de filtração. O Figura *box plot* permitiu verificar a dispersão e identificar possíveis outliers no conjunto de dados. A representação gráfica é composta por um retângulo (caixa) correspondendo ao intervalo interquartil (IQR), o qual abrange a região central dos dados, excluindo os 25% dos valores mais baixos e os 25% mais altos. Também há uma linha dentro da caixa indicando a mediana e, linhas que se estendem a partir da caixa para mostrar a variabilidade fora do intervalo interquartil. Além disso, pontos ou asteriscos podem ser usados para representar valores discrepantes (Vizibelli, 2021).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

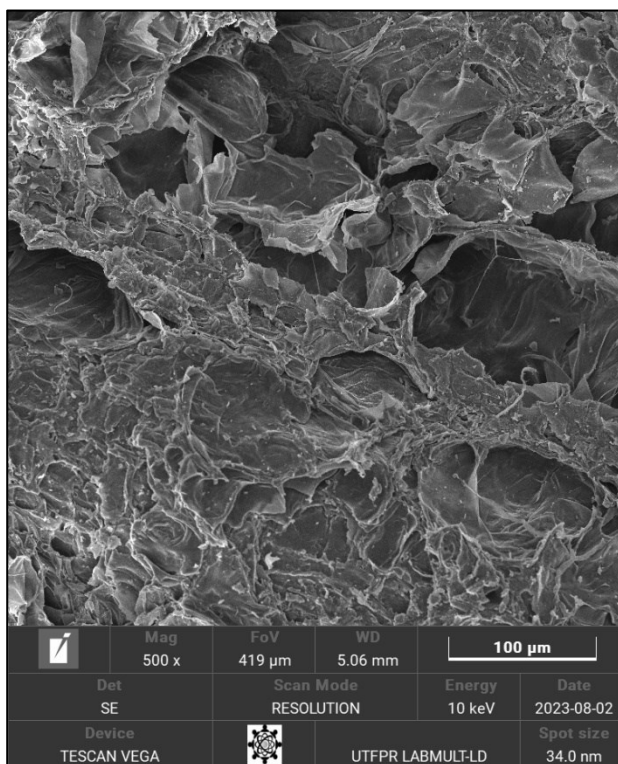
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ADSORVENTE

4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) possibilitou verificar a porosidade e rugosidade da superfície da fibra de coco *in natura* e o carvão ativado.

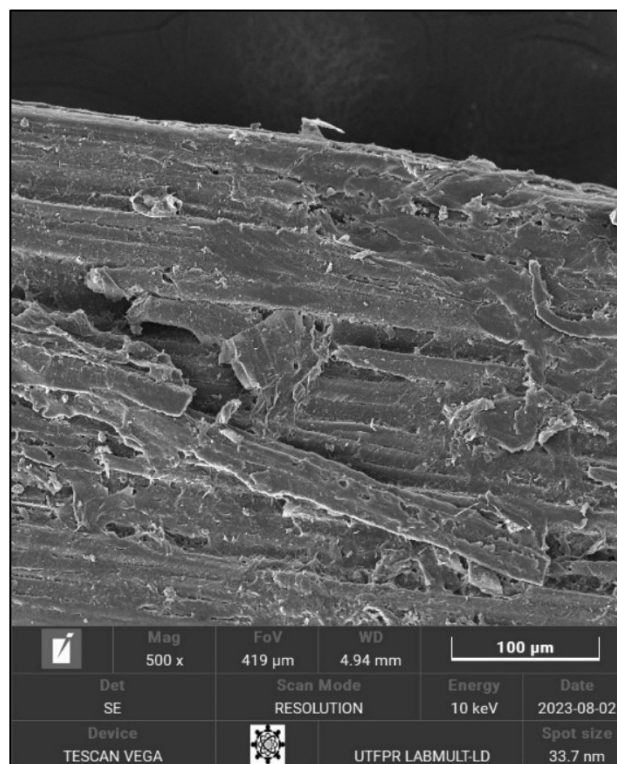
As imagens obtidas da fibra de coco *in natura* é apresentada na Figura 10.

FIGURA 10- Imagens da superfície da fibra *in natura* obtidas do MEV, com aumento de 500 vezes.



(a)

Aumento de 500 vezes



(b)

Aumento de 500 vezes

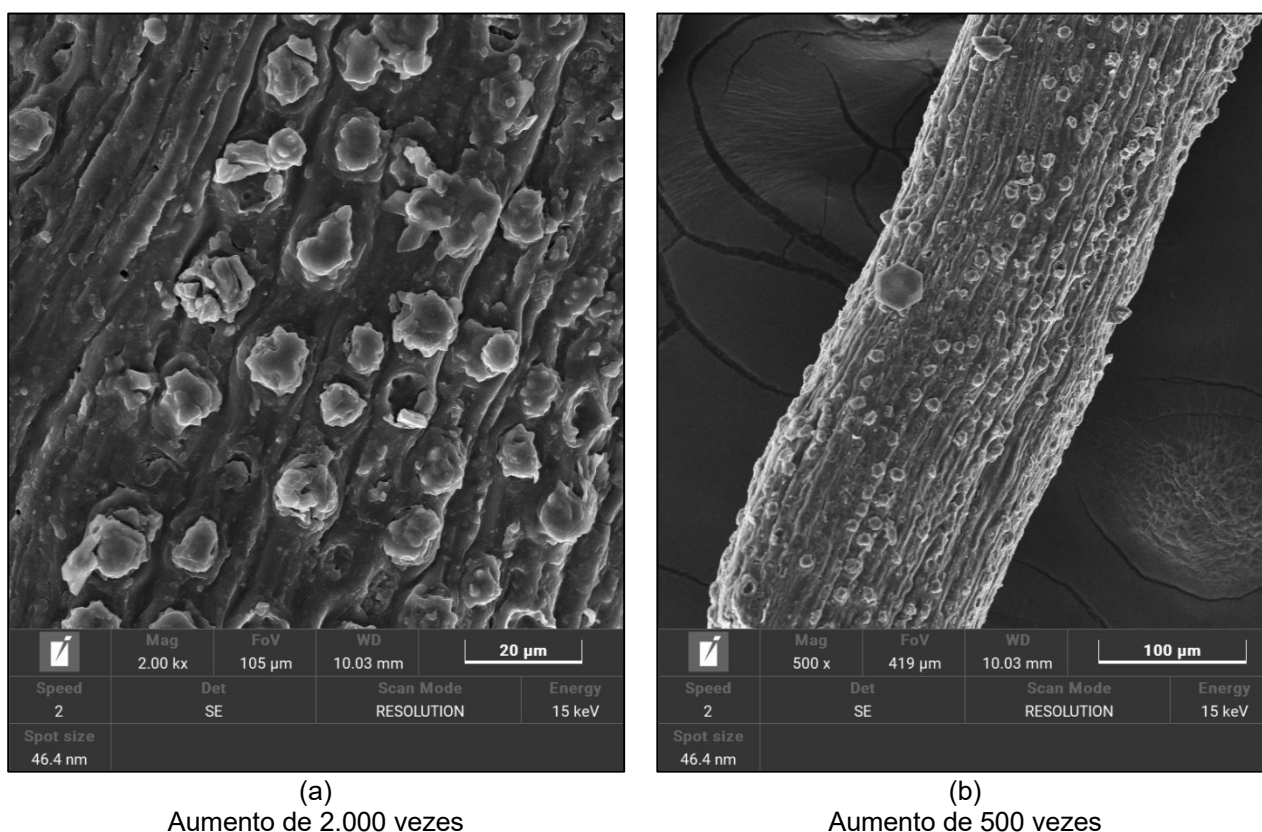
FONTE: LABMULT- LD (2023).

Na Figura 10, é possível observar que a superfície da fibra de coco *in natura* é heterogênea, com regiões mais lisas e outras mais rugosas. Também se verifica a presença de poros em sua superfície, indicando uma alta porosidade interna. As características morfológicas da fibra de coco são significativas para o processo de adsorção.

Em outros estudos que analisaram a morfologia da superfície do coco verde, como os de Souza (2009) e Sousa *et. al.* (2007), também foram obtidos resultados semelhantes, constatando-se que a superfície do material apresenta irregularidades e cavidades, favorecendo a retenção de compostos em sua superfície.

As imagens obtidas do carvão ativado de fibra de coco é apresentada na Figura 11.

Figura 11- Imagens da superfície do carvão de fibra de coco ativado obtidas do MEV, com aumento de (a) 2.000 vezes e (b) 500 vezes.



FONTE: LABMULT- LD (2024).

Também se observa, na Figura 11, uma superfície heterogênea do carvão ativado em relação a fibra de coco *in natura*, e houve um aumento significativo de poros de diferentes tamanhos, sendo fundamental para aplicação de adsorção.

O aumento da porosidade na superfície do carvão ativado pode ser atribuída à ação do ácido fosfórico, que remove componentes como a hemicelulose, expondo a celulose e modificando as propriedades da fibra, permitindo assim a ativação da fibra e aumentando sua capacidade de adsorver poluentes, metais e entre outras substâncias (Brito, 2023).

4.1.2 Determinação da área de superfície BET

Nesta análise, determinou-se a área superficial e volume dos poros da fibra de coco e do carvão ativado, os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Resultados obtidos na análise da área superficial BET da fibra de coco e do carvão ativado.

Amostras	Temperatura (°C)	Duração (min)	Área superficial específica (m ² .g ⁻¹)	Volume de poro (m ³ .g ⁻¹)
Fibra de coco <i>in natura</i>	23,11	68,20	0,088	0,0005
Carvão ativado	26,64	62,40	0,293	0,0001

FONTE: LAMAP (2024).

Analisando a área superficial específica da fibra de coco *in natura*, verifica-se que esta apresenta uma área superficial relativamente baixa e o volume de poro sugere que a fibra possui uma certa estrutura porosa. Para o carvão ativado, houve um aumento significativo da área superficial específica, em comparação com a fibra de coco *in natura*, e o volume de poro também evidencia uma estrutura porosa.

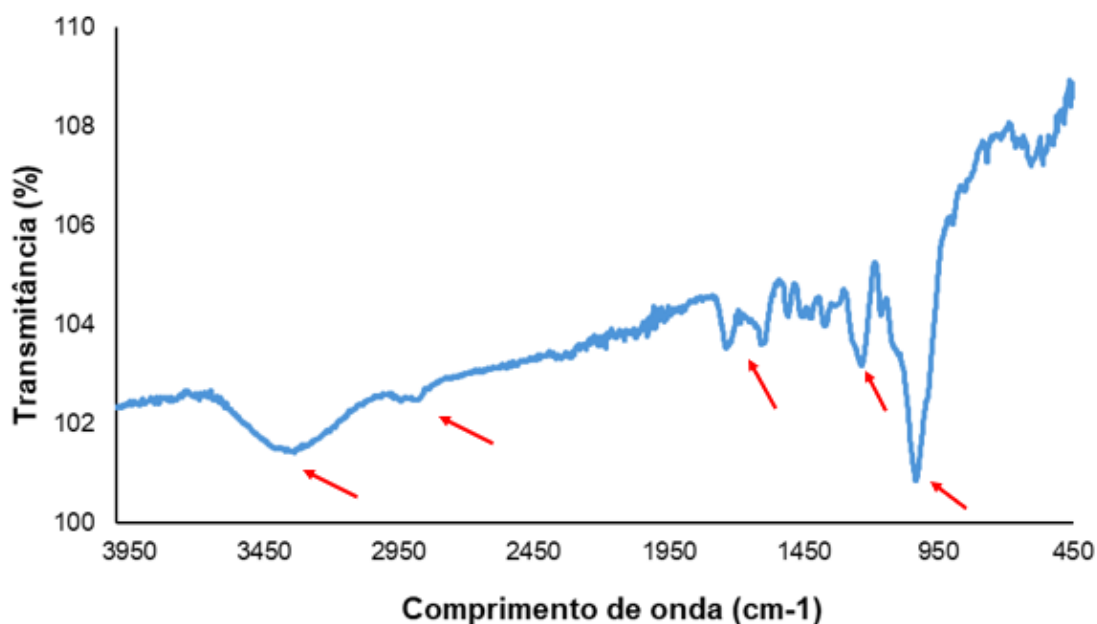
Desse modo, a ativação da fibra de coco com ácido fosfórico mostrou-se eficaz para produzir carvão com maior área superficial e volume de poros, resultando em um material com alta capacidade de adsorção (Teixeira, 2020; Narita, 2021).

4.1.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Com o espectro FTIR, foi possível identificar os grupos funcionais presente na amostra fibra de coco *in natura* e fibra de coco ativada com H₃PO₄. Cada pico no espectro corresponde a uma vibração específica de uma ligação química presente no material. A posição do pico indica o tipo de ligação, enquanto a intensidade está relacionada à quantidade desse grupo funcional na amostra.

A Figura 12 apresenta os espectros vibracionais da fibra de coco *in natura*.

Figura 12- Gráfico com os espectros vibracionais da fibra de coco *in natura*.



FONTE: O Autor (2025).

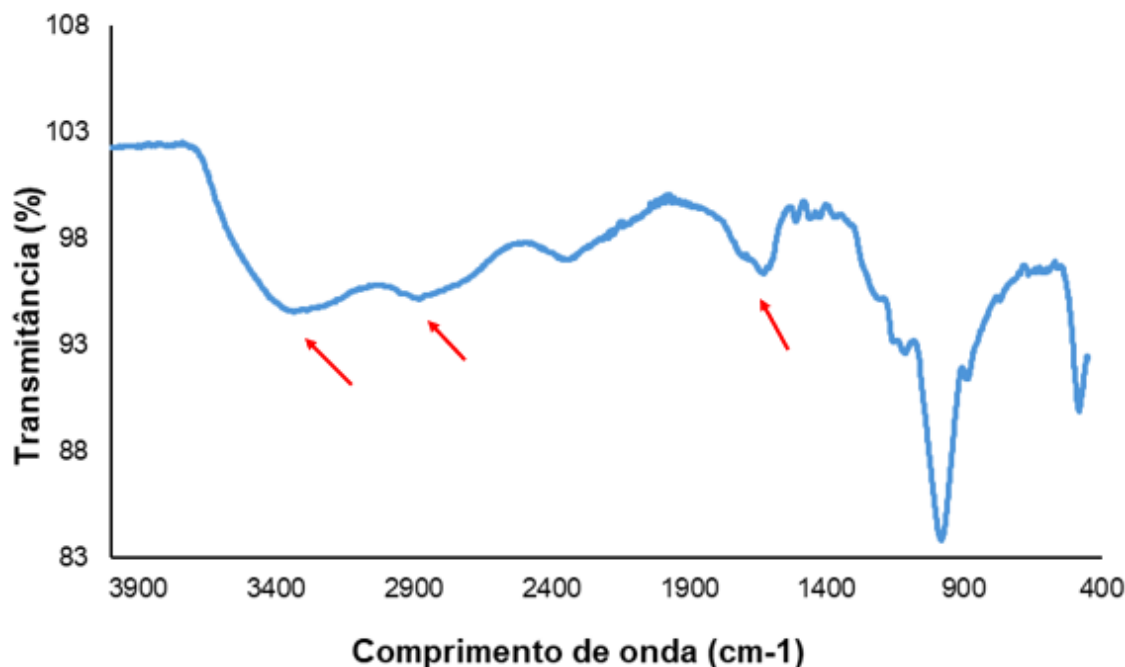
Analisando os picos da Figura 12, observa-se que a faixa de $3500\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ compreende a região de ligações hidroxila (O-H) presentes em compostos como celulose, a faixa $2900\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ (C-H), corresponde a presença de grupos metil e metileno, específicos de cadeias hidrocarbônicas encontradas na celulose e hemicelulose. Já na faixa de $1750\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$, identificam-se sinais atribuídos a grupos carbonila (C=O), associados a ésteres, ácidos carboxílicos ou carbonilas conjugadas. A faixa de $1500\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ está relacionada à deformação angular C-H e ao estiramento C-O, abrangendo estruturas de celulose, hemicelulose e lignina. E abaixo de 1200 cm^{-1} as vibrações moleculares são mais complexas e envolvem a deformação de diversos tipos de ligações químicas (Cambuim, 2009; Souza, 2009).

A presença desses principais picos citados acima, indicam a natureza lignocelulósica da fibra de coco.

Brito (2023) avaliou a aplicação da fibra de coco com diferentes pré-tratamentos para obtenção de etanol celulósico. Para verificar a composição química da fibra, foram realizados espectros de FTIR nas regiões 500 e 4000 cm^{-1} . Os resultados evidenciaram picos significativos nas regiões 3315 cm^{-1} , $1284\text{--}1454\text{ cm}^{-1}$ e 1028 cm^{-1} , associados aos picos de composição de celulose, lignina e hemicelulose, respectivamente, sugerindo que a fibra de coco é um material lignocelulósico.

A Figura 13 apresenta os espectros vibracionais da fibra de coco ativada com H_3PO_4 .

Figura 13-Gráfico com os espectros vibracionais da fibra de coco ativada com H_3PO_4 .



FONTE: O Autor (2025).

Na Figura 13, observamos os picos na faixa de $3500\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$, $2900\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$, $1750\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ e abaixo de 1000 cm^{-1} . Comparando com a Figura 12, houve uma diminuição na intensidade dos picos da banda de celulose, hemicelulose e lignina, além de apresentar novas bandas. Essas diferenças significativas nos picos analisados podem ser atribuídas ao processo de ativação da fibra de coco com ácido fosfórico. O pico intenso abaixo de 1000 cm^{-1} é característico do grupo fosfato, confirmando a presença do ácido na estrutura da fibra (Teixeira, 2020; Brito, 2023).

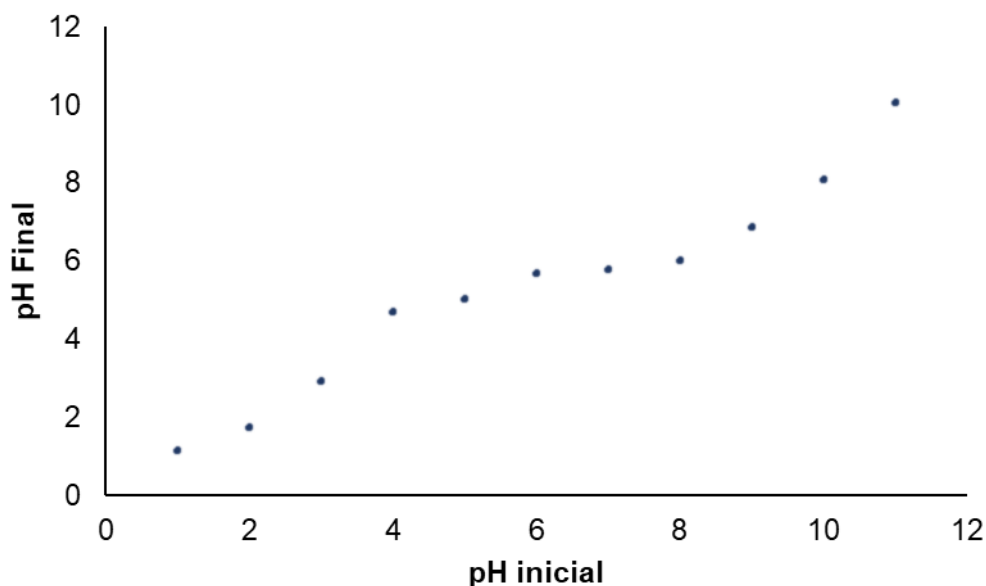
A espectroscopia de infravermelho mostrou que a fibra de coco foi efetivamente tratada com ácido fosfórico, modificando a estrutura da fibra de coco.

4.1.4 Determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ).

O pH é um parâmetro fundamental para o processo de adsorção, pois influencia diretamente as interações eletrostáticas entre o adsorvente e o adsorvato (Nascimento *et al.*, 2014). Por meio do ensaio do ponto de carga zero (PCZ), foi possível determinar o valor de pH na qual ocorre interação entre a fibra de coco e os

metais pesados, como Cobre e Zinco. A Figura 14 traz os resultados obtidos da análise de PCZ da fibra de coco.

Figura 14- Gráfico com os resultados de pH inicial e pH final obtidos a partir da análise de ponto de carga zero (PCZ) da fibra de coco.



FONTE: O Autor (2025).

Com base na Figura 14, o pH_{PCZ} da fibra de coco foi determinado pela média aritmética dos pontos em que o pH final permaneceu constante, resultando em um valor de 5,45. Dessa forma, para que ocorra a adsorção dos metais Cobre e Zinco, é necessário que o pH da solução seja superior ao pH_{PCZ} . Nessa condição, a superfície da fibra de coco apresenta carga negativa, favorecendo a adsorção de cátions.

Outros autores, como Souza (2009) e Freitas, Câmara e Martins (2015) em seus estudos encontraram os valores de pH_{PCZ} para o coco sendo 4,10 e 4,43, respectivamente.

Freitas e Júnior (2022) em seu trabalho, estudaram as características da fibra de coco para avaliar sua capacidade de adsorção e remoção de corantes têxteis reativos, e encontraram um valor de pH_{PCZ} igual a 5,85. Oliveira *et al.* (2024) também caracterizou a fibra de coco para verificar sua eficiência como biochar na remoção de íons Pb^{2+} em amostras de água, e obteve um valor de pH_{PCZ} de 4,60.

Sendo assim, o valor de pH_{PCZ} para fibra de coco encontrado nesse estudo está próximo aos valores de outros trabalhos.

4.2 ENSAIO DE ADSORÇÃO

Os ensaios de adsorção, de Cobre e Zinco no carvão ativado de fibra de coco, foram realizados em três concentrações crescentes dos metais pesados. Os tópicos 2.2.1 e 2.2.2 descrevem os resultados encontrados.

4.2.1 Cobre

A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio de adsorção do Cobre (Cu) com concentração de 0,4 mg.L⁻¹.

Para melhor compreensão dos resultados, será apresentada uma descrição de cada coluna:

- Amostra: representa o tempo em que a amostra foi analisada, sendo a cada intervalo de tempo, uma nova medida era realizada;
- Absorbância (ABS): quantidade de luz absorvida pela amostra, está relacionada à concentração de Cu na solução;
- Concentração de Cu Remanescente (mg.L⁻¹): concentração de Cu que permaneceu na solução após o tempo de contato com o adsorvente (carvão ativado);
- Concentração de Cu Adsorvido (mg.L⁻¹): quantidade de Cu que foi adsorvido pelo carvão ativado, calculado a partir da diferença entre a concentração inicial e a remanescente;
- Concentração de Cu Adsorvido (mg.g⁻¹): Quantidade de Cu adsorvido por grama de adsorvente, uma medida mais precisa da capacidade de adsorção do material.

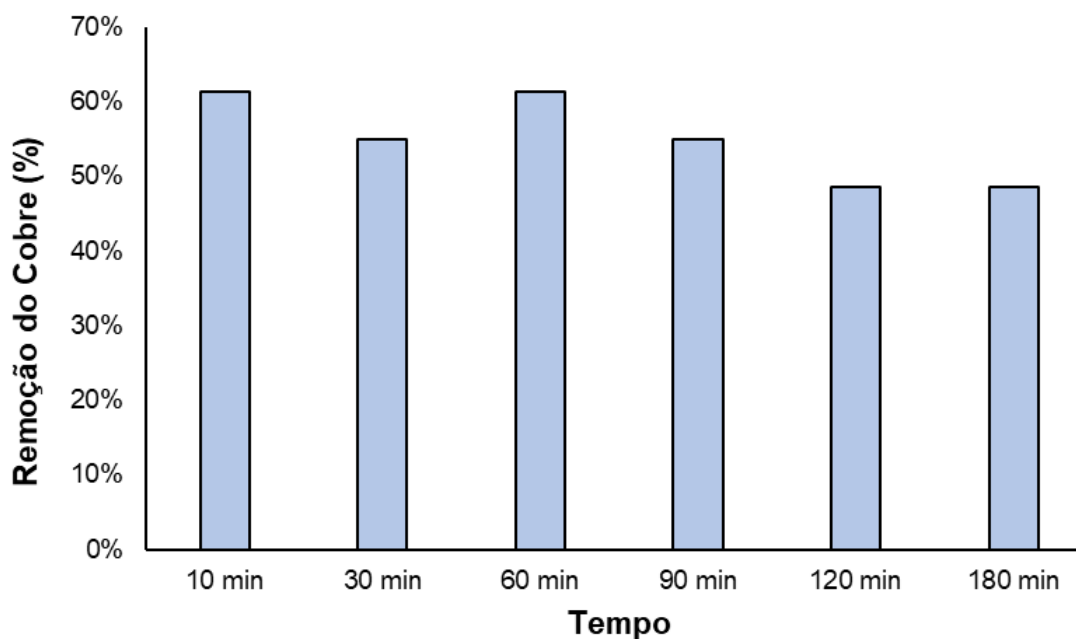
Tabela 3- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Cobre de 0,4 mg.L⁻¹.

Amostra	ABS	[Cu Remanescente] (mg.L ⁻¹)	[Cu Adsorvido] (mg.L ⁻¹)	[Cu Adsorvido] (mg.g ⁻¹)
T= 1 min	-0,005	0,426	-0,026	-0,0007
T= 2 min	-0,006	0,400	0,000	0,0000
T= 3 min	-0,005	0,426	-0,026	-0,0007
T= 4 min	-0,005	0,426	-0,026	-0,0007
T= 6 min	-0,005	0,426	-0,026	-0,0007
T= 8 min	-0,005	0,426	-0,026	-0,0007
T= 10 min	0,005	0,155	0,245	0,0061
T= 30 min	0,006	0,180	0,220	0,0055
T= 60 min	0,005	0,155	0,245	0,0061
T= 90 min	0,006	0,180	0,220	0,0055
T= 120 min	0,007	0,206	0,194	0,0049
T= 180 min	0,007	0,206	0,194	0,0049

FONTE: O Autor (2025).

Analisando a Tabela 3, observa-se que no tempo de 1 a 8 minutos não ocorreu adsorção, somente a partir de 10 minutos o Cobre é adsorvido significativamente, e atingindo equilíbrio após 120 minutos.

A Figura 15 traz os resultados de remoção do Cobre em porcentagem.

Figura 15- Resultados de remoção de Cobre, na concentração de 0,4 mg.L⁻¹, no ensaio de adsorção.

FONTE: O Autor (2025).

Com a Figura 15, verifica-se que, com 10 minutos, o carvão ativado já demonstrou uma alta capacidade de remover o Cobre da solução, atingindo mais de 60% de remoção, após isso, a eficiência de remoção fica em torno de 50 a 60%. Com 120 minutos a quantidade de Cobre adsorvido não aumenta significativamente com o aumento do tempo de contato, alcançando o equilíbrio.

A Tabela 4 apresenta os resultados do ensaio de adsorção do Cobre com concentração de 2,0 mg.L⁻¹.

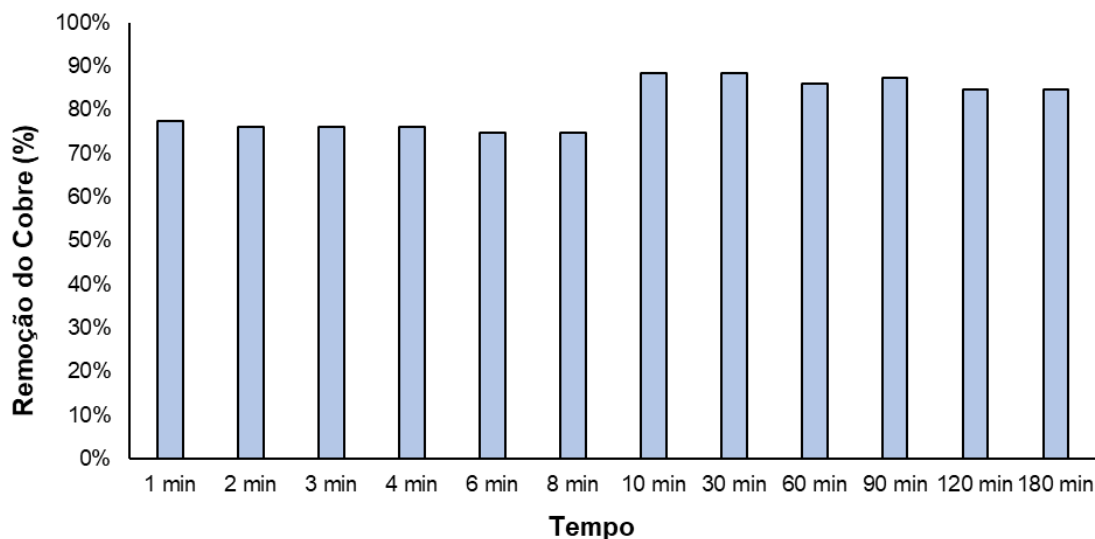
Tabela 4- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Cobre de 2,0 mg.L⁻¹.

Amostra	ABS	[Cu Remanescente] (mg.L ⁻¹)	[Cu Adsorvido] (mg.L ⁻¹)	[Cu Adsorvido] (mg.g ⁻¹)
T= 1 min	-0,004	0,453	1,547	0,039
T= 2 min	-0,003	0,479	1,521	0,038
T= 3 min	-0,003	0,479	1,521	0,038
T= 4 min	-0,003	0,479	1,521	0,038
T= 6 min	-0,002	0,505	1,495	0,037
T= 8 min	-0,002	0,505	1,495	0,037
T= 10 min	0,008	0,231	1,769	0,044
T= 30 min	0,008	0,231	1,769	0,044
T= 60 min	0,010	0,282	1,718	0,043
T= 90 min	0,009	0,256	1,744	0,044
T= 120 min	0,011	0,307	1,693	0,042
T= 180 min	0,011	0,307	1,693	0,042

FONTE: O Autor (2025).

Na Tabela 4, constata-se que a adsorção do Cobre iniciou-se nos primeiros minutos, nos tempos 10, 30, 60 e 90 minutos houve um aumento significativo da concentração de Cobre adsorvido, e com 120 minutos atinge o equilíbrio da adsorção.

Figura 16- Resultados de remoção de Cobre, na concentração de $2,0 \text{ mg.L}^{-1}$, no ensaio de adsorção.



FONTE: O Autor (2025).

A Figura 16, onde exibe em porcentagem os resultados de remoção do Cobre, mostra que nos primeiros minutos o carvão ativado alcançou em torno de 75% de remoção do metal, indicando uma cinética de adsorção rápida. Nos tempos de 10 a 90 minutos a eficiência de remoção aumentou e ficou entre 80 e 90%, depois, com 120 e 180 minutos a adsorção diminuiu ficando próxima aos 85%.

A Tabela 5 apresenta os resultados do ensaio de adsorção do Cobre com concentração de $10,0 \text{ mg.L}^{-1}$.

Tabela 5- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Cobre de $10,0 \text{ mg.L}^{-1}$.

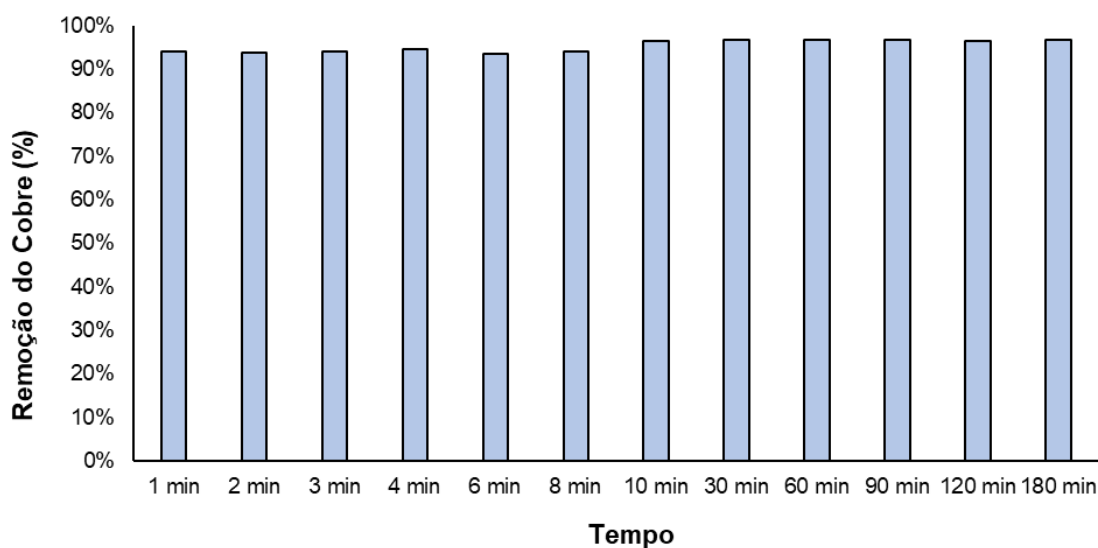
Amostra	ABS	[Cu Remanescente] (mg.L^{-1})	[Cu Adsorvido] (mg.L^{-1})	[Cu Adsorvido] (mg.g^{-1})
T= 1 min	0,002	0,611	9,389	0,235
T= 2 min	0,003	0,637	9,363	0,234
T= 3 min	0,002	0,611	9,389	0,235
T= 4 min	0,000	0,558	9,442	0,236
T= 6 min	0,004	0,663	9,337	0,233
T= 8 min	0,002	0,611	9,389	0,235
T= 10 min	0,013	0,358	9,642	0,241
T= 30 min	0,012	0,332	9,668	0,242
T= 60 min	0,012	0,332	9,668	0,242
T= 90 min	0,012	0,332	9,668	0,242
T= 120 min	0,013	0,358	9,642	0,241
T= 180 min	0,012	0,332	9,668	0,242

FONTE: O Autor (2025).

Na Tabela 5, observa-se que os resultados de adsorção de Cobre foram elevados em todos os tempos, com variações pouco expressivas entre si. No entanto, verifica-se um comportamento distinto ao comparar os dados de remoção de Cobre nas concentrações de $0,4 \text{ mg.L}^{-1}$ e $2,0 \text{ mg.L}^{-1}$. À medida que a concentração de Cobre na solução aumenta, ocorre maior adsorção.

A Figura 17 traz os resultados de remoção do Cobre em porcentagem.

Figura 17- Resultados de remoção de Cobre, na concentração de $10,0 \text{ mg.L}^{-1}$, no ensaio de adsorção.



FONTE: O Autor (2025).

A eficiência de remoção do Cobre na concentração de 10 mg.L^{-1} utilizando o carvão ativado alcançou mais de 90% para todos os tempos de amostragem, novamente indicando que a adsorção é rápida. Essa alta eficiência pode ser explicada pelo maior gradiente de concentração, que favorece ainda mais a difusão dos íons de Cobre para os sítios ativos do carvão.

Com base nos resultados apresentados, verifica-se que o carvão ativado de fibra de coco é um material adsorvente eficiente para a remoção de Cobre devido à sua alta eficiência inicial e a rápida cinética de adsorção.

Santos (2017) desenvolveu um carvão ativado a partir da fibra do mesocarpo do coco e avaliou sua eficiência na remoção do corante Azul de Metileno e dos agrotóxicos 2,4-D e Furadan, comparando os resultados com os de um carvão ativado comercial. Na concentração de 100 mg.L^{-1} de Azul de Metileno, o carvão ativado produzido apresentou uma adsorção de 95%. Para o agrotóxico 2,4-D, também na concentração de 100 mg.L^{-1} , a adsorção foi de 59,18%. Já para o Furadan, na

concentração de 50 mg.L^{-1} , o carvão ativado removeu 92,65% do agrotóxico. Em todos os ensaios, o carvão ativado produzido no estudo demonstrou desempenho superior ao do carvão ativado comercial.

4.2.2 Zinco

A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio de adsorção do Zinco (Zn) com concentração de $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$.

Para melhor compreensão dos resultados, será apresentada uma descrição de cada coluna:

- Amostra: representa o tempo em que a amostra foi analisada, sendo a cada intervalo de tempo, uma nova medida era realizada;
- Absorbância (ABS): quantidade de luz absorvida pela amostra, está relacionada à concentração de Zn na solução;
- Concentração de Zn Remanescente (mg.L^{-1}): concentração de Zn que permaneceu na solução após o tempo de contato com o adsorvente (carvão ativado);
- Concentração de Zn Adsorvido (mg.L^{-1}): quantidade de Zn que foi adsorvido pelo carvão ativado, calculado a partir da diferença entre a concentração inicial e a remanescente;
- Concentração de Zn Adsorvido (mg.g^{-1}): Quantidade de Zn adsorvido por grama de adsorvente, uma medida mais precisa da capacidade de adsorção do material.

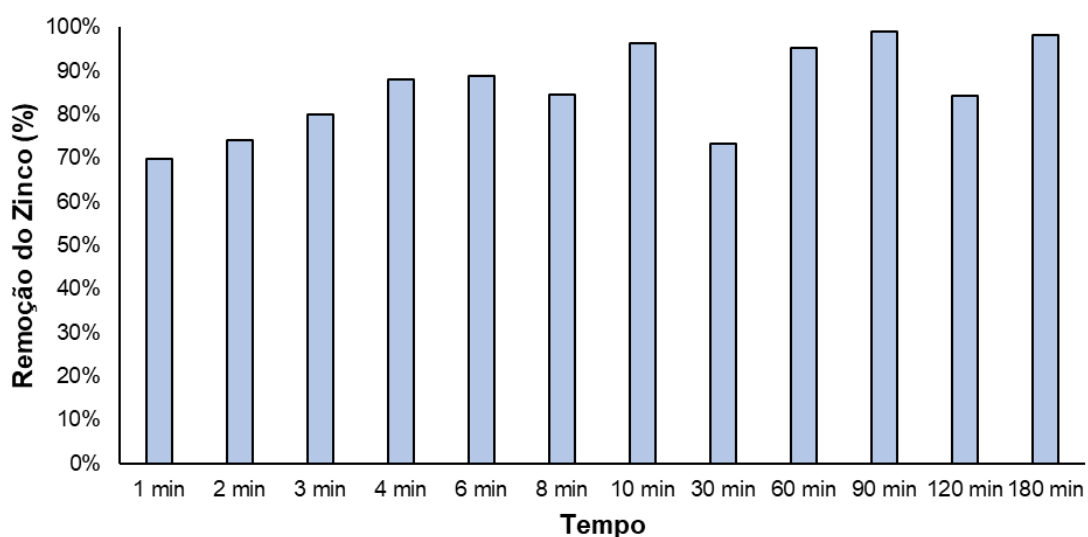
Tabela 6- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Zinco de 1,0 mg.L⁻¹.

Amostra	ABS	[Zn Remanescente] (mg.L ⁻¹)	[Zn Adsorvido] (mg.L ⁻¹)	[Zn Adsorvido] (mg.g ⁻¹)
T= 1 min	0,053	0,303	0,697	0,017
T= 2 min	0,048	0,260	0,740	0,019
T= 3 min	0,041	0,199	0,801	0,020
T= 4 min	0,032	0,121	0,879	0,022
T= 6 min	0,031	0,112	0,888	0,022
T= 8 min	0,036	0,156	0,844	0,021
T= 10 min	0,011	0,038	0,962	0,024
T= 30 min	0,036	0,267	0,733	0,018
T= 60 min	0,012	0,047	0,953	0,024
T= 90 min	0,008	0,010	0,990	0,025
T= 120 min	0,024	0,157	0,843	0,021
T= 180 min	0,009	0,019	0,981	0,025

FONTE: O Autor (2025).

Os resultados do ensaio de adsorção mostram que, entre 1 e 6 minutos, a concentração de Zinco adsorvido aumentou gradualmente. Após esse período, as concentrações permaneceram próximas entre si.

Na Figura 18 os resultados de remoção do Zinco são expressos em porcentagem.

Figura 18- Resultados de remoção de Zinco, na concentração de 1,0 mg.L⁻¹, no ensaio de adsorção.

FONTE: O Autor (2025).

Nos minutos 1, 2, 3, 4, 6 e 8 a porcentagem de remoção de Zinco da solução foi entre 70 e 85%, já nos tempos de 10 a 180 minutos a remoção variou entre 70 e 100%.

A Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio de adsorção do Zinco com concentração de 5,0 mg.L⁻¹.

Tabela 7- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Zinco de 5,0 mg.L⁻¹.

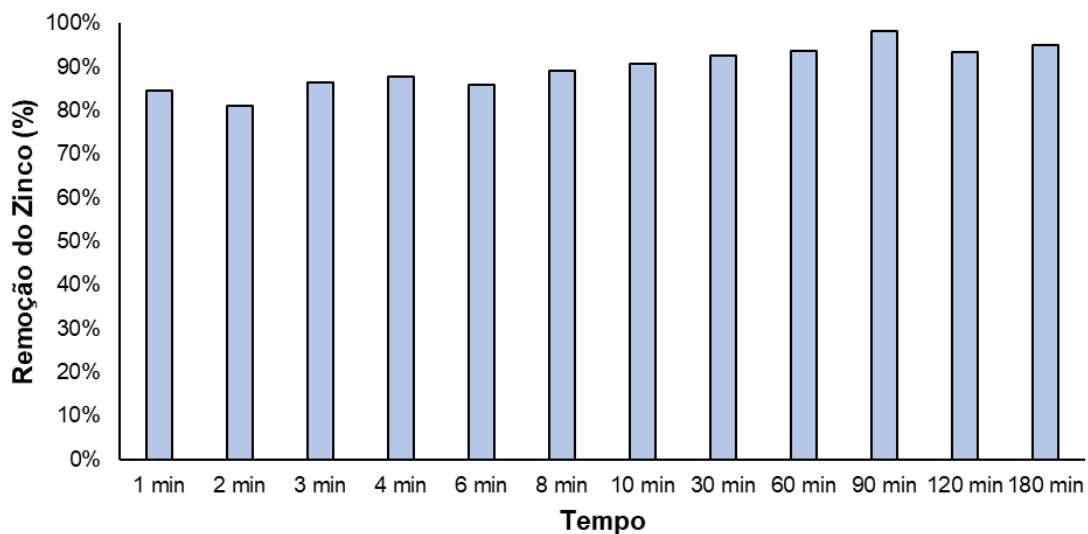
Amostra	ABS	[Zn Remanescente] (mg.L ⁻¹)	[Zn Adsorvido] (mg.L ⁻¹)	[Zn Adsorvido] (mg.g ⁻¹)
T= 1 min	0,108	0,779	4,221	0,106
T= 2 min	0,127	0,943	4,057	0,101
T= 3 min	0,096	0,675	4,325	0,108
T= 4 min	0,088	0,606	4,394	0,110
T= 6 min	0,099	0,701	4,299	0,107
T= 8 min	0,081	0,545	4,455	0,111
T= 10 min	0,057	0,459	4,541	0,114
T= 30 min	0,048	0,377	4,623	0,116
T= 60 min	0,041	0,313	4,687	0,117
T= 90 min	0,017	0,093	4,907	0,123
T= 120 min	0,043	0,331	4,669	0,117
T= 180 min	0,034	0,248	4,752	0,119

FONTE: O Autor (2025).

Para a concentração de 5,0 mg.L⁻¹ a adsorção de Zinco foi elevada em todos os tempos de amostragem, sem diferenças significativas entre os valores observados.

Na Figura 19 os resultados de remoção do Zinco são expressos em porcentagem.

Figura 19- Resultados de remoção de Zinco, na concentração de 5,0 mg.L⁻¹, no ensaio de adsorção.



FONTE: O Autor (2025).

A Figura 19 mostra que, nos primeiros minutos (de 1 a 8 minutos), a remoção de Zinco foi superior a 80%. Nos intervalos de tempo seguintes, a remoção variou entre 90% e 100%, com o maior percentual registrado aos 90 minutos, atingindo 98,15%.

A Tabela 8 apresenta os resultados do ensaio de adsorção do Zinco com concentração de 25,0 mg.L⁻¹.

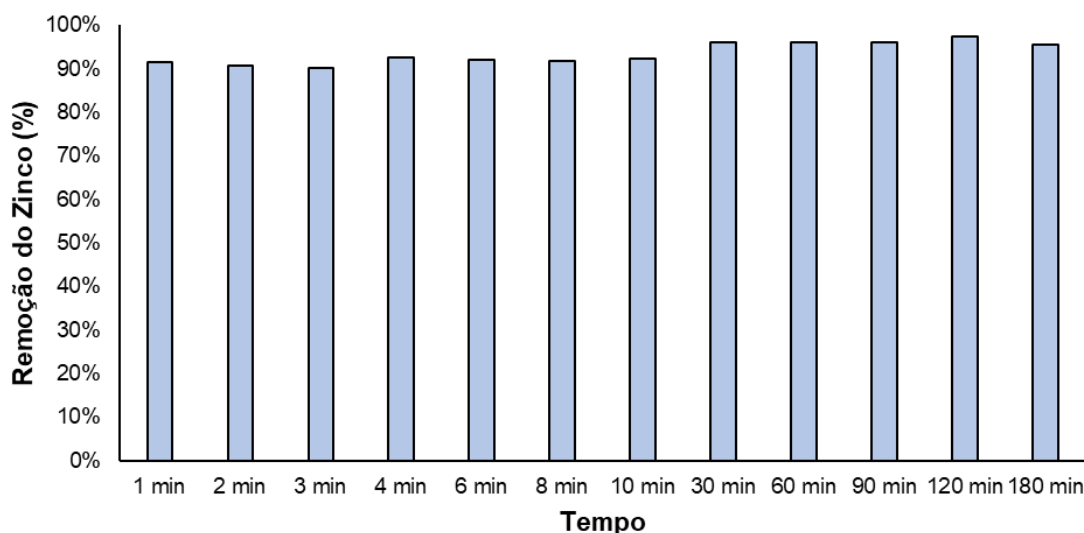
Tabela 8- Resultados do ensaio de adsorção com a concentração de Zinco de 25,0 mg.L⁻¹.

Amostra	ABS	[Zn Remanescente] (mg.L ⁻¹)	[Zn Adsorvido] (mg.L ⁻¹)	[Zn Adsorvido] (mg.g ⁻¹)
T= 1 min	0,266	2,145	22,855	0,571
T= 2 min	0,288	2,336	22,664	0,567
T= 3 min	0,305	2,483	22,517	0,563
T= 4 min	0,231	1,843	23,157	0,579
T= 6 min	0,246	1,972	23,028	0,576
T= 8 min	0,253	2,033	22,967	0,574
T= 10 min	0,215	1,907	23,093	0,577
T= 30 min	0,116	1,000	24,000	0,600
T= 60 min	0,116	1,000	24,000	0,600
T= 90 min	0,113	0,973	24,027	0,601
T= 120 min	0,076	0,633	24,367	0,609
T= 180 min	0,133	1,156	23,844	0,596

FONTE: O Autor (2025).

Com a Tabela acima, nota-se que a concentração de Zinco adsorvida foi elevada, com os melhores resultados nos tempos entre 30 e 120 minutos. A Figura 20 apresenta os resultados de remoção de Zinco.

Figura 20- Resultados de remoção de Zinco, na concentração de 25,0 mg.L⁻¹, no ensaio de adsorção.



FONTE: O Autor (2025).

Os resultados apresentados na Figura 20 demonstram que a remoção de Zinco foi altamente eficiente, com percentuais superiores a 90% em todas as amostras. O tempo de 120 minutos registrou a maior remoção, atingindo 97,47%.

Nota-se que, nos três ensaios realizados com o metal pesado Zinco, a eficiência de remoção variou entre 70% e 95% nos primeiros minutos, indicando que a maioria dos sítios ativos do carvão ativado foi rapidamente ocupada pelos íons de Zinco (Teixeira, 2020). O equilíbrio parece ser alcançado após aproximadamente 10 minutos, quando a quantidade de Zinco adsorvido deixa de aumentar significativamente com o tempo de contato.

Miranda *et al.* (2008) estudou o uso de carvão ativado do coco babaçu para a retenção do metal pesado Ferro em amostras de água, os resultados mostraram que o carvão ativado removeu, em 10 minutos, 99,89% dos íons férricos. Em outro estudo Oliveira *et al.* (2024) analisou a eficiência do biochar da fibra de coco para remover íons Pb²⁺ em amostras de água. Os autores também obtiveram uma remoção superior a 90% de íons Pb²⁺, o processo de adsorção foi rápido, ocorrendo nos minutos iniciais, e atingindo o equilíbrio de adsorção em 60 minutos.

Com base nos resultados apresentados e estudos prévios, o carvão ativado de fibra de coco possui um grande potencial para a adsorção de metais pesados e outros contaminantes.

4.3 OPERAÇÃO DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS (FiME)

4.3.1 Água Sintética

A Tabela 9 apresenta os valores médios dos parâmetros analisados nas amostras de água sintética, coletadas na primeira e segunda carreira de filtração do sistema FiME. Esses dados fornecem um panorama inicial da qualidade da água utilizada nos experimentos.

Tabela 9- Valores médio dos parâmetros analisados na água sintética.

Parâmetros	
Temperatura	26,95 °C
Condutividade Elétrica	185,60 $\mu\text{S.cm}^{-1}$
pH	7,02
Turbidez	336,50 uT
Cor aparente	1.015,00 uH
Sólidos totais	1.119,50 mg.L^{-1}
Sólidos dissolvidos totais	722,00 mg.L^{-1}
Sólidos suspensos totais	1.310,00 mg.L^{-1}
Cobre	10,00 mg.L^{-1}
Zinco	25,00 mg.L^{-1}

FONTE: O Autor (2025).

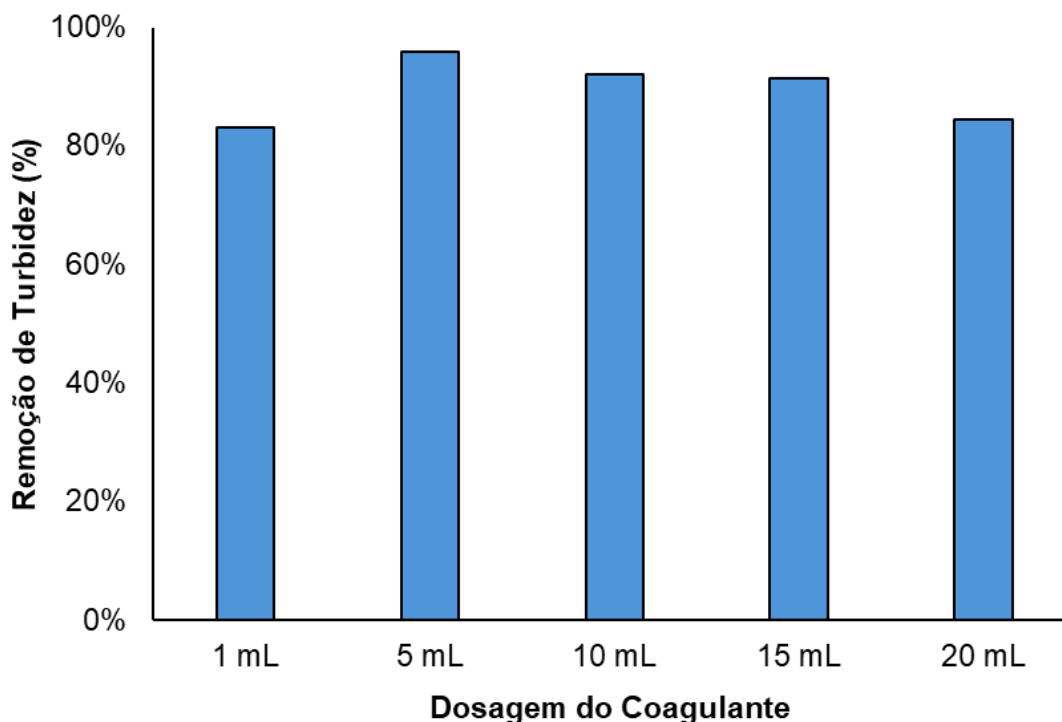
Conforme os resultados da análise da água sintética produzida, esta possui coloração intensa, presença de partículas em suspensão e dissolvidas, material particulado e dissolvido na água, além de estar contaminada por metais pesados (Cobre e Zinco).

4.3.2 Definição da Dosagem de Aplicação do Coagulante Orgânico

O teste com o coagulante extraído da semente de *Moringa oleifera* foi realizado em diferentes dosagens e verificou sua eficiência analisando somente a remoção do

parâmetro turbidez. A Figura 21 apresenta os resultados de remoção de turbidez para com o coagulante *Moringa oleifera*.

Figura 21- Resultados de remoção de Turbidez no teste com o coagulante orgânico *Moringa oleifera*.



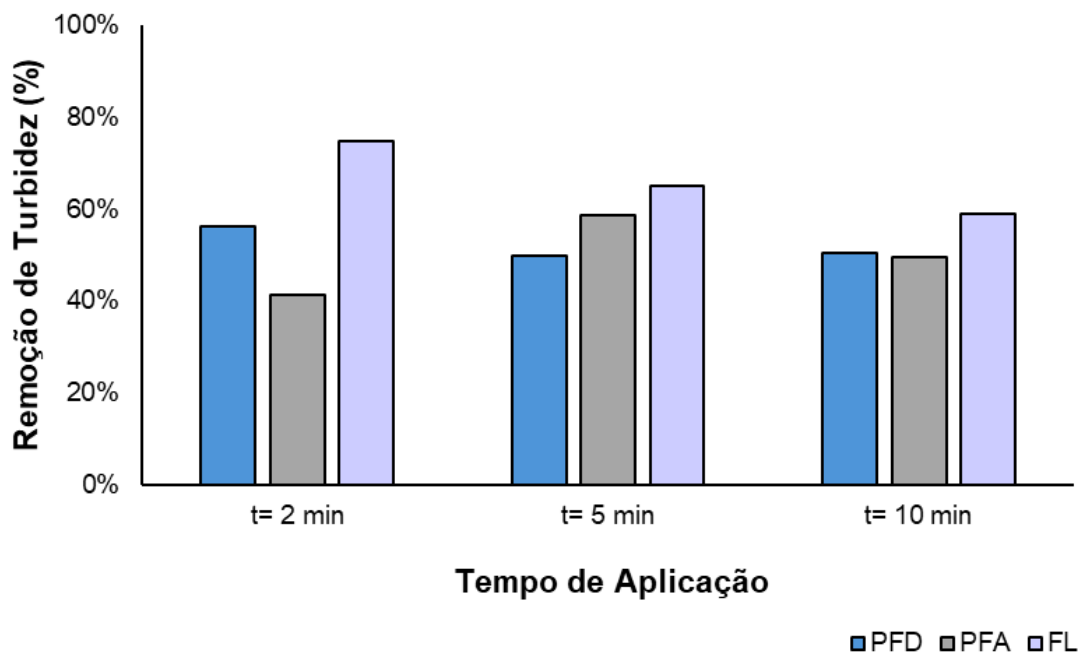
FONTE: O Autor (2025).

O coagulante a base de *Moringa oleifera* apresentou uma alta eficiência na remoção de turbidez em todas as dosagens testadas, com um pico de eficiência em 5 mL. A partir dessa dosagem, a eficiência tende a diminuir, possivelmente devido ao aumento na concentração de matéria orgânica, o que resulta em uma maior carga de sólidos na água (Vizibelli, 2021).

A partir dos resultados de remoção de turbidez da água sintética, escolheu a dosagem de 5 mL do coagulante a ser aplicado no FiME.

Após, foram realizados novos testes para avaliar o tempo de aplicação do coagulante. Utilizou-se a dosagem de 5 mL no sistema FiME, com tempos de aplicação de 2, 5 e 10 minutos. Durante o funcionamento do sistema, que teve duração de 40 minutos, foram realizadas cinco coletas em cada filtro (PFD, PFA e FL) ao longo do processo. Em seguida, foi elaborado um gráfico com os resultados médios de remoção de turbidez (Figura 22).

Figura 22- Resultados de remoção de Turbidez no teste de tempo de aplicação do coagulante orgânico *Moringa oleifera*.



Nota: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

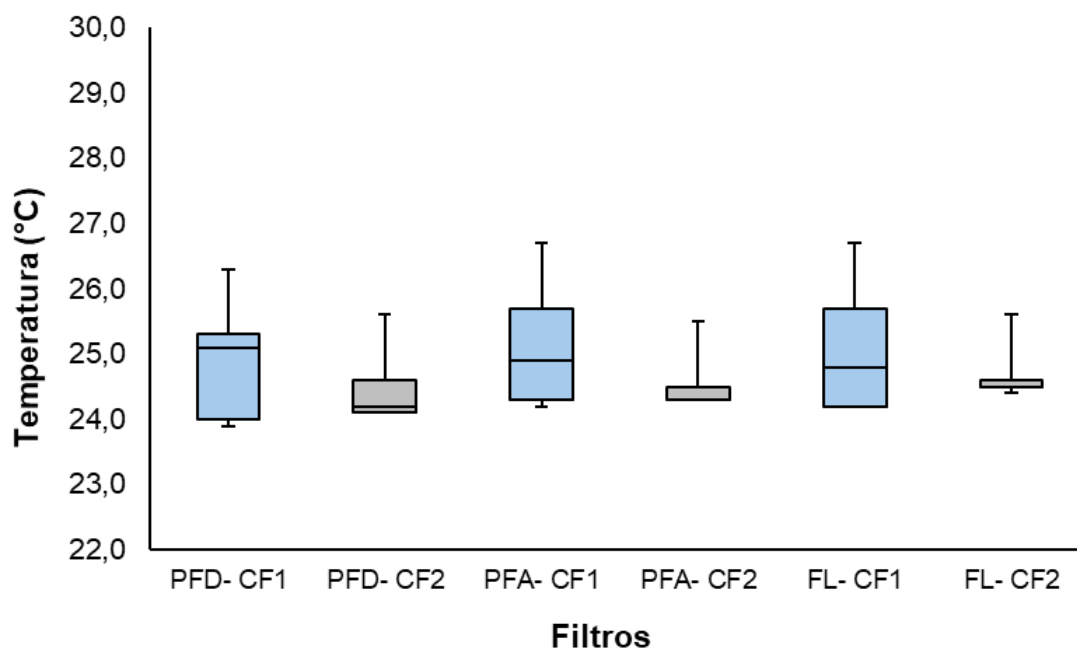
A análise a Figura 22 revela que os filtros alcançaram uma remoção de turbidez variando entre 40% e 75%, evidenciando a eficiência combinada do coagulante com o meio filtrante. Entre os tempos testados, a aplicação de 5 minutos apresentou a maior média de eficiência de remoção de turbidez nos três filtros. Por esse motivo, esse tempo de aplicação do coagulante *Moringa oleifera*, foi o selecionado para a realização do experimento no FiME.

4.3.3 Parâmetros Analisados

4.3.3.1 Temperatura

Na Figura 23 são apresentados os resultados do parâmetro Temperatura (°C), coletados durante a primeira e segunda carreira de filtração de operação do sistema FiME.

Figura 23- Resultados do parâmetro Temperatura obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



Nota: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

Analisando a Figura 23, verifica-se que houve uma variação de temperatura da água entre os diferentes filtros e até mesmo entre as duplicatas de cada filtro. O Filtro Lento (FL) apresentou menor variabilidade na temperatura, com valores mais concentrados ao redor da mediana, indicando que o FL pode contribuir para uma maior estabilidade térmica da água.

As Tabelas 10 e 11, trazem os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para o parâmetro Temperatura em relação a cada carreira de filtração ao longo do tempo de tratamento.

Tabela 10- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro temperatura em relação a primeira carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	0,0413	0,0207	0,2825	0,7611
Bloco	4	9,4507	2,3627	32,9216	<0,001
Resíduo	8	0,5853	0,0732	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	24,96	1,0668	0,121	23,9	26,5	a
PFA	25,06	0,8735	0,121	24,2	26,2	a
FL	24,94	0,7797	0,121	24,2	25,8	a

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFA - PFD	0,10	0,8321
PFA - FL	12,00	0,7695
PFD - FL	0,02	0,9925

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

O p-valor do fator Tratamentos (PFD, PFA e FL), sendo 0,7611, é maior que o nível de significância de 0,05. Isso significa que não há diferença significativa na temperatura média da água entre os filtros, não rejeita a hipótese nula.

Em relação ao p-valor do fator Bloco (Tempo), <0,001, é menor que o nível de significância de 0,05. Isso indica que existe uma diferença significativa ao longo do tempo de tratamento.

O teste F para o fator Tratamentos não foi significativo, o teste de Tukey não encontrou diferenças significativas entre as médias dos tratamentos e em nenhum par de tratamentos.

Tabela 11- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro temperatura em relação a segunda carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	0,2013	0,1007	8,7536	0,0097
Bloco	4	1,5	0,375	32,6087	<0,001
Resíduo	8	0,092	0,0115	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
FL	24,66	0,3647	0,048	24,4	25,3	a
PFA	24,56	0,3715	0,048	24,3	25,2	ab
PFD	24,38	0,3564	0,048	24,1	24,9	b

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
FL – PFA	0,1	0,3525
FL – PFD	0,28	0,0083
PFA - PFD	0,18	0,0677

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

O p-valor do Fator Tratamentos (igual a 0,0097) é menor que o nível de significância convencional de 0,05. Isso significa que existe diferença significativa entre as médias das temperaturas nos diferentes tipos de filtros (PFD, PFA e FL).

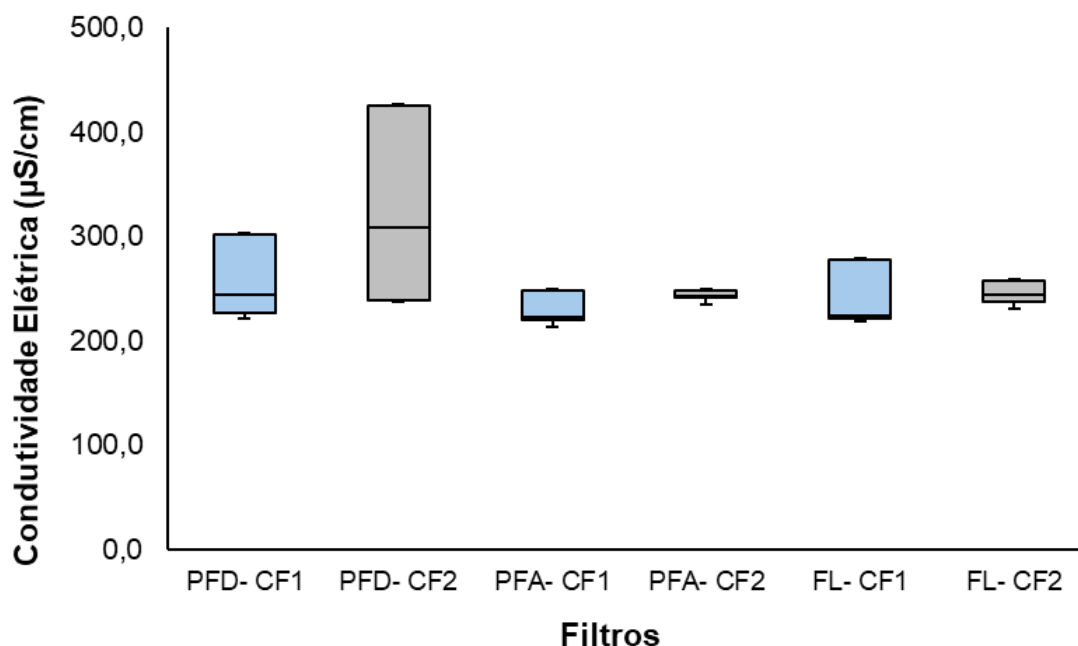
O p-valor do Fator Bloco (Tempo) (< 0,001), também é menor que o nível de significância 0,05, assim a temperatura varia significativamente ao longo do tempo.

Em relação ao teste de Tukey, FL tem a maior temperatura média e difere significativamente de PFD. PFA tem uma temperatura média intermediária e não difere significativamente de PFD e FL.

4.3.3.2 Condutividade Elétrica

A Figura 24 apresenta os resultados do parâmetro Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), coletados durante a primeira e segunda carreira de filtração de operação do sistema FiME.

Figura 24- Resultados do parâmetro Condutividade Elétrica obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

Analisando a Figura 24, o PFD-CF2 apresentou a maior condutividade elétrica, com uma mediana significativamente maior que os outros grupos. Isso sugere que a água que passou por esse filtro específico tinha uma maior concentração de íons, tornando-a mais condutora. Em relação ao PFA a condutividade elétrica foi intermediária e com uma pequena diferença entre as duas duplicatas. E o FL mostrou a menor condutividade elétrica, indicando que a água que passou por esses filtros tinha a menor concentração de íons.

As Tabelas 12 e 13, trazem os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para o parâmetro Condutividade Elétrica em relação a cada carreira de filtração ao longo do tempo de tratamento.

Tabela 12- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro condutividade elétrica em relação a primeira carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	87024,14	43512,07	1,2484	0,3374
Bloco	4	693381,38	173345,35	4,9735	0,0261
Resíduo	8	278831,32	34853,92	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	420,408	385,707	83,4912	221,14	1108	a
FL	371,7	305,252	83,4912	219	916	a
PFA	240,08	33,2344	83,4912	213,8	294,8	a

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - FL	48,708	0,9115
PFD - PFA	180,328	0,3293
FL - PFA	131,62	0,5322

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

Com o p-valor igual a 0,3374, sendo maior que 0,05, indica que não há evidência estatística suficiente para rejeitar a hipótese nula, sendo assim, não há diferença significativa na condutividade elétrica média entre os filtros.

No p-valor do Fator Bloco (0,0261) menor que 0,05, rejeitamos a hipótese nula, significando que a condutividade elétrica varia significativamente ao longo do tempo.

O teste de Tukey indica que não há diferença significativa entre nenhum par de filtros (PFD, FL e PFA).

Tabela 13- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro condutividade elétrica em relação a segunda carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	92324,09	46162,04	2,291	0,1634
Bloco	4	101451,25	25362,81	1,2588	0,3611
Resíduo	8	161191,84	20148,98	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	412,48	255,6817	63,4807	239	849	a
FL	247,74	15,6137	63,4807	230,7	269,1	a
PFA	244,42	6,6206	63,4807	235,6	252,7	a

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - FL	164,74	0,2192
PFD - PFA	168,06	0,2084
FL - PFA	3,32	0,9992

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

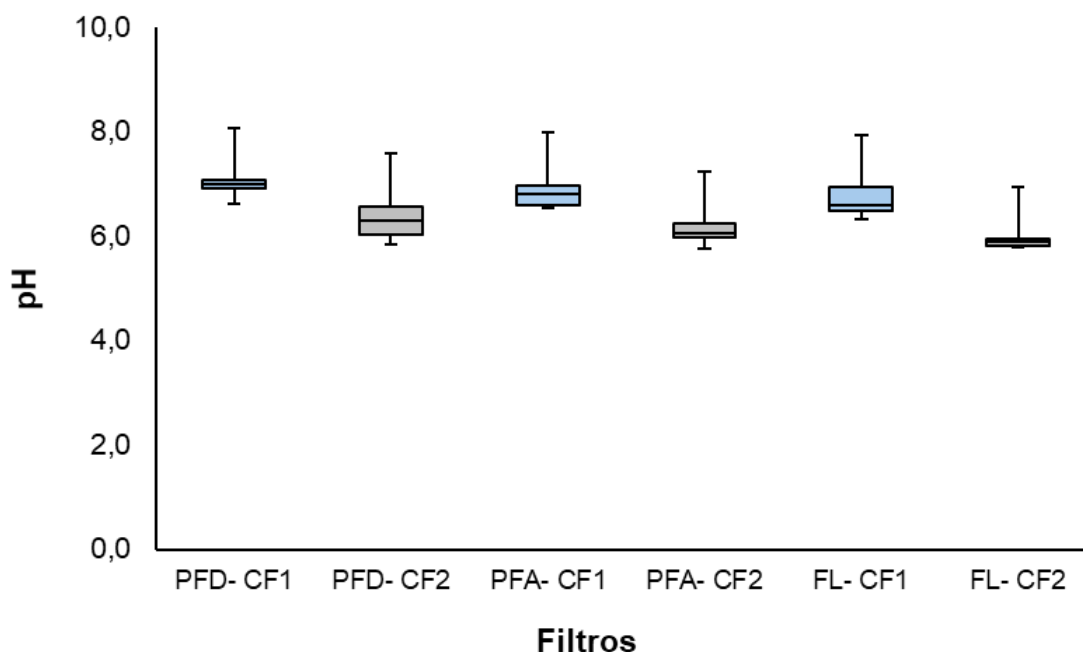
FONTE: O Autor (2025).

Com o p-valor de 0,1634 do Fator Tratamento, mostra que não há diferença significativa na condutividade elétrica média entre os três tipos de filtros. Para o p-valor (0,3611) do Fator Bloco, a condutividade elétrica também não varia significativamente ao longo do tempo. Desse modo, o teste de Tukey indica que não há diferença significativa entre nenhum par de filtros.

4.3.3.3 pH

A Figura 25 apresenta os resultados do parâmetro pH, coletados durante a primeira e segunda carreira de filtração de operação do sistema FiME.

Figura 25- Resultados do parâmetro pH obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

Observando os valores do parâmetro pH na Figura 25, estes apresentaram pequenas diferenças entre cada tipo de filtros, indicando uma boa estabilidade do pH ao longo da filtração. Também não observou diferença entre a primeira e segunda carreira de filtração.

Os valores de pH variaram entre 6 e 7,5, respeitando ao exigido na Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021).

As Tabelas 14 e 15, trazem os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para o parâmetro pH em relação a cada carreira de filtração ao longo do tempo de tratamento.

Tabela 14- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro pH em relação a primeira carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	0,1693	0,0847	1,7679	0,2313
Bloco	4	0,8411	0,2103	4,3907	0,036
Resíduo	8	0,3831	0,0479	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	6,972	0,2404	0,0979	6,61	7,27	a
PFA	6,852	0,3381	0,0979	6,53	7,37	a
FL	6,712	0,366	0,0979	6,32	7,23	a

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PDF - PFA	0,12	0,6747
PFD - FL	0,26	0,2067
PFA - FL	0,14	0,5908

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

Conforme a Tabela 14, o p-valor do Fator Tratamento é 0,2313, indicando que não há diferença significativa entre as médias de pH dos diferentes tipos de filtros (PFD, PFA e FL). Por outro lado, o p-valor do Fator Bloco é inferior a 0,05, evidenciando que as médias de pH variam significativamente ao longo do tempo na primeira carreira de filtração. Além disso, o teste de Tukey confirmou a ausência de diferenças significativas entre os filtros.

Tabela 15- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro pH em relação a segunda carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	0,3423	0,1711	5,4438	0,0322
Bloco	4	0,4876	0,1219	3,8775	0,0488
Resíduo	8	0,2515	0,0314	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	6,264	0,3341	0,0793	5,84	6,6	a
PFA	6,08	0,2463	0,0793	5,76	6,4	ab
FL	5,894	0,1117	0,0793	5,78	6,06	b

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - PFA	0,184	0,2846
PFD - FL	0,37	0,0263
PFA - FL	0,186	0,278

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

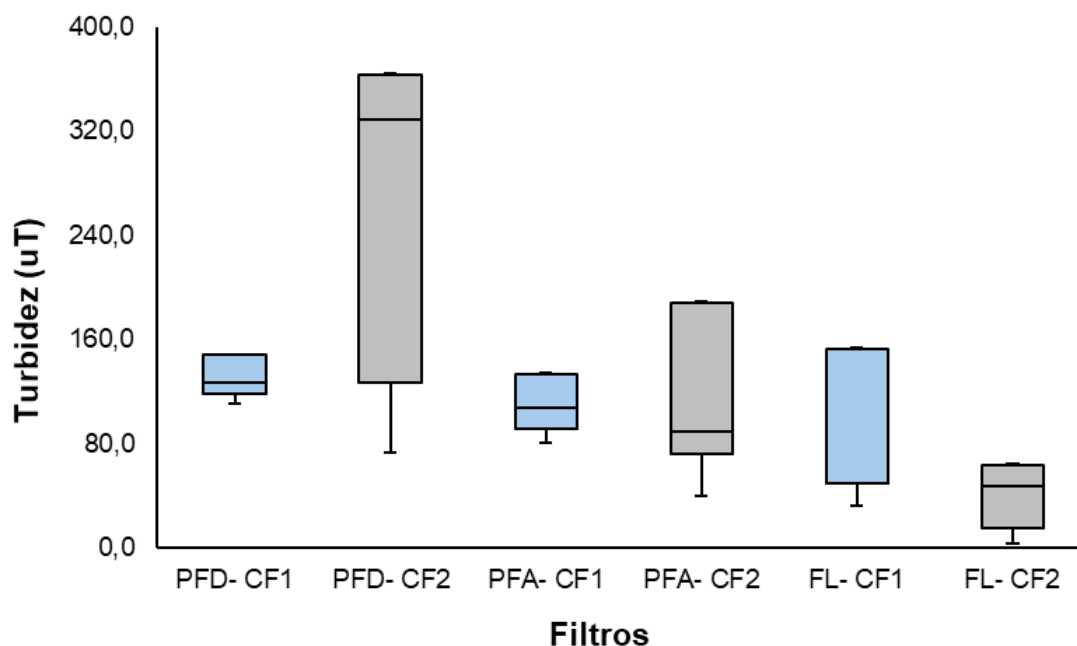
Os resultados do p-valor para Tratamentos e Bloco são inferiores a 0,05, significando que existe diferença significativa na média do pH da água tratada entre os diferentes tipos de filtros e ao longo do tempo da segunda carreira de filtração.

O teste de Tukey mostrou que o filtro PFD apresentou o maior valor de pH médio, diferindo significamente do filtro FL. E PFA não possui diferença dos filtros PFD e FL.

4.3.3.4 Turbidez

A Figura 26 traz os resultados do parâmetro Turbidez (uT), coletados durante a primeira e segunda carreira de filtração de operação do sistema FiME.

Figura 26- Resultados do parâmetro Turbidez obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

Analisando a Figura 26 com os dados de turbidez, observa-se que existem variações significativas na eficiência dos diferentes filtros e ao longo do tempo de filtração, sendo a carreira de filtração 2 que apresentou as variações mais evidentes. Entre os filtros, o FL se destacou com os menores valores de turbidez, indicando a eficiência do sistema em reduzir este parâmetro.

Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para o parâmetro Turbidez em relação a cada carreira de filtração ao longo do tempo de tratamento são apresentados nas Tabelas abaixo.

Tabela 16- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro turbidez em relação a primeira carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	4076,649	2038,3247	3,1804	0,0963
Bloco	4	17979,269	4494,8173	7,0133	0,0100
Resíduo	8	5127,171	640,8963	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	132,2	19,6392	11,3216	111	157	a
PFA	114,78	31,9414	11,3216	81,3	160	a
FL	91,94	66,111	11,3216	32,9	174	a

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - PFA	17,42	0,5471
PFD - FL	40,26	0,0828
PFA - FL	22,84	0,3733

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

O p-valor de 0,0963 para o Fator Tratamentos mostra que não há diferença significativa entre as médias de turbidez para os filtros, assim não rejeita a hipótese nula. Para o Fator Bloco, o p-valor foi de 0,0100, então o bloco tem um efeito significativo na turbidez, sugerindo que a turbidez varia ao longo do tempo do experimento.

Os testes de comparação múltipla (Tukey) também não indicam diferenças significativas entre os tratamentos PFD, PFA e FL. Demonstrando que, para a primeira carreira de filtração, os três filtros apresentam um desempenho similar em termos de remoção de turbidez.

Tabela 17- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro turbidez em relação a segunda carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	102976,83	51488,416	15,6063	0,0017
Bloco	4	84591,07	21147,767	6,4099	0,0129
Resíduo	8	26393,72	3299,215	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	252,68	141,3609	25,6874	73,4	371	a
PFA	116,22	69,21290	25,6874	40,3	191	b
FL	54,346	54,524	25,6874	4,03	142	b

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - PFA	136,460	0,0137
PFD - FL	198,334	0,0015
PFA - FL	61,874	0,262

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

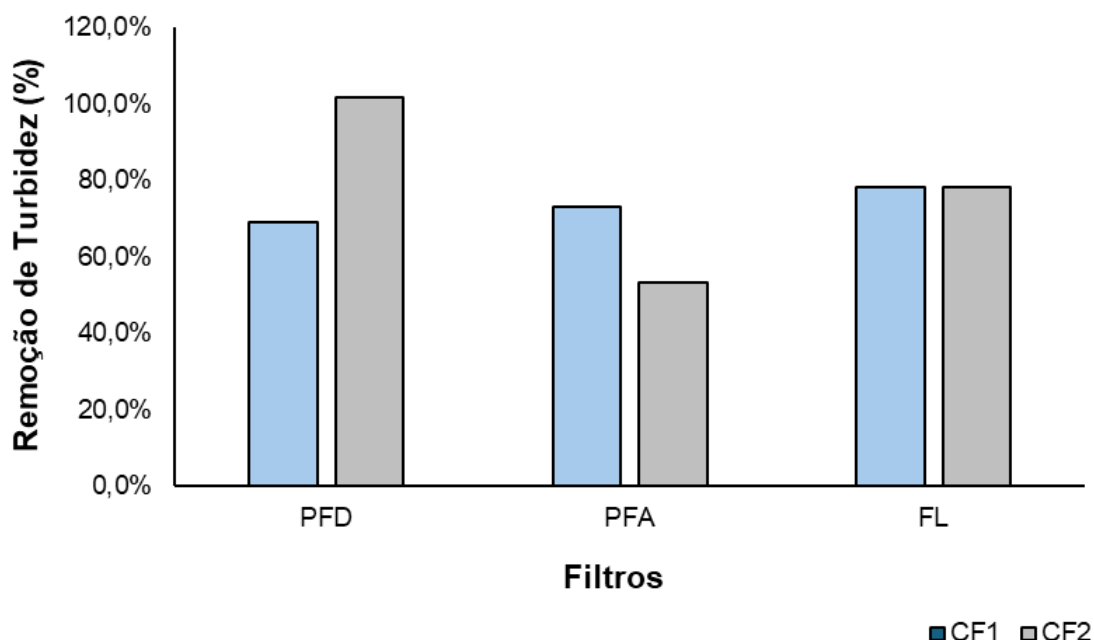
FONTE: O Autor (2025).

Observando a Tabela 17, o p-valor do Fator Tratamentos é 0,0017, sendo menor que o nível de significância 0,05, então rejeita a hipótese nula. Os resultados da estatística mostram que existe uma diferença significativa entre as médias de turbidez dos diferentes tratamentos na segunda carreira de filtração. O p-valor do Fator Bloco é 0,0129, também menor que 0,05, indicando que o bloco tem um efeito significativo na turbidez. Como na primeira carreira, a turbidez varia ao longo do tempo de filtração.

No teste de Tukey, o tratamento PFD apresentou a maior média de turbidez, diferindo significativamente dos tratamentos PFA e FL. Os resultados do Teste de Comparação Múltipla indicam que o filtro lento (FL) foi o mais eficiente na remoção da turbidez durante a segunda carreira de filtração, em comparação com os outros dois tratamentos.

Para melhor compreensão dos resultados de remoção de Turbidez, a Figura 27 traz os resultados em porcentagem.

Figura 27- Resultados de remoção de Turbidez da primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

A Figura 27 mostra que, entre os três filtros, o filtro lento (FL) apresentou os melhores resultados, atribuídos às suas características que favorecem a retenção de partículas, mesmo após um longo período de operação. Por outro lado, na segunda carreira de filtração, o filtro PFD teve um aumento de turbidez da água sintética, como evidenciado na Figura 26. Esse efeito pode ser atribuído às altas concentrações de matéria orgânica presentes na solução coagulante de *Moringa oleifera* (Vizibelli, 2021).

De modo geral, os resultados indicam que a *Moringa oleifera*, utilizada como coagulante orgânico, demonstrou ser eficaz na remoção de turbidez em todos os filtros (PFD, PFA e FL) e em ambas as carreiras de filtração. A eficiência foi evidenciada pelas porcentagens de remoção de turbidez, que variaram entre 50% e 80%.

Segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021), o valor máximo permitido (VMP) da turbidez para a água pós Filtração Lenta é de 1,0 uT em 95% das amostras e 2,0 uT no restante das amostras mensais coletadas. No entanto, ao

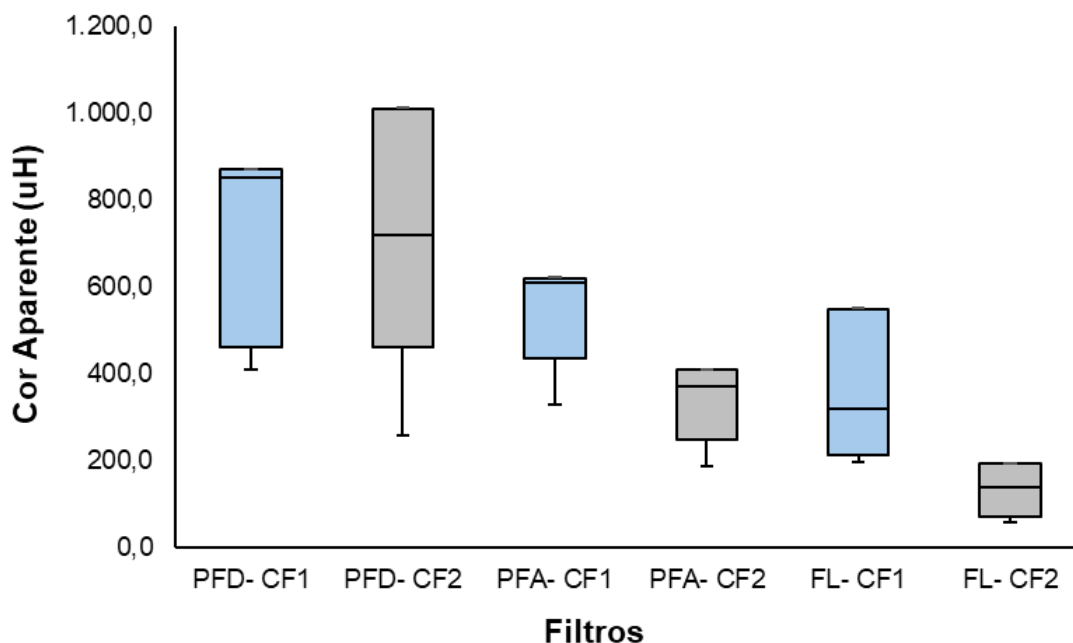
comparar os resultados obtidos com os limites estabelecidos pela legislação, os valores não foram atendidos, apesar da alta eficiência na remoção de turbidez.

Franco (2010) em seu trabalho avaliou a eficiência de diferentes dosagens do coagulante natural *Moringa oleífera* em cada etapa do sistema de Filtração em Múltiplas Etapas, no tratamento de água. As dosagens aplicadas do coagulante natural foram 131 mg.L^{-1} na etapa da pré-filtração, 106 mg.L^{-1} e 53 mg.L^{-1} na estapa de filtração lenta. A etapa da pré-filtração, alcançou uma média de turbidez de 11 NTU. Na filtração lenta o valor foi de 1,15 NTU para a dosagem de 106 mg.L^{-1} e de 5 NTU para a dosagem de 53 mg.L^{-1} da solução coagulante. A autora concluiu que o emprego do coagulante a base *Moringa oleífera* melhorou a eficiência do sistema de Filtração em Múltiplas Etapas para o tratamento de água.

4.3.3.5 Cor Aparente

Na Figura 28 são apresentados os resultados do parâmetro Cor Aparente (uH), coletados durante a primeira e segunda carreira de filtração de operação do sistema FiME.

Figura 28- Resultados do parâmetro Cor Aparente obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

A Figura 28 mostra que, existem variações significativas na eficiência de cada filtro e ao longo das carreiras de filtração. Além disso, observa-se uma diminuição gradual na cor aparente ao longo das etapas, indicando que o FiME é eficaz na redução da cor da água sintética.

Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para o parâmetro Cor Aparente em relação a cada carreira de filtração ao longo do tempo de tratamento são apresentados nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro cor aparente em relação a primeira carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrada Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	1437511	718755,3	1,6175	0,2571
Bloco	4	1373351	343337,7	0,7727	0,5725
Resíduo	8	3554839	444354,9	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	1117,8	1073,6499	298,1124	409	3000	a
PFA	555,2	175,1148	298,1124	330	780	a
FL	396,2	220,586	298,1124	197	700	a

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - PFA	562,6	0,4168
PFD - FL	721,6	0,2591
PFA - FL	159	0,9253

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

Analisando a Tabela 18, o Fator Tratamentos obteve um p-valor de 0,2571, assim não se pode rejeitar a hipótese nula. Em outras palavras, não há diferença significativa entre as médias de cor aparente dos diferentes tratamentos (PFD, PFA e FL) na primeira carreira de filtração. O p-valor do fator Bloco é de 0,5725, então o bloco não teve efeito sobre a cor aparente. O teste de Tukey não indicou diferenças significativas entre os tratamentos, corroborando com a ANOVA. Os filtros PFD, PFA

e FL apresentaram uma eficiência similar na remoção de cor na primeira carreira de filtração.

Tabela 19- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro cor aparente em relação a segunda carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	990584,9	495292,47	9,2658	0,0083
Bloco	4	1176945,6	294236,4	5,5045	0,0198
Resíduo	8	427628,4	53453,55	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	782	472,144	103,3959	260	1460	a
PFA	483,4	410,5153	103,3959	187	1200	ab
FL	152,8	98,4921	103,3959	58	300	b

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - PFA	298,6	0,1642
PFD - FL	629,2	0,0065
PFA - FL	330,6	0,1199

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

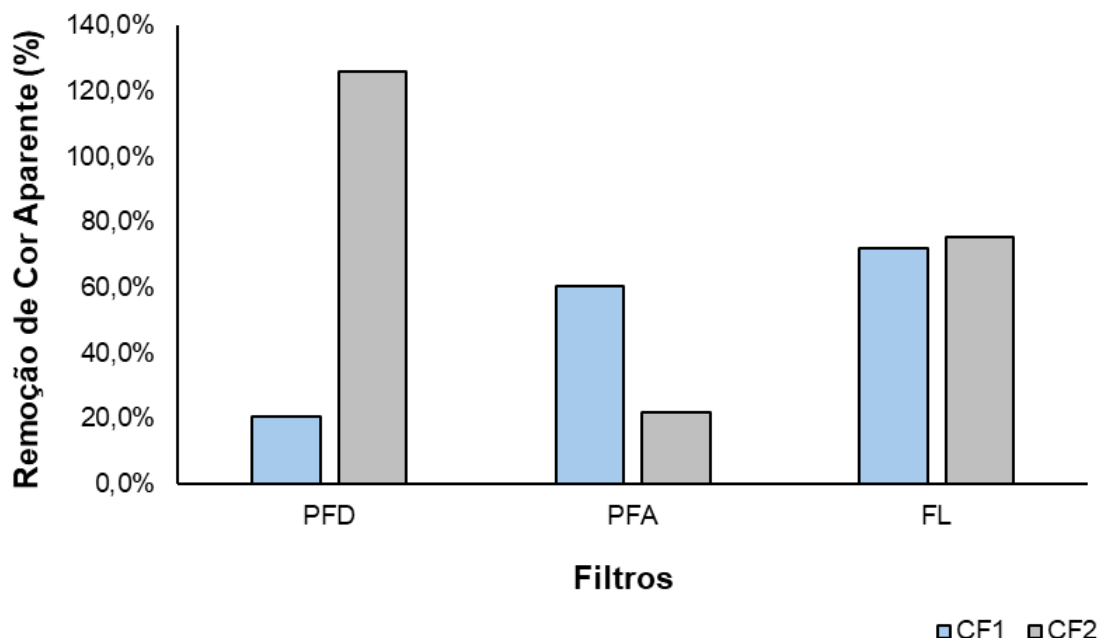
FONTE: O Autor (2025).

Na Tabela 19, verifica-se que o p-valor dos Fatores Tratamentos e Bloco são 0,0083 e 0,0198, respectivamente, menor que o nível de significância de 0,05, portanto rejeita-se a hipótese nula de que todas as médias são iguais. Desse modo, há diferença significativa entre as médias de cor aparente dos diferentes tratamentos (PFD, PFA e FL) e o bloco tem efeito sobre a cor aparente, ou seja, a cor varia ao longo do tempo na segunda carreira de filtração.

O teste de Tukey mostrou que, o tratamento PFD possui a maior média de cor aparente e difere significativamente do tratamento FL. PFA tem uma média intermediária e não difere significativamente de PFD e FL. O Teste de Comparação de Médias indica que FL foi mais eficiente em remover a cor aparente.

A Figura 29 contém os resultados de remoção de Cor Aparente em porcentagem.

Figura 29- Resultados de remoção de Cor Aparente da primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

O filtro PFD apresentou a menor eficiência na remoção da cor aparente em ambas as carreiras de filtração. O filtro PFA demonstrou um desempenho intermediário, enquanto o filtro lento (FL) destacou-se com a maior eficiência na remoção da cor aparente nas duas carreiras.

Assim como no parâmetro turbidez, no PFD-CF2 houve um aumento da cor aparente, possivelmente devido à alta concentração de matéria orgânica presente na solução do coagulante à base de *Moringa oleífera*.

Os resultados indicam que a *Moringa oleífera* contribui significativamente para a remoção da cor aparente no sistema FiME. A eficiência de remoção variou entre 20% e 75%. Ressalta-se que os materiais que compõem cada filtro do sistema, também são essenciais na remoção dos parâmetros, devido as suas características, como o tipo de material, tamanho, a área superficial e altura do leito filtrante.

Conforme descrito na Tabela de Padrão Organoléptico de Potabilidade da Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021), o valor máximo permitido (VMP) para a

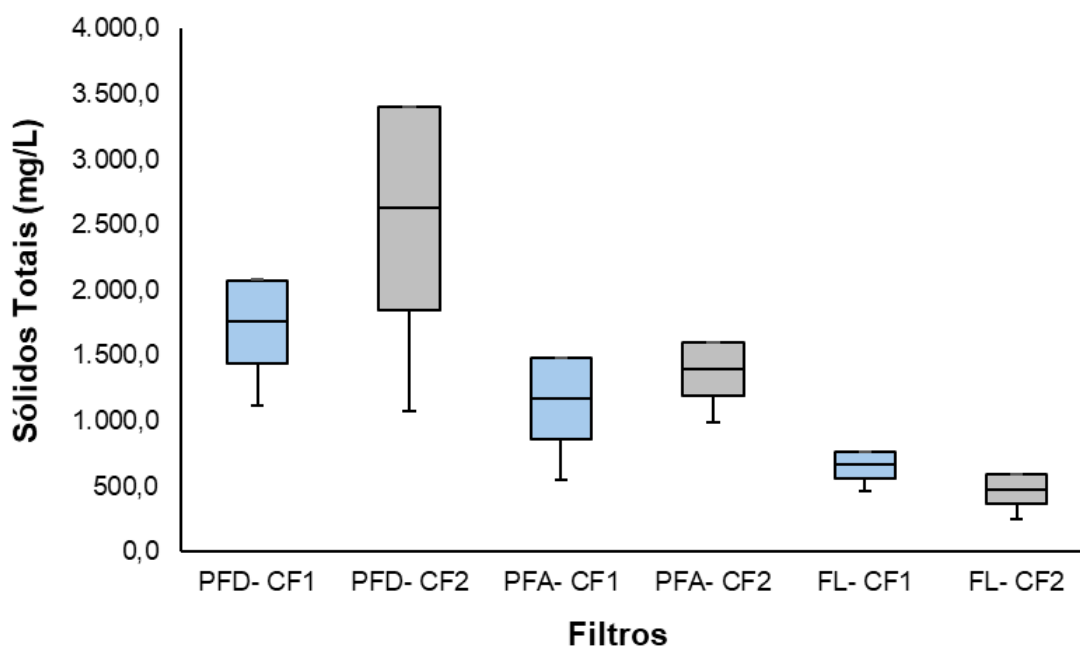
cor aparente é 15 uH, neste estudo todos os resultados de cor aparente foram superiores ao exigido na legislação.

Santos *et al.* (2023) construíram um sistema de filtração em múltiplas etapas (FiME) composto por três filtros (pré-filtro grosseiro, filtro lento e filtro de biomassa). No filtro de biomassa foi utilizado uma camada suporte de brita, torta de *Moringa oleífera* e bucha vegetal. Os resultados mostraram que, houve uma redução de 46,62% da cor aparente da água filtrada. Sendo estes resultados próximos aos alcançados neste estudo.

4.3.3.6 Série de Sólidos

Na Figura 30 são apresentados os resultados do parâmetro Série de Sólidos (mg.L^{-1}), coletados durante a primeira e segunda carreira de filtração de operação do sistema FiME.

Figura 30- Resultados do parâmetro Sólidos Totais obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

A análise da Figura 30 evidencia uma redução nos sólidos totais ao longo do processo de filtração, indicando a eficiência do sistema na remoção de partículas

sólidos presentes na água. No entanto, no filtro PFD, houve um aumento na carga de sólidos, possivelmente atribuído à solução coagulante de *Moringa oleifera* (Vizibelli, 2021). Entre os filtros avaliados, o filtro lento (FL) apresentou os menores valores de sólidos totais, destacando-se como o mais eficiente nesse parâmetro.

Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para o parâmetro Sólidos Totais em relação a cada carreira de filtração ao longo do tempo de tratamento são apresentados nas Tabelas abaixo.

Tabela 20- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos totais em relação a primeira carreira de filtração.

	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	1203091	601545,5	4,9859	0,1671
Bloco	1	1431794	1431793,5	11,8674	0,0749
Resíduo	2	241299	120649,5	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	1759	900,854	245,611	1122	2396	a
PFA	1173,5	881,7622	245,611	1797	1797	a
FL	663	289,9138	245,611	868	868	a

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - PFA	585,5	0,3907
PFD - FL	1096	0,1549
PFA - FL	510,5	0,4574

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

O p-valor para os Fatores Tratamentos e Bloco são maiores que o nível de significância convencional de 0,05. Assim, não existe uma diferença significativa entre as médias de sólidos totais dos filtros e o tempo de funcionamento do FiME não teve efeito sobre a concentração de sólidos totais. O teste de Tukey não indica diferenças significativas entre os tratamentos, confirmando a ANOVA.

Tabela 21- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos totais em relação a segunda carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	4656580	2328290	2,2528	0,3074
Bloco	1	3211651	3211651	3,1075	0,2200
Resíduo	2	2067037	1033519	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	2628,875	2199,2789	718,8597	1073,75	4184	a
PFA	1398,875	580,0043	718,8597	988,75	1809	a
FL	478,375	324,7388	718,8597	248,75	708	a

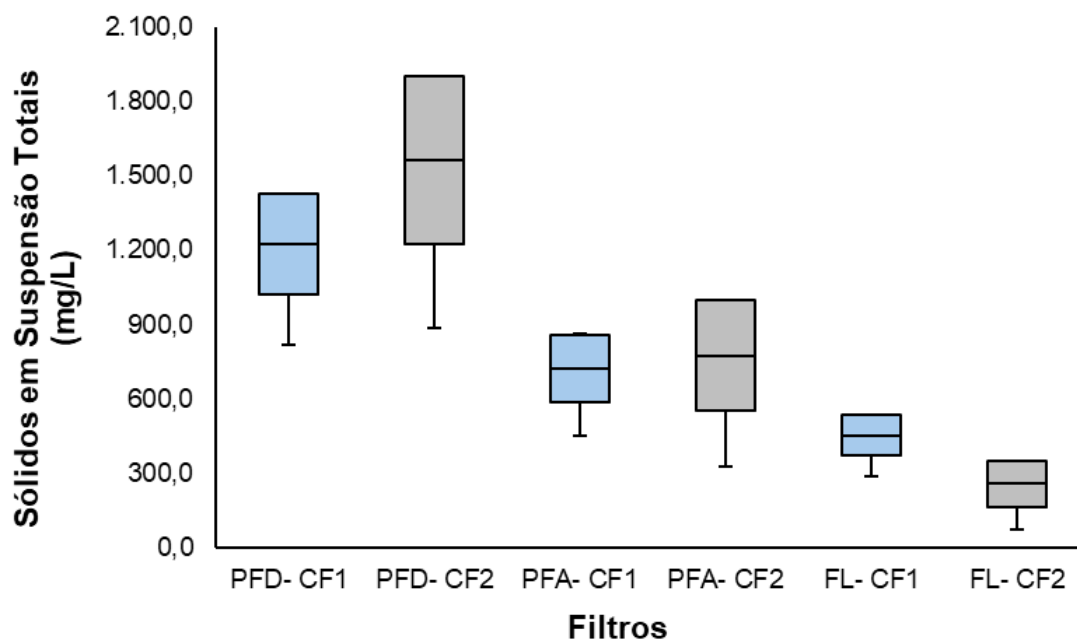
Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - PFA	1230	0,5542
PFD - FL	2150,5	0,2895
PFA - FL	920,5	0,6892

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

Para a carreira de filtração 2, também não houve diferença significativa entre as médias de sólidos totais dos filtros e o bloco não teve efeito sobre a concentração de sólidos totais. Desse modo, os filtros (PFD, PFA e FL) apresentaram uma eficiência similar na remoção de sólidos totais nas duas carreiras de filtração.

Figura 31- Resultados do parâmetro Sólidos em Suspensão Totais obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

A Figura 31 mostra uma diminuição nos sólidos totais ao longo do processo de filtração. No PFD houve um aumento na quantidade de sólidos, possivelmente devido à solução coagulante de *Moringa oleífera*. Dentre os filtros analisados, o FL obteve os menores níveis de sólidos totais, demonstrando ser o mais eficiente.

Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para o parâmetro Sólidos em Suspensão Totais em relação a cada carreira de filtração ao longo do tempo de tratamento são apresentados nas Tabelas abaixo.

Tabela 22- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos suspensos totais em relação a primeira carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	609994,3	304997,2	10,2505	0,0889
Bloco	1	473766	473766	15,9225	0,0574
Resíduo	2	59509	29754,5	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	1225	575,5849	121,9723	818	1632	a
PFA	724,5	385,3732	121,9723	452	997	a
FL	455,5	231,2239	121,9723	292	619	a

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - PFA	500,5	0,1781
PFD - FL	769,5	0,0840
PFA - FL	269	0,4282

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

Conforme a Tabela 22, o p-valor do Fator Tratamentos é 0,0889, indicando que não há diferença significativa entre as médias de sólidos em suspensão totais nos diferentes tratamentos (PFD, PFA e FL). O Fator Bloco também não apresentou efeito sobre a concentração de sólidos em suspensão totais, com um p-valor de 0,0574. Além disso, o teste de Tukey não identificou diferenças estatisticamente significativas entre os pares de tratamentos. Apesar disso, o tratamento PFD apresentou uma concentração maior de sólidos em suspensão, porém essa diferença não foi estatisticamente relevante.

Tabela 23- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos suspensos totais em relação a segunda carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	1722728,1	861364,1	7,1087	0,1233
Bloco	1	1130570	1130570	9,3304	0,0925
Resíduo	2	242340,6	121170,3	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	1561,75	953,5335	246,1405	887,5	2236	a
PFA	774,375	630,2089	246,1405	328,75	1220	a
FL	258,625	257,9172	246,1405	76,25	441	a

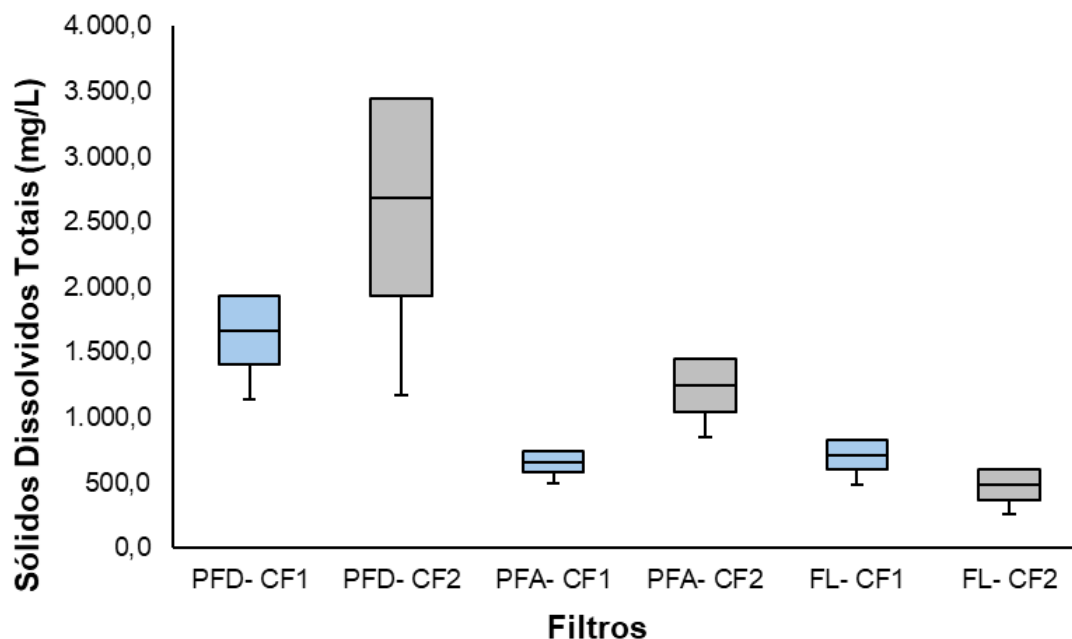
Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - PFA	787,375	0,2628
PFD - FL	1303,125	0,1152
PFA - FL	515,75	0,4534

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

A análise de variância (ANOVA) para o parâmetro sólidos em suspensão totais revelou que os filtros (PFD, PFA e FL) exibiram eficiências semelhantes nas duas carreiras de filtração. Isso é corroborado pelos p-valores dos Fatores Tratamentos e Bloco, ambos superiores a 0,05. O teste de Tukey reforçou esses resultados, não identificando diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos tratamentos.

Figura 32- Resultados do parâmetro Sólidos Dissolvidos Totais obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

Na Figura 32, observa-se que houve uma redução nos sólidos dissolvidos totais ao longo do processo de filtração, indicando que o sistema está removendo parte das substâncias dissolvidas presentes na água sintética. O filtro FL apresentou uma maior capacidade de remoção de sólidos dissolvidos totais.

Os resultados da Análise de Variância (ANOVA) para o parâmetro Sólidos Dissolvidos Totais em relação a cada carreira de filtração ao longo do tempo de tratamento são apresentados nas Tabelas abaixo.

Tabela 24- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos dissolvidos totais em relação a primeira carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)					
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F
Tratamentos	2	1284742,2	642371,09	8,7148	0,1029
Bloco	1	561204,2	561204,17	7,6136	0,1101
Resíduo	2	147421,4	73710,69	-	-

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	1668,335	740,1075	191,9775	1145	2191,67	a
FL	715,835	331,1593	191,9775	481,67	950	a
PFA	660	226,2742	191,9775	500	820	a

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - FL	952,5	0,1292
PFD - PFA	1008,335	0,1169
FL - PFA	55,835	0,9772

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

Ao analisar a Tabela 24, observa-se que os p-valores dos Fatores Tratamentos e Bloco são superiores a 0,05. Esses resultados indicam que não há diferença entre as médias dos tratamentos, e que o bloco não exerce influência significativa sobre a concentração de sólidos dissolvidos totais. O teste de Tukey corroborou essa análise, não identificando diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos tratamentos.

Tabela 25- Análise de Variância (ANOVA) do parâmetro sólidos dissolvidos totais em relação a segunda carreira de filtração.

Análise de Variância (ANOVA)						
	Grau de liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F	p>F	
Tratamentos	2	4994083	2497041,3	2,586	0,2789	
Bloco	1	3085265	3085265,4	3,1952	0,2158	
Resíduo	2	1931172	965586,1	-	-	

Média Ajustada						
Tratamento	Média Ajustada	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo	Tukey
PFD	2689,795	2140,4759	694,8331	1176,25	4203,34	a
PFA	1248,96	569,5179	694,8331	846,25	1651,67	a
FL	490	332,3402	694,8331	255	725	a

Teste de Comparação Múltipla		
Pares	Contraste	p(Tukey)
PFD - PFA	1440,835	0,4586
PFD - FL	2199,795	0,2668
PFA - FL	758,96	0,7529

NOTA: PFD- Pré-filtro Dinâmico; PFA- Pré-filtro Pedregulho; FL- Filtro Lento.

FONTE: O Autor (2025).

Para a segunda carreira de filtração, os p-valores dos Fatores Tratamentos e Bloco também foram superiores que 0,05. O teste de Tukey não encontrou diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos tratamentos.

Os resultados da ANOVA para a série de sólidos indicam que o filtro PFD apresentou as maiores médias, seguido pelo PFA e, por último, pelo FL. Dessa forma, o filtro lento (FL) destacou-se como o mais eficiente na remoção dos sólidos.

A Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021) traz somente o valor máximo permitido dos sólidos dissolvidos totais, sendo 500 mg.L⁻¹, analisando os resultados este parâmetro não atendeu a legislação.

Vizibelli (2021) em seu trabalho avaliou o sistema de Filtração de Múltiplas Etapas (FiME) para o tratamento de água de abastecimento. O sistema operou em três etapas, sendo o não uso de coagulantes (C1) e o uso de coagulantes como o Sulfato de Alumínio (C2) e a semente de *Moringa oleifera* (C3). Para os resultados de série de sólidos, o autor alcançou uma eficiência de remoção de sólidos totais em C1 e C2 superior a 70%, porém em C3 o coagulante *Moringa oleifera* aumentou a carga

de sólidos. Para os sólidos dissolvidos totais a eficiência de remoção não foi relevante, e a eficiência de remoção de sólidos suspensos totais foi superior a 95%.

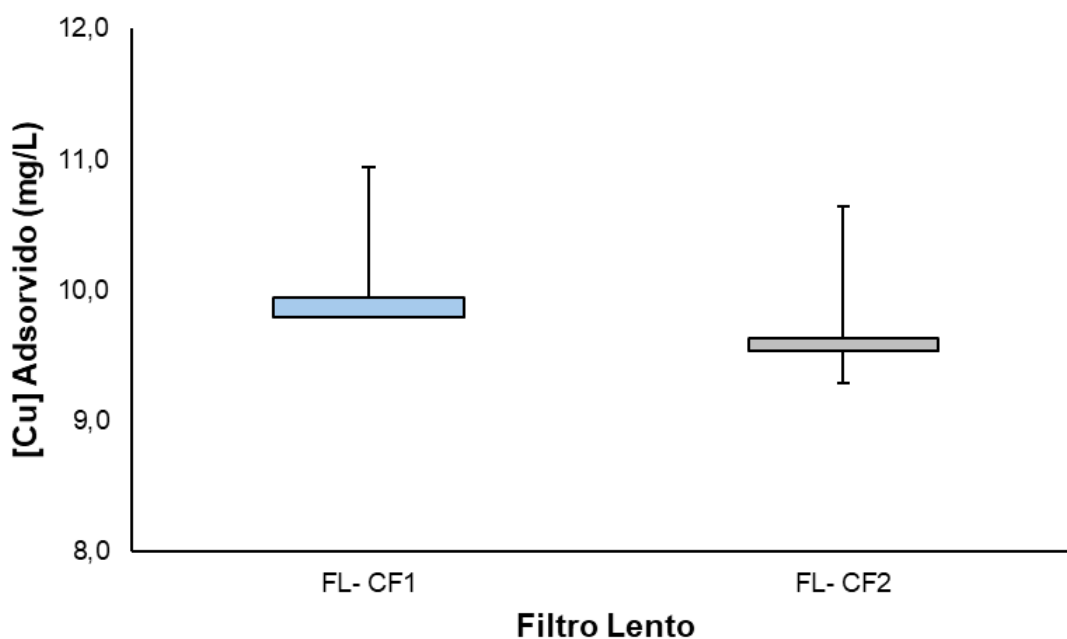
Franco (2010) utilizou a *Moringa oleifera* como coagulante no sistema de Filtração em Múltiplas Etapa para o tratamento de água. A mesma também verificou que a *Moringa oleifera* aumentou os sólidos na água, reduzindo a duração da carreira de filtração.

Sendo assim, outras pesquisas encontraram resultados semelhantes aos obtidos neste estudo.

4.3.3.7 Metais Pesados

A Figura 33 apresenta os resultados do Cobre Adsorvido (mg.L^{-1}), coletados durante a primeira e segunda carreira de filtração de operação do sistema FiME.

Figura 33- Resultados do parâmetro Cobre obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

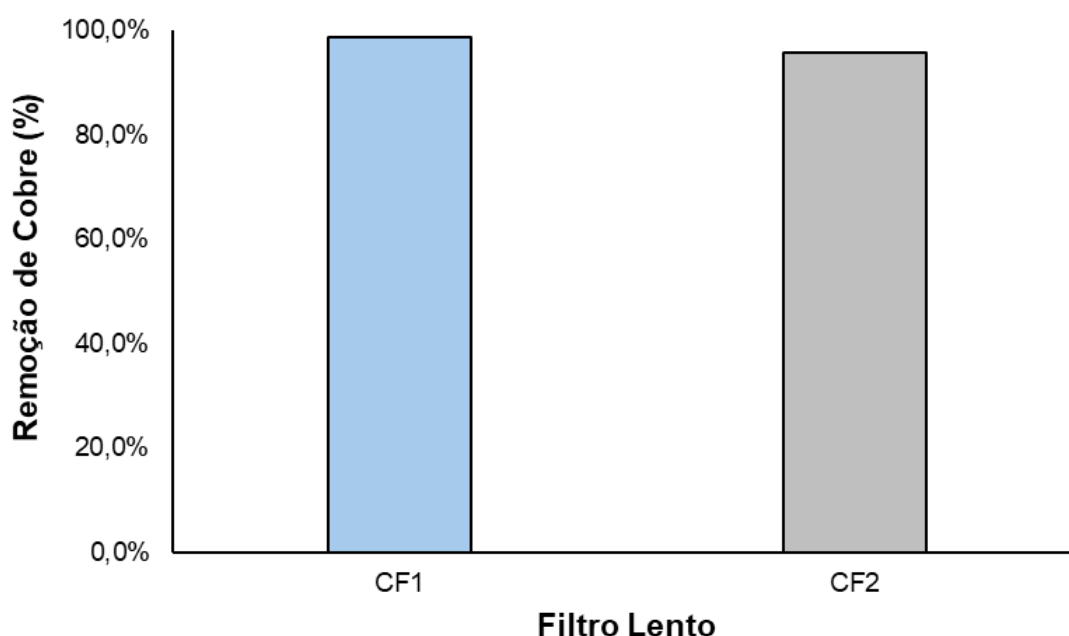
A Figura 33 mostra que a quantidade de Cobre adsorvido apresentou pouca variação e foi semelhante na primeira e segunda carreira de filtração. Esses resultados sugerem que, no filtro lento, a adsorção atingiu o equilíbrio de forma rápida, ocorrendo nos primeiros minutos. Após esse período, pequenas variações no tempo

de contato não resultaram em alterações significativas na quantidade de Cobre adsorvido. Esses resultados estão em concordância com os obtidos no ensaio de adsorção de Cobre, descrito no tópico 1.2.1.

Devido à ausência de variabilidade significativa entre os dados, não foi possível aplicar a Análise de Variância (ANOVA), pois este teste estatístico requer diferenças entre os grupos para avaliar a significância. Essa uniformidade nos valores sugere que a adsorção atingiu o equilíbrio rapidamente e permaneceu estável ao longo do tempo avaliado, o que pode explicar a falta de variação nos resultados.

Na Figura 34 são apresentados os resultados de remoção de Cobre.

Figura 34- Resultados de remoção de Cobre da primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

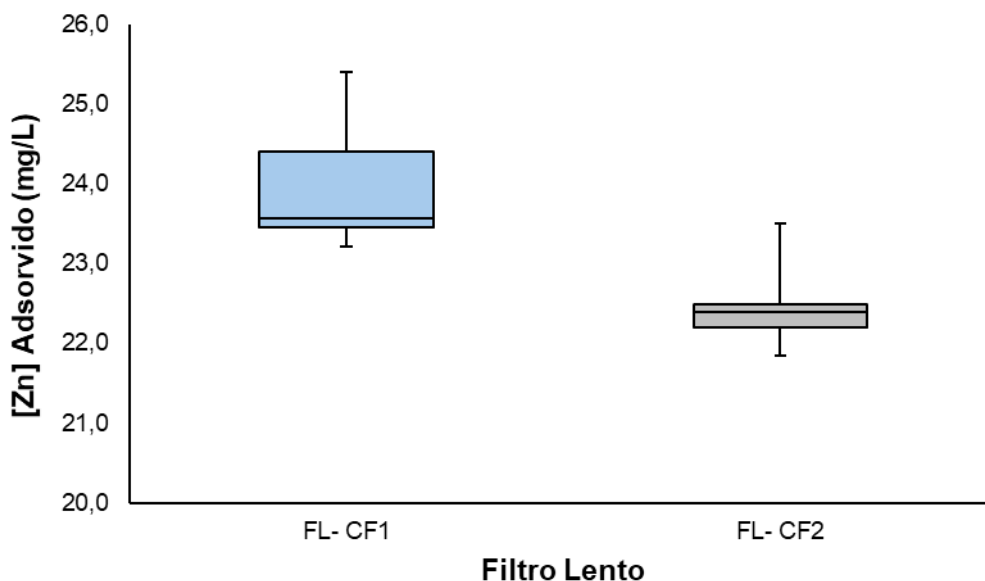
Tanto na primeira quanto na segunda carreira, o filtro lento apresentou uma alta eficiência na remoção de Cobre, com valores superiores a 95%. Isso indica que o carvão ativado de fibra de coco foi um material adsorvente eficaz para a remoção deste metal pesado da água sintética.

A média de cobre remanescente na água sintética foi de $0,131 \text{ mg.L}^{-1}$ na primeira carreira de filtração e $0,432 \text{ mg.L}^{-1}$ na segunda. Quando comparados aos limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021), que define o valor máximo permitido (VMP) de cobre em água potável como $2,0 \text{ mg.L}^{-1}$, os dados

indicam que as concentrações finais de cobre na água sintética estão em conformidade com a legislação vigente.

Na Figura 35 são apresentados os resultados do Zinco Adsorvido (mg.L^{-1}), coletados durante a primeira e segunda carreira de filtração de operação do sistema FiME.

Figura 35- Resultados do parâmetro Zinco obtidos na primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



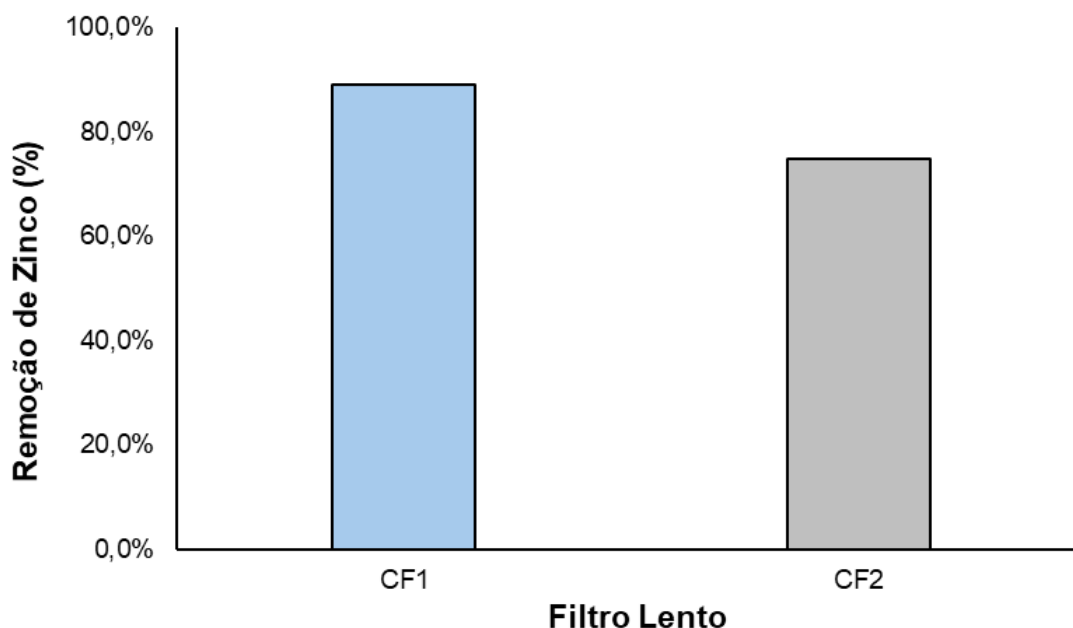
NOTA: FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

Na Figura 35 verifica-se que, a quantidade de Zinco adsorvido apresentou pouca variação para cada carreira de filtração. A concentração de Zinco adsorvido na segunda carreira (FL-CF2) é menor do que na primeira carreira (FL-CF1), indicando uma possível saturação do material adsorvente, pois com o tempo vai diminuindo a disponibilidade de sítios do material adsorvente para novas ligações.

Para o Zinco não foi possível aplicar a Análise de Variância (ANOVA), pela ausência de variabilidade significativa entre os dados. Também sugerindo que a adsorção atingiu o equilíbrio rapidamente e permaneceu estável ao longo do tempo de filtração.

Figura 36- Resultados de remoção de Zinco da primeira e segunda carreira de filtração durante o funcionamento do sistema FiME.



NOTA: FL- Filtro Lento; CF1- Carreira de Filtração 1; CF2- Carreira de Filtração 2.

FONTE: O Autor (2025).

Analisando a Figura 36, referente a remoção do Zinco, o filtro lento apresentou uma alta eficiência nas duas carreiras de filtração, onde os valores foram superiores a 70%. Isso indica que o carvão ativado de fibra de coco foi um material adsorvente eficaz para a remoção deste metal pesado da água sintética.

A Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021), traz o valor máximo permitido (VMP) de Zinco em água potável como $5,0 \text{ mg.L}^{-1}$. A média de Zinco remanescente na água sintética foi de $1,089 \text{ mg.L}^{-1}$ na primeira carreira de filtração e $2,531 \text{ mg.L}^{-1}$ na segunda, sendo assim as concentrações finais de Zinco estão em acordo com a legislação vigente.

Teixeira (2020) em seu estudo, produziu carvão ativo a partir da casca de coco da Bahia (*Coccus nucifera*) e avaliou sua atividade adsorativa para remoção do corante azul de metileno em água. Em até 30 minutos de contato com o carvão, mais de 50% do corante foi adsorvido, e após 180 minutos a remoção foi de 99,9%. Conclui-se que, o carvão ativado produzido atendeu os objetivos propostos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ativação química da fibra de coco com ácido fosfórico, seguida de sua conversão em carvão ativado, resultou em um aumento significativo na capacidade de adsorção do material. O carvão ativado produzido neste estudo apresentou uma superfície heterogênea e porosa, além de maior área superficial e volume de poros. A caracterização química revelou que o adsorvente é um material de natureza lignocelulósica, com alterações em sua estrutura provocada pelo tratamento ácido.

Os testes de adsorção dos metais pesados no carvão ativado obtiveram resultados satisfatórios.

O sistema FiME construído neste estudo alcançou bons resultados. Porém como não houve a etapa de desinfecção, não foi possível a avaliação de adequabilidade para o consumo humano.

A aplicação do coagulante orgânico extraído das sementes de *Moringa oleifera* mostrou-se eficaz na remoção de turbidez e cor aparente em todos os filtros (PFD, PFA e FL) e em ambas as carreiras de filtração. E ao comparar a eficiência dos três filtros, o FL demonstrou ser o mais eficiente.

Portanto, os resultados deste estudo estão alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), que busca garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água para todos. Além disso, a utilização de materiais naturais e de baixo custo contribui para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsável), ao promover práticas ambientais corretas e reduzir a dependência de produtos químicos sintéticos. A relevância deste estudo também se relaciona com o ODS 3 (Saúde e Bem-estar), uma vez que a melhoria da qualidade da água impacta diretamente a redução de contaminação e doenças de veiculação hídrica, contribuindo para a saúde pública e o bem-estar da população.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a realização de uma curva de ruptura e um estudo de cinética de adsorção no carvão ativado, a fim de avaliar com maior precisão sua capacidade adsorvente.

Embora a solução de coagulante orgânico extraído das sementes de *Moringa oleifera* tenha apresentado bons resultados, é necessário investigar novos métodos de preparo e aplicação para reduzir a presença de sólidos no sistema, e consequentemente aumentar sua eficiência no tratamento de água.

Além disso, sugere-se uma análise do sistema FiME quanto a eficiência na remoção de microorganismos, como cistos de *Giardia* spp., oocistos de *Cryptosporidium* spp., *Escherichia coli* e Coliformes totais, além de um tratamento completo com o sistema de desinfecção ao final do FiME.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **A ANA e o Saneamento Básico.** Disponível em:<<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/saneamento-basico/a-ana-e-o-saneamento>>. Acesso em: abril 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Usos da água.** Disponível em:<<https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/usos-da-agua#:~:text=No%20Brasil%2C%20a%20%C3%A1gua%20%C3%A9,e%20de%20qualidade%20das%20%C3%A1guas>>. Acesso em: abril 2023.

ALMEIDA, T. S.; LIMA, A. J. L.; SOUZA, L. A.; MICHELAN, D. C. G. S. MULTI-STAGE FILTRATION (FiME) MODIFIED BY UNCONVENTIONAL MATERIALS. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 9, n. 3, p. 170-190, 2021.

AMADO, S.; FILHO, J. T. C. Fitorremediação: uma alternativa sustentável para remediação de solos contaminados por metais pesados. **Natureza on line**, v.13, n. 4, p. 158-164. Jul 2015.

APHA. **Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater.** 23rd Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC, 2017.

ARANTES, C.; RIBEIRO, T. A. P.; PATERNIANI, J. E. S.; TATEOKA, M. S. S.; SILVA, G. K. E. Uso de coagulantes naturais à base de *Moringa oleifera* e Tanino como auxiliares da filtração em geotêxtil sintético não tecido. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 4, p. 780-788, ago, 2014.

ASSUNÇÃO, I. C. O.; BELO, I. C. B.; MUNIZ, A. C. M.; SOUZA, J. E. F. A ação de metais pesados no organismo e a presença do material em cosméticos do cotidiano. **Consciência: alunos (des)conectados, professores em conexão**, p. 1-6, nov, 2020.

AYACH, L. R.; GUIMARÃES, S. T.; CAPPI, N.; AYACH, C. Saúde, saneamento e percepção de riscos ambientais urbanos. **Caderno de Geografia**, v. 22, n. 37, p. 47-64, 2012.

BAZZO, F. P. **Análise multivariada de polímeros naturais de *Ceratonia siliqua* L. e *Moringa oleifera* lam como agentes coagulantes aplicados em tratamento de água destinada ao abastecimento.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão- PR, 2016.

BITTAR, D. B. **Determinação dos metais pesados Cd, Cu, Cr e Pb nas águas do Rio Uberabinha e proposta de adsorção por adsorventes naturais.** Dissertação (Mestrado) – Química. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia- MG, 2008.
BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes

ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília- DF, mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 393, de 8 de agosto de 2007**. Dispõe sobre o enquadramento de corpos d'água destinados à proteção das comunidades aquáticas. Brasília- DF, ago. 2007.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 397, de 3 de abril de 2008**. Altera os parâmetros e padrões de qualidade de água da Resolução CONAMA nº 357/2005. Brasília- DF, abr. 2008.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 410, de 4 de maio de 2009**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de sistemas de disposição final de efluentes líquidos. Brasília- DF, maio 2009.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições, parâmetros, padrões e diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos de água receptores e complementa a Resolução CONAMA nº 357/2005. Brasília- DF, maio 2011.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art, v. 21, 1997.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 2021.

BRITO, H. G. **Aplicação de diferentes estratégias de pré-tratamento para conversão da fibra de coco verde em etanol celulósico**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte- Engenharia Química, 2023.

CAMBUIM, K. B. **Carvão de endocarpo de coco da baía ativado quimicamente com H_3PO_4 e fisicamente com vapor d'água: produção, caracterização e aplicações**. Tese (Doutorado) – Química. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa- PB, 2009.

CAMPLESI, D. C. F.; PEREZ, W. E.; SIQUEIRA, E. Q. Removal of total coliforms and *Escherichia coli* using a multistage filtration (MSF) in periods of high turbidity of raw water. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 1, n.1, p. 14-18, 2010.

CARVALHO, L. T.; SAMPAIO, S. F. M. **Operações Unitárias III: Adsorção**. Universidade de São Paulo, 2023.

CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Cobre- 2022**. Disponível em: cefndmkaaj/https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Cobre.pdf>. Acesso em: abril 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIO. **Dia Mundial da Água**. Disponível em: <<https://www.cnm.org.br/comunicacao/noticias/dia-mundial-da-agua-80-da-agua-residual-do-mundo-sao-despejados-sem-tratamento-no-meio-ambiente>>. Acesso em: abril 2023.

DI BERNARDO, L; BRANDÃO, C. C. S.; HELLER, L. **Tratamento de Águas de Abastecimento por Filtração em Múltiplas Etapas**. ABES/ PROSAB. Rio de Janeiro, 1999.

DUARTE, R. P. S.; PASQUAL, A. Avaliação do cádmio (Cd), chumbo (Pb), níquel (Ni) e zinco (Zn) em solos, plantas e cabelos humanos. **Energia na Agricultura**, v. 15, n. 1, p. 46-58, 2000.

EOS. **As grandes dificuldades da distribuição da água no Brasil**. Disponível em: <<https://www.eosconsultores.com.br/dificuldades-distribuicao-da-agua-no-brasil/>>. Acesso em: abril 2023.

FERRAZ, L. L.; DOURADO, A. A.; RODRIGUES, A.; ROCHA, F. A. Análise da presença de metais pesados na água em diferentes reservatórios subterrâneos no município de Vitória da Conquista- BA. **Agrarian Academy, Centro Científico Conhecer**, v. 5, n. 9, p. 1-9, 2018

FERREIRA, B. N. **Adsorventes utilizados para o tratamento de águas subterrâneas: uma revisão**. 2021. 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Licenciatura em Química), Universidade Federal de Campina Grande. Cuité- PB, 2021.

FILHO, D. DE S. V. *et al.* Infraestrutura Urbana: Infraestrutura e o crescimento populacional no Brasil. **Cadernos de Graduação- Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 1, n. 16, p. 19–25, mar. 2013.

FRANCO, M. **Uso de coagulante extraído de sementes de *Moringa oleifera* como auxiliar no tratamento de água por filtração em múltiplas etapas**. Dissertação (Mestrado)- Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

FREITAS, B. L. S. **Filtros lentos em escala domiciliar como alternativa de tratamento de águas com risco microbiológico em comunidades isoladas**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2017.

FREITAS, F. B. A.; CÂMARA, M. Y. F.; MARTINS, D. F. F. **Determinação do PCZ de adsorventes naturais utilizados na remoção de contaminantes em soluções aquosas**. In: 5º Encontro Regional de Química & 4º Encontro Nacional de Química. Blucher Chemistry Proceedings, v. 3, n. 1, p. 610-618, 2015.

FREITAS, K. O.; ARAÚJO, G. M. **Uso de filtro simplificado com camada de fibra de coco no tratamento de águas cinzas provenientes de máquina de lavar visando o reuso**. Congresso ABES/ FENASAN, 2017.

FREITAS, S. S.; JÚNIOR, A. A. S. Remoção de corantes têxteis de meio aquoso por adsorção em fibra de coco. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 12, p. 80107-80126, 2022.

GOMES, H. M. A. **Aplicação das técnicas de processamento digital de imagens na caracterização de carvão ativado da biomassa do coco babaçu**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Materiais. Instituto do Piauí, Teresina-PI, 2019.

LIMA, A. DE J. **Análise comparativa da eficiência de filtros lentos com meios filtrantes convencional e não convencionais**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão-SE, 2020.

LIMA, E. R.; STIER, P. H. **Água potável e seus processos**. Uninter, 2022.

LIMA, P. R.; ALMEIDA, I. V. DE; VICENTINI, V. E. P. Os diferentes tipos de coagulantes naturais para o tratamento de água: uma revisão. **Evidência - Biociências, Saúde e Inovação**, v. 20, n. 1, p. 9–22, jul. 2020.

LIMA, R. N.; ABREU, F. O. M. S. Natural products used as coagulants and flocculants for public water supply: A review of benefits and potentialities. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 3, p. 709–735, 1 maio 2018.

MARQUES, Marcia. **Análise da cadeia causal da degradação dos recursos hídricos: Proposta de modelo conceitual do projeto GIWA UNEP/GEF**. Simpósio sobre Recursos Hídricos do Centro Oeste, v. 2, 2002.

MENDES, C. G. DA N. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. Tese (Doutorado) – Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, dez. 1989.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Situação epidemiológica**. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/d/dda/situacao-epidemiologica>>. Acesso em: maio 2023.

MIRANDA, V. M.; BATISTA, G. A.; SILVA, A. P.; JUNIOR, R. S. Remoção de metais pesados através da utilização do carvão ativado do coco babaçu. **Enciclopédia Biosfera**, v. 4, n. 5, p. 1-3, 2008.

MONACO, P. A. V.; MATOS, A. T.; SARMENTO, A. P.; JÚNIOR, A. V. L.; LIMA, J. T. Desempenho de filtros constituídos por fibras de coco no tratamento de águas residuárias de suinocultura. **Engenharia na Agricultura- REVENG**, v.17, n. 6, p. 473-480, 2009.

MORAES, D. S. L.; JORDÃO, B. Q Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. **Revista Saúde Pública**, v. 36, n. 3, p. 370-374, 2002.

NARITA, C. Y. **Carvões ativados a partir de resíduo de coco verde por diferentes ativadores: obtenção, caracterização e aplicações**. Tese (Doutorado)- Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade de São Paulo, São Paulo- SP, 2021.

Nascimento, R. F.; LIMA, A. C. A.; VIDAL, A. B.; MELO, D. Q.; RAULIANO, G. S. C. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, p. 1-256, 2014.

OLIVEIRA, M. B.; MELO, E. I.; BELAS, K. L. A.; COSTA, B. E. S.; BARBOSA, G. A. P.; COELHO, L. M. Uso do Biochar Produzido a partir da Fibra do Coco para Remoção de Íons Pb^{2+} em Meio Aquoso. **Revista Processos Químicos**, v. 18, n. 35, p. 109-119, 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). 6. **Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável de água e saneamento para todos**. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/goals/goal6>>. Acesso em: abril 2023.

PATERNIANI, J. E. S., MANTOVANI, M. C., SANT'ANNA, M. R. Uso de sementes de *Moringa oleifera* para tratamento de águas superficiais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 765–771, 2009.

PATERNIANI, J. E. S.; CONCEIÇÃO, C. H. Z. Eficiência da pré-filtração e filtração lenta no tratamento de água para pequenas comunidades. **Revista de Engenharia Ambiental, Espírito Sato do Pinhal**, v. 1, n. 1, p. 17-24, 2004.

PIMENTEL, R. G.; REZENDE, N.; BENATTI, C. T.; LAUTENSCHLAGER, R.; BERGAMASCO, R. Utilização de adsorventes para remoção de compostos farmacêuticos no tratamento de água: Uma Revisão. **Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, p. 292-305, jan. 2022.

RAMALHO, J. F. G. P.; SOBRINHO, N. M. B. A.; VELLOSO, A. C. X. Contaminação da microbacia de Caetés com metais pesados pelo uso de agroquímicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 7, p. 1289-1303, 2000.

REGALBUTO, J.R., ROBLES, J. **The engineering of Pt/Carbon Catalyst Preparation**, University of Illinois, Chicago, 2004.

RIBEIRO, E. V.; JUNIOR, A. P. M.; HORN, A. H.; TRINDADE, W. M. Metais pesados e qualidade da água do rio São Francisco no segmento entre Três Marias e Pirapora-MG: índice de contaminação. **Geonomos**, v. 20, n. 1, p. 49-63, 2012.

RIBEIRO, L. D. **Fatores que influenciam a sustentabilidade de sistemas de abastecimento de água em comunidades rurais no Mato Grosso Sul**. Dissertação (Mestrado)- Eficiência Energética e Sustentabilidade. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande- MS, set. 2016.

SAENGER, C. C. **Análise da distribuição espaço-temporal de intoxicação humana por agrotóxicos agrícolas e de metais pesados em águas superficiais no estado de Goiás**. Dissertação (Mestrado)- Geociências Aplicadas e Geodinâmica. Universidade de Brasília- DF, out. 2018.

SANTOS, D. R. **Características, variáveis de produção e aplicação do carvão ativado fisicamente de mesocarpo do coco verde da baía**. Trabalho de Conclusão

de Curso (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa- PB, 2017.

SANTOS, L. O.; SOUZA, I. F.; SILVA, G. F.; BARBOSA, S. A.; CAETANO, N. S. Análise de eficiência de filtração de água por múltiplas etapas vs múltiplas camadas com biomassa de *Moringa oleífera* e bucha vegetal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 4, p. 2184-2196, 2023.

SANTOS, S. T. **Uso de materiais não convencionais misturados com areia no meio filtrante para o tratamento de água para consumo humano**. Universidade Federal de Sergipe, ago. 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Abastecimento de água- 2020**. Disponível em:<<http://antigo.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-abastecimento-agua>>. Acesso em: abril 2023.

SOARES, E. J. S.; BARBOSA, M. G. N.; ANDRADE, T. C. S.; SANTOS, W. B.; SILVEIRA, T. N.; FERREIRA, W. B. Potencial de vegetais para produção de coagulantes visando aplicação no tratamento de água: revisão sistemática. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 2, p. 292-302, 2021.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Notícias**. Disponível em:<<https://www.sosma.org.br/noticias/menos-de-7-dos-rios-monitorados-na-mata-atlantica-tem-agua-de-boa-qualidade/>>. Acesso em: abril 2023.

SOUSA, F. W.; MOREIRA, S. A.; RIVELINO, A. G. O.; CAVALCANTE R. M.; NASCIMENTO, R. F.; ROSA, M. F. Uso da casca de coco verde como adsorbente na remoção de metais tóxicos. **Química Nova**, v. 30, p. 1153-1157, 2007.

SOUZA, A. K. R; MORASSUTI, C. Y; DEUS, W. B. Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. **Acta Biomédica Brasiliensia**, v. 9, n. 3, p. 95-106, 2018.

SOUZA, B. F. M.; JUNIOR, D. A. F.; FELIPPE, M. T. S. D. Aplicação de carvão alternativo em tratamento de água industrial. **Atena Editora**, p. 109-122, 2022.

SOUZA, J. L. **Mesocarpo do coco verde (*Cocos nucífera*) como adsorvente para os corantes: turquesa remazol e azul remazol**. Dissertação (Mestrado)- Química. Universidade Federal do Maranhão, São Luiz- MA, 2009.

TEIXEIRA, J. L. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir da casca de coco verde**. Dissertação (Mestrado)- Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre- RS, 2020.

VERAS, L. R. V.; DI BERNARDO, L. Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 1, p. 109–116, mar. 2008.

VIZIBELLI, D. **Avaliação de diferentes materiais utilizados na composição de filtros quando associados a aplicação de coagulantes no tratamento de água.** 2019. 60p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

VIZIBELLI, D. **Sistema FiME associado a aplicação do coagulante *Moringa oleifera* e do sulfato de Alumínio no tratamento de água de abastecimento.** Dissertação (Mestrado)- Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina-PR, 2021.

ZENDRON, R. Mecanismo de neurotoxicidade e doenças neurológicas relacionadas à intoxicação por metais pesados. **Revista Brasileira de Nutrição Funcional**, v. 64, n.1, p. 45–51, 2015.