

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL  
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Milena Soares Binsfeld

**FILTRAÇÃO LENTA RETROLAVÁVEL UTILIZANDO CARVÃO  
ANTRACITO COMO MEIO FILTRANTE PARA APLICAÇÃO EM  
COMUNIDADES RURAIS**

Frederico Westphalen, RS  
2023

**Milena Soares Binsfeld**

**FILTRAÇÃO LENTA RETROLAVÁVEL UTILIZANDO CARVÃO ANTRACITO COMO MEIO  
FILTRANTE PARA APLICAÇÃO EM COMUNIDADES RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), *Campus* Frederico Westphalen – RS, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Bruno Soares

Frederico Westphalen, RS, Brasil  
2023

**Milena Soares Binsfeld**

**FILTRAÇÃO LENTA RETROLAVÁVEL UTILIZANDO CARVÃO ANTRACITO COMO MEIO  
FILTRANTE PARA APLICAÇÃO EM COMUNIDADES RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), *Campus* Frederico Westphalen – RS, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

**Aprovado em 04 de dezembro de 2023:**

---

**Marcus Bruno Soares, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Raphael Corrêa Medeiros, Dr. (UFSM)**

---

**Mariza de Camargo, Dra. (UFSM)**

Frederico Westphalen, RS  
2023

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por estar comigo em todos os momentos e ser minha base para enfrentar todos os desafios desta caminhada.

Agradeço a minha família, especialmente aos meus pais André e Marinei, por estarem comigo em todos os momentos, me apoiando e incentivando. Vocês foram meu porto seguro, minha fonte de força e inspiração ao longo de toda a minha jornada acadêmica. Seu apoio inabalável, encorajamento constante e crença em mim foram fundamentais. Cada conquista que alcancei é, em grande parte, resultado do amor e dos sacrifícios que vocês fizeram por mim. Estendo este agradecimento, aos meus irmãos do coração, tios e demais familiares que fizeram parte desta jornada e me apoiaram incondicionalmente até a chegada deste momento. O incentivo, a compreensão e paciência em todos os momentos foram inestimáveis.

Agradeço a toda a família UFSM, por todo o suporte nestes 5 anos da graduação. A todos os professores pela dedicação, acolhimento e por todo o conhecimento e experiência compartilhada ao longo desses anos. Vocês desempenharam um papel significativo na minha formação e crescimento como estudante.

Em especial, quero expressar minha profunda gratidão ao meu orientador Marcus Bruno, por todo o apoio durante a graduação e especialmente no desenvolvimento deste estudo, cuja paciência e conhecimento foram cruciais para o sucesso deste trabalho. Suas sugestões e insights ajudaram a moldar meu projeto e meu crescimento acadêmico.

Gratidão aos colegas e amigos que fiz durante o curso, onde compartilhamos experiências e ideias. Obrigada por tornarem esta jornada acadêmica mais rica e gratificante. E em especial ao Mateus, a Gilmara, a Nathielly, o Thiago, a Taina, o Diogo que contribuíram para o desenvolvimento da minha pesquisa. Foram meses de dedicação e muito aprendizado, onde contei com o apoio de pessoas incríveis que tornaram a jornada mais feliz, por ter com quem contar nas dificuldades.

Este TCC representa a culminância de muito esforço e dedicação, e estou profundamente grata a todos que fizeram parte desta jornada. Muito obrigada!

“...Importante não é tanto ver aquilo que  
ninguém viu, mas pensar o que ninguém  
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê...”

Arthur Schopenhauer

## RESUMO

# **FILTRAÇÃO LENTA RETROLAVÁVEL UTILIZANDO CARVÃO ANTRACITO COMO MEIO FILTRANTE PARA APLICAÇÃO EM COMUNIDADES RURAIS**

AUTOR: Milena Soares Binsfeld

ORIENTADOR: Dr. Marcus Bruno Domingues Soares

A filtração lenta retrolavável é uma tecnologia eficiente para se tratar águas de abastecimento humano em pequenas comunidades rurais, sem acesso a água potável. Através dela é possível modificar algumas características físico-químicas para torná-la adequada ao consumo. Para tanto, o devido estudo dimensionou e construiu um protótipo de filtro lento retrolavável objetivando a tratabilidade da água proveniente de uma represa localizada na UFSM em Frederico Westphalen. O sistema de filtração utilizou como meio filtrante o carvão antracito. Na pesquisa realizou-se a avaliação de todo o sistema piloto considerando aspectos hidráulicos operacionais, como expansão do meio filtrante e eficiência da retrolavagem. Parâmetros de qualidade da água em termos de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, oxigênio dissolvido, temperatura, condutividade elétrica e absorvância 254 nm, também foram avaliados. O desempenho hidráulico do sistema foi monitorado através da perda de carga no meio filtrante. O tempo de operação total do sistema foi de 88 dias consecutivos, gerando 5 carreiras de filtração. O sistema se apresentou efetivo em termos de perda de carga e expansão do meio filtrante durante o processo de limpeza, porém a avaliação da retrolavagem ainda possibilitou observar um tempo de limpeza insuficiente para a aplicação do sistema. A turbidez se apresentou um parâmetro de grande potencial, apesar de não atingir os padrões da legislação vigente. De maneira geral, os parâmetros analisados indicaram uma filtração em profundidade, com uma indicação de elevada atividade microbiológica ao longo do leito filtrante. Contudo, o sistema se apresentou um grande aliado ao abastecimento de pequenas comunidades isoladas, mesmo que apresentando parâmetros em desacordo com a legislação. Observou-se a possibilidade de desenvolvimento do estudo e aprimoramento do sistema, bem como, o uso de tecnologias aliadas, como um pré-tratamento e um sistema de desinfecção. Por fim, entende-se que este sistema possui um grande potencial, se operado adequadamente e possibilitado o desenvolvimento de estudos da tecnologia e da área de aplicação, a fim de possibilitar o acesso a água potável para toda a população, em especial a comunidades rurais.

Palavras chaves: Água de abastecimento, filtro lento, retrolavagem, tratamento de água carvão antracito.

## ABSTRACT

# SLOW BACKWASHABLE FILTRATION USING ANTHRACITE COAL AS A FILTERING MEDIUM FOR APPLICATION IN RURAL COMMUNITIES

AUTHOR: Milena Soares Binsfeld

ADVISOR: Dr. Marcus Bruno Domingues Soares

Slow backwashable filtration is an efficient technology for treating water for human consumption in small rural communities without access to potable water. Through said filtration, it's possible to modify some physicochemical characteristics to make it suitable for consumption. To this end, a proper study dimensioned and built a prototype of a slow backwashable filter aiming at treating water from a small dam located on the *Campus* itself. The filtration system used anthracite coal as the filtering medium. The research included evaluating the entire pilot system considering operational hydraulic aspects, such as the expansion of the filtering medium and the efficiency of backwashing. Water quality parameters in terms of turbidity, apparent color, true color, dissolved oxygen, temperature, electrical conductivity, and absorbance at 254 nm were also assessed. The hydraulic performance of the system was monitored through the head loss across the filtering medium. The total operating time of the system was 88 consecutive days, generating 5 filtration runs. The system proved effective in terms of head loss and expansion of the filtering medium during the cleaning process. However, the evaluation of backwashing still revealed insufficient cleaning time for the system's application. Turbidity emerged as a parameter with significant potential, although it did not meet the standards of current legislation. Overall, the analyzed parameters indicated deep filtration, with an indication of high microbiological activity along the filtering bed. Nonetheless, the system proved to be a significant ally for supplying small, isolated communities, even while presenting parameters that don't comply with regulations. There is a possibility of further study development and system improvement, as well as the use of allied technologies such as pretreatment and disinfection systems. Ultimately, it's understood that this system has great potential if operated properly and if studies on the technology and its application area are developed, aiming to provide access to potable water for the entire population, especially rural communities.

Keywords: Water supply, slow filter, backwashing, water treatment anthracite coal.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Índice de Abastecimento total de água -SNIS, 2021.....	18
Figura 2 - escoamento dos sistemas de filtração – descendente e ascendente.....	19
Figura 3 - Esquema de atuação da filtração lenta, com nível constante e variável.....	20
Figura 4 - Exemplo de um sistema de filtração lenta.....	21
Figura 5 - Fluxograma dos mecanismos atuantes no processo de filtração lenta.....	24
Figura 6 - Mecanismos de transporte de partículas coloidais: sedimentação (A), interceptação (B) e difusão browniana (C).....	25
Figura 7 - Ação dos mecanismos de filtração – filtração lenta.....	26
Figura 8 - Limpeza convencional de filtros lentos – Raspagem da camada de <i>Schmutzdecke</i> .....	27
Figura 9 - Sistema de Filtração lento retrolavável em atuação.....	28
Figura 10 - Sistema de filtração de camada simples e dupla e suas respectivas divisões.....	29
Figura 11 - Representação dos materiais filtrantes: Areia, Carvão Antracito e Carvão ativado granular, respectivamente.....	30
Figura 12 - Curva granulométrica típica de um material filtrante.....	31
Figura 13 - Gráfico de correlação entre as porosidades absolutas e efetivas.....	32
Figura 14 - Formato de grãos de um meio filtrante.....	33
Figura 15 - Ação da colmatação interna e externa no meio filtrante.....	35
Figura 16 - Ação da Colmatação química no meio filtrante.....	36
Figura 17 - Ação da Colmatação Biológica no meio filtrante.....	37
Figura 18 - Ação da Colmatação Mecânica no meio filtrante.....	38
Figura 19 - Ação da Colmatação Física no meio filtrante.....	39
Figura 20 - Mapa de localização da área de estudo.....	40
Figura 21 - Localização das áreas de estudo do referido trabalho.....	41
Figura 22 - Esquema estrutural do Sistema de Filtração Lenta proposto.....	42
Figura 23 - Sistema de captação de água bruta.....	43
Figura 24 - Esquema do sistema desenvolvido pelo estudo.....	45
Figura 25 - Reservatório superior de água bruta (tanque de amortecimento).....	46
Figura 26 - Sistema de dosagem de vazão de entrada no filtro lento.....	47
Figura 27 - Representação da constituição dos piezômetros no sistema de filtração.....	48
Figura 28 - Sistema de retrolavagem instalado no protótipo.....	50

Figura 29 - Aferição da altura da camada filtrante fluidificada durante a retrolavagem.....	51
Figura 30 - Verificação da eficiência de limpeza do filtro durante a retrolavagem.....	52
Figura 31 - Representação da estrutura interna filtrante do sistema.....	53
Figura 32 - Peneiramento e separação granulométrica do material filtrante.....	55
Figura 33 - Curva granulométrica para aplicação no sistema de filtração lenta retrolavável.....	56
Figura 34 - Equipamento utilizado para inserção do material filtrante no sistema.....	58
Figura 35 - Parâmetros de qualidade da água por frequência de análise e equipamentos utilizados.....	61
Figura 36 - Fatiamento do meio filtrante para análise granulométrica.....	62
Figura 37 - Amostras coletadas por camada de influência de meio filtrante.....	63
Figura 38 - Análises microbiológicas realizadas por camada de material filtrante.....	64
Figura 39 - Pesagem de cada amostra por camada, para cálculo de sólidos.....	65
Figura 40 - Comportamento do parâmetro turbidez durante os testes de retrolavagem.....	69
Figura 41 - Testes de expansão do meio filtrante durante a retrolavagem, em porcentagem.....	71
Figura 42 - Perda de carga absoluta (a) e relativa (b) ao longo do meio filtrante.....	72
Figura 43 - Consumo médio absoluto (a) e relativo (b) de oxigênio dissolvido ao longo do meio filtrante.....	80
Figura 44 - Absorbância 254 nm média ao longo do meio filtrante.....	81
Figura 45 - Massa sólida seca presente ao meio filtrante no final da carreira de filtração.....	83
Figura 46 - Quantificação de colônias de coliformes formadas por camada de meio filtrante.....	84
Figura 47 - Quantificação de colônias de bactérias heterotróficas formadas por camada de meio filtrante.....	85
Figura 48 - Quantificação de esporos de bactérias aeróbias formadas por camada de meio filtrante.....	89
Figura 49 - Concentração de Coliformes e Bactérias em amostra seca de material filtrante.....	90
Figura 50 - Valores de turbidez de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.....	99
Figura 51 - Valores de cor aparente de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento....	99
Figura 52 - Valores de cor verdadeira de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.....	100

Figura 53- Valores de oxigênio dissolvido de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.....	100
Figura 54 - Valores de pH de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.....	101
Figura 55 - Valores de Oxigênio Dissolvido de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.....	101
Figura 56 - Valores de Temperatura de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.....	102
Figura 57 – Análises Microbiológicas <i>E-Coli</i> e Coliformes Totais.....	103
Figura 58 – Análises Microbiológicas de Bactérias.....	105
Figura 59 – Análises Microbiológicas de Esporos.....	107

**LISTA DE QUADROS E TABELAS**

Tabela 1 - Descrição dos materiais utilizados na construção do sistema de filtração lenta...	43
Tabela 2 - Cálculos realizados para análise da perda de carga no sistema.....	49
Tabela 3 - Composição granulométrica da camada suporte.....	53
Tabela 4 - Características do material filtrante por composição granulométrica.....	55
Tabela 5 - Dados para a determinação da porosidade do meio filtrante.....	57
Tabela 6 - Equações utilizadas no cálculo da porosidade do meio filtrante.....	57
Tabela 7 - Características granulométricas do material filtrante.....	58
Tabela 8 - Planilha de controle de análises de qualidade da água.....	59
Tabela 9 - Parâmetros de qualidade da água por frequência de análise e equipamentos utilizados.....	60
Tabela 10 - Cálculo de sólidos totais por camada de material filtrante.....	66
Tabela 11 - Dados de turbidez coletados durante a retrolavagem do sistema.....	68
Tabela 12 - Teste de expansão do meio filtrante durante a retrolavagem.....	70
Tabela 13 - Desempenho do sistema de filtração por parâmetro de qualidade da água.....	74
Tabela 14 - Quantificação de colônias de coliformes formadas por camada de meio filtrante.....	85

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivos Gerais.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1 TRATAMENTO DA ÁGUA.....	17
2.2 FILTRAÇÃO.....	19
<b>2.2.1 A Filtração Lenta.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2 Histórico da filtração lenta.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.3 Mecanismos de remoção de contaminantes em filtros lentos.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.4 Tipos de limpeza de filtros lentos.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.5 Um olhar para o meio filtrante.....</b>	<b>29</b>
2.2.5.1 Principais materiais utilizados.....	30
2.2.5.2 Distribuição granulométrica.....	31
2.2.5.3 Porosidade.....	33
2.2.5.4 Forma do Grão.....	34
2.2.5.5 Densidade.....	34
2.2.5.6 Colmatação do meio filtrante.....	35
2.2.5.7.1 <i>Colmatação Química</i> .....	36
2.2.5.6.2 <i>Colmatação biológica</i> .....	37
2.2.5.6.3 <i>Colmatação mecânica</i> .....	38
2.2.5.6.4 <i>Colmatação física</i> .....	39
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
3.1 LOCAL DO ESTUDO.....	41
3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO LENTA RETROLAVÁVEL.....	42
<b>3.2.1 Captação da água bruta.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.2 Materiais utilizados para a montagem do sistema de filtração.....</b>	<b>44</b>
<b>3.2.3 Controle operacional do sistema.....</b>	<b>48</b>

<b>3.3 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FILTRANTE.....</b>	<b>54</b>
3.5 MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	61
3.5 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS DO MEIO FILTRANTE.....	63
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	69
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>70</b>
4.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO.....	70
4.2 MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS.....	70
<b>4.2.1 Verificação da expansão do meio filtrante e eficiência da retrolavagem.....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.2 Perda de carga no meio filtrante.....</b>	<b>74</b>
4.3 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	76
<b>4.3.1 Desempenho global do sistema.....</b>	<b>76</b>
4.4 AVALIAÇÃO DO MEIO FILTRANTE.....	82
<b>4.4.1 Desempenho do parâmetro oxigênio dissolvido ao longo do meio filtrante.....</b>	<b>82</b>
<b>4.4.2 Desempenho do parâmetro absorvância 254 nm ao longo do meio filtrante.....</b>	<b>84</b>
<b>4.4.3 Análise indireta da variação de sólidos totais ao longo do leito.....</b>	<b>86</b>
4.5 COMPORTAMENTO MICROBIOLÓGICO AO LONGO DO LEITO.....	87
<b>4.5.1 Concentração de coliformes totais e E. coli ao longo do meio filtrante.....</b>	<b>87</b>
<b>4.5.2 Concentração de bactérias heterotróficas.....</b>	<b>90</b>
<b>4.5.3 Concentração de esporos de bactérias aeróbias.....</b>	<b>91</b>
<b>4.5.4 Concentração total de microrganismos em massa seca de meio filtrante.....</b>	<b>93</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>94</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>106</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Assegurado pela legislação brasileira, o acesso à água potável e ao saneamento básico é um direito humano essencial, fundamental e universal, indispensável à vida com dignidade e reconhecido pela ONU como “condição para o gozo pleno da vida e dos demais direitos humanos” (Resolução 64/292 de 2010).

Muitas regiões brasileiras e pequenas comunidades ainda sofrem com a ausência de um sistema de abastecimento de água potável, tendo que recorrer à alternativas emergentes, sem o devido tratamento deste recurso, expondo-se a riscos no que se refere à saúde humana.

Processo imprescindível para o abastecimento, o tratamento de água apresenta diversas tecnologias e que variam das mais simples até as mais complexas, adotadas em função da qualidade da água a ser tratada. O processo de tratamento de água pode ser considerado como um conjunto de mudanças nas características brutas da água, de acordo com as suas diversas apresentações, baseando-se na finalidade de proporcionar ao recurso, características físico-químicas e microbiológicas, que atendam aos padrões de qualidade definidos por agências reguladoras.

Como objetivo principal de proteger a saúde pública, o tratamento de água proporciona o acesso seguro a este recurso, estando de acordo com os padrões exigidos pelos órgãos vigentes do país. Estes padrões especificam diretrizes para que o processo de tratamento seja realizado de forma a atender as necessidades de qualidade e potabilidade, sendo definidas de acordo com estudos realizados no decorrer dos anos e casos práticos vivenciados desde o surgimento das civilizações.

No Brasil, os padrões de qualidade e potabilidade da água são definidos pelo Ministério da Saúde que dispõe dos procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu respectivo padrão de potabilidade, descritos na Portaria GM/MS (Gabinete do Ministro/Ministério da Saúde) nº 888, de 04 de maio de 2021, vigente a partir da respectiva data de publicação.

Dentre as técnicas de tratamento da água, existe a filtração lenta, processo antigo que vem sendo aplicada desde o século XIX, nos sistemas públicos, e amplamente utilizada no país e mundo (NAKAMOTO, GRAHAM, GIMBEL, 2014). Técnica eficiente que utiliza da formação de uma camada biológica natural nos primeiros centímetros da camada filtrante, (chamada de Schmutzdecke) para a remoção de impurezas presentes na água bruta, desenvolvendo processos biológicos (LIBÂNIO, 2010).

Uma das principais características deste tratamento, é a não utilização de coagulantes químicos, quando se tem água bruta de características adequadas, o que exige um baixo investimento para sua implantação, sendo assim um sistema de tratamento bastante viável principalmente para as pequenas comunidades (PATERNIANI, CONCEIÇÃO, 2004).

Suas características econômicas, bem como sua viabilidade operacional, tornam este tipo de sistema uma excelente alternativa para o abastecimento de pequenas e médias comunidades. O sistema composto por uma filtração lenta torna-se eficiente, dada a sua simples construção e manutenção, bem como a qualidade da água tratada, devido as suas características físicas e a não adição de produtos químicos em sua operação (GIMBEL, GRAHAM, COLLINS, 2006).

Características agregadas ao filtro devido a sua manutenção, ainda possibilitam uma melhor visão de suas condições, como os sistemas de lavagem, que vem se aprimorando e possibilitando menos investimento e operação. A retrolavagem é um sistema que realiza a limpeza de forma simples, onde a água já filtrada entra em contrafluxo, com uma vazão capaz de assegurar uma expansão adequada para o meio filtrante, possibilitando assim uma limpeza eficiente e de baixo custo (EMMENDOERFER, 2006).

A passagem de água pelo meio filtrante proporciona a purificação da mesma por intermédio de sua interação com o meio onde ocorre a retenção química, física ou biológica de impurezas (SOUZA, 2020; PIZZOLATTI, 2014; WEBER-SHIRK; DICK, 1997B). Esse processo possibilita que o sistema de filtração lenta seja desenvolvido com eficiência, onde fenômenos como a granulometria, densidade e colmatação interferem diretamente neste processo. O entendimento destes fatores no processo operacional, bem como, as características hidráulicas e de qualidade do processo de filtração como um todo, garantem um desenvolvimento adequado e rentável.

Este trabalho visou analisar o sistema de filtração lenta retrolavável, utilizando como meio filtrante carvão antracito, através da construção de um protótipo de operação. Parâmetros operacionais do sistema, de desempenho hidráulico, de qualidade da água e análise microbiológica do meio filtrante foram analisados, com o intuito de compreender os limites do sistema, dentro dos parâmetros estudados. Enfim, estratégias foram apresentadas com base nos resultados obtidos, para o aperfeiçoamento da aplicação deste sistema em pequenas e médias comunidades sem acesso à água potável.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Avaliar o desempenho de um sistema de filtração lenta retrolavável utilizando carvão antracito como meio filtrante, baseado no monitoramento de parâmetros operacionais, hidráulicos, de qualidade da água e análise microbiológica do meio filtrante.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a expansão e eficiência de limpeza do meio filtrante do sistema durante a retrolavagem;
- Monitorar a perda de carga e a longevidade das carreiras de filtração;
- Avaliar a eficiência do tratamento em termos dos parâmetros de qualidade da água selecionados;
- Avaliar o desempenho do meio filtrante em termos de transporte de oxigênio dissolvido, matéria orgânica e microbiológico.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 TRATAMENTO DA ÁGUA

O uso da água vem ganhando nos últimos tempos, uma importância considerável, envolvendo fatores como a alimentação e higiene pessoal, agricultura, navegação, produção industrial, resfriamento de termoelétricas e usinas nucleares e atividades recreativas. Para tanto, foi necessário uma adesão a sistemas alternativos de tratamento de água que suprissem as necessidades humanas, e que fossem eficazes, de baixo custo e que, sobretudo, contribuíssem com a qualidade ambiental e de vida das populações (TUFENKJI et al., 2002).

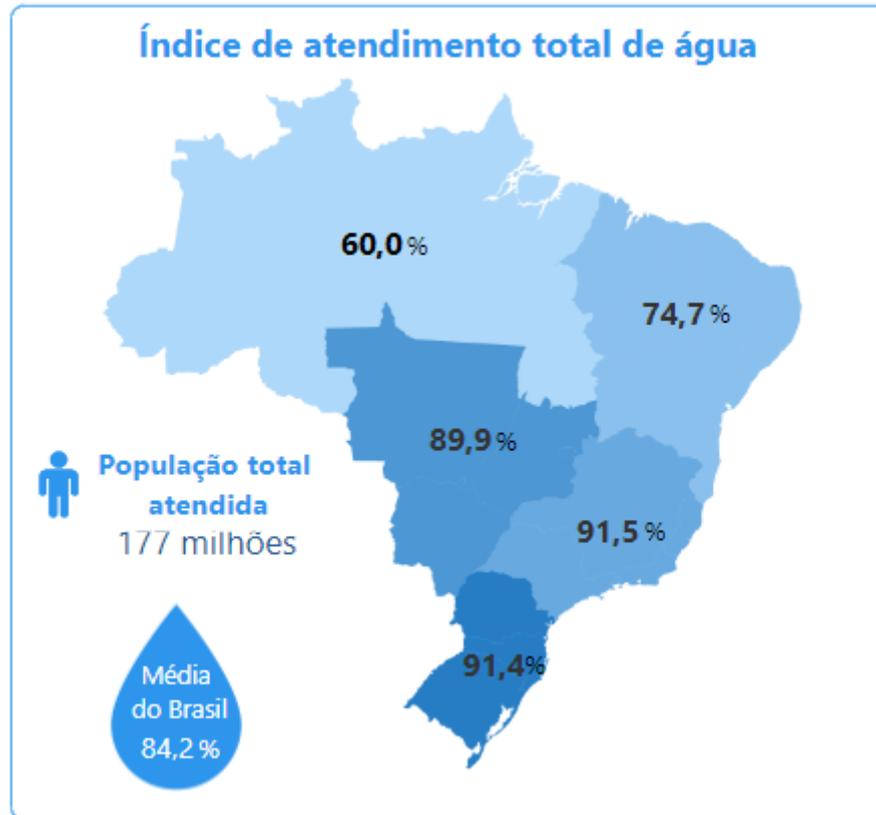
As necessidades hídricas passaram a exigir demandas voltadas às prioridades populacionais. O atendimento por sistemas de abastecimento de água em quantidade e qualidade adequadas, por sua importância para a assistência às necessidades relacionadas a saúde e ao desenvolvimento (TSUTIYA, 2014).

Com a expansão dos municípios e crescimento da população, fez-se necessário o investimento em sistemas de tratamento e abastecimento de água, ou em tecnologias que os substituam, de forma a proporcionar uma água segura, dentro dos padrões de potabilidade, aos consumidores.

A expansão territorial é fator de grande influência no acesso a água potável no Brasil, áreas mais isoladas e pequenas cidades são as que mais sofrem com esse problema (PIZZOLATTI, 2010). Para suprir as necessidades, muitas vezes são implementadas tecnologias emergentes de coleta e armazenamento de águas sem o devido tratamento, o que influencia negativamente na saúde e bem-estar da população.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), o índice de atendimento total de água com redes públicas de abastecimento no ano de 2021 é de 84,2%. Isso corresponde a 176.972.501 habitantes atendidos. Já o índice de atendimento urbano chega a 93,5% s (SNIS, 2021). A Figura 1 apresenta a relação de atendimento total de água no Brasil de acordo com dados do SNIS, classificando de acordo com cada região do País.

Figura 1 - Índice de Abastecimento total de água -SNIS, 2021.



Fonte: SNIS (2021).

A água em seu estado bruto e/ou sem o devido tratamento pode apresentar uma grande variedade de constituintes capazes de provocar doenças, como também apresenta uma capacidade única de transmitir rapidamente enfermidades para um grande número de pessoas. Sistemas de abastecimento de água inviabilizam seu uso emergente e inadequado, dado a falta de tratamento. (HOWE, 2016).

O tratamento da água é o sistema que possibilita o acesso populacional à água potável, este, um direito humano básico. A Lei nº 11.445/2007 estabelece as diretrizes nacionais do saneamento básico, considerando um de seus pilares o acesso das populações a serviços públicos de abastecimento de água (BRASIL, 2007).

O processo de tratamento de água pode ser descrito como um conjunto de manipulações da água, este, possuindo diversas concepções e formatos, possibilita haja um sistema de abastecimento público. Passo imprescindível para a aptidão do sistema, o tratamento possibilita a afirmação da qualidade físico-química e microbiológica da água, além de propiciar que padrões de qualidade definidos por agências reguladoras sejam consideravelmente aptos a consumo humano (SECKLER, 2022).

## 2.2 FILTRAÇÃO

O processo de filtração é um dos mais importantes em um sistema de tratamento de água. Amplamente utilizado para a remoção de partículas da água, a filtração pode ser definida como qualquer processo de remoção de partículas sólidas a partir de uma suspensão (um sistema de duas fases contendo partículas num fluido) por meio de um meio poroso (SECKLER, 2022).

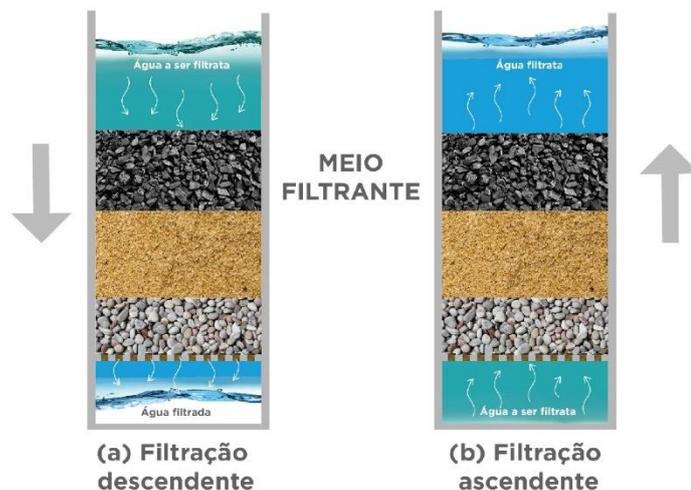
A filtração é um processo baseado na separação sólido-líquido, a fim de remover impurezas presentes na água. Através da passagem da água por materiais porosos, o processo envolve fenômenos físicos, químicos e biológicos capazes de melhorar a qualidade da água bruta (DI BERNARDO, 1993).

A filtração é um processo fundamental no tratamento de águas de abastecimento, sendo considerado um processo unitário que tem como função garantir a remoção de partículas coloidais presentes na fase líquida do tratamento (SECKLER, 2017).

As técnicas de filtração lenta são classificadas de acordo com a sua operação, definidas de acordo com as características particulares de cada projeto. A classificação é realizada de acordo com seu escoamento, sendo descendente ou ascendente (Figura 2), de acordo com seu fluxo, sendo contínuo ou intermitente, e de acordo com seu nível, sendo constante ou variável.

O escoamento descendente é realizado em fluxo, tendo contato primário direto com o meio filtrante, já em escoamentos ascendentes é realizado em contrafluxo, tendo contato primário com a camada suporte (FUNASA, 2019).

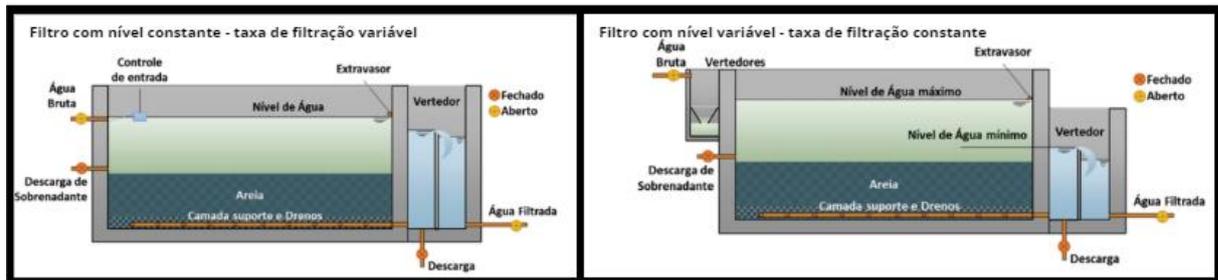
Figura 2 - Escoamento dos sistemas de filtração – descendente e ascendente.



Fonte: UFG (2020).

De acordo com a Funasa (2019) filtros de nível constante são aqueles que apresentam um nível de água sobrenadante constante no decorrer da operação o que influencia em uma taxa de filtração variável, já filtros de nível variável possuem altura disponível para aumento da água acima do meio filtrante e conseqüentemente uma taxa de filtração constante. A Figura 3 apresenta um esquema de filtração lenta de acordo com seu nível.

Figura 3 - Esquema de atuação da filtração lenta, com nível constante e variável.



Fonte: FUNASA (2019).

### 2.2.1 A Filtração Lenta

A filtração lenta é um tipo de tratamento de água, reconhecido atualmente por sua eficiência no tratamento de água de pequenas e médias comunidades. Trata-se de um processo que realiza o transpasse da água em condições naturais através de um meio poroso, o qual age como forma de obstáculo para as partículas, no momento em que se tem o contato com a superfície dos grãos (PIZZOLATTI, 2010).

Uma das principais características deste tratamento, é a não utilização de coagulantes químicos, quando se tem água bruta de características adequadas, o que exige um baixo investimento para sua implantação, sendo assim um sistema de tratamento bastante viável principalmente para as pequenas comunidades (PATERNIANI, CONCEIÇÃO, 2004).

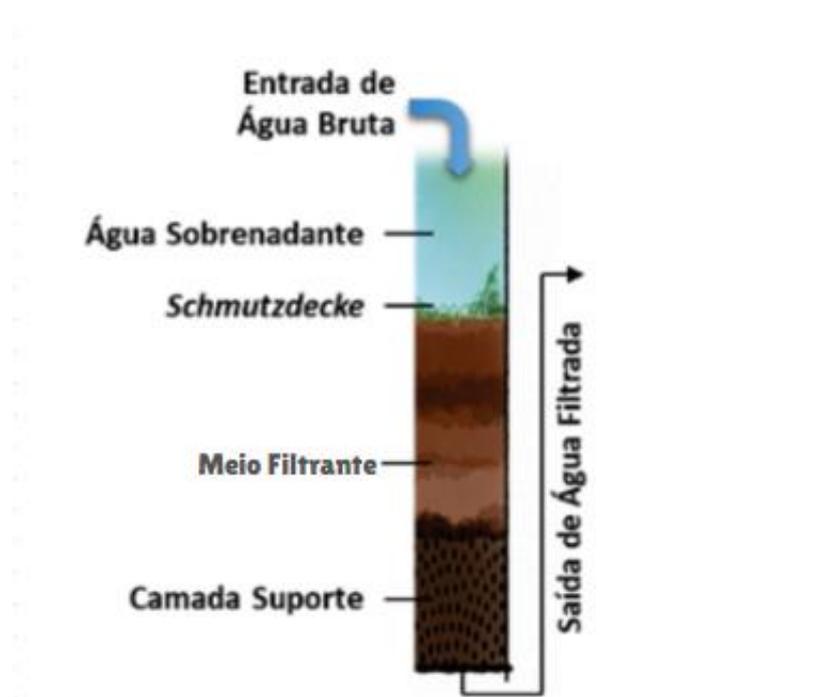
O sistema de filtração lenta se torna eficiente devido à formação da camada biológica nos primeiros centímetros da camada filtrante, chamada de *Schmutzdecke*. É no *Schmutzdecke* onde ocorrem os principais processos biológicos de remoção de impurezas que estão presentes na água bruta (LIBÂNIO, 2010).

Devido a baixas taxas de filtração utilizadas na filtração lenta, a água bruta permanece em contato longo com o meio filtrante permitindo o desenvolvimento da camada biológica, composta por microrganismos biológicos e detritos. À medida que a água atravessa a camada e

o leito filtrante, ocorre a uma melhora significativa da qualidade da água, reduzindo as concentrações de microrganismos, de coloides e de partículas suspensas, bem como da alteração da composição química. Este processo é resultado da combinação de mecanismos distintos atuantes no processo de filtração lenta (HAARHOFF & CLEASBY, 1991).

De acordo com o caderno técnico desenvolvido pela Fundação Nacional da Saúde (FUNAS, 2019) sobre o assunto, sistemas de filtração lenta são conhecidos por sua simplicidade de construção e operação. A água é introduzida no filtro com baixa taxa de filtração, o que permite a remoção de materiais suspensos por mecanismos físicos e a remoção de patógenos pela atividade biológica (camada de *Schmutzdecke*). A Figura 4 expressa este sistema com entrada de água descendente.

Figura 4 - Exemplo de um sistema de filtração lenta.



Fonte: Adaptado FUNASA (2019).

### 2.2.2 Histórico da filtração lenta

Aplicada e desenvolvida desde o século XIX, a filtração lenta ganhou um papel importante no tratamento de água, devido a sua eficiência comprovada nos sistemas públicos de abastecimento, o que posteriormente provocou um uso amplo em todo o mundo (NAKAMOTO, GRAHAM, GIMBEL, 2014).

Com o tempo, essa tecnologia foi perdendo espaço com o aparecimento de tecnologias mais avançadas, principalmente a partir do estudo de processos de coagulação e floculação e das demandas sociais econômicas para a implementação de menores áreas, e maior quantidade de produção e distribuição da água tratada, dado o crescimento populacional, principalmente em grandes centros urbanos. (DI BERNARDO, BRANDÃO, HELLER, 1999).

Apesar do desenvolvimento de novas tecnologias terem ganhado espaço, a filtração lenta foi sendo evidenciada pela constituição de um sistema eficiente tratamento de água de áreas rurais em escala domiciliar, como também para pequenas comunidades (LOGSDON, KOHNE, ABEL, 2002).

O desenvolvimento desta tecnologia se ampliou, tornando a filtração lenta uma tecnologia reconhecida pelo tratamento de água de abastecimento de pequenas comunidades. Caracterizada por se tratar de um sistema de fácil construção operação e manutenção, a filtração lenta também apresenta custos acessíveis, o que a torna uma alternativa econômica e socialmente viável a pequenas comunidades (NASCIMENTO, PELEGRINI, BRITO, 2012).

Nas últimas décadas, a filtração lenta se constituiu como uma solução apropriada em diversas aplicações no Brasil, principalmente em zonas rurais e comunidades de pequeno e médio porte que apresentaram mananciais de captação razoavelmente preservados, porém o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas tecnologias de tratamento, vem ganhando um espaço considerável no setor de tratamento de água. (DI BERNARDO, BRANDÃO, HELLER, 1999).

Contudo, a filtração lenta ainda se destaca pela inexistência de complexidades operacionais de processos e produtos, a não utilização de coagulação química, floculação e decantação é tratado como um fator importante na escolha de um tratamento para água, garantido uma alta eficiência e condições socioeconômicas proeminentes (MELLO, 1998).

### 2.2.3 Mecanismos de remoção de contaminantes em filtros lentos

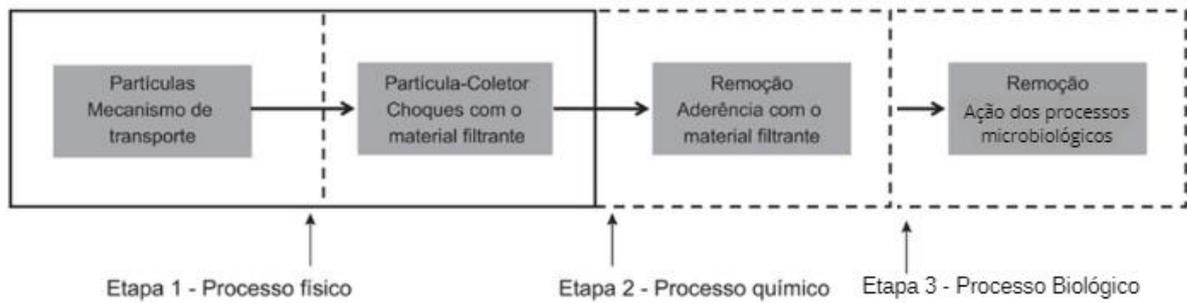
A filtração lenta é caracterizada pela presença de uma camada biológica capaz de reter os contaminantes na passagem da água. A eficiência deste tipo de filtração é proveniente dessa camada biológica, a qual demora, normalmente, algumas semanas para se formar, dependendo das características do meio filtrante e dos parâmetros de operação. Neste período, de início de funcionamento até a formação do “*Schmutzdecke*”, é que há produção de efluente com qualidade insatisfatória, pois a camada biológica não se encontra totalmente formada (DI BERNARDO, BRANDÃO, HELLER, 1999).

Neste tipo de filtração, a atividade biológica é caracterizada como um dos fatores mais importantes, sendo mais pronunciada no topo do meio filtrante, e se estendendo até cerca de 40 centímetros de profundidade. Essa camada biológica é constituída, fundamentalmente, por partículas inertes, matéria orgânica, e uma grande variedade de organismos, tais como bactérias, algas, protozoários, metazoários, etc, além de precipitados de ferro e manganês quando esses metais se encontram em estado solúvel na água afluenta (DI BERNARDO, BRANDÃO, HELLER, 1999).

Na filtração lenta, as impurezas entram em contato com a superfície das partículas do meio filtrante, onde são retidas. Essas partículas podem se apresentar até 100 vezes menores que o espaço entre os grãos e o meio filtrante, ocasionando simultaneamente ações físicas, químicas e biológicas na passagem da água pelo meio filtrante (VARGAS, 1992). O tratamento da água realizado por meio da filtração lenta é caracterizado pela ação de três mecanismos, responsáveis pela remoção das partículas, sendo o transporte, a aderência e os processos microbiológicos (SÁ, 2006; COSTA, 1980).

Os mecanismos atuantes na filtração lenta possibilitam que haja a remoção dos contaminantes e impurezas presentes na água bruta. Desta forma, o uso de produtos químicos torna-se dispensável, necessitando apenas da desinfecção final da água tratada, estando de acordo com as legislações vigentes. A Figura 5 expressa um fluxograma com a ação dos mecanismos em ordem de atuação e classificados por etapas.

Figura 5 - Fluxograma dos mecanismos atuantes no processo de filtração lenta.



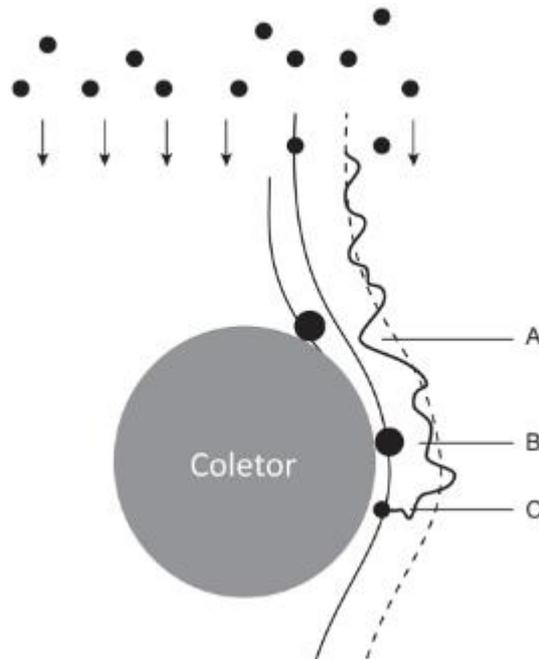
Fonte: Adaptado SECKLER (2021).

No mecanismo de transporte de partículas é realizado através da inércia, colisão entre as partículas e o grão, que ocorre a partir da velocidade das partículas. Essa velocidade se apresenta superior à velocidade das linhas de fluxo, ocasionando movimento suficiente para atravessar as linhas e ir de encontro ao coletor (PIZZOLLI, 2009).

O transporte está ligado aos movimentos de fluxo da água no meio filtrante, caracterizados pelas diversas ações de interação entre os sólidos presentes na água e o próprio meio. Dentre tais processos destacam-se: a ação de coagem, impacto inercial, hidrodinâmica, sedimentação, difusão e interceptação (SOUZA, 2020; HUISMAN, WOOD, 1974).

De acordo com Seckler (2021) os mecanismos de transporte podem ser classificados em três tipos: mecanismo de transporte por sedimentação, por interceptação ou por difusão browniana. Na sedimentação a partícula é transportada em uma linha de corrente pode apresentar uma velocidade de sedimentação que possibilite sua separação da linha de corrente, sendo posteriormente transportada para a superfície do coletor. Na interceptação a partícula é transportada em uma linha de corrente pode entrar em contato com o coletor e ficar retida em sua superfície. Por fim, na difusão browniana a partícula coloidal presente em meio aquoso, em razão de seu contínuo bombardeamento pelas moléculas de água, pode ser transportada de sua linha de corrente para a superfície do coletor. A Figura 6 expressa a atuação deste mecanismo de transporte, apresentando a diferença entre suas três formas de atuação.

Figura 6 - Mecanismos de transporte de partículas coloidais: sedimentação (A), interceptação (B) e difusão browniana (C).



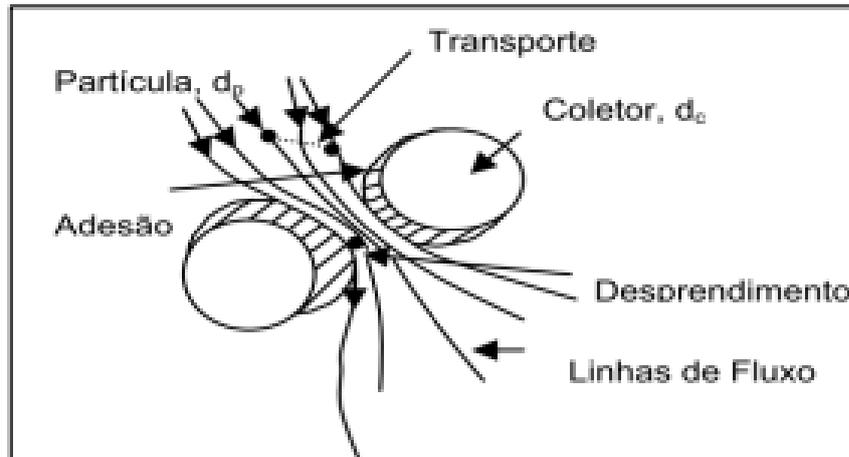
Fonte: SECKLER (2021).

O mecanismo de aderência ocorre principalmente da parte superior do meio filtrante, devido a maior concentração de matéria orgânica e conseqüentemente a rápida reprodução de microrganismos, capazes de produzirem um biofilme viscoso e gelatinoso formado por células mortas, material excretado e pelos próprios microrganismos, em torno dos grãos e na superfície do *Schmutzdecke*. Por sua consistência pegajosa, o biofilme adere de forma rápida boa parte das partículas presentes na água bruta, logo ao entrarem em contato com o meio filtrante (SOUZA, 2020; MANZ, 2004; HUISMAN, WOOD, 1974).

Neste sentido, atrelado ao mecanismo de aderência, ocorre o desprendimento que por sua vez, pode ser originado na colisão entre as partículas recentes e as já aderidas. Estes eventos acontecem de maneira simultânea, pois o aumento da velocidade pode ocasionar o desprendimento das partículas em adesão deslocando-as para grãos em proximidade. A manifestação de tais fenômenos ocorre principalmente nos primeiros centímetros do leito, não havendo alteração da taxa de filtração (PIZZOLATTI, 2014; AMIRTHARAJAH, 1988).

A Figura 7 apresenta uma representação da atuação dos mecanismos de filtração de forma esquemática demonstrando a ação das partículas e os grãos do meio filtrante.

Figura 7 - Ação dos mecanismos de filtração – filtração lenta.



Fonte: Pizzolatti (2010); Amirtharajah (1988).

#### 2.2.4 Tipos de limpeza de filtros lentos

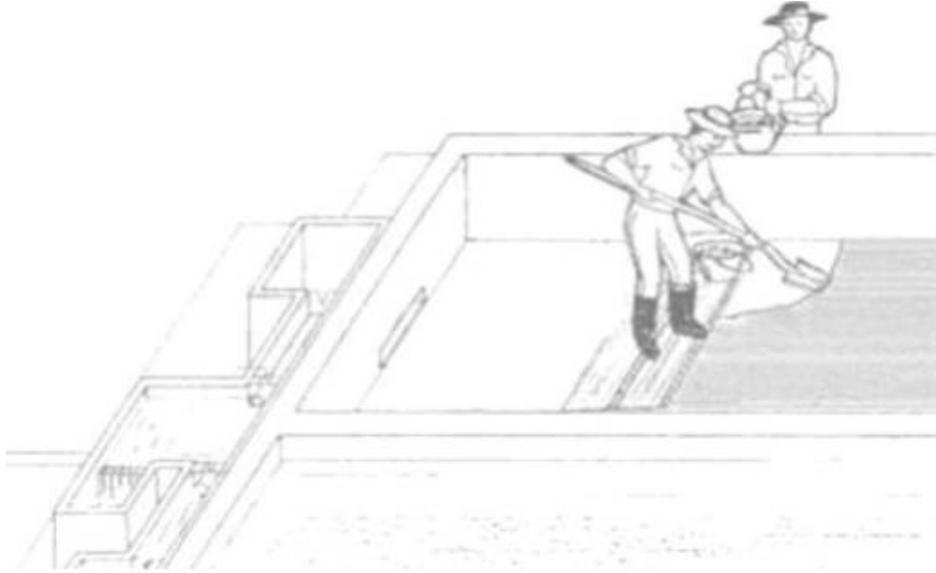
A limpeza de um filtro lento é uma etapa importante e necessária para a realização do tratamento da água de forma eficiente. Este tipo de filtração exige uma limpeza periódica nos primeiros centímetros da camada filtrante, devido ao acúmulo de impurezas retidas no processo (EMMENDOERFER, 2006).

O tempo de limpeza dos filtros é dado pela carreira de filtração, que designa o período, em dias, em que houve operação do filtro lento, esta carreira é finalizada quando o filtro se encontrar inoperante, ou seja, seu meio filtrante encontra-se colmatado e a água não pode mais ser filtrada. Uma carreira de filtração, em filtros lentos, apresenta uma duração média de 30 a 60 dias, o que não exige muita manutenção e limpeza constantes (MEDINA, 2000).

A limpeza pode ser realizada de duas maneiras, pela lavagem tradicional ou pela retrolavagem. A lavagem tradicional realizada em filtros lentos é feita através da drenagem da água do filtro, para que a os primeiros 1 a 5 centímetros do meio filtrante (camada de *Schmutzdecke*) seja raspada. Este material raspado é lavado e acondicionado, de modo a ser repostado no filtro (LOGSTDON, 2002).

A limpeza tradicional, requer uma manutenção mais trabalhosa, onde extrair, limpar e repor o meio filtrante pode levar um dia ou mais. Segundo Logsdon (2002), em um filtro com dimensões de 100 m<sup>2</sup> são necessárias mais de 50 horas para a execução da limpeza. A Figura 8 ilustra a limpeza convencional de filtros lentos, através da retirada da camada biológica.

Figura 8 - Limpeza convencional de filtros lentos – Raspagem da camada de *Schmutzdecke*.



Fonte: Di Bernardo (1997).

Cabe ressaltar que a atividade biológica do filtro é imprescindível no processo de tratamento da água, e a reconstituição da mesma após a limpeza convencional deve ser realizada corretamente, a fim de garantir que a camada superficial seja composta por um meio filtrante com filme biológico formado (DI BERNARDO, 2005).

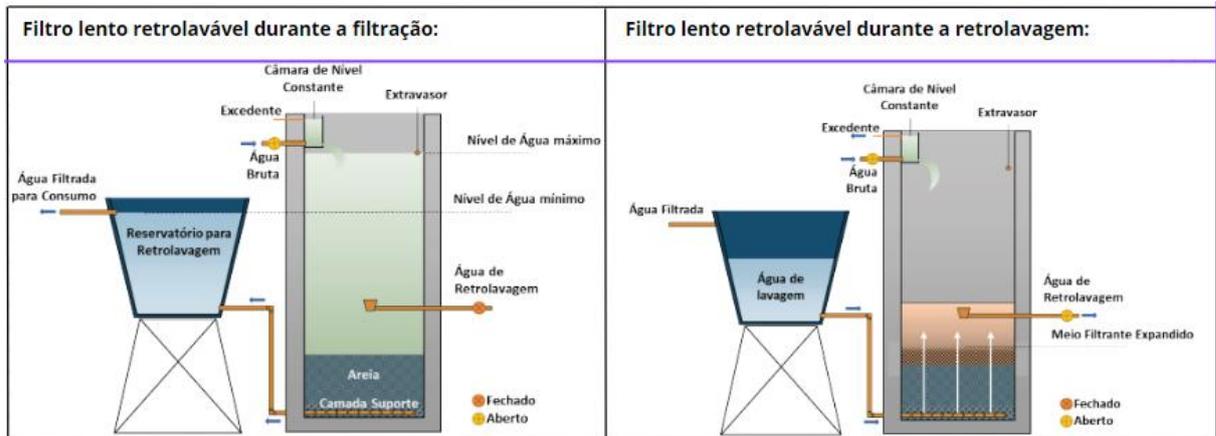
A técnica da limpeza por retrolavagem em filtros lentos, considerada até então incomum, devido ao método convencional por raspagem ser consolidado, vem se demonstrando vantajosa e prática para filtros lentos de pequena escala (FUNASA, 2019).

Os sistemas compostos que realizam retrolavagem apresentam uma forma simples e prática de limpeza, apenas com a abertura de uma válvula, onde a água entra em contracorrente (inversão de fluxo) com uma vazão capaz de assegurar uma expansão apropriada para o meio filtrante, o que garante uma limpeza eficiente (EMMENDOERFER, 2006).

Um sistema de retrolavagem atua de forma econômica, reduzindo custos e tempo do processo, utilizando da própria água filtrada para realização da limpeza do meio filtrante, em um sistema de filtração descendente (SENS, 1992).

O sistema de filtração lenta utilizando retrolavagem apesar de apresentar vantagens econômicas e operacionais ainda é foco de estudo, pelo seu recente desenvolvimento. De acordo com a FUNASA (2019) esse sistema vem sendo desenvolvido e aperfeiçoado em diversos laboratórios de Universidades Federais do Brasil. A Figura 9 evidencia um sistema de filtração lenta com retrolavagem em suas operações, esquematizando o processo de retrolavagem em um sistema descendente e de nível constante.

Figura 9 - Sistema de Filtração lento retrolavável em atuação.



Fonte: FUNASA (2019).

Para a realização de uma limpeza adequada o meio filtrante deve estar parcialmente ou totalmente fluidificado, para tanto o processo deve obter uma velocidade mínima de fluidificação. Essa velocidade deve ser levada em consideração no dimensionamento, uma vez que velocidades maiores do que o apropriado podem gerar uma renovação no filtro quebrando aspectos biológicos importantes, já velocidades menores podem não gerar a fluidificação adequada do meio filtrante, não ocorrendo o desprendimento dos materiais indesejados e, conseqüentemente, não realizando limpeza efetiva do filtro (SCHÖNTAG, 2015).

### 2.2.5 Um olhar para o meio filtrante

Para garantir que o processo de filtração ocorra de maneira adequada e que as impurezas presentes na água bruta sejam separadas do fluído, é necessário utilizar-se de elementos que sejam capazes de realizar tal função e modificar positivamente as características da água. Desta forma, utiliza-se de elementos de características complexas de origem mineral e natural, a fim de separar do fluído resíduos e sedimentos de desacordo com as características da água potável.

As características físicas do meio filtrante tais como formato do grão, porosidade, coeficiente de uniformidade, diâmetro efetivo, profundidade do meio e tortuosidade são conceitos e parâmetros que influenciam diretamente na eficiência da filtração (SOARES, 2015).

Pizzolatti (2014) relacionou as características do meio filtrante através dos seus mecanismos de filtração, relacionado a granulometria do mesmo com sua eficiência, para ele os menores diâmetros efetivos são os mais eficientes na remoção de turbidez, porém esse fator

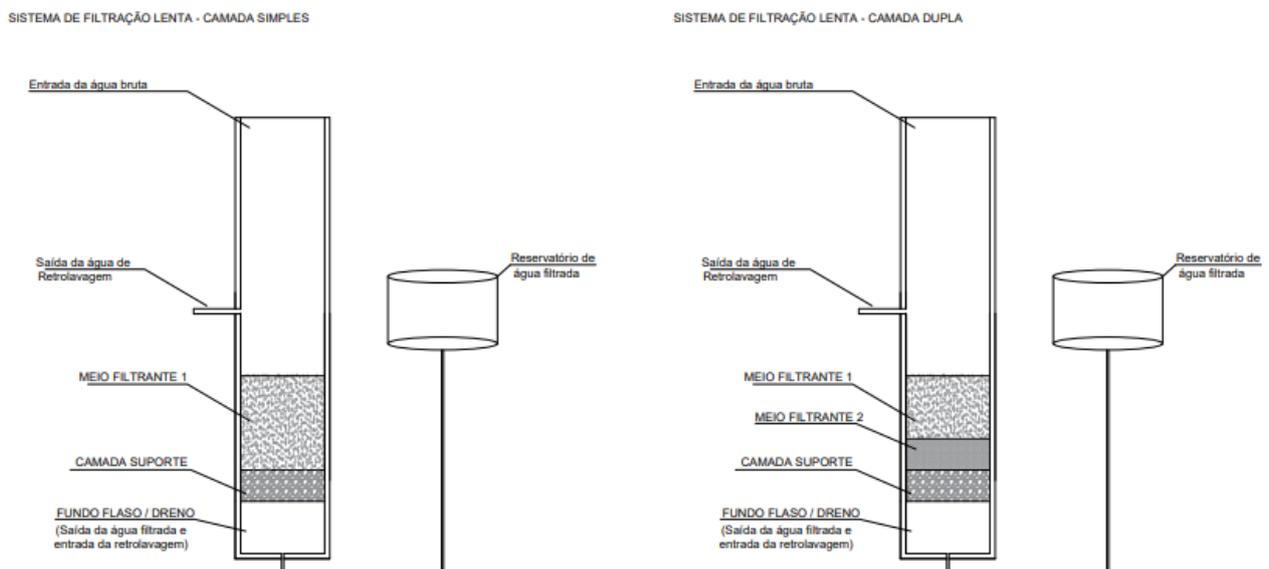
se relaciona diretamente ao desenvolvimento de perdas de carga no sistema. Parâmetros que devem ser balanceados para o desenvolvimento operacional do filtro.

### 2.2.5.1 Principais materiais utilizados

O uso de diferentes materiais granulares como material filtrante apresentam influência direta na eficiência da filtração. Segundo Brinck (2009) os materiais filtrantes devem ser analisados e correlacionados às propriedades de tamanho, densidade e formato dos grãos. Neste sentido, encontram-se materiais de origem natural e mineral capazes de respeitar as características adequadas para o tipo de filtração, os mais comuns encontradas são de areia, carvão antracito, granada e ilmenita, podendo ser aplicados em camada única, dupla ou tripla (KAWAMURA, 1999).

Os materiais utilizados são dispostos no filtro de acordo com seu peso específico e densidade, bem como a quantidade de camadas presentes na estrutura do filtro. Um filtro de camada simples apresenta um meio filtrante, de camada dupla dois meios filtrantes e de camada tripla três meios filtrantes. A Figura 10 esquematiza a estrutura de um filtro e suas camadas. Além do meio filtrante, o filtro ainda apresenta uma camada suporte, composta por pedregulho ou cascalho, responsáveis por impedir que o meio filtrante seja levado para pela água no processo de filtração, bem como, por distribuir a água igualmente no filtro no processo de retrolavagem.

Figura 10 - Sistema de filtração de camada simples e dupla e suas respectivas divisões.



Fonte: Autora (2023).

De acordo com Seckler (2022) materiais como areia, antracito e carvão ativado granular são utilizados por apresentarem propriedades físicas de grande relevância na hidráulica do processo de filtração. Suas características de massa específica, área superficial específica e disposição de seus vazios intergranulares são de grande influência no processo. Por não apresentarem formato de esferas perfeitas, o desvio de suas irregularidades geométricas pode ser quantificado pelo parâmetro coeficiente de esfericidade. A Figura 11 apresenta uma representação de cada um destes materiais filtrantes.

Figura 11 - Representação dos materiais filtrantes: Areia, Carvão Antracito e Carvão ativado granular, respectivamente.



Fonte: SECKLER (2022).

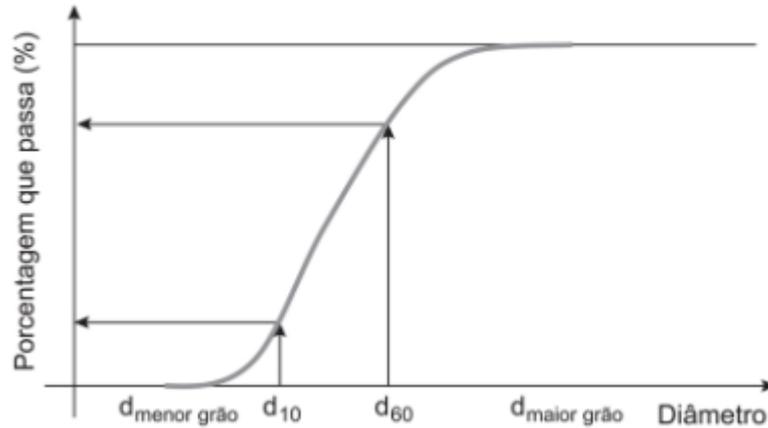
#### 2.2.5.2 Distribuição granulométrica

A granulometria dos materiais filtrantes é uma característica fundamental no desenvolvimento de filtro lento, bem como sua distribuição. Onde a distribuição e acomodação dos grãos gera a formação de vãos ou espaços vazios gerados pelas irregularidades de suas superfícies e pelo tamanho de cada grão.

A caracterização específica do meio filtrante utilizado através das análises granulométricas, possibilita a determinação do tamanho efetivo dos grãos e sua assiduidade de ocorrência nas faixas de diâmetro (DI BERNARDO, 2003; LIMA, LUZ, 2001).

Os meios filtrantes utilizados nos sistemas de filtração não apresentam características uniformes, portanto, algumas grandezas são empregadas para definir suas características granulométricas principais. A curva granulométrica típica (Figura 12) de um material filtrante usado em processos de filtração aborda os diâmetros dos grãos e sua respectiva passagem em peneiramentos (SECKLER, 2022).

Figura 12 - Curva granulométrica típica de um material filtrante.



Fonte: SECKLER (2022).

A partir da curva granulométrica pode ser definido o coeficiente de uniformidade (CU), dado pela divisão do valor encontrado por  $d_{60}$  (diâmetro do grão 60% passante) pelo  $d_{10}$  (diâmetro do grão 10% passante) (SECKLER, 2022). Os coeficientes maiores são aqueles mais fáceis de serem adquiridos e os menores os que mais inibem a penetração de impurezas. Para a filtração lenta recomenda-se coeficiente de uniformidade até 3, no entanto, para retrolavagens de filtros rápidos recomendam-se até 1,7 pela possibilidade de estratificação do meio, o que não é interessante para filtros descendentes (FUNASA, 2019).

Coefficientes de uniformidade baixos, normalmente menores que 5, indicam uma menor desuniformidade do corpo granular, desta forma propiciando uma maior profundidade de infiltração de impurezas no meio filtrante (WIECHETECK, 1996).

O diâmetro efetivo ( $d_{10}$ ) é um fator imprescindível no processo da filtração lenta, apresentando grande influência. São utilizados diâmetros efetivos menores devido ao aumento de eficiência no processo, porém sua utilização apresenta uma maior perda de carga no sistema quando comparado a diâmetros efetivos maiores (SOUZA et al., 2020).

De acordo com o manual da FUNASA (2019), algumas características são recomendadas no dimensionamento de filtros lentos retrolaváveis. Neste sentido, para o diâmetro efetivo recomenda-se o uso de 0,25 mm até 0,3 mm.

O diâmetro efetivo ( $d_{10}$ ) configura-se como o diâmetro da abertura da peneira que permite a passagem de 10% da amostra, quanto menor o  $d_{10}$ , melhor é a quantidade de água filtrada. Contudo, o coeficiente de uniformidade (CU) é definido como o intervalo de tamanho das partículas de igual classificação (DIOGO et al., 2010).

### 2.2.5.3 Porosidade

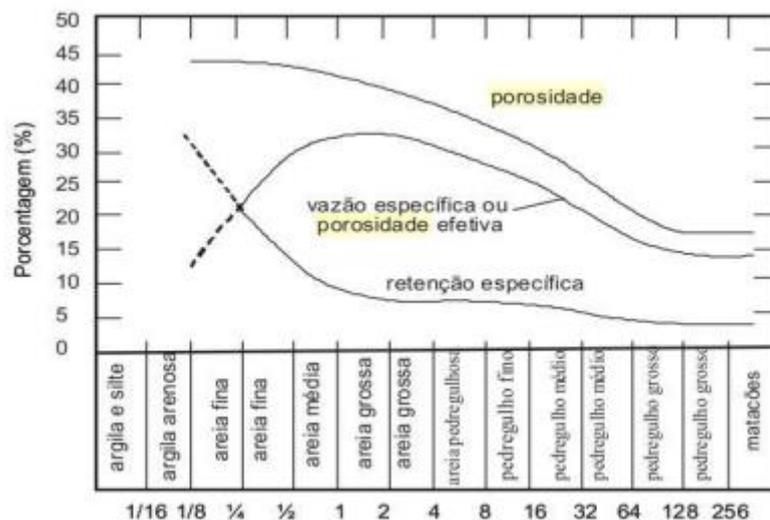
A porosidade dos meios filtrantes é dada pela relação entre o volume existente nos espaços vazios entre os grãos e o volume total do material. Considerando uma influência direta de perdas de carga, condutividade hidráulica e detenção particular no interior do meio filtrante. A relação do volume poroso de um filtro e a esfericidade dos grãos alocados em seu interior, é dada onde quanto maior o coeficiente de esfericidade menor será a porosidade do leito fixo (DI BERNARDO, 2003; TRUSSELL et al., 1999).

De acordo com Seckler (2019) quando os materiais filtrantes são dispostos na forma de meio filtrante, estes apresentam vazios intergranulares que são quantificados pelo parâmetro porosidade, que é definido como o volume de vazios intergranulares dividido pelo volume total do meio filtrante. Fator esse, que deve ser dimensionado no projeto de um sistema de filtração por apresentar grande influência no processo.

A porosidade pode ser classificada em duas formas, a porosidade total e a porosidade efetiva. A porosidade absoluta é a relação entre o volume total dos espaços vazios em uma amostra e o volume total dessa mesma amostra. Já a porosidade específica ou efetiva é a relação entre o volume dos poros interconectados e o volume total da amostra, sendo o mais importante no entendimento do processo de retenção (SILVA, 2014).

A Figura 13 - expressa a relação entre a porosidade de acordo com o tamanho médio do grão (granulometria do meio filtrante).

Figura 13 - Gráfico de correlação entre as porosidades absolutas e efetivas.



Fonte: SENS et al.(2006).

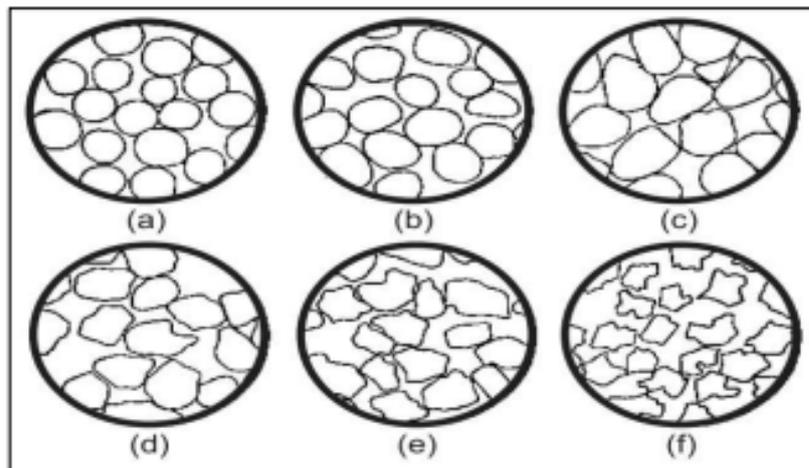
#### 2.2.5.4 Forma do Grão

As características físicas dos grãos no meio filtrante é dada pelo formato geométrico da sua superfície. Essa característica é fundamental para a eficiência da filtração. Os grãos que apresentam formato geométrico muito irregulares oferecem uma melhor performance de filtração, enquanto grãos de formato mais circular com superfícies lisas oferecem melhor desempenho durante a limpeza do meio (DI BERNARDO, SABOGAL PAZ, 2008; DI BERNARDO, 2003).

Um indicador para a forma do grão é o coeficiente de esfericidade. Este define a porção esférica da superfície dos grãos a partir do seu formato esférico imperfeito. É definido como sendo a área de uma esfera perfeita de igual volume da partícula, dividido pela área superficial da partícula (DI BERNARDO, 2003; WIECHETECK, 1996). O antracito brasileiro possui coeficiente de esfericidade entre 0,55 e 0,70 (DI BERNARDO, 2005). Quanto mais próximo de 1,0, mais próxima a uma esfera o grão parece.

Os grãos derivados de fontes naturais dificilmente possuem características de superfície com formato perfeito, variando de formatos arredondados, agudos, angulares, esféricos, desgastados a triturados. Esses grãos podem ser classificados (Figura 14) em diferentes formatos de grãos e seus respectivos coeficientes de esfericidade, sendo Esférico (a), Arredondado (b) Desgastado, (c) Agudo (d), Angular (e) e Triturado (f) (DI BERNARDO & SABOGAL PAZ, 2008).

Figura 14 - Formato de grãos de um meio filtrante.



Fonte: Di Bernardo (2003).

#### 2.2.5.5 Densidade

A densidade do material filtrante é dada pelo resultado do cálculo de sua massa específica, onde a massa total do material filtrante é dividida pelo seu volume total. Assim como a porosidade, esse parâmetro é importante nos aspectos de perda de carga e fluxo hidráulico interno no meio filtrante (DI BERNARDO, 2003).

Os meios filtrantes que apresentam preenchimento livre, ou seja, sem compactação entre os grãos, possuem menor densidade e conseqüentemente uma maior formação de espaços vazios entre os grãos. Se a forma de acomodação do meio se torna menos ajustada, o fluxo de escoamento e sedimentação de partículas é facilitado devido à menor resistência de passagem existente (GIBSON et al., 2009; DI BERNARDO, SABOGAL PAZ, 2008).

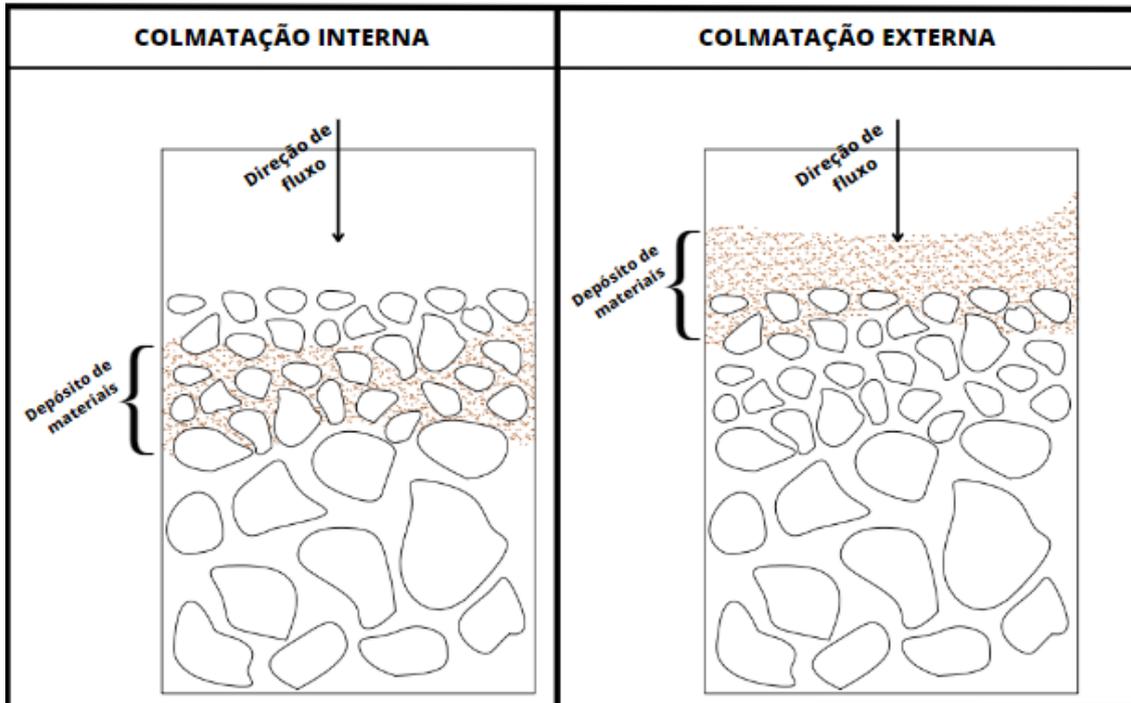
#### 2.2.5.6 Colmatação do meio filtrante

A colmatação do meio filtrante é um processo natural dos sistemas de filtração. O entendimento deste processo e as características que o influenciam é essencial para manter a eficiência da filtração. Este processo é dado a partir da redução de volume total dos poros, à medida que ocorre a deposição de materiais e impurezas presentes na água bruta, o que, por sua vez, afeta diretamente a condutividade hidráulica do meio (SOARES, 2015).

A colmatação está diretamente associada à diversos fatores de constituição do meio filtrante, bom como com a granulometria tanto do meio filtrante, quanto nos materiais e impurezas filtradas, existentes de forma interna ou externa no processo. O acúmulo de material de maior diâmetro na camada superficial do filtro aumenta a densidade, reduzindo a condutividade hidráulica e causando entupimento externo (colmatação externa). Leitos filtrantes com espaços de poros maiores promovem a migração de partículas menores para a profundidade, resultando um entupimento interno (colmatação interna) (SOARES & PIZZOLATTI, 2019; GRACE et al., 2016; GUNKEL et al., 2009; BAVEYE et al., 1998).

A Figura 15 expressa o desenvolvimento da colmatação interna e externa, de acordo com a disposição do depósito de materiais em suspensão no material filtrante.

Figura 15 - Ação da colmatação interna e externa no meio filtrante.



Fonte: Autora (2023).

De acordo com Schubert (2006) e Soares (2015) a colmatação é um processo gerado pela percolação contínua da água superficial, que contém partículas orgânicas e inorgânicas em suspensão, precipitação química, bem como processos biológicos responsáveis pela liberação de gases.

Alguns autores dividem os processos de colmatação em 4 categorias, sendo elas a colmatação física, química, biológica e mecânica (MARTINS, 2021; SOARES, 2015; RINCK-PFEIFFER et al., 2000).

#### 2.2.5.7.1 Colmatação Química

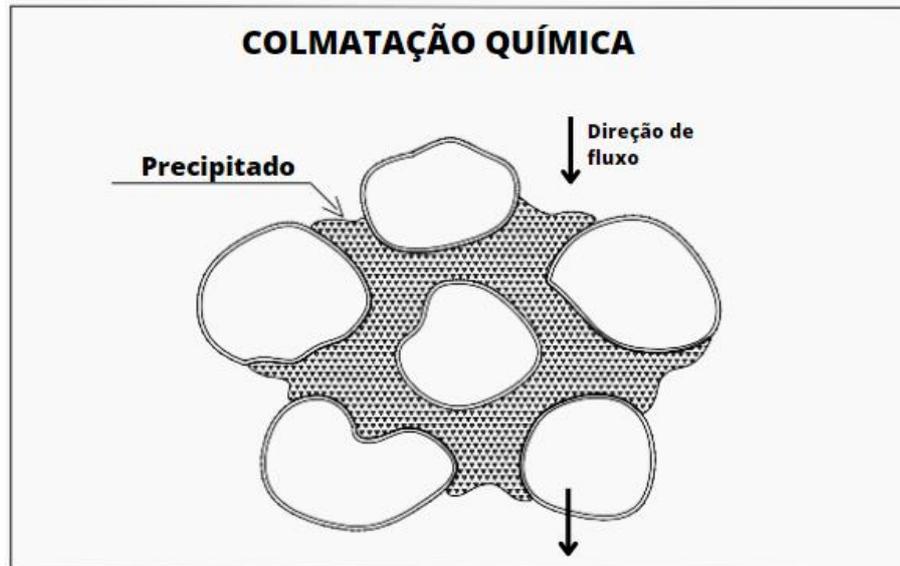
A colmatação química pode ser observada devido ao fluxo de fluido, ou mesmo a obstrução parcial através de meios porosos, causada principalmente pela precipitação ou acúmulo de produtos químicos nos meios, especialmente quando as condições de pH, temperatura, oxigênio são favoráveis (SOARES, 2015; WANG et al., 2014).

A colmatação química tem sua causa associada à diversas ocorrências, dentre elas composição natural do fluido reações químicas ocasionadas pela interação entre o material

filtrante e o fluido, produtos resultantes da atividade microbiológica e acréscimo de compostos químicos à água bruta (WANG et al., 2014).

A Figura 16 expressa a ação da colmatação química em um meio filtrante, apresentando a reação de precipitações atuantes no processo.

Figura 16 - Ação da Colmatação química no meio filtrante.



Fonte: Autora (2023).

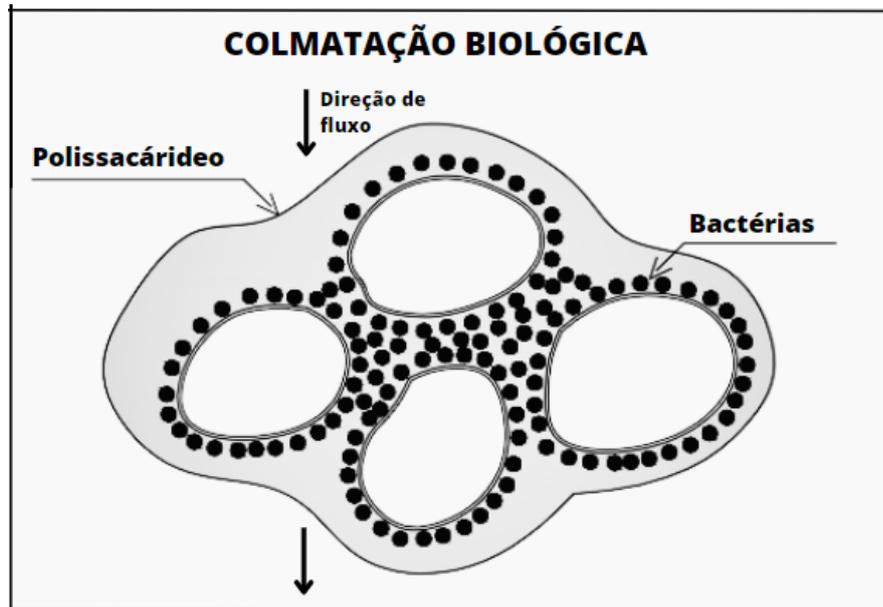
#### 2.2.5.6.2 Colmatação biológica

A colmatação biológica é observada principalmente logo nas camadas mais superficiais de leitos filtrantes, onde há maior retenção e acúmulo de sólidos, tornando propenso o desenvolvimento de microrganismos como protozoários, algas, fungos e bactérias. (SOARES & PIZZOLATTI, 2019; GRACE et al., 2016; BAVEYE et al., 1998).

O processo de formação da camada biológica tem seu início atrelado ao início da alimentação do sistema, propiciando a biodigestão de compostos orgânicos e a bioacumulação na região de contato entre o meio filtrante e o fluido (HISCOCK, GRISCHEK, 2002). A colmatação biológica também opera como agente purificador, sendo responsável pela eliminação de contaminante patogênicos, especialmente em sistemas de baixa taxa de filtração (DASH et al., 2008; BRITO et al., 2005).

A Figura 17 expressa a ação da colmatação biológica em um meio filtrante, apresentando o crescimento biológico e a formação de polissacarídeos no processo.

Figura 17 - Ação da Colmatação Biológica no meio filtrante.



Fonte: Autora (2023).

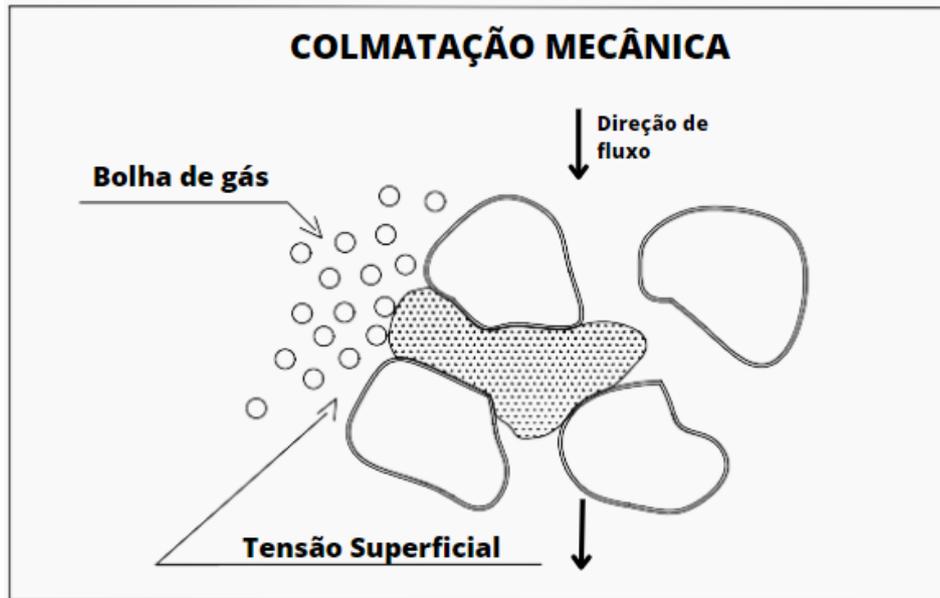
#### 2.2.5.6.3 Colmatação mecânica

A colmatação mecânica está vinculada ao aprisionamento de bolhas de gases ou ar no interior de um meio poroso que, por sua vez, barram ou redirecionam a passagem do fluído, podendo ocasionar a diminuição da condutividade hidráulica (SOARES, 2015). O aprisionamento de bolhas de ar pode ser causado pela má saturação do meio, especialmente no momento de concepção do sistema, quando não há a liberação e dissolução progressiva dos gases durante o processo de preenchimento. Ou ainda quando ocorre a alimentação inicial do sistema através da inserção abrupta de uma grande quantidade de água preenchendo o meio antes que ocorra a liberação completa dos gases (BAVEYE et al., 1998; ALLISON, 1947; CHRISTIANSEN, 1944). Lozada et al. (1994) apontam que as obstruções também podem ser vinculadas aos produtos gasosos originados da ação microbiana, como por exemplo as atividades metanogênicas e a decomposição de compostos nitrogenados (desnitrificação).

Esta acontece na formação e aprisionamento dos gases normalmente formados pela atividade metabólica microbiana, o que possibilita diminuir a condutividade elétrica em função da presença de gases nos espaços porosos. Este fenômeno é atribuído ao bloqueio dos poros, devido a presença de bolhas de metano produzido por bactérias em condições anaeróbicas, o que pode ocorrer também pela desnitrificação com a produção de gás de nitrogênio que dão origem a bolhas de gás (LOZADA et al., 1994).

A Figura 18 expressa a ação da colmatação mecânica em um meio filtrante, apresentando a ação das bolhas de gás atuantes no processo.

Figura 18 - Ação da Colmatação Mecânica no meio filtrante.



Fonte: Autora (2023).

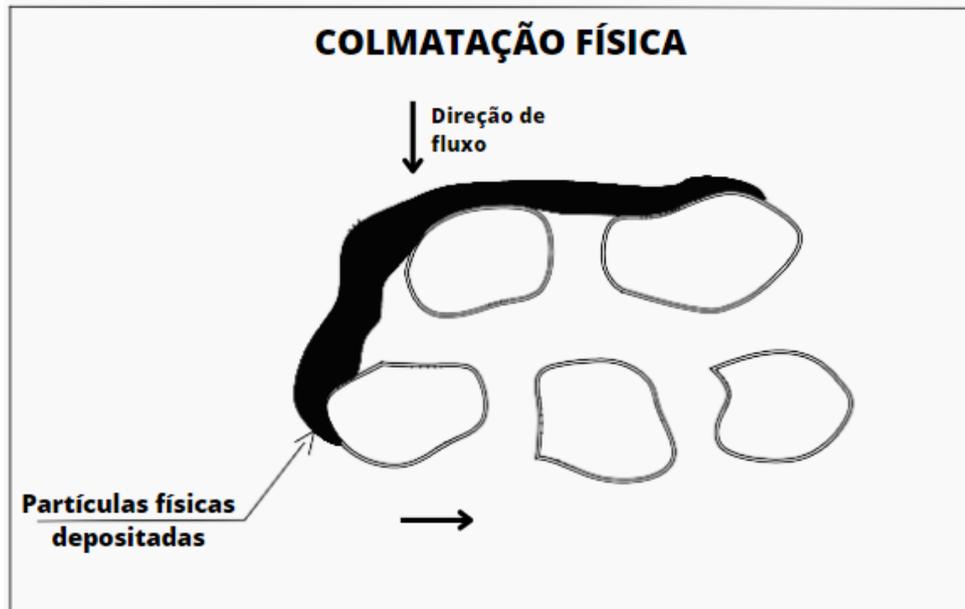
#### 2.2.5.6.4 Colmatação física

O processo de colmatação ocasionado por sedimentos finos em suspensão, é denominado de colmatação física, processo considerado importante pela agressividade na redução da condutividade hidráulica do meio poroso (Soares, 2015; Rosenberry & Pitlick, 2009).

A retenção de sedimentos finos nas primeiras camadas do leito filtrante, obstruindo a passagem de água entre espaços vazios de um meio granular, é tida como colmatação física (MARTINS, 2021; SOARES, PIZZOLATTI, 2019; ROSENBERY; PITLICK, 2009). Quando a mesma ocorre principalmente abaixo e no interior da porção onde se desenvolve o biofilme, pode afetar o equilíbrio de existência de microrganismos e reduzir significativamente a condutividade hidráulica no meio. Além de ter influência na porosidade, densidade, uma vez que a estrutura da camada de sedimentos pode ser afetada e também causar alterações na perda de carga do sistema (SCHUBERT, 2002; ROSENBERY, PITLICK, 2009).

A Figura 19 expressa a ação da colmatação física em um meio filtrante, apresentando a ação da suspensão de sólidos no processo de filtração .

Figura 19 - Ação da Colmatação Física no meio filtrante.



Fonte: Autora (2023).

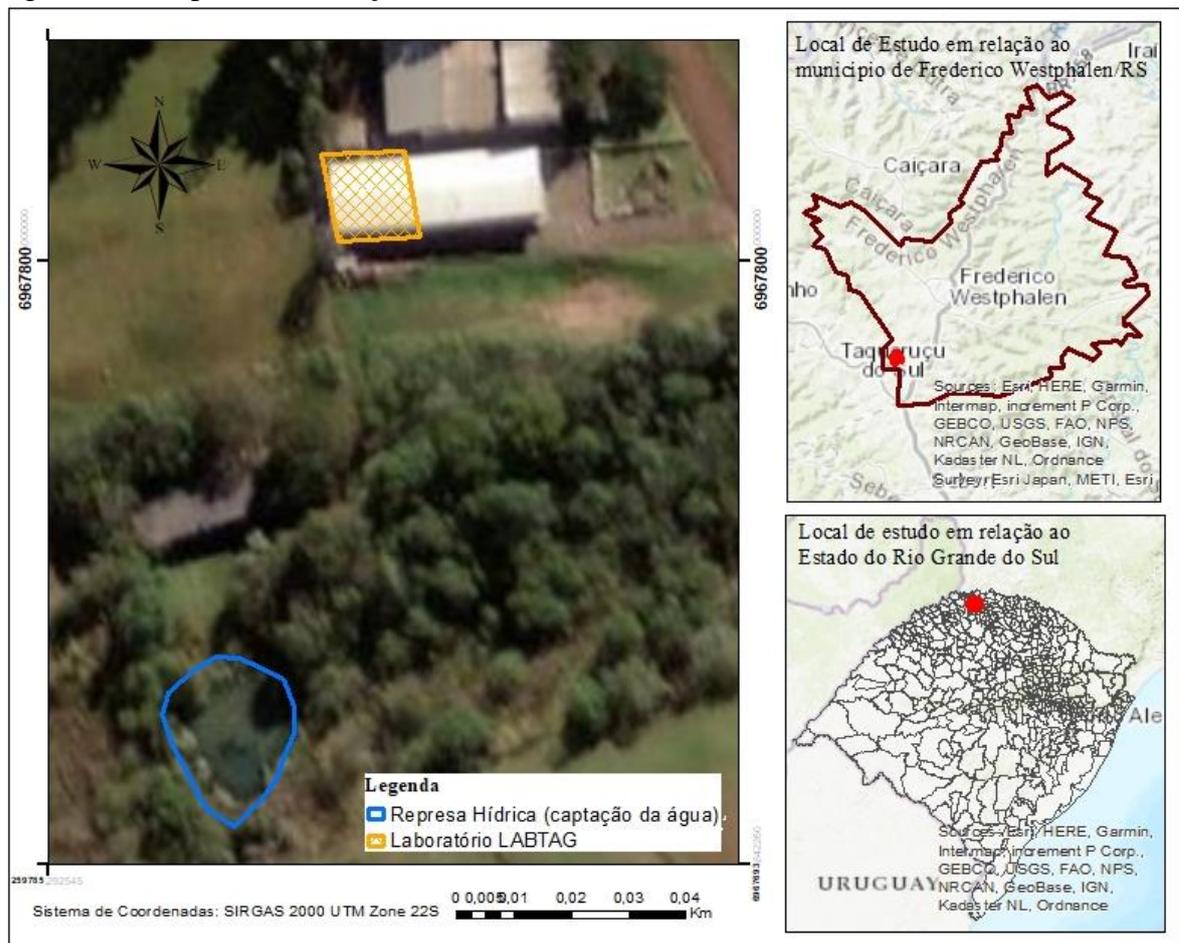
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 LOCAL DO ESTUDO

O estudo foi realizado no Estado do Rio Grande do Sul (RS), Brasil, no município de Frederico Westphalen, noroeste do Estado, na Universidade Federal de Santa Maria – *Campus Frederico Westphalen* ( $27^{\circ}21'33''S$ ;  $53^{\circ}23'40''O$ ) (Figura 20). O município possui uma população de 32.627 habitantes (IBGE, 2022). Seu clima é temperado com temperatura média de  $6^{\circ}C$  no inverno e  $30^{\circ}C$  no verão (IMET, 2022).

Nas dependências da Universidade Federal de Santa Maria - *Campus Frederico Westphalen*, junto ao laboratório de Tratamento de água (LABTAG), foi construído um sistema piloto de filtração lenta retrolavável. O período de estudo, que foi de 14 meses, foi caracterizado pela concepção do sistema, dimensionamento, execução, monitoramento da qualidade da água e hidráulica do sistema, bem como o referido trabalho de pesquisa e conclusão.

Figura 20 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autora (2023).

### 3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO LENTA RETROLAVÁVEL

O sistema de filtração lenta retrolavável foi dimensionado seguindo as metodologias desenvolvidas pelo “Caderno Técnico de Projeto e Operação de Filtros Lentos Retrolaváveis para o Tratamento de Água para Abastecimento” (FUNASA, 2019), bem como do livro de “*Tratamento de Água - Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento*” (Seckler, 2017). O sistema foi projetado para operação contínua, funcionando em tempo integral a partir do primeiro dia de operação. Após dimensionamento do filtro, montagem, análise e preparação do meio filtrante, a operação iniciou no dia 30 de março de 2023 e finalizou no dia 06 de julho de 2023, totalizando 91 dias.

#### 3.2.1 Captação da água bruta

A água utilizada no estudo proveio de uma pequena represa localizada no *Campus* da Universidade. A represa possui uma área de aproximadamente 264 m<sup>2</sup> e profundidade de 2 metros, e está localizada a cerca de 90 metros do laboratório de Tratamento de Água (LABTAG). A Figura 21 apresenta a localização do LABTAG e do manancial superficial.

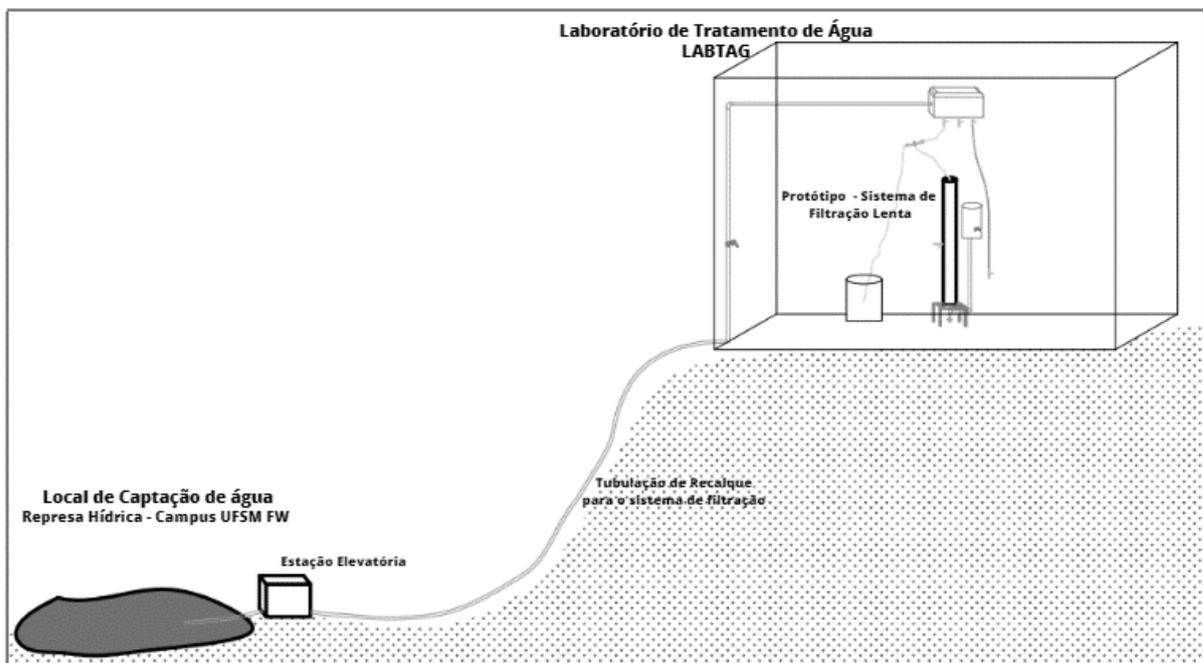
Figura 21 - Localização das áreas de estudo do referido trabalho.



Fonte: Google Earth (2023).

Por apresentar diferença de altitude entre o local de captação da água bruta e o laboratório (LABTAG), onde foi realizada a montagem do protótipo de sistema de filtração lenta, foi necessário utilizar uma estrutura capaz de direcionar a água a um reservatório e posteriormente ao sistema piloto. Esta estrutura, já presente no *Campus*, conta com uma estação elevatória capaz de bombear a água e suprir as necessidades presentes no local. A Figura 22 apresenta um esquema ilustrativo sobre as áreas de estudo deste trabalho, em relação as condições topográficas naturalmente presentes.

Figura 22 - Esquema estrutural do Sistema de Filtração Lenta proposto.



Fonte: Autora (2023).

A estação de recalque conta com uma bomba centrífuga Schneider (BCR-2010, 1 cv). A parte da sucção possui uma válvula de pé com crivo flutuante, para captar a água sobrenadante, e um sistema de tubulação de DN 32, conforme Figura 23. O recalque foi também utilizada tubulação de DN 32.

Figura 23 - Sistema de captação de água bruta.



Fonte: Autora (2023).

### 3.2.2 Materiais utilizados para a montagem do sistema de filtração

O sistema de filtração lenta retrolavável proposto por este estudo, teve como objetivo demonstrar a eficiência e a necessidade do tratamento de águas de abastecimento para pequenas comunidades rurais. Para tanto, apostou-se em uma estrutura simples, capaz de apresentar pouco investimento, manutenção e operação.

Neste sentido, a estrutura piloto foi composta por materiais hidráulicos de fácil acesso, como tubulações e conexões, além de alguns materiais de apoio. A Tabela 1 apresenta a relação dos materiais utilizados na construção do sistema.

Tabela 1: Descrição dos materiais utilizados na construção do sistema de filtração lenta.

Sistemas constituintes	Descrição dos Materiais
Sistema de entrada de água bruta	Caixa de plástico de 20 L
	Registro Esfera $\frac{3}{4}$ (3 un.)
	Mangueira (20 mm) (2 m)
	Mangueira (10 mm) ( 1 m)
	Toco de tubo (DN 25) (calha dosadora)
	Seringa descartável 5 ml (calha dosadora)
Corpo do filtro	Mangueira (5 mm) (calha dosadora) (1 m)
	Tubulação para esgoto (DN 100) (2 m)

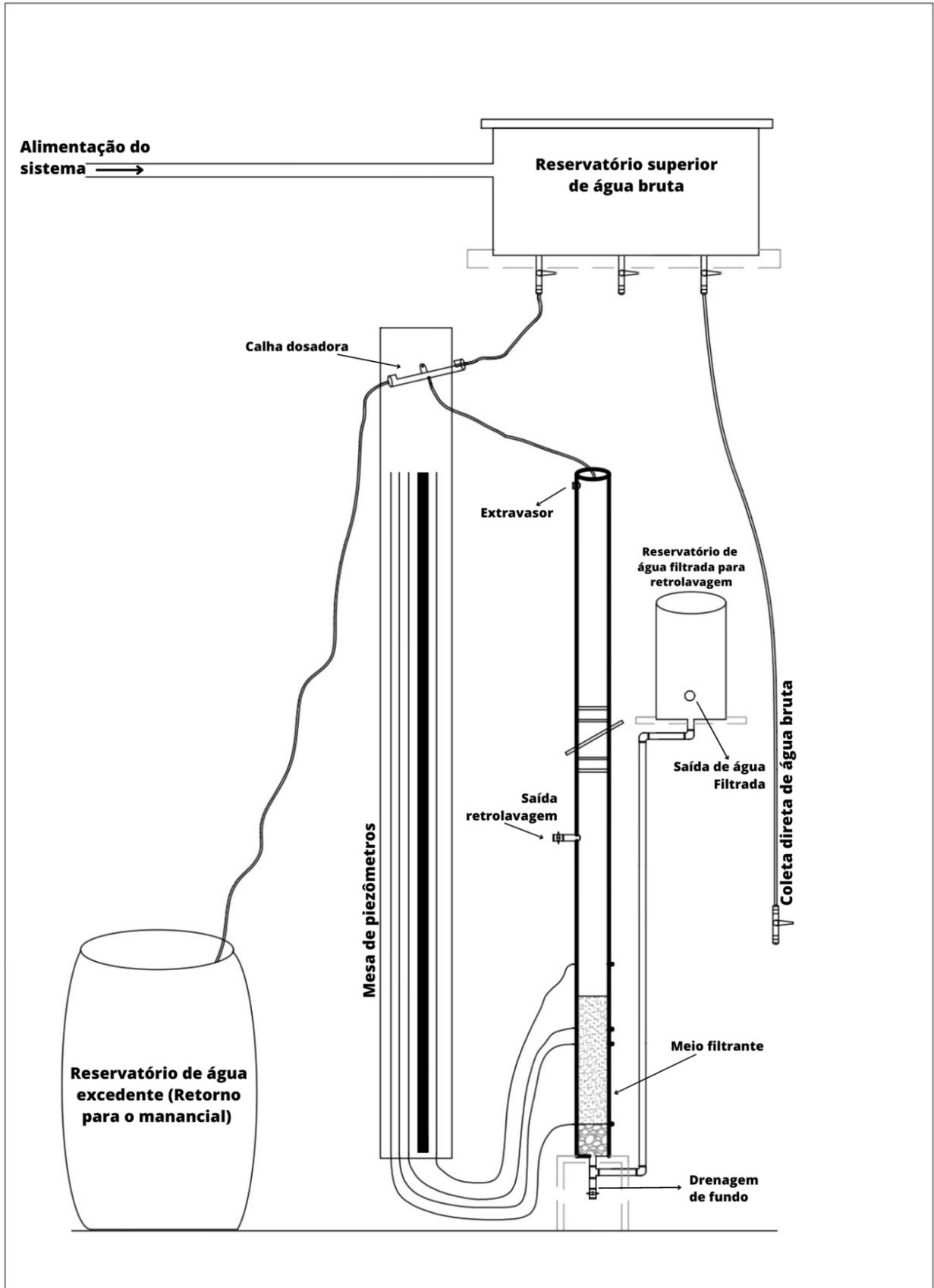
	Curvar 45° para esgoto (DN 100) (1 un.)
	CAP - esgoto (DN 100) (2 un.)
	Anel de borracha (DN 100) (4 un.)
Sistema de limpeza (retrolavagem)	Registro de esfera (DN 25) (1 un.)
	Mangueira de (20 mm) (1 m)
	Saídas de equipo de soro hospitalar – saída livre (6 un.)
Sistema de piezômetros	Saídas de equipo de soro hospitalar – saída rosqueável (6 un.)
	Mangueira transparente (10 mm) (4 un.)
	Tábua de madeira
	Trena de medição
	Tubo soldável (DN 25) (1,5 m)
	Registro de esfera (DN 25) (1 un.)
	Tê soldável 90° (DN 25) (1 un.)
Sistema de saída de água filtrada	Curva soldável 90° (DN 25) (3 un.)
	Flange de entrada (DN 25) (3 un.)
	Lixeira comum 10 litros (reservatório)
	Torneira PVC ½”
	Torneira PVC 5/8”

Fonte: Autora (2023).

A montagem da estrutura baseou-se em modelo simples, para funcionamento por conduto livre, realizando a disposição dos materiais anteriormente descritos. Posteriormente à montagem, foi realizado um teste de estanqueidade para garantir um funcionamento adequado, evitando vazamentos na estrutura.

De forma geral, após a chegada da água bruta, a mesma era direcionada para o reservatório instalado acima do filtro. Este compreendia três saídas de água, sendo a saída 1 direcionada ao filtro, a saída 2 fechada (sem uso) e a saída 3 para captação direta de água bruta. A saída de água 1 compreendia um sistema de tubulação direcionando a água para uma calha dosadora, capaz de regular a vazão. Por gravidade a água bruta percola o meio filtrante, se direcionando ao reservatório de água filtrada, localizado ao lado do filtro, pelo princípio dos vasos comunicantes. A retrolavagem é acionada abrindo a válvula “saída retrolavagem”. A Figura 24 expressa o esquema do sistema de filtração lenta, desenvolvido neste estudo, abordando os seus componentes principais.

Figura 24 - Esquema do sistema desenvolvido pelo estudo.



Fonte: Autora (2023).

### 3.2.3 Controle operacional do sistema

#### Chegada da água bruta e controle de vazão do sistema

Com a chegada da água bruta da estação elevatória, a mesma foi direcionada para um reservatório retangular de plástico (tanque de amortecimento), com capacidade de 20 litros. Este direciona água bruta para três saídas, todas compostas de controladores de nível, destinando vazões igualitárias, mas não precisas, para todas as saídas. A saída 1 destina água diretamente ao sistema de filtração. A saída 2 apresentou-se inoperante durante o estudo, e a saída 3 foi utilizada para coleta direta da água bruta, conforme Figura 25.

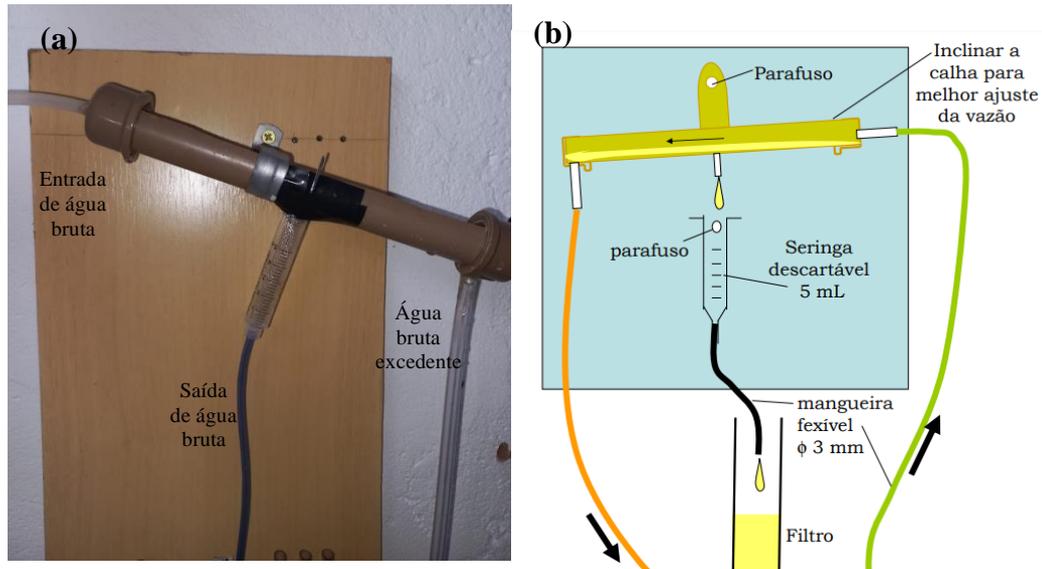
Figura 25 - Reservatório superior de água bruta (tanque de amortecimento).



Fonte: Autora (2023).

A saída 1 do reservatório superior de água bruta é direcionado para o filtro lento, porém um controle preciso da vazão de entrada é um parâmetro importante para o monitoramento do filtro. Assim, foi instalada uma calha dosadora conforme modelo proposto pelo Professor Ramon Lucas Dalsasso (ENS / UFSC), para a dosagem da vazão desejada no filtro (Figura 26). Esta recebe água do reservatório superior e destina apenas a quantidade desejada, de acordo com a regulação de sua inclinação. A vazão do sistema foi aferida diariamente pelo método volumétrico. A água sobressalente era encaminhada para um reservatório inferior, que posteriormente retornava para o manancial superficial.

Figura 26 - Sistema de dosagem de vazão de entrada no filtro lento.



Legenda: (a) Calha dosadora instalada no sistema de filtração lenta.

(b) Modelo de calha dosadora proposto pelo Professor Ramon Lucas Dalsasso (ENS / UFSC);

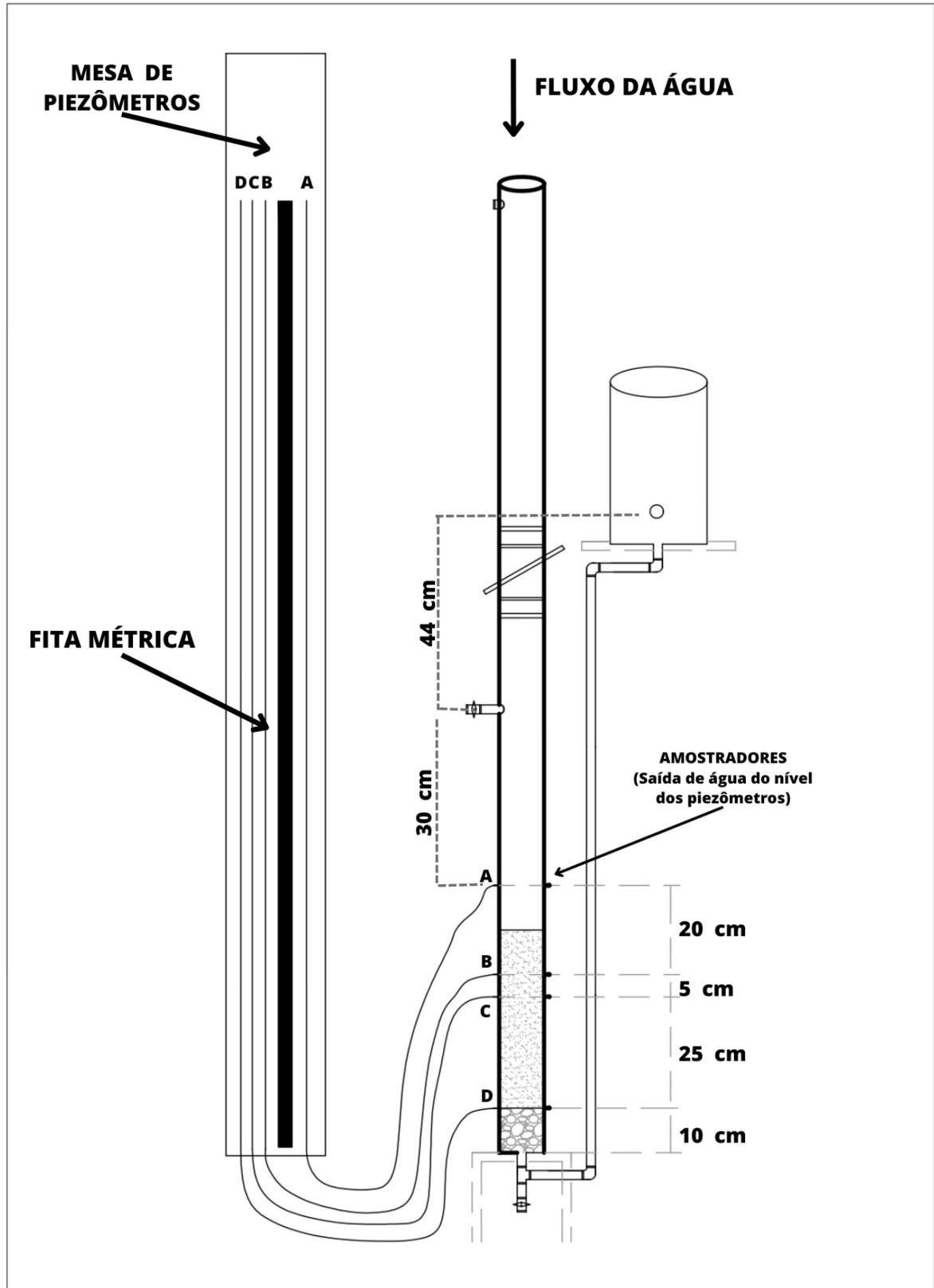
Fonte: Autora (2023).

### **Controle da perda de carga**

A medição da perda de carga foi realizada pela instalação de mangueiras flexíveis (10 mm) conectadas ao longo do corpo do filtro. As mesmas foram conectadas à uma mesa de medição piezométrica, onde era realizada a leitura da pressão piezométrica. A Figura 27 representa a instalação do corpo do sistema de filtração, de piezômetros e coleta de água filtrada.

O piezômetro “A” foi utilizado para acompanhar a carga hidráulica do sistema. O piezômetro “B” foi instalado à uma profundidade de 10 cm da superfície do meio filtrante. O piezômetro “C” foi localizado à uma profundidade de 15 cm, e o piezômetro “D” foi instalado à uma profundidade de 40 cm da superfície do meio filtrante.

Figura 27 - Representação da constituição dos piezômetros no sistema de filtração.



Fonte: Autora (2023).

Para a análise concreta da perda de carga, foram realizados cálculos através da diferença da leitura dos piezômetros acima da camada de filtração e os instalados entre camadas do meio filtrante. A Tabela 2 apresenta as fórmulas utilizadas para o cálculo diário das perdas de carga do sistema. A partir do cálculo é possível indicar a resistência exercida pelo meio filtrante no fluxo de filtração da água.

Tabela 2 - Cálculos realizados para análise da perda de carga no sistema.

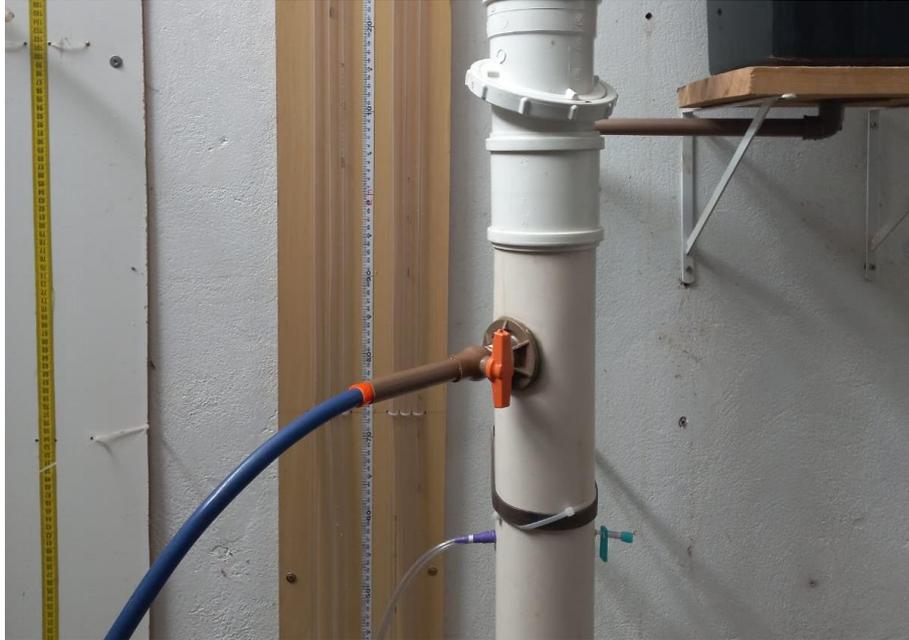
<b>Piezômetros</b>	<b>Fórmula</b>
A – B	$\Delta h = \text{leitura piezômetro A} - \text{piezômetro inferior B}$
B – C	$\Delta h = \text{leitura piezômetro B} - \text{piezômetro inferior C}$
C – D	$\Delta h = \text{leitura piezômetro C} - \text{piezômetro inferior D}$
A - D	$\Delta h = \text{leitura piezômetro A} - \text{piezômetro inferior D}$

Fonte: Autora (2023).

### **Limpeza do meio filtrante**

Com processo natural de colmatagem do meio filtrante, ocorre o entupimento do filtro, necessitando realizar o processo de limpeza, através da retrolavagem. Assim, quando a água no interior do filtro atingia sua carga hidráulica máxima (76 cm acima da saída da água filtrada), conforme demonstra a Figura 27, era necessário realizar a abertura da válvula instalada no corpo do filtro (DN 25) (Figura 28). Com isso, a água filtrada presente no reservatório realiza o fluxo contrário da filtração, passando pela camada suporte e posteriormente pelo meio filtrante. Assim, há a fluidificação do meio filtrante e, conseqüentemente, limpeza do mesmo. O tempo de lavagem utilizado foi de 4 minutos, seguindo as orientações de dimensionamento disponibilizadas pelo manual da FUNASA (2019), bem como, referenciadas pelos autores Pizzolatti (2014), Souza (2020) e Emmendoerfer (2006).

Figura 28 - Sistema de retrolavagem instalado no protótipo.

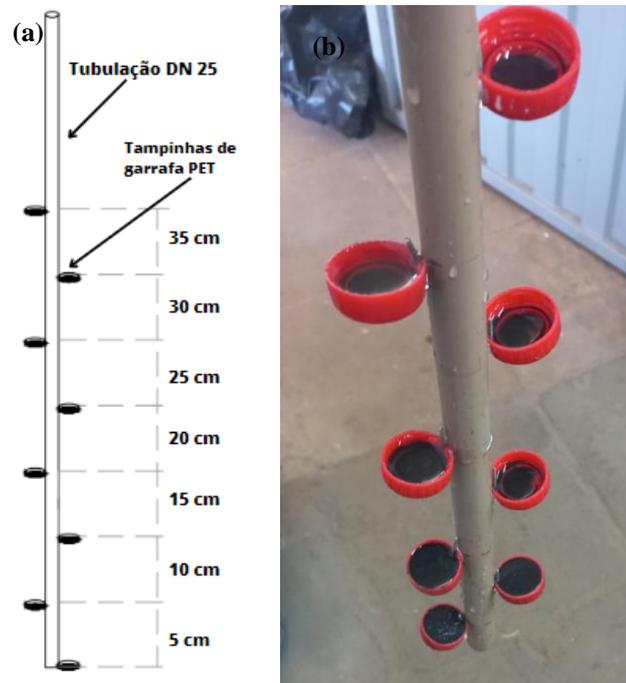


Fonte: Autora (2023).

### **Verificação da expansão do meio filtrante durante a retrolavagem e eficiência de limpeza**

Durante a limpeza do filtro, alguns parâmetros operacionais são levados em consideração, como a verificação da expansão do meio filtrante durante a retrolavagem. Neste sentido, ao abrir a válvula e iniciar a retrolavagem foi inserido no interior do filtro uma espécie de trena (Figura 29), composta por uma tubulação de água DN 25 e tampas de garrafa PET, sendo estas dispostas ao longo do tubo de 5 em 5 centímetros. Com isso, foi avaliada a altura de expansão do meio fluidificado durante a retrolavagem.

Figura 29 - Aferição da altura da camada filtrante fluidificada durante a retrolavagem.



Legenda: (a) demonstração esquemática; (b) equipamento em escala real.

Fonte: Autora (2023).

Durante a retrolavagem também foi avaliada a eficiência de limpeza do meio filtrante. Assim, na saída da água de lavagem foram coletadas, em Beckers e a cada 10 segundos, amostras deste fluído, possibilitando posteriormente analisar e entender a dinâmica de limpeza do meio filtrante através de análises de turbidez.

Figura 30 - Verificação da eficiência de limpeza do filtro durante a retrolavagem.



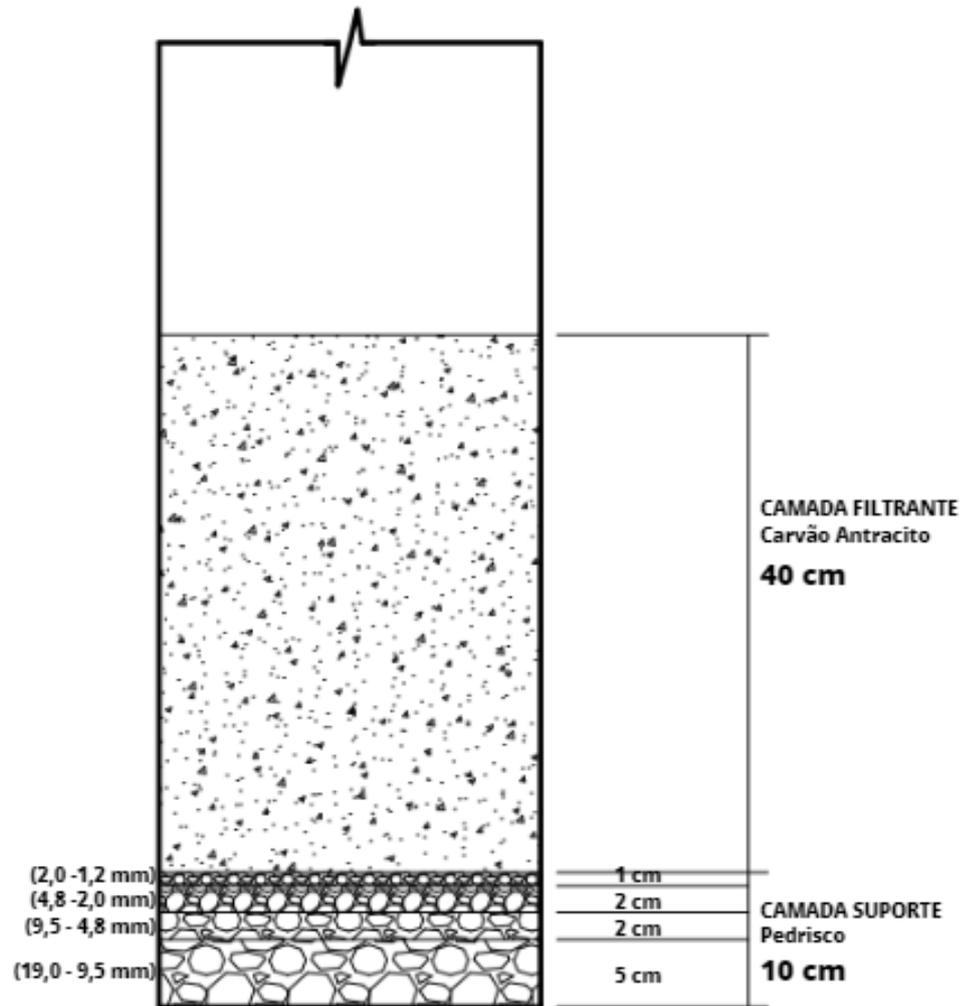
Fonte: Autora (2023).

### 3.3 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FILTRANTE

#### **Análise granulométrica**

O referido estudo baseou-se na perspectiva de utilização de um material filtrante (camada simples), composta por carvão antracito. A espessura de meio filtrante adotada foi de 40 cm, conforme orientações do manual de filtros lentos, desenvolvido pela FUNASA (2019), onde indica uma espessura de 40 a 60 cm de camada filtrante no filtro. Além do uso de uma camada suporte de 10 cm (pedrisco), dado também indicado pela FUNASA (2019), onde estabelece valor máximo de espessura de 20 cm (Figura 31), valores também evidenciados pelos autores Pizzolatti (2014), Souza (2020) e Emmendoerfer (2006).

Figura 31 - Representação da estrutura interna filtrante do sistema.



Fonte: Autora (2023).

A camada suporte baseou-se na composição de diferentes diâmetros, a fim de impedir de impedir a fuga de material filtrante durante a filtração, e promover uma distribuição uniforme de água para lavagem. A constituição dos diferentes diâmetros da camada suporte se deu de forma gradativa, apresentando diâmetros maiores na parte inferior, e diâmetros menores na parte superior do filtro, conforme expresso na Tabela 3 e Figura 31.

Tabela 3 - Composição granulométrica da camada suporte.

Camada	Diâmetro (mm)	Espessura (cm)
1	19,0 - 9,5	5,0
2	9,5 - 4,8	2,0
3	4,8 - 2,0	2,0
4	2,0 - 1,2	1,0

Fonte: Autora (2023).

A camada filtrante foi composta por carvão antracito. Este material é largamente utilizado em sistemas de filtração, devido à sua eficácia na remoção de impurezas da água, por seu formato geométrico singular. Além disso, sua baixa massa específica, quando comparada ao da areia, permite um menor volume de água para lavagem. Também, o reservatório de água para lavagem é posicionado em cota menor. Com isso, além da economia de água filtrada para limpeza do filtro, há uma aceleração do processo de produção no pós-lavagem do filtro.

A preparação do material consistiu na sua limpeza e caracterização granulométrica. Primeiramente, baseada na massa específica do material e no volume necessário para 40 cm de meio filtrante, foi calculada massa necessária para o estudo. Na preparação deste material, que foi doado pela empresa Rio Deserto, foi necessário realizar a moagem dos grãos para adequação aos diâmetros desejados. A moagem foi realizada com um Picador Forrageiro Agrícola com Motor Peneira de 1,5cv e 220v Tf2, da marca Garthen, disponível nas dependências do próprio *Campus*.

A fim de garantir que o material filtrante estivesse em condições adequadas para a aplicação no sistema, foi realizada a lavagem com água corrente retirando qualquer substância indesejada. Posteriormente foi realizada a secagem do material diretamente com sol incidente.

Por fim, para adequação das granulometrias desejadas, o meio filtrante foi submetido à um processo de peneiramento, seguindo as normas especificadas na NBR 6457 (ABNT, 1986) e NBR7181 (ABNT, 1984). O peneiramento consistiu no uso de peneiras Bertel e um agitador eletromagnético de peneiras, por aproximadamente 20 minutos (LINKLAB Digital). As peneiras utilizadas foram as 10, 12, 16, 18, 20, 30, 40, 60, 70, 100, 200 e 270 e fundo, que correspondem aos diâmetros de 2,0 mm, 1,70 mm, 1,18 mm, 1,0 mm, 0,85 mm, 0,60 mm, 0,42 mm, 0,25 mm, 0,20 mm, 0,15 mm, 0,075 mm, 0,053 mm e fundo. Por fim, o material peneirado foi pesado através de uma balança de bancada (PRIX 9094 Plus) (Figura 32(a) e Figura 32(b)).

Figura 32 - Peneiramento e separação granulométrica do material filtrante.



Descrição: (a) Peneiramento em peneiras Bertel e um agitador eletromagnético de peneiras; (b) Material filtrante peneirado e separado de acordo com suas características granulométricas.

Fonte: Autora (2023).

Com o material peneirado e a divisão granulométrica realizada, foi possível constituir a curva granulométrica do meio filtrante, através de características pré-definidas de proporções ideais para cada tamanho de grão. Com o peso adequado, já estipulado, para a constituição do 40 cm de meio filtrante, as informações do material constituíram a Tabela 4, base da curva granulométrica.

Tabela 4: Características do material filtrante por composição granulométrica.

Nº ABNT	Diâmetro da peneira (mm)	Peso da peneira (g)	Peso da peneira + amostra (g)	Massa retida (g)	% retida simples	% retida acumulada	% passante acumulada
10	2,000	419	419,000	0,000	0,00	0,00	100,00
12	1,700	339	339,002	0,002	0,09	0,09	99,91
16	1,180	341	341,007	0,007	0,30	0,39	99,61
18	1,000	342	342,005	0,005	0,22	0,61	99,39
20	0,850	367	367,023	0,023	1,00	1,61	98,39
30	0,600	323	323,189	0,189	8,22	9,83	90,17
40	0,425	321	322,633	1,633	71,00	80,83	19,17

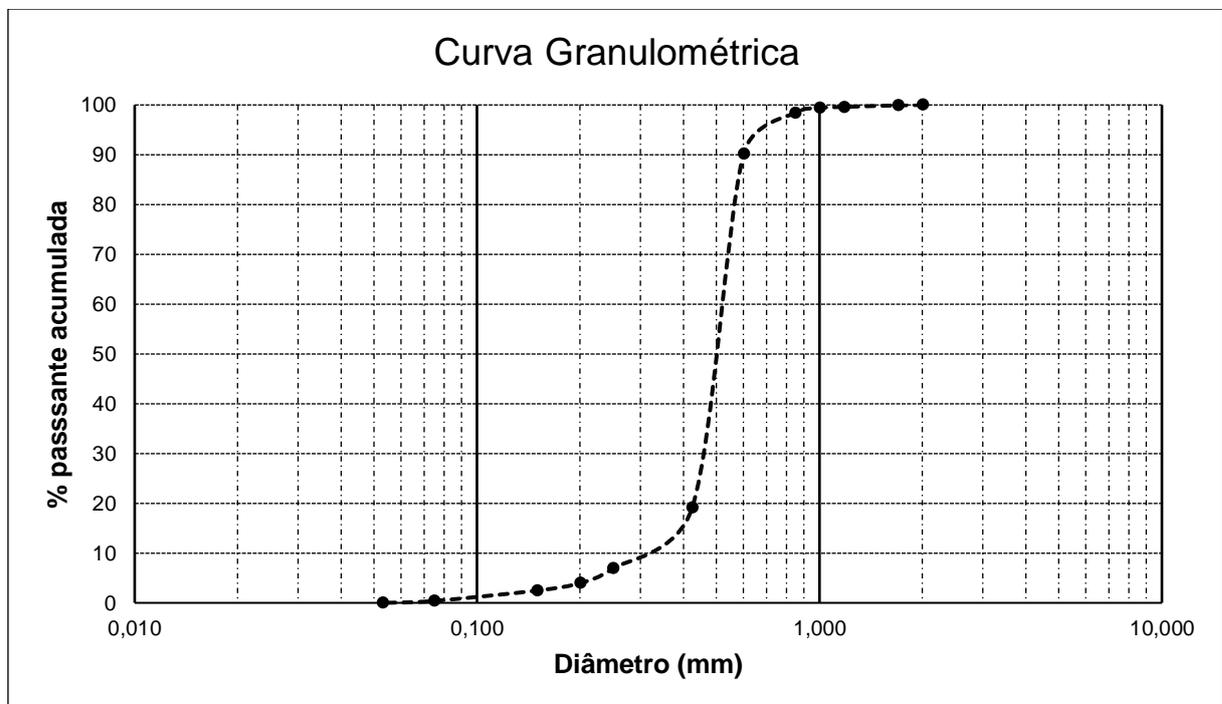
<b>60</b>	0,250	322	322,281	0,281	12,22	93,04	6,96
<b>70</b>	0,200	248	248,069	0,069	3,00	96,04	3,96
<b>100</b>	0,150	308	308,034	0,034	1,48	97,52	2,48
<b>200</b>	0,075	305	305,048	0,048	2,09	99,61	0,39
<b>270</b>	0,053	381	381,009	0,009	0,39	100,00	0,00
<b>Fundo</b>					0,00	100,00	0,00
<b>TOTAL</b>				<b>2,3 kg</b>	100,00	-	-

Fonte: Autora (2023).

As informações tabeladas constituíram a curva granulométrica do meio filtrante, utilizando como parâmetros o tamanho das peneiras e a porcentagem passante acumulada de cada tamanho de grão. Após, o material foi misturado de forma manual, em uma vasilha, deixando a estrutura filtrante homogeneizada.

Com os parâmetros calculados e realização da distribuição granulométrica, foi possível montar a curva granulométrica ideal para o sistema, conforme explicito na Figura 33. Bem como, foi possível calcular as características granulométricas do meio, apresentada na Tabela 4.

Figura 33 - Curva granulométrica para aplicação no sistema de filtração lenta retrolavável.



Fonte: Autora (2023).

### Porosidade total

Para a caracterização do meio filtrante, também é necessário estipular a porosidade, a fim de caracterizar a estrutura interna do material e determinar sua capacidade de retenção e permeabilidade. Para tanto, utilizou-se o método volumétrico, para o cálculo da porosidade abordado no manual da EMBRAPA (2017).

O método foi abordado em triplicata, separando três amostras do material peneirado e homogeneizado. Estes foram adicionados em três provetas graduadas de 100 ml, todos até a marca de 50 ml, sendo pesados e descontados o valor da proveta vazia. Posteriormente, foi adicionado água até a mesma margem, cobrindo os espaços vazios da amostra, e novamente sendo realizada a pesagem do recipiente. Sendo assim, realizada três etapas de pesagem da proveta, proveta vazia, proveta com material seco e proveta com material úmido, conforme expresso na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados para a determinação da porosidade do meio filtrante.

	Massa da proveta (g)	Massa do Material Seco (g)	Massa do Material Seco - Massa da proveta (g)	Quantidade de água (ml)	Massa do Material Úmido (g)	Massa do Material Úmido - Massa da proveta (g)	Massa de água (g)
<b>1</b>	148	211	63	18	229	81	18
<b>2</b>	148	211	63	17,8	228	80	17
<b>3</b>	148	211	63	17,9	229	81	18

Fonte: Autora (2023).

Com os dados coletados foi possível realizar os cálculos com as equações indicadas abaixo, onde inicialmente foi realizado cálculo do volume do corpo de prova (proveta) adotando a Equação 1. Posteriormente, calculou-se o volume de sólidos utilizando a Equação 2. Com a equação 3 foi possível calcular o volume dos vazios, e por fim, com a equação 4 calculou-se a porosidade do meio filtrante (Tabela 6).

Tabela 6 - Equações utilizadas no cálculo da porosidade do meio filtrante.

<b>Equação 1</b>	$V = \frac{\pi D^2}{4} \times h$	Onde:
<b>Equação 2</b>	$V_s = \frac{m_s}{\rho}$	V: volume total; D: diâmetro do recipiente; h: altura do recipiente;
<b>Equação 3</b>	$V_v = V - V_s$	Vv: volume de vazios; Vs: volume de sólidos;
<b>Equação 4</b>	$\eta = \frac{V_v}{V}$	ms: massa de material filtrante seco; ρ: massa específica do material filtrante (1,6);
<b>Equação 5</b>	$\eta \text{ média} = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3}{3}$	η: porosidade no material.

Um resumo das características granulométricas do material filtrante está disposto na Tabela 7, e estão de acordo com a recomendação da literatura para filtros lentos retrolaváveis disponibilizados pelo manual de filtros lentos da FUNASA (2019), bem como pelos autores Pizzolatti, Souza e Emmendoerfer (2020).

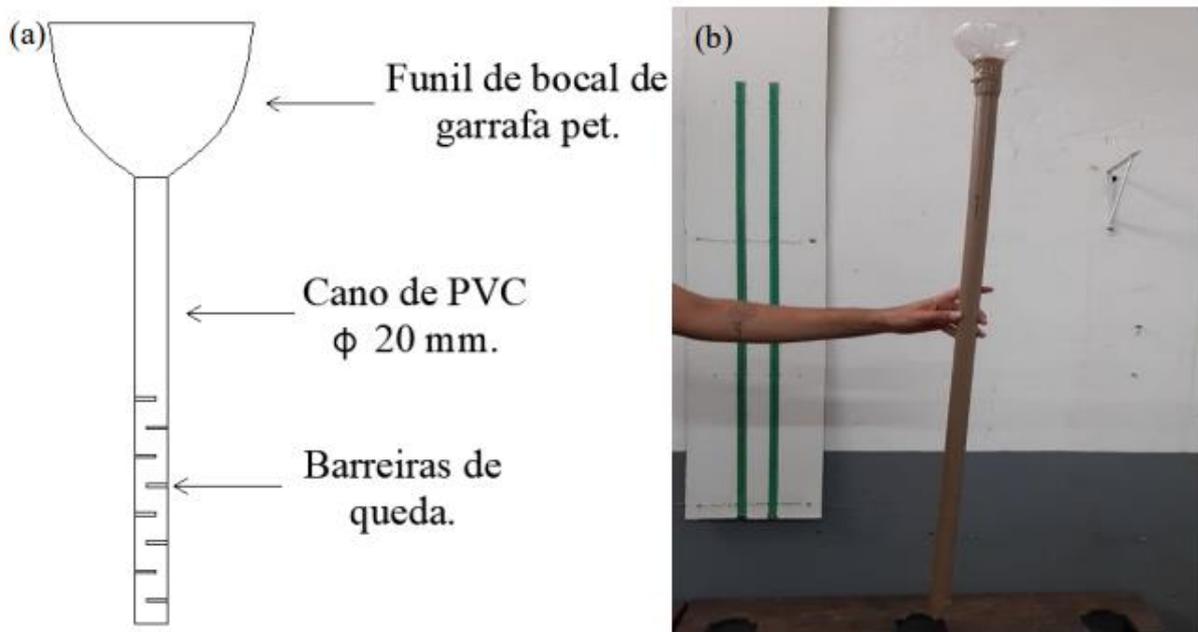
Tabela 7 - Características granulométricas do material filtrante.

<b>Características</b>	<b>Carvão Antracito</b>
Diâmetro efetivo (d10) (mm)	0,30
Coefficiente de Curvatura (CC)	1,30
Coefficiente de Uniformidade (CU)	1,70
Porosidade total (%)	0,30

Fonte: Autora (2023).

Com as características do meio filtrante ajustadas e adequadas à estrutura de filtração proposta, cabe ressaltar que para inserção destas no meio, foi necessário utilizar de um equipamento capaz de manter a homogeneidade do material. Este equipamento é formado por uma tubulação e uma boca de garrafa PET, representando um funil. Em sua estrutura são apresentadas barreiras (Figura 34(a) e Figura 34(b)) que impedem que materiais de maior granulometria sejam depositados primeiramente no filtro, mantendo a homogeneidade inicial.

Figura 34 - Equipamento utilizado para inserção do material filtrante no sistema.



Legenda: (a) demonstração esquemática; (b) equipamento em escala real.

Fonte: PONCIO (2023).

### 3.5 MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

O sistema foi monitorado diariamente através de parâmetros de qualidade da água, baseando-se em critérios estabelecidos na Portaria GM/MS N° 888 (BRASIL, MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2021), com análises da água filtrada e da água bruta. Os parâmetros selecionados foram: turbidez, cor aparente, cor verdadeira (a cada dois dias), pH, temperatura, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e absorvância 254 nm.

Através de amostradores instalados ao longo do meio filtrante (Figura 27), seguindo a profundidade dos piezômetros, amostras de água foram também coletadas periodicamente para a determinação do parâmetro oxigênio dissolvido.

Os parâmetros de qualidade da água selecionados seguiram o "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*" (STANDARD METHODS: APHA, 1985), e foram realizadas em triplicata, para a obtenção da média. Foram também desenvolvidas planilhas para controle efetivo dos parâmetros de qualidade da água e operacionais, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Planilha de controle de análises de qualidade da água.

Aferidor:	Data:				Tempo:	Chuva ( )		Sol ( )	
	Filtro Lento Retrolavável					Água Bruta			
Parâmetro	1	2	3	Média	1	2	3	Média	
Vazão (ml/min)									
Turbidez (NTU)									
Cor Aparente (uC)									
Cor Verdadeira (uC)									
pH									
Temperatura (°C)									
Condutividade Elétrica (S)									
Oxigênio dissolvido (mg/L)									
Absorvância 254 nm									
Oxigênio dissolvido (mg/L)	A -		C -		Observações:				
	B -		D -						
Piezômetros	A -		C -						
Perda de carga	B -		D -						

Fonte: Autora (2023).

Os parâmetros de qualidade são apresentados também na Tabela 9, conforme sua frequência de análise e equipamento utilizado.

Tabela 9 - Parâmetros de qualidade da água por frequência de análise e equipamentos utilizados.

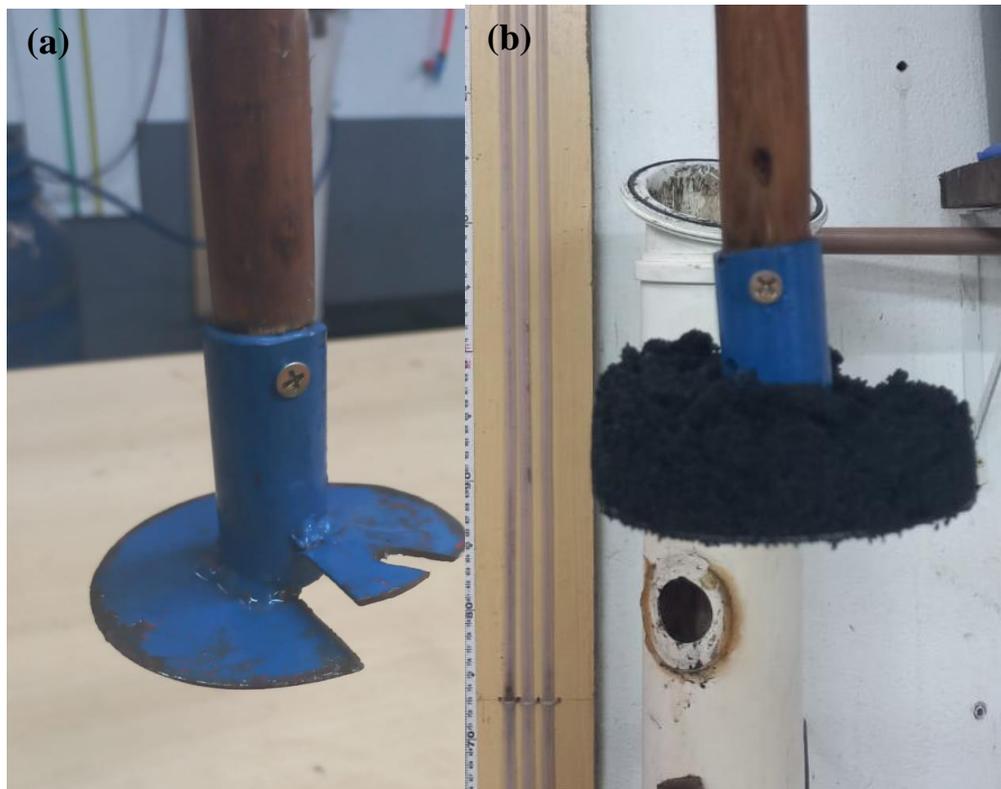
<b>Parâmetro</b>	<b>Frequência</b>	<b>Marca e Modelo</b>	<b>Gama de medição</b>	<b>Precisão</b>
Turbidez (NTU)	Diária	Turbidímetro Hach modelo 2100Q	0-1000 NTU	±2%
Cor aparente (uC)	Diária	Colorímetro Hach DR-900.	0-2 Abs	±0,005 Abs em 1,0 Abs nomina
Cor Verdadeira (uC)	Periodicamente (dois dias)	Filtração membrana de 45 nm + Colorímetro Hach DR-900.	0-2 Abs	±0,005 Abs em 1,0 Abs nomina
pH	Diária	Medidor Multiparâmetros Hach modelo HQ40d. Sonda Hach pH101	pH 2 a 14	±0,02 pH
Temperatura (oC)	Diária	Medidor Multiparâmetros Hach modelo HQ40d. Sonda Hach pH101	0 a 50°C	±0,3°C
Condutividade elétrica (S)	Diária	Medidor Multiparâmetros Hach modelo HQ40d. Sonda Hach CDC 401	1 µS/cm – 200 mS/cm	± 0.5%
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Diária	Medidor Multiparâmetros Hach modelo HQ40d. Sonda Hach LDO101	0,1 a 20,0 mg/L	±0,1 mg/L para 0 a 8 mg/L; ± 0,2 mg/L para mais de 8 mg/L
Absorbância 254 nm	Periodicamente	Espectrofotômetro UV-Vis SPECORD 200 PLUS, marca Analytik Jena®	190nm 1100nm (UV-V)	±0.0002A/h@500nm

Fonte Adaptado HACH (2021).

### 3.5 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS DO MEIO FILTRANTE

Com o encerramento da última carreira de filtração do sistema de filtração, foi realizada a drenagem da água presente no sistema e, posteriormente, a retirada do carvão antracito utilizado como meio filtrante para análise microbiológica, a fim de identificar a presença de microrganismos nas camadas da estrutura filtrante, além de sólidos totais secos. A retirada do material foi realizada através do fatiamento do meio filtrante. O fatiamento foi realizado com o auxílio de um equipamento de raspagem, formado por uma estrutura de ferro em formato circular entreaberto, como expresso na Figura 34.

Figura 35 - Parâmetros de qualidade da água por frequência de análise e equipamentos utilizados.

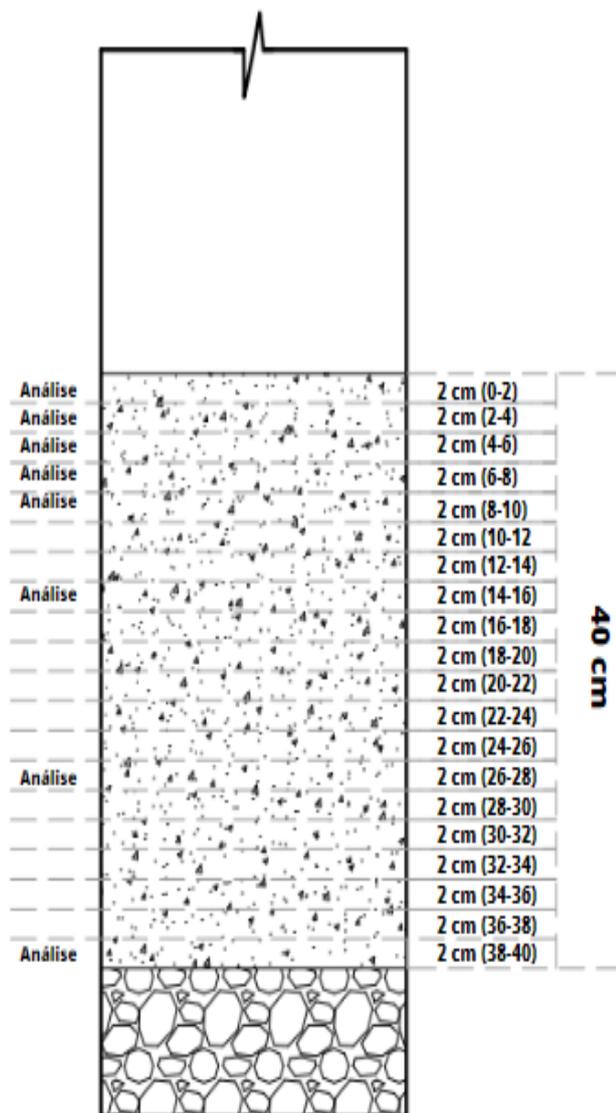


Legenda: (a) Equipamento de retirada de material filtrante do filtro; (b) Retirada de 2 cm do material filtrante do filtro após o fim da operação. Fonte: Autora (2023).

Foram retiradas 2 cm de amostras, conforme mostrado na Figura 34 (b), nas seguintes profundidades: 0-2 cm, 2-4 cm, 4-6 cm, 6-8 cm, 8-10 cm, 14-16 cm, 26-28 cm e 38-40 cm. As amostras foram coletadas e separadas em sacos plásticos fechados por *ziplock*, identificadas, armazenadas em geladeira, a fim de conservar as características microbiológicas do material

filtrante, para posterior análise. Cabe ressaltar que, a cada alteração de camada o equipamento (Figura 35) de remoção do material filtrante era lavado em água corrente, e esterilizado com álcool, evitando contaminação cruzada.

Figura 36 - Fatiamento do meio filtrante para análise granulométrica.



Fonte: Autora (2023).

Figura 37 - Amostras coletadas por camada de influência de meio filtrante

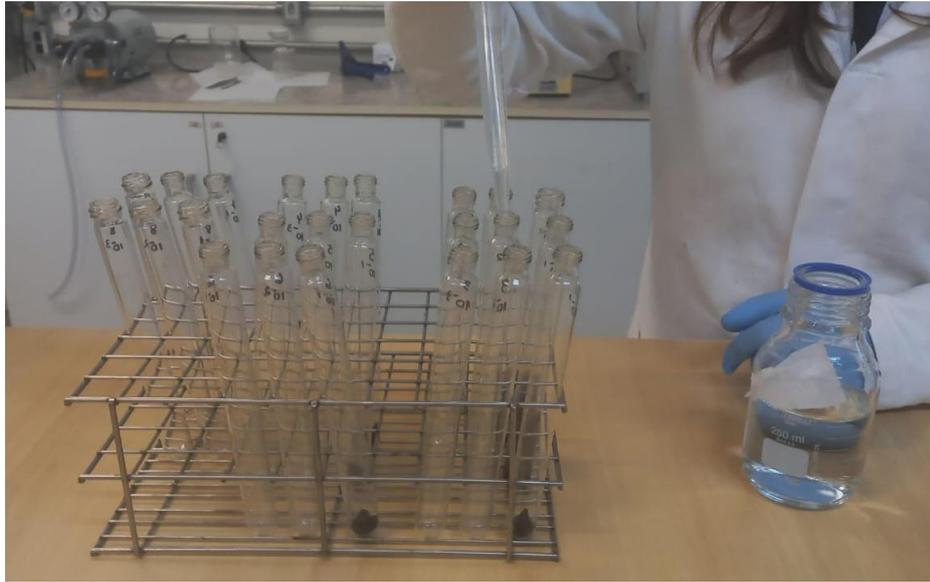


Fonte: Autora (2023).

Em menos de 24 horas após a coleta foi dado o início da realização de ensaios microbiológicos de identificação de coliformes totais e *E. coli* utilizando metodologia de Pour-Plate, além de sólidos totais secos. As análises seguiram as orientações do "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*" (STANDARD METHODS: APHA, 1985).

Para início das análises foi separado todo o material necessário para a realização dos ensaios (vidrarias) e posteriormente autoclavados, a fim de realizar a limpeza efetiva dos materiais, garantindo a inexistência de influências externas no processo. Em sequência, foi pesado em balança analítica aproximadamente 1 grama de cada uma das amostras de cada camada, totalizando 8 amostras (1 amostra de cada camada). Essa amostra foi inserida em tubos de ensaio e dissolvidas em solução aquosa de 9 ml, a fim de diminuir a concentração dos elementos presentes na amostra, apresentando assim uma solução em escala de diluição  $10^{-1}$ . Com a amostra totalmente homogeneizada, retirou-se 1 ml da diluição, inserindo em outro tubo de ensaio composto por 9 ml de solução aquosa, assim, obtendo uma diluição de  $10^{-2}$ . Posteriormente, foi realizado o mesmo procedimento, diluindo a amostra novamente em  $10^{-3}$ . Assim, obtendo três amostras de diluição de cada uma das camadas, como mostra a Figura 37.

Figura 38 -Análises microbiológicas realizadas por camada de material filtrante.



Fonte: Autora (2023).

Após as diluições, iniciou-se a primeira fase de análises microbiológicas, através de técnicas de semeadura de Pour-Plate. Esta técnica foi realizada a fim de isolar e contar bactérias heterotróficas presentes na amostra. Para tanto, foi adicionado 1 ml de cada diluição de cada amostra de camada filtrante em placas de Petri esteril, estas já compostas por uma preparação de ágar fundido (material gelatinoso derivado de algas), sendo agitada suavemente para distribuição uniforme das bactérias. Por fim, as placas foram armazenadas em estufa por 24 horas para o desenvolvimento das colônias, para posterior contagem das bactérias presentes na amostra.

Na segunda fase de análises microbiológicas, foi realizado o derramamento de 1ml das três diluições cultura em placas de Petri esteril compostas com meio de cultura Chromocult coliform agar, a 45°C, anteriormente preparado para esta análise, através das técnicas de Pour Plate. Posteriormente, realizando movimentos suaves, sendo possível o desenvolvimento de colônias e visibilidade de bactérias indicadoras, sendo coliformes totais e *E. coli*, a fim de diagnosticar a possível contaminação fecal destes microrganismos na camada filtrante. Desta forma, o meio de cultura foi aquecido em banho maria até 45° C, e posteriormente depositado nas placas e agitando-as em movimentos suaves a fim de distribuir uniformemente os microrganismos. Em seguida, as placas foram levadas para estufa por 24 horas, a 37°C para desenvolvimento dos microrganismos e posterior contagem.

Na terceira fase de análises microbiológicas, realizou-se a análise de esporos de bactérias aeróbias de acordo com metodologia descrita no *Standard Methods for the*

*Examination of Water and Wastewater*, onde foi realizado o tratamento térmico das amostras em banho-maria a 80°C por aproximadamente 12 minutos, e em seguida resfriadas em banho de gelo até atingir temperatura ambiente, utilizando a técnica de *Spread plate*. Posteriormente, as amostras foram inseridas em placas Petri em meio ágar nutriente com azul de tripano, e levadas a estufa por 24 horas, a 35°C, para sequente contagem a olho nu dos esporos formados nesta análise.

Por fim, foi realizada a análise de sólidos totais presentes em 1 grama de material filtrante a fim de expressar, no final, as unidades formadoras de colônia (UFC) por grama de amostra seca (meio filtrante + sólidos retidos). Sendo assim, foi pesada em balança analítica 1 grama do material filtrante de cada camada em análise, esta foi colocada em um cadinho, anteriormente pesado (vazio), e pesado novamente em balança analítica, anotando seus valores. Posteriormente, esses cadinhos (com amostra) foram levados à estufa, à uma temperatura de 105 °C até peso constante, e posterior para dessecador a vácuo, retirando qualquer teor de umidade presente na amostra. Por fim, o cadinho (com amostra) é pesado novamente, para realizar o cálculo da quantidade de sólidos totais presentes em cada amostra, assim observando os vazios presentes em 1 grama de cada camada filtrante. A Figura 38 mostra a composição de pesagem de cada amostra para posterior análise e cálculo de sólidos.

Figura 39 - Pesagem de cada amostra por camada, para cálculo de sólidos.



Fonte: Autora (2023).

A partir da pesagem descrita na Tabela 10 foi possível calcular a quantidade de sólidos totais (amostra seca) presentes em cada amostra e, conseqüentemente, a quantidade de vazios em 1 grama de cada camada.

Tabela 10 - Cálculo de sólidos totais por camada de material filtrante.

<b>Fórmula</b>	
<b>Sólidos Totais</b>	$\text{Sólidos Totais} = \text{Sólidos Totais Fixos} + \text{Sólidos Totais Voláteis}$

Onde:

- Sólidos Totais Fixos: Peso do resíduo obtido após a evaporação a seco;
- Sólidos Totais Voláteis: Peso do resíduo obtido após a evaporação a 180°C.

Fonte: Autora (2023).

A realização dos cálculos em cada amostra de meio filtrante, possibilitaram calcular a quantidade de microrganismos por parte seca de material filtrante. Através da relação entre os relatados e o desenvolvimento de uma regra de três. Desta forma, o estudo evidenciou a probabilidade de formação de cada microrganismo avaliado por material seco de meio filtrante, indicando futuras pesquisas referentes ao uso do material e suas especificações.

### 3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

A avaliação estatística dos dados foi realizada através da computação diária dos dados hidráulicos e de qualidade da água, ambas foram inseridas e monitoradas através do software Excel, o que posteriormente proporcionou a comparação de cada parâmetro por carreira de filtração. O desenvolvimento das análises estatísticas se deu por meio do software, onde foram calculadas as médias e o desvio padrão de cada dado, bem como, foi avaliado desempenho global do sistema atrelado aos padrões de qualidade da água.

O estudo também desenvolveu gráficos e tabelas estatisticamente comparativos, a fim de entender o comportamento dos parâmetros analisados e relacioná-los a referências existentes e legislações vigentes.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE FILTRAÇÃO**

O sistema de filtração proposto por este estudo foi avaliado durante 14 meses, desde seu dimensionamento até a análise dos parâmetros finais. A fim de apresentar os resultados obtidos através de dados levantados durante este período, o estudo buscou alcançar os objetivos específicos propostos através da metodologia aplicada. Cabe ressaltar, que este capítulo apresenta os resultados obtidos nas análises realizadas nesta pesquisa, bem como a discussão embasada de seus tópicos.

Com o sistema montado e apto ao funcionamento, foi iniciada a primeira carreira de filtração do filtro lento retrolavável de camada simples desenvolvido neste estudo, iniciando sua operação no dia 01/04/2023. Em sua continuidade, foram realizadas mais 4 carreiras de filtração, totalizando 91 dias de operação do filtro.

É importante ressaltar que o sistema realizou paradas inesperadas, nas carreiras 3 e 5, devido à ocorrências técnicas inesperadas (entupimento de tubulação de água bruta e vazamento em um dos amostradores). Cabe ressaltar que todas as paradas foram solucionadas em menos de 24 horas, não comprometendo a sequência da carreira de filtração.

A avaliação do desempenho deste sistema se deu durante o processo de operação e análise das carreiras de filtração, em relação a parâmetros operacionais, de qualidade da água e microbiológicos. Cada parâmetro foi monitorado, e acompanhado seu desempenho em relação ao progresso do sistema.

### **4.2 MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS**

#### **4.2.1 Verificação da expansão do meio filtrante e eficiência da retrolavagem**

Na retrolavagem é feita a passagem de água em velocidade suficiente para expandir, fluidificar e limpar o meio filtrante. Geralmente a água utilizada é filtrada pelo próprio sistema (PIZZOLATTI, 2010; ISHII, 2013; DE SOUZA, 2015). Alguns aspectos hidráulicos são abordados neste sentido, a fim de garantir que a limpeza efetiva seja realizada e as impurezas não influenciem negativamente no desenvolvimento da próxima carreira de filtração.

Com o monitoramento frequente e sistemático da turbidez da água de lavagem, é possível estimar a eficiência de limpeza do meio filtrante, ou seja, se o tempo e volume de água

para lavagem são suficientes. Com o acionamento da retrolavagem, espera-se que a turbidez aumente e, posteriormente, diminua, devido ao desprendimento de partículas aderidas ao meio filtrante. Isto ocorre devido ao choque e atrito entre os grãos durante a expansão do meio filtrante, bem como as forças hidráulicas envolvidas, como a tensão de cisalhamento.

Neste estudo, na realização de quatro testes, não foi observada diminuição significativa do parâmetro turbidez ao final do intervalo de 40 minutos na água de lavagem (Tabela 11 e Figura 40). A partir dos dados foi possível visualizar uma pequena variância de turbidez entre as amostras, apresentando uma certa linearidade entre valores encontrados. Apenas no teste 4 foi possível visualizar um crescimento constante da unidade de turbidez encontrada, saindo de uma turbidez de 3,4 NTU e encerrando-a com uma turbidez de 16,2 NTU, embora esse valor não tenha decrescido, como era de se esperar.

Isto pode ser um indicativo de ineficiência de limpeza do meio filtrante, fazendo com que partículas de material em suspensão capturadas durante o processo de filtração, permaneçam aderidas ao meio filtrante no início da próxima carreira de filtração. Como consequência, poderá haver a diminuição do tempo de carreiras de filtração futuras, com o acúmulo de material remanescente no meio filtrante. Neste caso, embora tenha-se seguido orientações técnicas da literatura pertinente, um aumento do tempo de lavagem do meio filtrante talvez seja necessário, embora os parâmetros hidráulicos avaliados tenham demonstrado o contrário, dentro do período de estudo (capítulo 3).

A inserção da água em contrafluxo ao meio filtrante proporcionou uma expansão adequada, capaz de realizar a limpeza do material granular, além de promover a fluidificação do mesmo. Durante a retrolavagem o empuxo e o peso dos materiais são anulados promovendo colisão e atrito entre os grãos, o que favorece o desprendimento dos materiais aderidos na superfície dos mesmos (ALLEY, 2007; HENDRICKS, 2010).

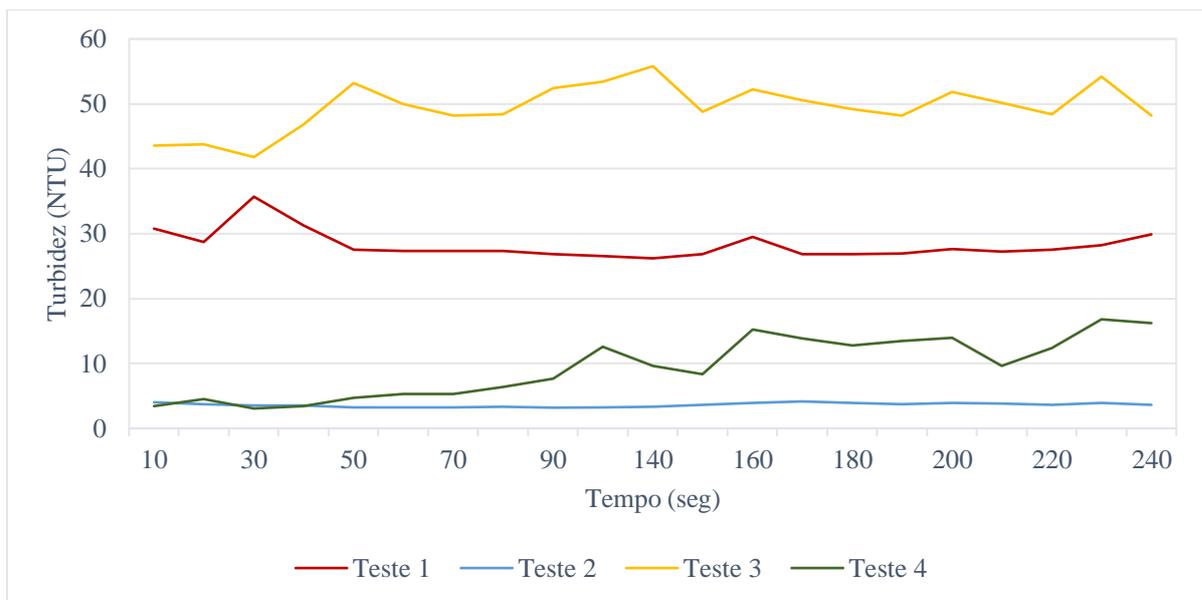
Tabela 11 - Dados de turbidez coletados durante a retrolavagem do sistema.

TEMPO (s)	TESTE 1 (NTU)	TESTE 2 (NTU)	TESTE 3 (NTU)	TESTE 4 (NTU)
10	30,8	4,05	43,6	3,43
20	28,7	3,77	43,8	4,49
30	35,7	3,53	41,8	3,06
40	31,3	3,49	46,8	3,45
50	27,5	3,28	53,2	4,75
60	27,3	3,21	50	5,26
70	27,3	3,28	48,2	5,28
80	27,3	3,33	48,4	6,39

<b>90</b>	26,8	3,19	52,4	7,68
<b>100</b>	26,5	3,21	53,4	12,6
<b>140</b>	26,2	3,33	55,8	9,63
<b>150</b>	26,8	3,6	48,8	8,31
<b>160</b>	29,5	3,88	52,2	15,2
<b>170</b>	26,8	4,15	50,6	13,9
<b>180</b>	26,8	3,89	49,2	12,8
<b>190</b>	26,9	3,75	48,2	13,5
<b>200</b>	27,6	3,95	51,8	14
<b>210</b>	27,2	3,82	50,2	9,63
<b>220</b>	27,5	3,6	48,4	12,4
<b>230</b>	28,2	3,91	54,2	16,8
<b>240</b>	29,9	3,6	48,2	16,2

Fonte: Autora (2023).

Figura 40 - Comportamento do parâmetro turbidez durante os testes de retrolavagem.



Fonte: Autora (2023).

Pizzolatti (2018) afirma que os picos de turbidez neste processo ocorrem devido a velocidade de aproximação empregada no sistema. O que indica que a carga de água utilizada na retrolavagem se torna suficiente para a alteração da turbidez. O autor ainda afirma, que a turbidez, bem como a limpeza geral do sistema, poderia ser melhorada através do aumento do volume ou do nível da câmara de carga, o que conseqüentemente influenciaria na expansão do meio filtrante.

Na avaliação da expansão do meio filtrante, o mesmo apresentou uma média de 46,9%, expressando 20 centímetros de expansão em todos os testes, em exceção ao teste 4 que

apresentou uma queda na fluidificação do seu meio filtrante de 12,5%, mas ainda assim com uma expansão de 37,5%.

De acordo com Lopez (2009), boa parte da remoção dos sólidos em suspensão ocorre devido à expansão do material da camada filtrante, alterando a organização granular do interior desta camada. A Tabela 12 aborda os resultados alcançados em cada teste de expansão.

Tabela 12 - Teste de expansão do meio filtrante durante a retrolavagem.

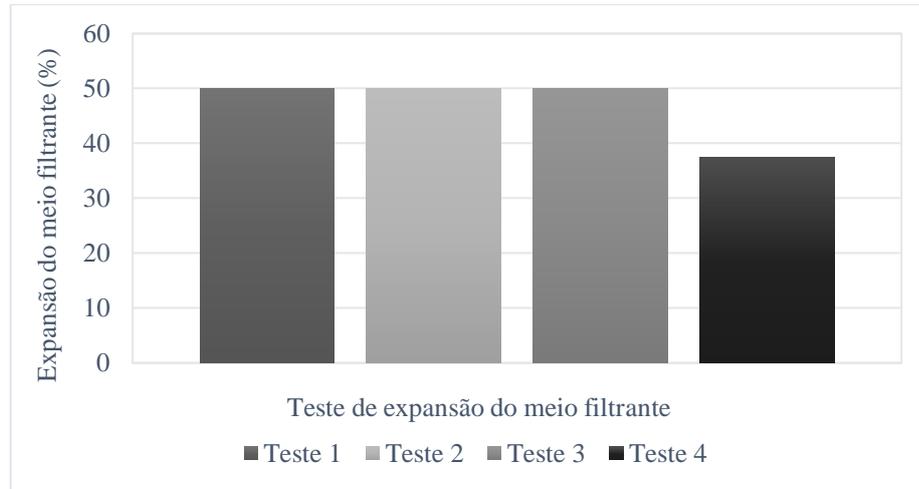
TESTE	EXPANSÃO (cm)	EXPANSÃO (%)
Teste 1	20,0	50,0
Teste 2	20,0	50,0
Teste 3	20,0	50,0
Teste 4	15,0	37,5
<b>Valor Médio</b>	18,7	46,9

Fonte: Autora (2023).

De acordo com o manual da FUNASA (2021) a expansão do meio filtrante em filtros lentos é recomendada entre 25% e 40%, verificada as características do meio filtrante. Richter & Azevedo Neto (1991) mencionam que expansões de até 50% do meio filtrante também podem ser eficientes, para que ocorra uma boa separação dos grãos e, conseqüentemente, um eficiente choque entre eles para que ocorra a limpeza do mesmo. A expansão deve ser proporcional à velocidade ascensional de lavagem e, conseqüentemente, ao volume da água a ser usada na retrolavagem. Seckler (2019) defende que a expansão do meio deve ser dimensionada quando submetida a um valor de velocidade ascensional de água de lavagem, para tanto deve-se considerar o cálculo da velocidade mínima de fluidificação.

Desta forma, os valores reais medidos *in loco* entraram em concordância com os valores recomendados na literatura. A Figura 41 expressa a relação entre os quatro testes de expansão realizados.

Figura 41 - Testes de expansão do meio filtrante durante a retrolavagem, em porcentagem.



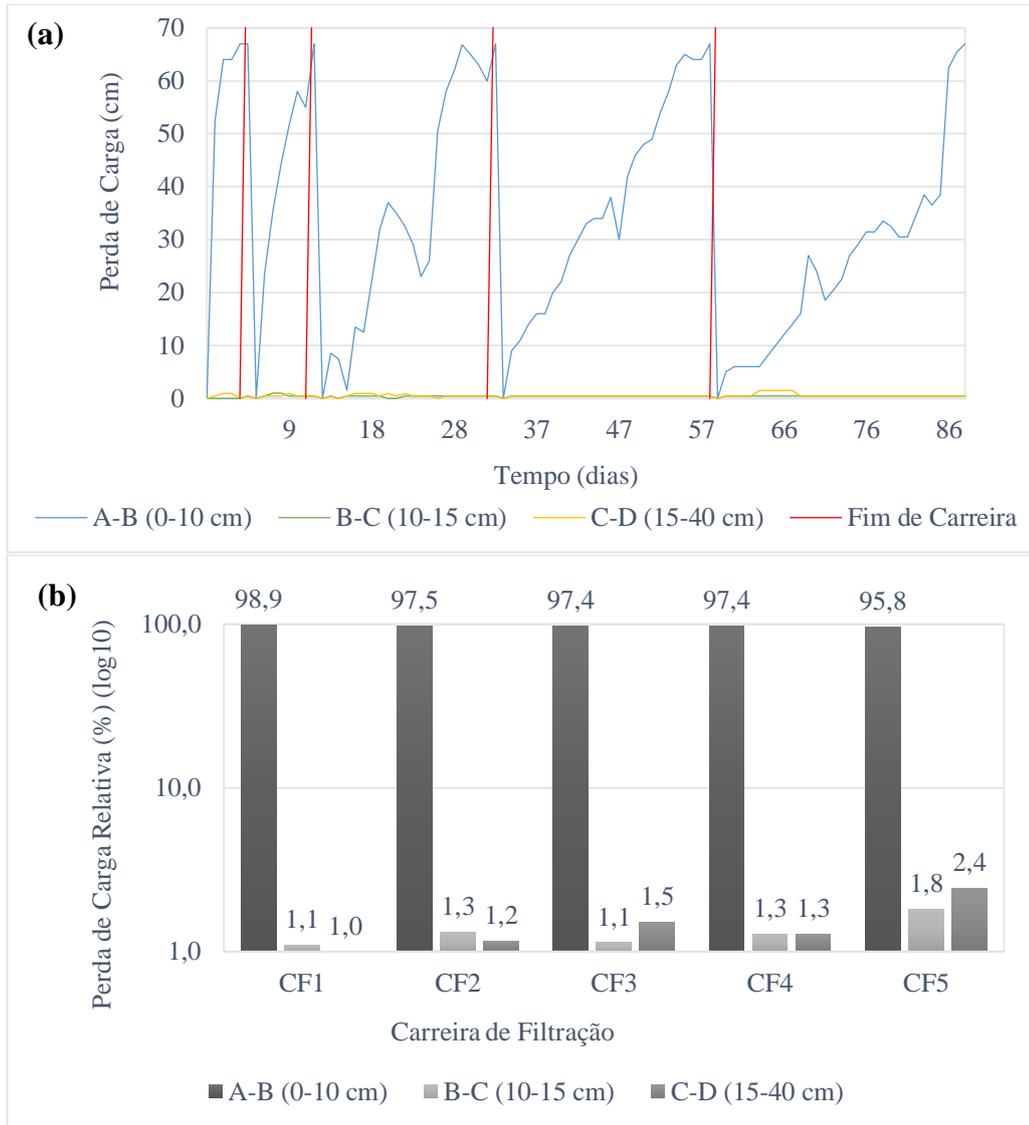
Fonte: Autora (2023).

#### 4.2.2 Perda de carga no meio filtrante

O monitoramento da perda de carga do sistema, realizado através dos piezômetros instalados no protótipo, possibilitaram o cálculo da perda de energia à medida que a água entra no filtro e, conseqüentemente, entra em contato com o meio filtrante. A Figura 42 demonstra a perda de carga absoluta e relativa ao longo do meio filtrante, em três profundidades distintas (0-10 cm, 10-15 cm, 15-40 cm).

Cabe ressaltar que as carreiras de filtração apresentaram tempos de duração diferentes, sendo encerradas devido a colmatação do meio filtrante e, conseqüentemente, o extravasamento de água bruta no nível máximo do filtro, proporcionando a realização da retrolavagem do sistema. A carreira de filtração 1 apresentou um tempo de duração de 5 dias. Já a carreira de filtração 2 se deu em 7 dias, a carreira de filtração 3 em 21 dias, a carreira 4 em 25 dias, e, por fim, a carreira de filtração 5 foi finalizada em 33 dias.

Figura 42 - Perda de carga absoluta (a) e relativa (b) ao longo do meio filtrante.



Fonte: Autora (2023).

Os gráficos representam uma perda de carga inferior entre as camadas B-C (10-15 cm) e C-D (15-40 cm), em relação a camada A-B (0-10 cm). Os primeiros 10 cm de meio filtrante demonstraram um aumento significativo da perda de energia no decorrer da operação do filtro, em todas as carreiras de filtração, indicando que essa camada parece ser a principal responsável pela remoção das partículas em suspensão capturadas pelo meio filtrante. Nas demais profundidades parece não haver acúmulo significativo de material em suspensão capturado, até a quinta carreira de filtração. Na última, e mais longa carreira de filtração, há a indicação de transporte de partículas para maiores profundidades, mas sem tirar a relevância da primeira camada monitorada (0-10 cm). Esta carreira apresentou a maior turbidez média da água bruta (ver capítulo 4.2.2)

A alimentação do sistema de filtração com água bruta possibilita que esta seja limpa, através da retenção de impurezas no meio filtrante. Sobretudo, este processo, denominado colmatação, auxilia diretamente na formação da camada biológica (colmatação biológica), muito importante em filtros lentos, que parece ser mais significativa nos primeiros centímetros do leito filtrante. Este fenômeno atua diretamente na diminuição da porosidade e, conseqüentemente, faz com que ocorra o aumento da perda de carga do fluido passante. Deste modo há um aumento da resistência hidráulica no fluxo de água, fazendo com que a carga hidráulica no sistema aumente progressivamente acima da superfície do meio filtrante (AMIRTHARAJAH, 1988; CAMPOS, 2006; DI BERNARDO, 2004).

Alguns fatores podem influenciar no processo de perda de carga do sistema, como a taxa de filtração, a qualidade da água bruta, o tamanho e a forma das partículas suspensas, o tipo e a granulometria do meio filtrante e o tempo de operação desde a última limpeza.

#### 4.3 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA

O monitoramento da qualidade da água ocorreu diariamente, através de parâmetros pré-definidos na metodologia. O sistema apresentou três pausas inesperadas, devido a problemas técnicos ocorridos na estrutura do próprio protótipo. Uma das pausas se deu em decorrência de um vazamento em um dos amostradores de piezômetros dificultando a coleta de água filtrada. As outras duas paradas, se deram pelo entupimento da tubulação de entrada de água bruta no filtro, devido à alta presença de sólidos no lago de coleta, conseqüentemente ocasionada por alta pluviosidade registrada no dia. Cabe ressaltar, que todas as paradas foram solucionadas em menos de 24 horas. Desta forma, as análises de qualidade se deram em 88 dias, contabilizando as análises nos dias em que se deu o fim da carreira de filtração e retrolavagem.

##### 4.3.1 Desempenho global do sistema

Retratando a capacidade e a eficiência em relação a execução de suas funções desejadas, o desempenho global do estudo foi realizado através do monitoramento dos parâmetros de qualidade da água apresentados na Tabela 13. Com isso, os resultados obtidos puderam ser comparados à legislação vigente de potabilidade da água. A Tabela 13 apresenta cada parâmetro analisado por carreira de filtração, sendo as análises retratadas em média e desvio padrão, bem como de água bruta e filtrada. Gráficos de resultados de qualidade da água podem ser observados no Apêndice A (Figuras 50, 51, 52, 53, 54, 55 e 56)

Tabela 13 - Desempenho do sistema de filtração por parâmetro de qualidade da água.

PARÂMETRO	AMOSTRA	CARREIRA DE FILTRAÇÃO					VALOR GLOBAL	REMOÇÃO (%)
		1	2	3	4	5		
Turbidez (NTU) (M±DP)	AB	4,18	5,30	7,31	25,95	35,45	15,64	74,8
		±1,50	±3,12	±8,38	±40,04	±128,30	±48,11	
	AF	1,41	2,71	1,46	3,82	10,28	3,94	
		±0,31	±2,09	±2,14	±5,22	±12,44	±4,30	
Cor aparente (u.c.) (M±DP)	AB	71,93	107,90	72,63	107,10	147,62	101,44	39,2
		±17,35	±34,68	±63,07	±227,06	±202,59	±88,01	
	AF	48,80	79,90	45,60	40,04	94,16	61,70	
		±40,39	±22,13	±35,43	±50,03	±99,90	±26,72	
Cor Verdadeira (u.c.) (M±DP)	AB	93,67	81,83	32,06	22,63	68,03	59,64	55,9
		±0,00	±4,00	±40,20	±18,86	±49,51	±19,52	
	AF	21,33	27,00	19,89	17,46	45,93	26,32	
		±0,00	±5,50	±13,79	±10,26	±40,05	±13,86	
pH (M±DP)	AB	6,64	6,67	6,59	6,56	6,95	6,68	-
		±0,09	±0,09	±0,19	±0,29	±0,22	±0,07	
	AF	6,46	6,62	6,45	6,40	6,75	6,54	
		±0,21	±0,10	±0,35	±0,41	±0,28	±0,11	
Temp. (°C) (M±DP)	AB	21,83	21,42	20,11	16,73	15,22	19,06	-
		±0,72	±1,31	±2,10	±1,65	±2,47	±0,61	
	AF	20,66	20,83	18,89	15,41	14,73	18,11	
		±1,21	±0,85	±2,46	±1,99	±2,79	±0,74	
Cond. Elétrica (µS/cm) (M±DP)	AB	115,27	469,88	238,21	87,74	77,20	197,66	-
		±3,34	±411,84	±285,19	±8,22	±11,83	±171,68	
	AF	118,98	470,46	253,30	95,06	86,18	204,80	
		±17,65	±403,68	±276,27	±7,66	±11,04	±165,62	
Oxigênio Dissolvido (mg/L) (M±DP)	AB	6,51	6,31	6,42	7,72	7,92	6,98	18,5
		±0,28	±0,63	±0,70	±0,62	±0,68	±0,15	
	AF	7,12	5,69	5,06	5,15	5,40	5,68	
		±0,69	±0,71	±0,61	±0,91	±1,17	±0,20	
Absorbância a 254 nm (cm-1) (M±DP)	AB	-	-	-	0,0473	0,4047	0,23	52,2
		-	-	-	±0,0109	±0,3525	±0,17	
	AF	-	-	-	0,0248	0,1912	0,11	
		-	-	-	±0,0105	±0,1109	±0,05	

Nota: AB - Água Bruta; AF - Água Filtrada; M - Média; DP - Desvio Padrão  
 Fonte: Autora (2023).

### **Desempenho dos parâmetros turbidez e cor**

De acordo com Pizzolatti (2014) e Puhl et al. (2023), um filtro biológico necessita de um período de maturação, onde o meio filtrante ainda está se adequando ao sistema e formando camada biológica. A formação da camada biológica é muito importante para o desempenho de filtros lentos. O estudo apresentou variações significativas de água bruta e filtrada em todo seu desenvolvimento, mesmo não apresentando valores pertinentes a legislação vigente.

O parâmetro de turbidez provém de várias substâncias em suspensão, incluindo coloides, microrganismos, material inorgânico e orgânico, microalgas, entre outros. A composição desse parâmetro exige sua eliminação como um requisito essencial para alcançar tratamentos de alta eficiência (PIZZOLATTI, 2010; POPEK, 2018; RAY et al., 2003).

Os dados representados na Tabela 13 demonstram que o sistema apresentou uma elevada capacidade de redução da turbidez da água bruta, com uma remoção desta característica da água de 74,8%, ainda que 95% dos seus valores não sejam condizentes com o exigido pela Portaria GM/MS N° 888, que exige turbidez menor que 1,0 NTU. Massanori (2013), em estudos com filtros lentos, apresentou remoção de 84,1% em um filtro lento retrolavável composto por uma camada simples de areia. O estudo ainda realizou a construção de um segundo protótipo de mesmas características chegando a uma remoção de 80,9%. Cabe ressaltar que ambos realizaram uma operação de aproximadamente 15 dias compostas por três carreiras de filtração, com média de 5 dias por carreira de filtração.

O não enquadramento destes parâmetros à portaria vigente pode estar associado às características da própria água bruta, que derivada de uma represa com pouca movimentação hidráulica, ela pode ser constituída de partículas extremamente pequenas que não ficam retidas na camada filtrante (DI BERNARDO, 2003). Como consequência, o arraste de partículas ao longo do meio filtrante pode ocorrer. Dalsasso (2005) explica que este fenômeno pode ser relacionado à uniformidade dos grãos do meio filtrante, que o confere menor tortuosidade, bem como a taxa de filtração aplicada, que podem fazer com que o material em suspensão retido no meio filtrante se desprenda, manifestando-se em forma de turbidez na água filtrada.

Associada à turbidez, a remoção da característica cor, tanto aparente quanto verdadeira, se mostrou insuficiente ao processo e, conseqüentemente, em desacordo com a legislação vigente. Com maior eficiência, a característica cor verdadeira apresentou remoção de 55,9%, e a cor aparente 39,2%. Os valores médios gerais da cor verdadeira na água bruta foi de 59,64 uC e de 26,32 uC na água filtrada.

Cabe ressaltar que os valores de cor apresentados na água bruta são demasiadamente elevados para filtros lentos, o que necessitaria de um processo anterior para redução sólidos suspensos, especialmente dissolvidos. Recomenda-se, para o emprego da filtração lenta, que o manancial abastecedor deva ter limite de cor verdadeira entre 5uC e 10 uC, considerando que para este tipo de sistema espera-se remoção média em torno de 25% (CLEASBY, 1991). Este estudo apresentou com uma remoção muito superior aos sugerido pelo autor. Isto talvez esteja relacionado ao tipo de material filtrante utilizado (antracito), embora mais estudos sobre o tema sejam necessários.

Cabe ressaltar que o estudo apresentou menores percentuais de remoção em dias com altos registros pluviométricos, resultando em picos de elevada presença de cor nas amostras de água bruta. Em estudos utilizando a mesma água bruta, Lunardi (2021) obteve média de 146 Uc (AB), relatando eventuais picos de presença de cor devido a ocorrência de chuvas.

Pizzolatti (2014) defende que a elevada eficiência na remoção de cor aparente alcançada nos sistemas filtração lenta é devido a cor do manancial, que em grande parte é proveniente de material suspenso, mensurado através da turbidez. A cor verdadeira indica um percentual de sólidos dissolvidos na amostra (STUPP, 2016).

De acordo com Souza (2020), o menor tamanho de sólidos dificulta sua remoção. De acordo com estudos já realizados, a cor verdadeira não é um parâmetro que apresenta uma eficiência considerável neste tipo de tratamento, por representar a presença de substâncias húmicas. Obtém-se melhores resultados do parâmetro quando há a utilização de coagulação química, o que foge da esfera de aplicação da filtração lenta (DI BERNARDO et al., 1999A; PIZZOLATTI, 2014).

### **Desempenho dos parâmetros oxigênio dissolvido e temperatura**

O oxigênio dissolvido é um parâmetro fundamental para o desenvolvimento de um sistema de filtração lenta. Através dele pode se obter dados sobre o desenvolvimento da camada biológica do filtro. O monitoramento deste parâmetro no decorrer do estudo, se apresentou de forma diária, apresentando médias de 6,98 mg/L na água bruta e 5,68 mg/L na água filtrada (Tabela 13).

No decorrer do monitoramento, o parâmetro não apresentou grandes discrepâncias de consumo, porém notou-se que o consumo de oxigênio dissolvido no meio filtrante se apresentou em maior quantidade em carreiras mais longas, como as três últimas. Isto ocorre devido à intensa atividade da camada biológica (schmutzdecke), principalmente nos primeiros

centímetros do meio filtrante (FOX et al., 1984; YOUNG-ROJANSCHI; MADRAMOOTOO, 2014).

Outro parâmetro de análise diária no estudo foi a temperatura da água bruta e filtrada, parâmetro capaz de influenciar diretamente na velocidade das reações químicas, na solubilidade de substâncias, bem como nas concentrações de OD e metabolismo dos organismos que estão presentes no meio (CUMBI, 2013). Temperaturas extremamente baixas ou elevadas podem impossibilitar a presença de atividade biológica no sistema, relacionando a inexistência de mecanismos de purificação da água bruta.

O aumento da temperatura pode, eventualmente, gerar reflexos no consumo de oxigênio dissolvido no manancial, deixando em maior evidência a reoxigenação durante a alimentação do sistema, implicando em menores leituras para a água bruta e maiores leituras para os sistemas. Dado evidenciado na comparação dos gráficos de oxigênio dissolvido e temperatura presentes neste estudo.

As variações de temperatura neste estudo se deram em decorrências de eventos climáticos ocorridos na região, contribuindo pela mudança das estações do ano. Os valores evidenciaram as mudanças de temperatura tanto na água bruta, quanto na filtrada, apresentando temperatura máxima de 23,8° C (dia 9) e mínima de 9,7° C (dia 74) na água bruta e temperaturas máximas de 22,5° C (dia 9) e mínima de 8,1° C (dia 74), na água filtrada. Cabe ressaltar que variações bruscas de aumento de temperatura, podem ocasionar na redução da viscosidade da água, podendo resultar em um menor desempenho na remoção dos poluentes e afetando diretamente a camada biológica do sistema.

Os valores médios de temperatura registrados pelo estudo foi de 19,06 °C na água bruta e 18,11°C na água filtrada, não registrando nenhum evento de temperaturas extremamente baixas ou altas. Em termos de temperaturas médias entre as carreiras de filtração, as análises sofreram pouca variação em relação as carreiras de filtração, o que contribuiu com a manutenção da atividade biológica do sistema (Tabela 13).

### **Desempenho dos parâmetros pH e condutividade elétrica**

Outro parâmetro de relevância monitorado por este estudo foi o pH, parâmetro do qual possibilita a averiguação da acidez ou alcalinidade da água. Em relação a água de estudo, o pH deve obedecer a uma margem adequada, esta regulamentada pela Portaria nº 888 de 2021, que estabelece padrões de potabilidade da água, onde o pH deve apresentar valores entre 6,0 e 9,0.

Os valores de pH podem sofrer alterações devido a ação de mecanismos bioquímicos de um sistema de filtração lenta, principalmente se relacionado a atividade fotossintetizantes e respiratórias de organismos autótrofos presentes no meio (SOUZA et al.,2021)(URAKAMI et al., 1995).

Este estudo observou valores de pH com pequenas variações, estando em sua maioria de acordo com os valores estipulados pela legislação vigente, porém eventualmente foram registrados valores de pH inferiores a 6,0. Essas pequenas variações podem ser decorrentes de eventos naturais, como como absorção de gases presentes na atmosfera, a degradação e decomposição de materiais orgânicos, fotossíntese de algas, a dissolução das rochas ou por ações antropogênicas (VON SPERLING, 2005). A análise do pH da água bruta apresentou uma média geral na água bruta de 6,68, e na água filtrada uma média de 6,54 (Tabela 13).

Cabe ressaltar que as pequenas variações de pH ao longo das carreiras de filtração podem ser explicadas por possíveis alterações ocasionadas de ações antrópicas. Mesmo o manancial estando numa área de proteção permanente, segundo o Código Florestal, pode estar recebendo contaminação de efluentes provenientes de escoamento superficial do solo.

O monitoramento do pH se torna relevante em comparação ao parâmetro de condutividade elétrica, dada a influência direta na concentração de íons presentes na água. Soluções mais ácidas, ou mesmo mais alcalinas, tendem a apresentar maior condutividade elétrica que soluções neutras. Os valores de pH e condutividade elétrica neste estudo apresentaram-se em consonância. Isto significa que não houve alteração significativa da água bruta durante o período de estudo. Quando observada o comportamento de ambos os parâmetros na água tratada, também não foi possível notar alteração significativa, que pudesse ser relacionada à alteração na camada biológica.

A condutividade elétrica trata-se de um parâmetro associado à presença de compostos iônicos e sólidos dissolvidos na água (CETESB, 2019). Amostras com condutividade elétrica superiores a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , podem indicar a presença de altas concentrações de substâncias dissolvidas.

O monitoramento deste parâmetro ao decorrer da operação do sistema se apresentou com valores excedentes a 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em grande parte de suas análises. Isto pode ser justificado pela existência de sólidos dissolvidos e pouco removidos no processo de filtração, como demonstrado no monitoramento do parâmetro cor. Os valores médios de condutividade elétrica se deram em 197,66  $\mu\text{S}/\text{cm}$  na água bruta e 204,80  $\mu\text{S}/\text{cm}$  na água filtrada, podendo indicar que o manancial esteja contaminado (Tabela 13).

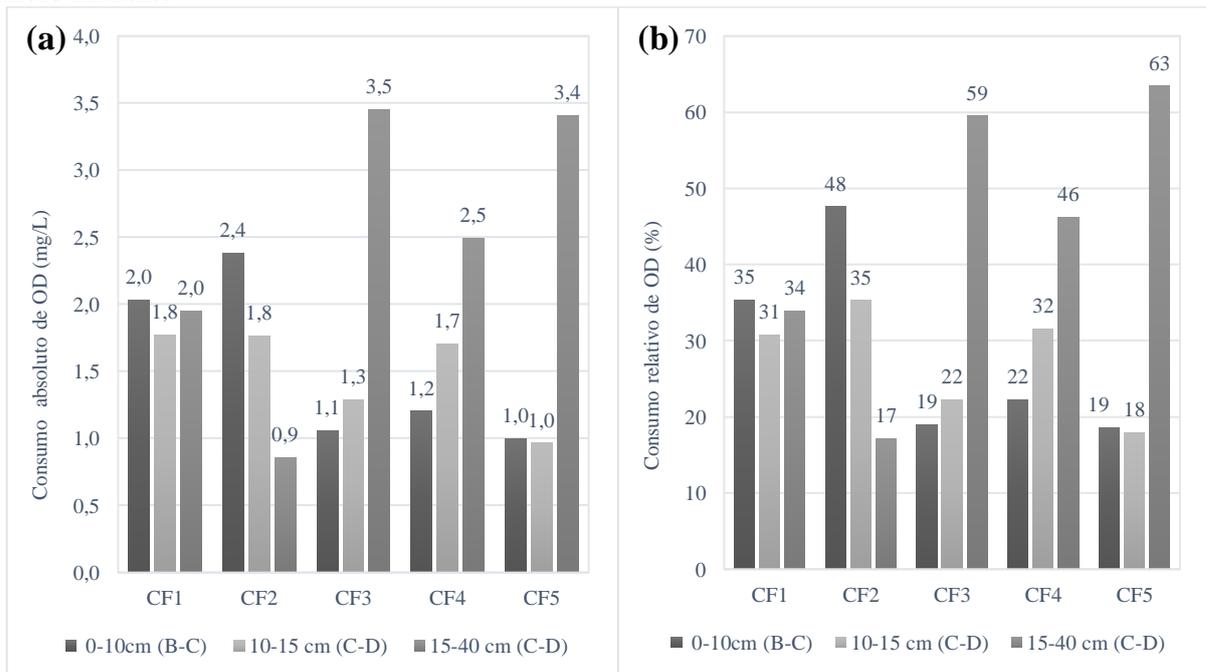
#### 4.4 AVALIAÇÃO DO MEIO FILTRANTE

Neste capítulo será demonstrado o desempenho do meio filtrante em termos de consumo de oxigênio dissolvido, e remoção indireta de matéria orgânica, através da absorbância 254 nm, ao longo de carreiras de filtração. Será demonstrado também, de forma indireta, a variação de acúmulo de massa sólida no meio filtrante. Por fim, será demonstrado o comportamento microbiológico ao longo do meio filtrante, através da análise de coliformes totais, *E. coli*, bactérias heterotróficas e esporos de bactérias aeróbias, com o intuito de avaliar o potencial impacto desses microrganismos na qualidade da água filtrada.

##### 4.4.1 Desempenho do parâmetro oxigênio dissolvido ao longo do meio filtrante

Os amostradores piezométricos possibilitaram a avaliação do oxigênio dissolvido entre as camadas do meio filtrante, diagnosticando o consumo de OD no sistema, a fim de entender como este parâmetro se comporta à medida que a água infiltra no meio filtrante. Desta forma, foram avaliados o comportamento do consumo médio de oxigênio dissolvido nas profundidades A-B (0-10 cm), B-C (10-15 cm) e C-D (15-40 cm), como demonstra a Figura 79(a) e Figura 79(b). Uma tabela detalhada dos dados pode ser encontrada no Apêndice A (Figura 53).

Figura 43 - Consumo médio absoluto (a) e relativo (b) de oxigênio dissolvido ao longo do meio filtrante.



Fonte: Autora (2023).

O consumo de oxigênio dissolvido ao longo das camadas de meio filtrante apresentaram valores diferentes e progressivos com o avanço da profundidade. No início da operação do sistema, a camada de meio filtrante (0-10 cm) consumia mais oxigênio que as demais camadas. A partir da terceira carreira de filtração foi observada uma redução significativa do consumo da primeira camada filtrante, onde a última camada (15-40 cm) foi ganhando um crescimento significativo e gradual, consumindo mais oxigênio que as demais camadas. Este fenômeno pode representar o amadurecimento do meio filtrante devido ao tempo das três últimas carreiras de filtração.

O consumo crescente nas últimas camadas de meio filtrante, indicam, possivelmente, uma presença maior de microrganismos nesta profundidade. Assim, à medida que o tempo de operação vai avançando, os microrganismos são transportados para as últimas camadas do meio filtrante, fazendo com que o processo de filtração e purificação da água seja realizado em profundidade. De acordo com Von Sperling (2005), quando identificadas alterações na concentração de oxigênio dissolvido, pode significar a ocorrência de atividade microbiana ou movimentação física que pode resultar na dissolução dos gases. Isto possibilita que o meio filtrante por completo atue no processo de filtração da água. Ao mesmo tempo, este fenômeno pode indicar risco potencial de contaminação microbiológica da água filtrada.

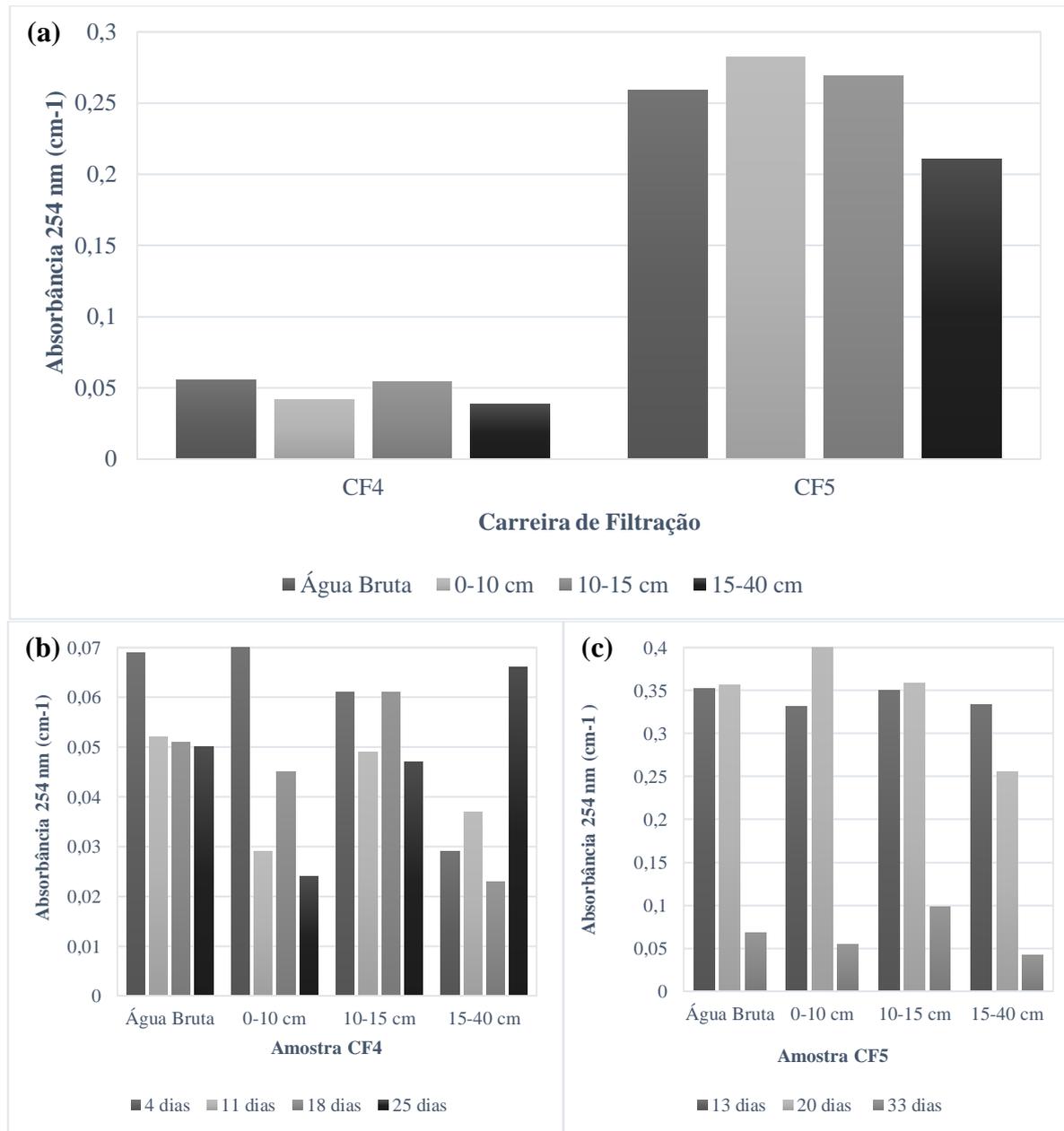
#### **4.4.2 Desempenho do parâmetro absorvância 254 nm ao longo do meio filtrante**

O estudo também avaliou, através do parâmetro absorvância 254 nm, a presença ou concentração indireta de possíveis contaminações biológicas através do monitoramento de proteínas e identificação de compostos orgânicos e inorgânicos do meio filtrante, bem como, a redução indireta de matéria orgânica.

A avaliação da absorvância 254 nm foi desenvolvida para estimar as concentrações de carbono orgânico total e dos precursores de subprodutos da desinfecção (EDZWALD & KAMINSKI, 2009).

Neste estudo, as análises permitiam observar o parâmetro nas últimas duas carreiras de filtração, realizando quatro análises na carreira 4 (nos dias 4, 11, 18 e 25) e três análises na carreira 5 (nos dias 13, 20 e 33). Assim, a Figura 44(a) expressa os resultados médios alcançados na avaliação deste parâmetro ao longo do meio filtrante, e a Figura 44(b) e 44(c) os resultados nos dias de coleta ao longo da carreira de filtração.

Figura 44 – Absorbância 254 nm média ao longo do meio filtrante.



Legenda: (a) Variação média da absorbância 254 nm por camada de filtração. (b) Variação da absorbância 254 nm por camada ao longo da carreira de filtração 4; (c) Variação da absorbância 254 nm por camada ao longo da carreira de filtração 5; Fonte: Autora (2023).

A absorbância é um indicativo da presença de matéria orgânica dissolvida. Segundo a literatura de APHA, AWWA e WEF (2017), no comprimento de onda 254 nm há uma predominância de compostos orgânicos, sendo grande parcela representada por ácidos húmicos. Em diferentes profundidades, o estudo avaliou a absorbância como forma de redução indireta da matéria orgânica, onde a primeira carreira de filtração em análise (CF4) obteve uma redução total de 0,014 cm<sup>-1</sup> do parâmetro. Já a segunda carreira (CF5) indicou uma redução total de

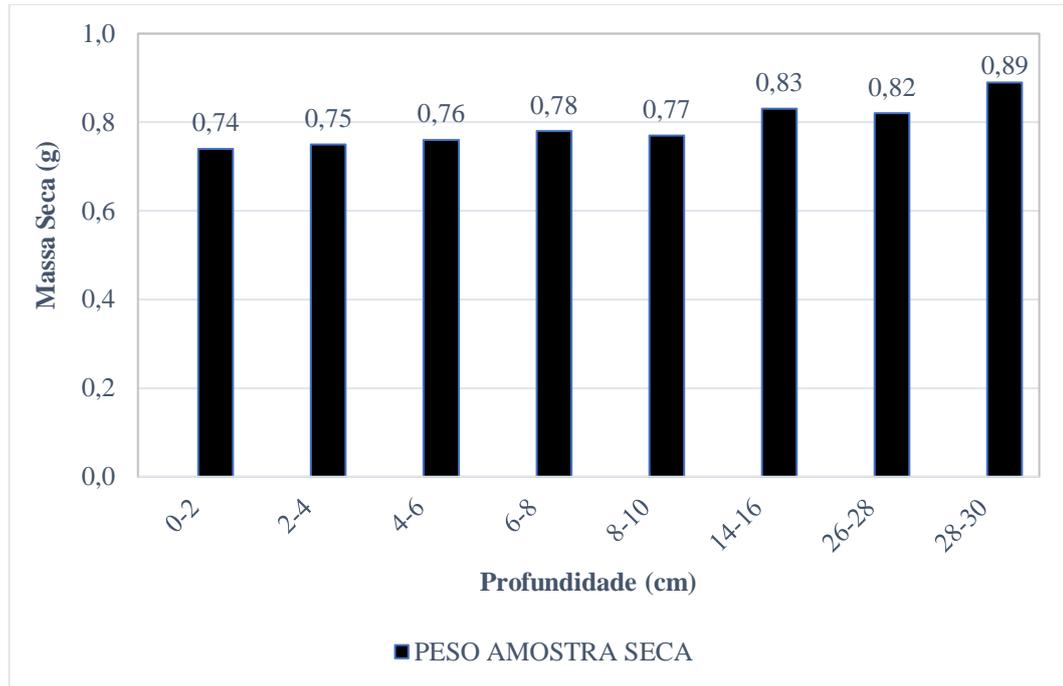
0,115  $\text{cm}^{-1}$  (Figura 44(a)). O parâmetro também possibilitou analisar a presença de matéria orgânica ao longo do meio filtrante durante as carreiras de filtração. Os resultados comprovam a aparente ineficiência de remoção de substâncias húmicas desta tecnologia de tratamento de água (Figura 44(b) e Figura 44(c)). Entretanto, quando os resultados de absorvância 254 nm são observados na Tabela 13, percebe-se que, entre a camada suporte e o reservatório de água filtrada, há uma redução significativa da absorvância. Este resultado sugere que, embora não seja sua função, a camada suporte pode estar contribuindo para a remoção da matéria orgânica. O alto tempo de detenção hidráulica dentro do reservatório de água filtrada, também pode estar contribuindo neste processo.

#### **4.4.3 Análise indireta da variação de sólidos totais ao longo do leito.**

Sólidos totais são um importante parâmetro de análise para o meio filtrante, o que possibilita a determinação do nível de acumulação de partículas sólida no meio filtrante. O método permite estimar também, de forma indireta, a variação da porosidade ao longo do meio filtrante.

Sabe-se que estas análises são cruciais para o desempenho do sistema, no que se refere a qualidade da água, pois podem indicar o arraste de partículas ao longo do meio filtrante, podendo comprometer a qualidade da água filtrada. A partir dos dados obtidos na metodologia de análise, foi possível calcular a massa sólida de cada amostra, sendo em uma grama de amostra coletada de cada camada do meio filtrante, é possível obter a parte seca, ou seja, a variação de carvão encontrada. Contudo, pode-se observar que Figura 45, a presença de massa seca em cada camada.

Figura 45 - Massa sólida seca presente ao meio filtrante no final da carreira de filtração.



Fonte: Autora (2023).

A partir dos dados obtidos é possível verificar a pequena variação de massa sólida entre as camadas, ambas se apresentam com uma diferença máxima de 0,15 gramas. Os resultados indicam que houve, aparentemente, acúmulo de massa sólida ao longo do meio filtrante neste sentido, pode-se observar maior presença de massa sólida nos últimos centímetros do meio filtrante.

A massa sólida presente nas amostras pode se tratar de uma massa física ou mesmo biológica, de acordo com os dados já analisados, e as próprias características da água bruta observadas neste estudo, pode se dizer, que a massa sólida se trata, majoritariamente de material orgânico, o que indica o transporte de material orgânico ao longo do meio filtrante.

Contudo, este parâmetro possibilitou a representação, de forma indireta, da existência de deposição de matéria orgânica, que atua como alimento para os microrganismos, o que representa a maior concentração na camada biológica formada pelo filtro lento, bem como, a presença de matéria orgânica em profundidade no meio, observando o arraste deste material ao longo do meio antracitoso e sua posterior deposição.

#### 4.5 COMPORTAMENTO MICROBIOLÓGICO AO LONGO DO LEITO

Dentre os objetivos deste tipo de sistema está a redução de partículas presentes na água, bem como microrganismos, como bactérias, protozoários, etc., a fim de atender os parâmetros de consumo estabelecidos pelas legislações vigentes. Em sua maioria, o uso de coagulantes químicos está associado à remoção destes parâmetros, o que entra em desacordo com o tipo de tratamento apresentado por este estudo.

Para tanto, a atuação dos microrganismos presentes na camada biológica formada no filtro é um importante processo, e se associa diretamente a altas remoções de coliformes totais e bactérias, porém não se espera uma remoção total na água final, uma vez que a etapa de desinfecção é prevista como etapa final do tratamento (PIZZOLATTI, 2010).

##### 4.5.1 Concentração de coliformes totais e *E. coli* ao longo do meio filtrante

A análise de coliformes totais e *E. coli* neste estudo buscou avaliar o potencial de contaminação da água filtrada, pois se tratando de um grupo de bactérias específicas, esse parâmetro pode vir a indicar contaminações por fezes humanas ou de animais, o que representa um grande risco à saúde humana, e a indicação do uso de mais uma etapa de tratamento, a desinfecção. A Tabela 14 expressa a contagem de colônias por grama de amostra seca.

Tabela 14 - Quantificação de colônias de coliformes formadas por camada de meio filtrante.

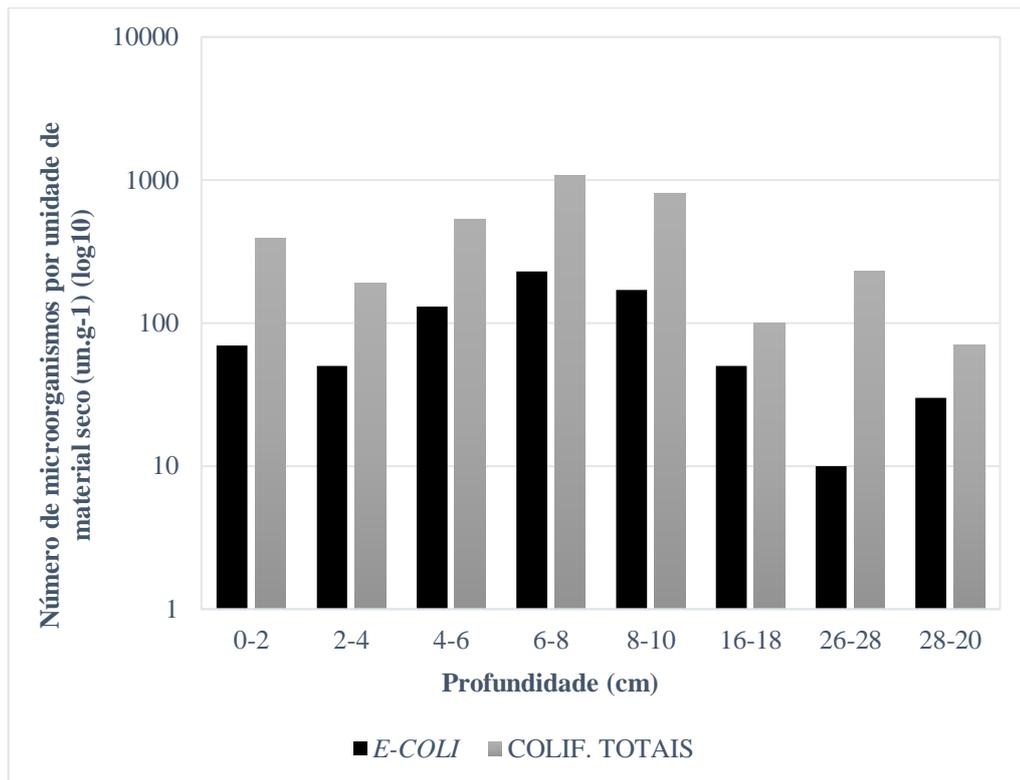
AMOSTRA	E-COLI	COLIF. TOTAIS
<b>1 (0-2 cm)</b>	70	390
<b>2 (2-4 cm)</b>	50	190
<b>3 (4-6 cm)</b>	130	530
<b>4 (6-8 cm)</b>	230	1080
<b>5 (8-10 cm)</b>	170	810
<b>6 (14-16 cm)</b>	50	100
<b>7 (26-28 cm)</b>	10	230
<b>8 (38-40 cm)</b>	30	70

Fonte: Autora (2023).

A representação gráfica dada na Figura 46 apresenta a comparação entre a presença de coliformes totais e *E. coli* em cada camada de meio filtrante analisado. O Apêndice B (Figura 57) representa uma análise visual das análises realizadas nas placas Petri e sequentemente quantificadas.

O conjunto de dados revela variações da presença de colônias de *E. coli* e coliformes totais em diferentes profundidades. Uma tendência ascendente na presença desses microrganismos é observada em profundidades intermediárias, atingindo o pico na faixa de 6-8 cm, sugerindo um acúmulo de coliformes totais e *E. coli* até a profundidade de 8-10 cm. Em profundidades maiores, a presença desses microrganismos tendem a diminuir.

Figura 46 - Quantificação de colônias de coliformes formadas por camada de meio filtrante.



Fonte: Autora (2023).

De acordo com Pizzolatti (2018), a filtração lenta não é um processo adequado para a remoção destes microrganismos, sendo necessário uma etapa posterior a esse tratamento, como a desinfecção. Poncio (2023) em estudo com pré-filtros utilizando carvão antracito, detectou a presença de *E.coli* utilizando uma granulometria de meio filtrante de 0,4 mm e 0,6 mm, já relacionado a coliformes o mesmo estudo evidenciou a presença significativa nos primeiros 10 centímetros.

Os resultados indicam a passagem de microrganismos entre as camadas de meio filtrante, o que potencialmente indicaria a presença dos mesmos na água filtrada. Coliformes totais presente na água indicam a presença de bactérias coliformes, sendo um indicador de contaminação. Contudo, a *E.coli* presente na composição destes coliformes totais indica a

presença de contaminante fecal, ambos são indicadores da presença de outros organismos que, possivelmente, podem vir a ser prejudiciais à saúde humana. De acordo com a Portaria 888/21, para abastecimento de populações menores que 5.000 habitantes, devem ser analisadas 5 amostras mensais, com ausência em 100 ml de amostra.

A Portaria nº 888 de 2021, ainda estabelece a ausência de *Escherichia coli* e outros microrganismos patogênicos na água de consumo. Para considerar água potável, não deve se encontrar nenhum tipo de bactérias do grupo da *Escherichia coli*, pois esta indica que há uma contaminação fecal, sendo essa encontrada nas fezes dos seres humanos e de animais de sangue quente (FUNASA, 2013).

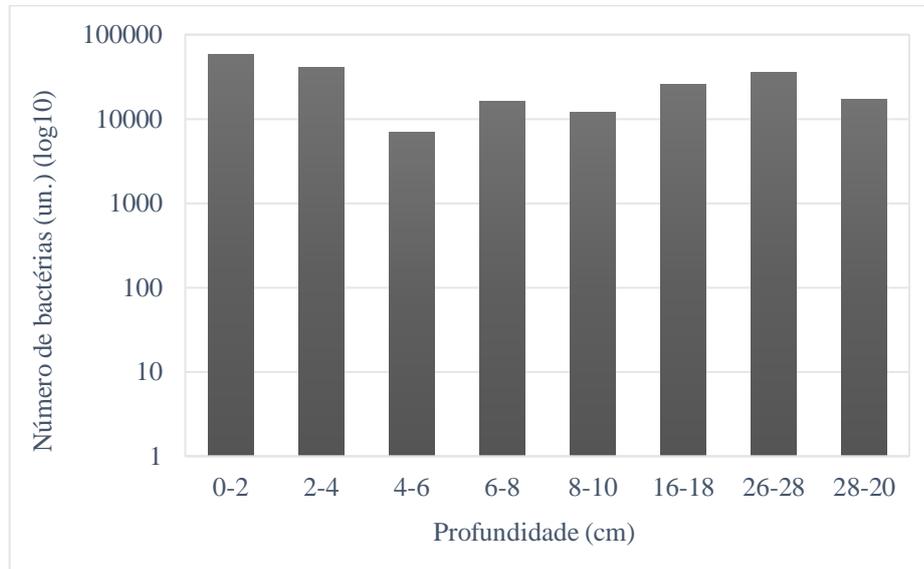
Contudo, a possível influência destes microrganismos na água filtrada é notável, indicando a necessidade de pós-tratamento da água para abastecimento público.

#### **4.5.2 Concentração de bactérias heterotróficas**

Em um sistema de filtração lenta, as bactérias desempenham um papel fundamental no processo de purificação da água. Dentre suas demasiadas formas, as bactérias são comuns no meio filtrante, podendo ser aeróbias capazes de remover substâncias orgânicas, odores e sabores da água, bactérias coliformes capazes de indicar a qualidade da água, bactérias nitrificantes capazes de remover nitrogênio da água e bactérias heterotróficas capazes de remover poluentes orgânicos.

Através das análises microbiológicas da presença de bactérias heterotróficas, pode-se observar a presença desses microrganismos em diferentes profundidades do meio filtrante. Neste estudo, foi observado um acúmulo significativo desses microrganismos, com níveis mais elevados nas camadas superficiais (0-2 cm e 2-4 cm), e uma redução em maiores profundidades (Figura 47).

Figura 47 - Quantificação de colônias de bactérias heterotróficas formadas por camada de meio filtrante.



Fonte: Autora (2023).

Na filtração lenta as atividades bacterianas são consideradas menores nas últimas camadas. Já em camadas mais superficiais esse sistema é capaz de apresentar maior ocorrência de atividade bacteriana, devido a uma maior retenção e acúmulo de sólidos. Tornando propenso o desenvolvimento de microrganismos como protozoários, algas, fungos e bactérias. (BAVEYE et al., 1998; GRACE et al., 2016; SOARES; PIZZOLATTI, 2019).

A partir dos dados coletados, pode-se observar um domínio na presença de colônias de bactérias ao longo do meio filtrante, em especial nas primeiras camadas de meio filtrante, onde há a formação da camada biológica promovendo a proliferação destes microrganismos em maior concentração, bem como maior disponibilidade de oxigênio dissolvido. Os resultados também evidenciaram a presença de bactérias nas camadas inferiores, com um acréscimo significativo na camada 26-28 cm. Isto demonstra o arraste destes microrganismos ao longo do meio filtrante, e potencial risco de contaminação da água filtrada demonstrado também pelas concentrações de oxigênio dissolvido presentes nas análises supracitadas. No Apêndice B (Figura 57) é possível visualizar as colônias formadas em placas Petri.

Poncio (2023) em estudo com pré-filtros compostos por carvão antracito identificou um grande número de colônias de bactérias heterotróficas nas diferentes profundidades, sendo que o pré-filtro composto por carvão antracitoso de granulometria de 0,2 mm, registrou o maior pico de retenção dessas bactérias, ainda nos primeiros 10 cm da camada filtrante, atingindo a contagem de 4.290 unidades de colônias. Em comparação ao presente estudo, a maior parcela de colônias dessas bactérias também foi detectada nos primeiros centímetros, podendo ainda

relacionar com a granulometria dispostas após as retrolavagens, onde grânulos maiores tendem a descer e menores a permanecer na superfície.

#### **4.5.3 Concentração de esporos de bactérias aeróbias**

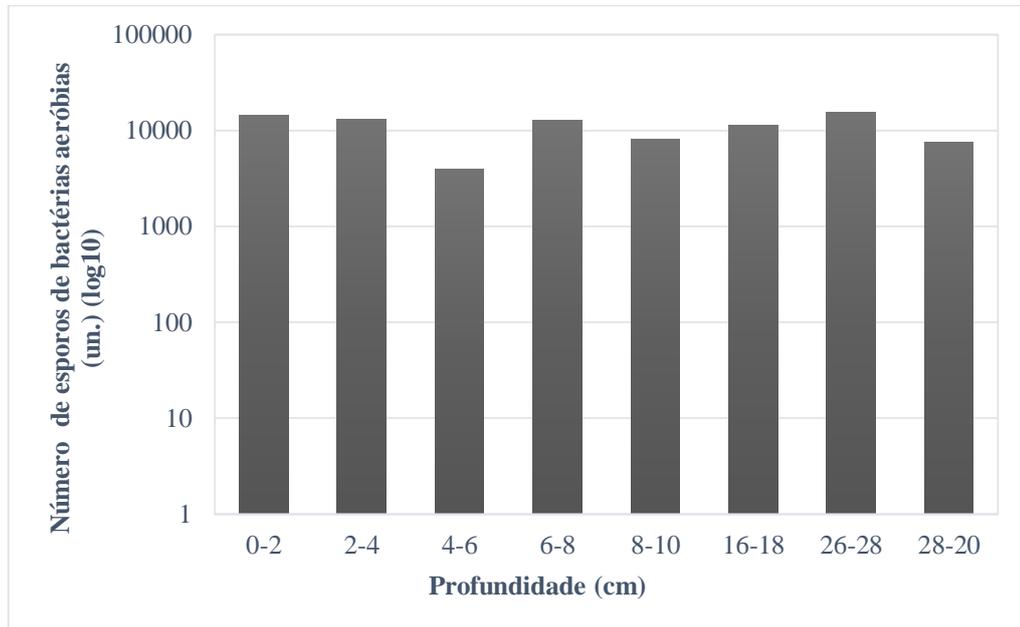
O estudo também avaliou a presença de esporos de bactérias aeróbias ao longo do meio filtrante. Por serem estruturas resistentes, esta análise é utilizada, como preconiza a Portaria de Potabilidade 888 (2021), como indicadora da remoção de (oo)cistos de protozoários patogênicos.

De acordo com Oliveira et.al. (2018), esporos de bactérias aeróbias tem sido testados e utilizados como indicadores de remoção/inativação de cistos e oocistos de protozoários em sistemas de tratamento de água. Isto é possível pois essa estrutura é formada por células metabolicamente dormentes, altamente resistentes a estresse químicos e físicos (LOGAN & DEVOS, 2009).

A presença de protozoários pode representar um desafio para a eficiência do processo de filtração lenta, e medidas adicionais, como monitoramento específico para protozoários, podem ser necessárias para aprimorar o sistema e garantir a remoção eficaz desses organismos. Neste sentido, a análise de esporos se torna ainda mais relevante por se tratar de uma metodologia de análise muito mais simples e menos onerosa, do que a indicada para os cistos e oocistos de protozoários (NIEMINSKI; BELLAMY; MOSS, 2000).

De modo geral foram observado esporos de bactérias aeróbias ao longo de todo o meio filtrante, visto que há o aumento progressivo destes esporos. A concentração máxima observada foi de 15400 esporos na profundidade de 26-28 cm. O comportamento do parâmetro entre as camadas não expressa uma sazonalidade. Uma análise visual em placas de Petri pode ser realizada no Apêndice B (Figura 59).

Figura 48 - Quantificação de esporos de bactérias aeróbias formadas por camada de meio filtrante.



Fonte: Autora (2023).

A presença de esporos de bactérias aeróbias nas camadas mais profundas do meio filtrante sugere a presença e o transporte de protozoários durante o processo de filtração. Devido ao seu tamanho microscópico e forma peculiar, as forças hidráulicas atuantes durante o processo de filtração, a distribuição granulométrica e a espessura do meio filtrante possivelmente permitiram que esses microrganismos fossem transportados para profundidades maiores.

De acordo com a Portaria 888/21, quando identificada a presença de *E.coli* nas análises (em tempo e concentração indicados) deve-se avaliar a eficiência de remoção da Estação de Tratamento de Água (ETA) por meio do monitoramento semanal de esporos de bactérias aeróbias. A detecção dos protozoários, é parte integrante dos esforços para garantir a segurança da água para consumo humano e ambiental, visto que alguns protozoários podem ser patogênicos, causando doenças em seres humanos e animais, tais como: toxoplasmose, doença de chagas, amebíase, giardíase, criptosporidiose entre outras.

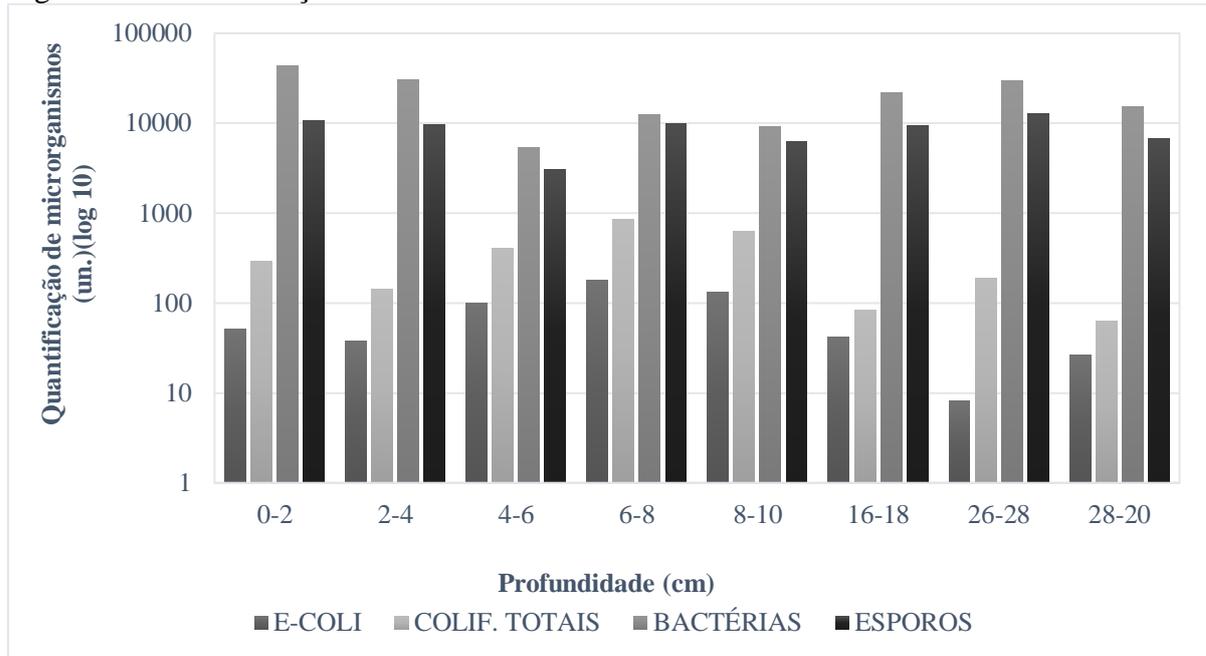
#### 4.5.4 Concentração total de microrganismos em massa seca de meio filtrante

A análise e quantificação dos parâmetros de bactérias e coliformes possibilitou o entendimento do comportamento destes no meio, porém, cabe ressaltar que o método de análise se baseou em amostras úmidas de meio filtrante. Com a avaliação dos sólidos totais de cada

amostra analisada, este capítulo busca apresentar um compilados dos dados de concentração de bactérias e coliformes por amostra seca de meio filtrante.

A Figura 49 destaca os resultados obtidos através da quantificação de microrganismos encontrados nas amostras, desconsiderando através de metodologias matemáticas a presença de partes úmidas do meio.

Figura 49 – Concentração de Coliformes e Bactérias em amostra seca de material filtrante.



Fonte: Autora (2023).

Os dados expressos evidenciaram a presença em quantidade destes microrganismos, o que, de modo geral, apresenta uma passagem significativa desses parâmetros entre as camadas de meio filtrante. Fato, possivelmente atrelado a características granulométricas do meio filtrante, o que possibilita uma passagem de substratos como oxigênio dissolvido e matéria orgânica para camadas mais profundas de antracito. Por possuírem formato variando entre agudo e desgastados, os grãos de antracito permitem maior adesão em sua superfície (DI BERNARDO, 2003).

De modo geral, o gráfico apresentado expressa a presença destes microrganismos em matéria seca de carvão antracito, considerando uma escala logarítmica 10, indicando uma alta percolação de matérias e microrganismos ao longo do meio filtrante.

## 5. CONCLUSÃO

Considerando os aspectos hidráulicos operacionais, embora a expansão do meio filtrante tenha estado dentro do recomendado, o tempo de retrolavagem se mostrou, aparentemente, insuficiente para a limpeza do meio filtrante, embora o monitoramento da perda de carga do sistema tenha demonstrado o contrário. O estudo desenvolvido teve por objetivo avaliar o comportamento deste tipo de tecnologia de tratamento de água, a fim de conhecer seus limites e especificações, para que a mesma possa ser aplicada futuramente em pequenas comunidades rurais.

A perda de carga no sistema se apresentou significativa nos primeiros 10 centímetros de meio filtrante. Isto indica que esta camada é a principal responsável pela remoção de partículas em suspensão. Ao longo da profundidade do meio a perda de carga foi mínima, indicando uma passagem do fluido sem grandes perdas de energia.

Pôde-se notar que padrões físicos de qualidade da água, como turbidez e cor aparente e verdadeira, não atingiram as recomendações da Portaria nº 888 de 2021. Entretanto, tais características apresentaram elevada remoção após o processo de filtração, mesmo associados à variações de qualidade da água bruta proveniente do manancial, provenientes de eventos climáticos de precipitação.

Alterações bruscas de temperatura, associadas a eventos climáticos, aparentemente influenciaram na disponibilidade de oxigênio dissolvido na água bruta.

A estabilidade dos parâmetros pH e a condutividade elétrica do meio indicam inexistência de alterações significativas na água bruta e filtrada, como a eutrofização do manancial por falta de oxigênio dissolvido, bem como na camada biológica formada.

Quando o meio filtrante é analisado, percebeu-se que carreiras de filtração longas levaram ao elevado consumo de oxigênio dissolvido ao longo meio filtrante, especialmente nas últimas camadas, o que indica elevada atividade microbiológica em profundidade no leito.

Foi observado também que, assim como demonstra a literatura, a remoção de substâncias húmicas não parece ser um ponto positivo deste tipo de tecnologia de tratamento de água.

Em relação as características microbiológicas do meio filtrante encontradas após finalização da operação do filtro, foi possível detectar a presença de coliformes totais, *E.coli*, bactérias e esporos ao longo de toda profundidade do meio filtrante. Isto indica o transporte

significativo destes microrganismos através das camadas filtrantes, e potencial contaminação da água filtrada.

Recomenda-se, para estudos futuros, o aumento do tempo de lavagem para melhorar a eficiência de lavagem do meio filtrante na retrolavagem. Ainda, recomenda-se o uso de um pré-filtro, anterior a filtração lenta, a fim de remover sólidos suspensos antes da passagem da água pelo sistema de filtração lenta, para que a mesma se adeque aos limites de uso para esta tecnologia.

Contudo, o sistema se apresentou de grande valia no processo de tratamento de água, sendo importante fonte de estudo e desenvolvimento para uso direto em pequenas comunidades. O abastecimento de água potável é uma necessidade de muitas regiões, e tratamentos como este demandam de incentivo e pesquisa para sua aplicação, o que visa um progresso futuro, onde todos possam ter acesso a direitos básicos e cruciais para a manutenção da vida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT.NBR 7181: **Análise granulométrica**: Método de ensaio. Brasil, 1984.

ABNT. NBR 6457: **Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Brasil, 1986.

APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington: American Public Health Association, Ed. 2005

BOTARI, A.; DI BERNARDO, L. **Modelação da perda de carga na filtração direta ascendente em meio granular de areia grossa e pedregulho**. Engenharia Sanitaria e Ambiental. v. 14, n. 2, p. 245-256, 2009.

CLEARY, R. W., 1989. **Águas subterrâneas**. Princeton Groundwater, INC. 111 pp.

DALSASSO, R. L. **Estudo de diferentes materiais para floculação em meio granular, precedendo a filtração rápida descendente no tratamento de água para abastecimento**. 2005. 254 f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2005.

DE SOUZA, F. H. **Tratamento de água para abastecimento por meio de filtros lentos de fluxo ascendente com limpeza por retrolavagem e descarga de fundo**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, Florianópolis, 2015.

DI BERNARDO, L.; BRANDÃO, C. C. S.; HELLER, L. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (Brasil). **Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

DI BERNARDO, Luiz e DANTAS, Angela Di Bernardo. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. . São Carlos: RiMa. . Acesso em: 23 set. 2023.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. São Carlos: LDIBE. 2008.

EMMENDOERFER, M. L. – **Filtração Lenta com retrolavagem para propriedades rurais de uso familiar**. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

EMBRAPA (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**/ Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017.

FARIAS, N. J. V. D. **Desempenho de filtros lentos período de amadurecimento procedimentos de pré-filtração em pedregulho no tratamento de água contendo células tóxicas de *Microcystis aeruginosa***., 10 abr. 2012.

FREITAS, B. L. S. **Filtros lentos em escala domiciliar como alternativa de tratamento de águas com risco microbiológico em comunidades isoladas**. 2017. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Usp, São Carlos, 2017.

FUNASA. **Caderno Técnico: Projeto e operação de filtros lentos retrolaváveis para o tratamento de água para abastecimento** Florianópolis-SC, 2019.

FUNASA. **Manual prático de análise de água**: Brasília, DF, 2013.

HACH. **Produtos**. 2021. Disponível em: <https://pt.hach.com/>. Acessado em: 18 out. 2023.

HAARHOFF, J. E. CLEASBY, J.L. (1991). **Biological and Physical Mechanisms in Slow Sand Filtration**. In: Longsdon, G.S. (ed.) *Slow Sand Filtration*. ASCE – American Society of Civil Engineers, Nova Iorque, E.U.A., 19-68.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. de. **Abastecimento de água para consumo humano**. 2ª edição, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

Heller, L., & Pádua, V. L. (2006). **Abastecimento de água para consumo humano**. UFMG.

HESPANHOL, I. **Investigação sobre o Comportamento e Aplicabilidade de Filtros Lentos do Brasil**. 1969. f. Tese)-Faculdade de Higiene e Saúde Pública – USP, São Paulo, 1969.

HOWE, Kerry J.; MÃO, David W.; CRITTENDEN, John C.; TRUSSELL, R. R.; TCHOBANOGLIOUS, George. **Princípios de Tratamento de Água**. Cengage Learning Brasil, 2016. *E-book*. ISBN 9788522124084. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522124084/>. Acesso em: 05 mar. 2023.

HYMNO, F; PIZZOLATTI, B.S.; SENS, M.L. **Filtração lenta com retrolavagem: meio filtrante e sua influência na qualidade de água e comparação com o processo convencional por raspagem**. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2014

ISHII, M. M. **Filtração lenta com retrolavagem para tratamento de água de abastecimento**. 2013. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013.

KAWAMURA, S. **Design and operation of high-rate filters**. American Water Works Association. V. 91, n. 12, p. 77-90, 1999. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1999.tb08752.x>.

LEME, F. P. **Teoria e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: Ed. 1990.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Átomo, 2008.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3ª edição, Campinas: Átomo, 2010.

LIMA, R. de C. R. **Avaliação econômica das tecnologias de filtração direta aplicada ao tratamento de água para abastecimento de pequenas populações**. 2019. 223 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Usp, São Carlos, 2019.

LOGSDON, G S et al. **Slow sand filtration for small water systems.** *Journal Of Environmental Engineering And Science*, New York, v. 1, n. 2, p. 339-348, set. 2002.

LUNARDI, S. **Estudo de arranjo granulométrico e condições operacionais de préfiltração seguida de filtração lenta.** Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, UFSM, *Campus Frederico Westphalen*, 2021.

MARTINS, M. **Estudo da colmatação biológica através da atividade enzimática em colunas de simulação de sistema de filtração em margem.** 2021. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) -Universidade Federal de Santa Maria Frederico Westphalen, 2021.

NAKAMOTO, N.et al. **Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes.** IWA Publishing, Ed. 2014.

NAPOTNIK, Julie A.; BAKER, Derek; JELLISON, Kristen L. **Influence of sand depth and pause period on microbial removal in traditional and modified biosand filters.** *Pesquisa* 76 de água, v. 189, p,116577, 2021.

NEUCKAMP, S.; SPILIMBERGO, P.A. **Combustão do antracito com pedras calcárias: captura de poluentes.** Primeira Feira Regional de Matemática. 2004.

NIEMINSKI, E.C.; BELLAMY, W.D.; MOSS, L.R. (2000) **Using surrogates to improve plant performance.** *Journal of the American Water Works Association*, v. 92, n. 3, p 67-78.

PATERNIANI, José E. S.; DA CONCEIÇÃO, Celso H. Z. **Eficiência da Pré-Filtração e Filtração Lenta no Tratamento de Água para Pequenas Comunidades** - Eng.ambient., Espírito Santo do Pinhal, v.1, n.1, p. 017-024, jan./dez., 2004.

PONCIO, T. **Avaliação da eficiência de sistemas de pré-tratamento de água utilizando filtros preenchidos com diferentes materiais e características granulométricas** Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, UFSM, *Campus Frederico Westphalen*, 2023.

PIZZOLATTI, B. S. **Estudos de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem** 2010. 105 f. Dissertação)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis -SC, 2010.

PIZZOLATTI, B. S. **Influência da técnica de limpeza de filtros lentos e diâmetro dos grãos sobre a qualidade da água produzida, com destaque para remoção de carbamatos e oocistos de *Cryptosporidium* (simulados por microesferas).** 2014. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)-Universidade Federal de Santa Catarina, FlorianópolisSC, 2014.

PUHL, V.A. **Avaliação da colmatação biológica através da atividade enzimática em filtros lentos intermitentes para uso unifamiliar** Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, UFSM, *Campus Frederico Westphalen*, 2021.

REGIONAL, Ministério da Integração e do Desenvolvimento. **Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento** 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/ptbr/assuntos/saneamento/snis/painel>.

RICHTER, C. A; NETTO, J. M. de A. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. 1ª edição, São Paulo: Blucher, 1991.

RICHTER, C.A. **ÁGUA: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

SANTOS, L. et.al. **Aplicação da tecnologia de filtração em margens para redução ou eliminação de contaminantes físico-químicos na região semi-árida de Pernambuco** XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2011

SECKLER, Sidney. **Tratamento de Água - Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento**. Grupo GEN, 2017.

SNIS. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e de Esgoto** – 2017. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2021.

SILVA, K. M. DE S. **Descrição das tecnologias de tratamento de água no Brasil e suas distribuições por regiões no país**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, PB, 2020.

SOARES, M.; PIZZOLATTI, B. S.; SENS, M. L. **Estudo Hidrogeológico Preliminar para a Avaliação do Potencial de Colmatação do Sedimento das Margens da Lagoa do Peri e do Canal Sangradouro– Florianópolis – Santa Catarina – para a Implantação da Técnica da Filtração em Margem**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ. v. 43, n. p. 2019. [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_4\\_46\\_55](http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_46_55).

SOARES, M. B. D. **The Influence of High Infiltration Rates, Suspended Sediment Concentration and Sediment Grain Size on River and Lake Bed Clogging**. 2015. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Technische Universität Berlin, Berlin, 2015.

SOARES, M.; PIZZOLATTI, B. S. **Estudo do Efeito da Colmatação sobre a Condutividade Hidráulica, Porosidade Total e Remoção da Turbidez Utilizando Diferentes Meios Filtrantes, como Apoio à Implementação da Técnica da Filtração em Margem**. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ. v. 43, n. 1, p. 17, 2019.

SOUZA, F. H. D. **Tratamento de água para abastecimento por meio de filtros lentos de fluxo ascendente com limpeza por retrolavagem e descarga de fundo**. 2015. 118 f. Dissertação (Mestrado)-UFSC, Florianópolis-SC, 2015.

STÜPP, A. J.; SOUZA, F. H. D. **Avaliação do Funcionamento de um filtro Lento com retrolavagem Automática para o tratamento de Água de abastecimento em pequenas comunidades**. 26 ago. 2016.

TCHOBANOGLIOUS, G.; HOWE, K. J.; HAND, D. W.; CRITTENDEN, J. C.; TRUSSEL, R. R. **Princípios de Tratamento de Água**. 1ª edição, São Paulo: Cengage, 2016.

TSUTIYA, M.T.; HIRATA, A.Y. (2001) **Aproveitamento e disposição final de lodos de Estação de Tratamento de Água do estado de São Paulo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2001. Anais. João Pessoa: ABES.

TUFENKJI, N.; RYAN, J. N.; ELIMELECH, M. **Peer Reviewed: The Promise of Bank Filtration. Environmental Science & Technology.** v. 36, n. 21, p. 6, 2002. 10.1021/es022441j.

TSUTIYA, M T. **Abastecimento de água** 4. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade, p. 643, 2014.

VERAS, L. R. V.; DI BERNARDO, L. **Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas** - FiME Engenharia Sanitaria e Ambiental. v. 13, n. 1, p. 17, 2008

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: UFMG/Departamento de Engenharia Sanitária, Ed. 2005.

WANG, et al. **MS2 Bacteriophage Reduction and Microbial Communities in Biosand Filters. Environmental Science Technology,** p. 6702-6709, 2014.

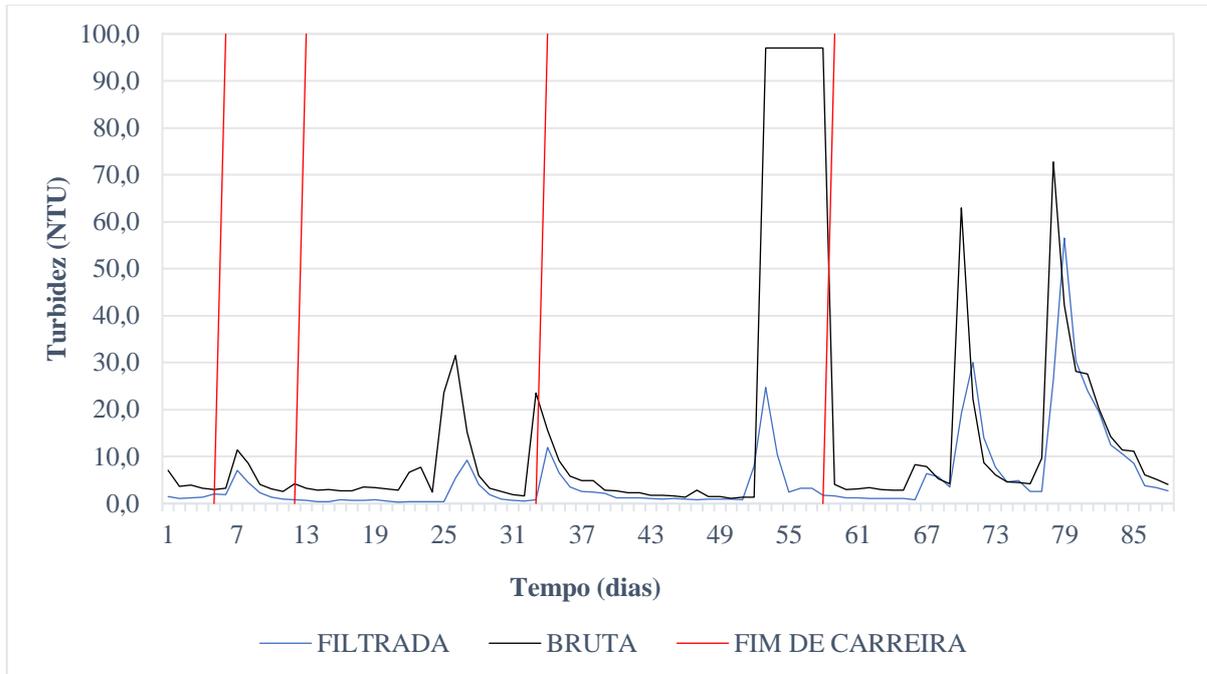
WIECHETECK, G. K. **Influência do método de lavagem por características de carvões antracitoso e betuminoso utilizados em meio filtrante.** 1996. 175 f. Dissertação (Mestrado) – USP, São Carlos – SP, 1996.

---

## APÊNDICE A

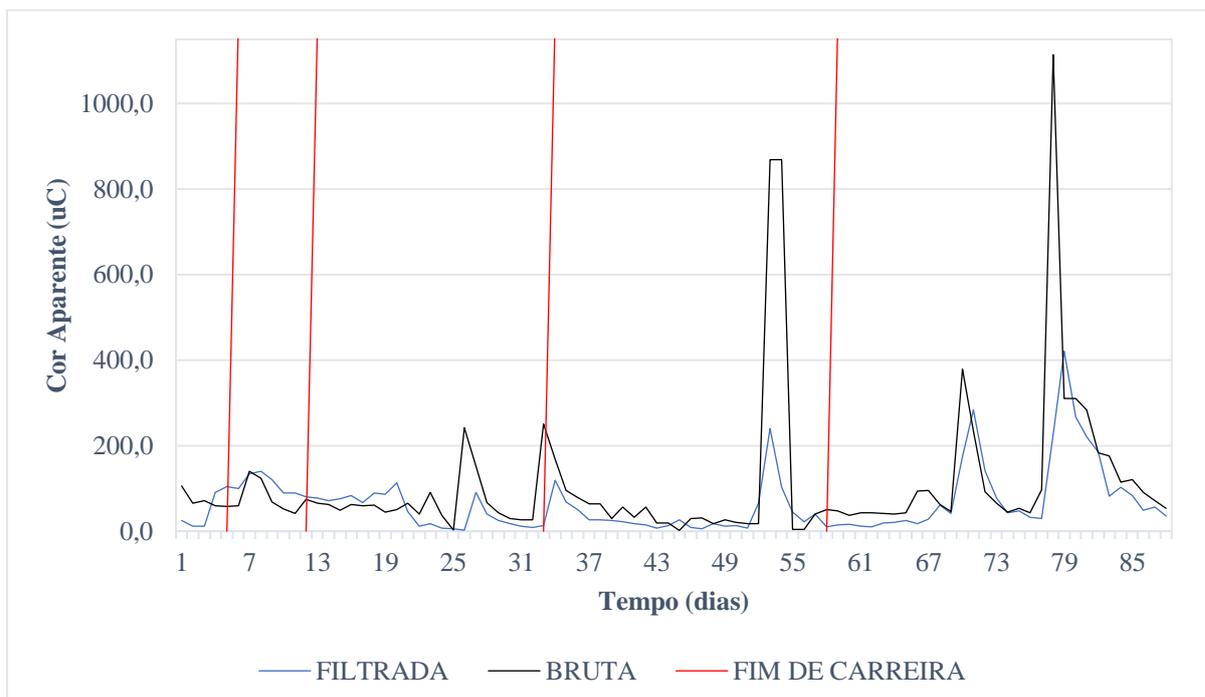
### ANÁLISES DE QUALIDADE DA ÁGUA

Figura 50 - Valores de turbidez de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.



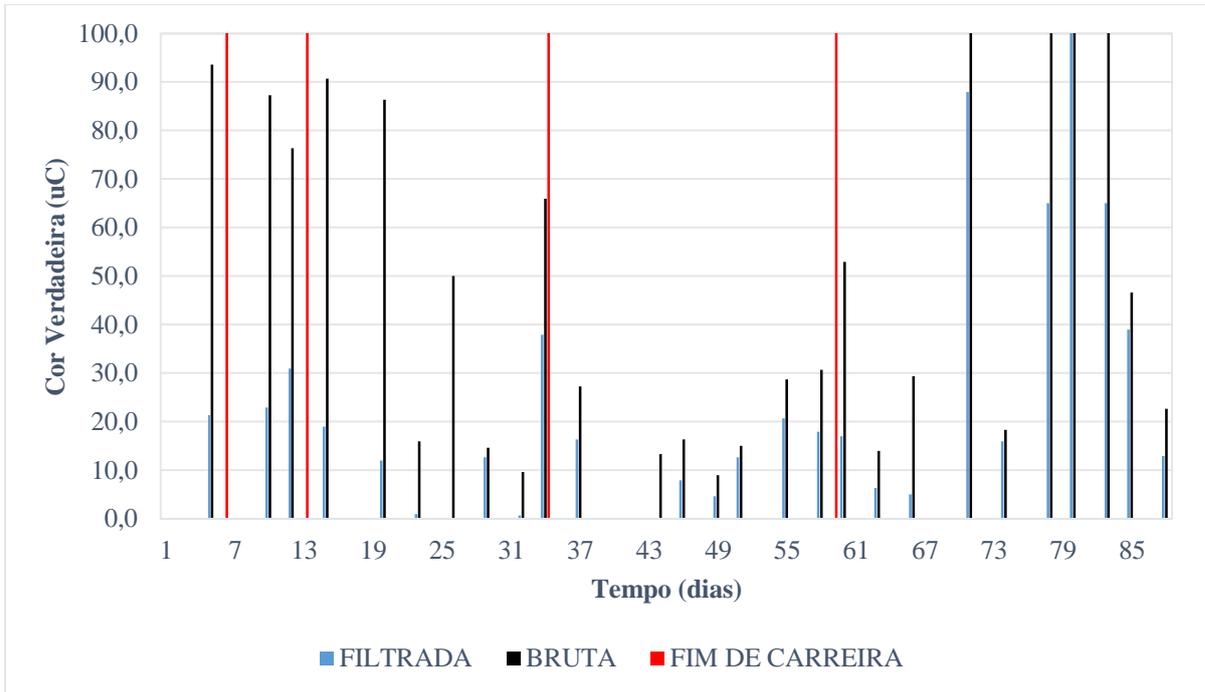
Fonte: Autora (2023).

Figura 51 - Valores de cor aparente de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.



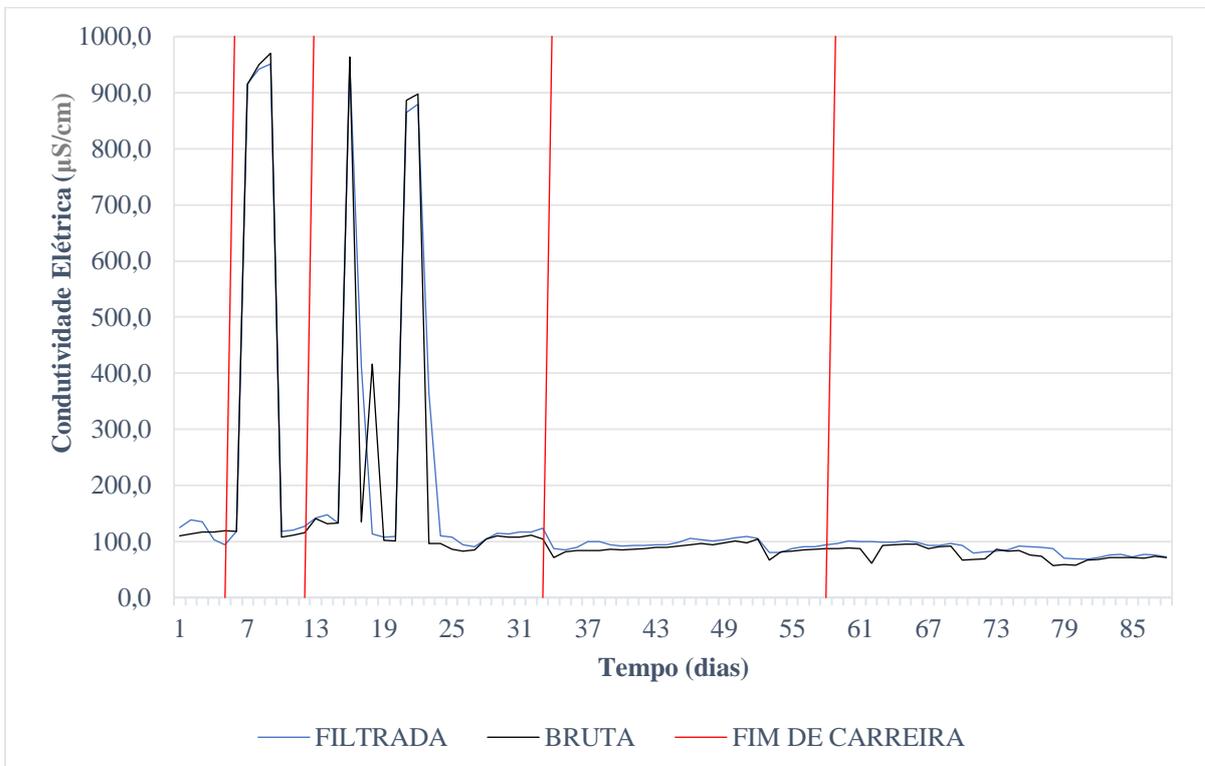
Fonte: Autora (2023).

Figura 52 - Valores de cor verdadeira de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.



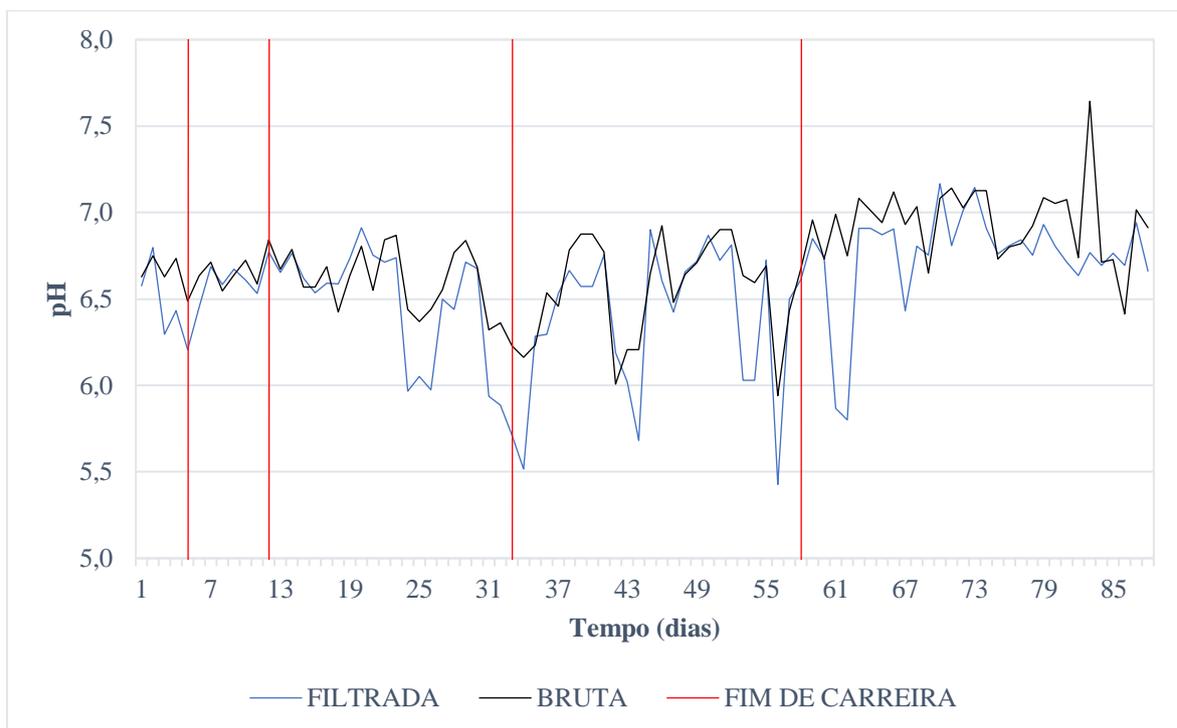
Fonte: Autora (2023).

Figura 53- Valores de oxigênio dissolvido de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.



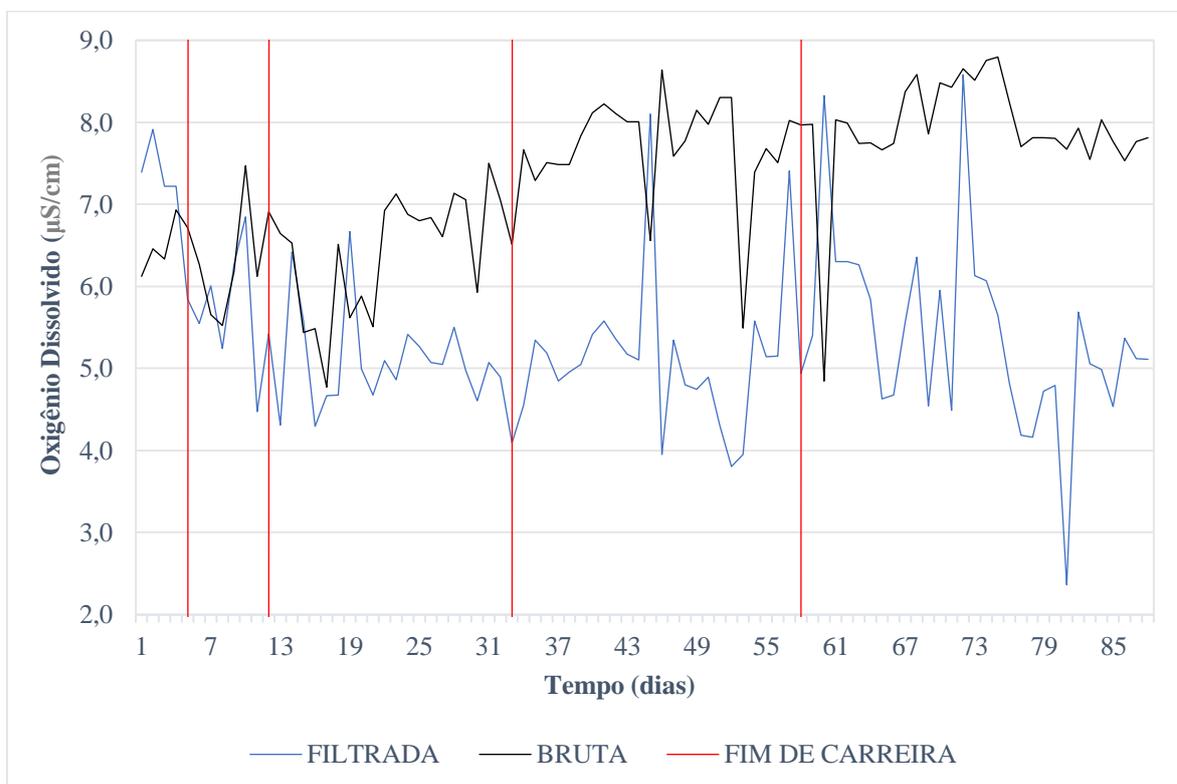
Fonte: Autora (2023).

Figura 54 - Valores de pH de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.



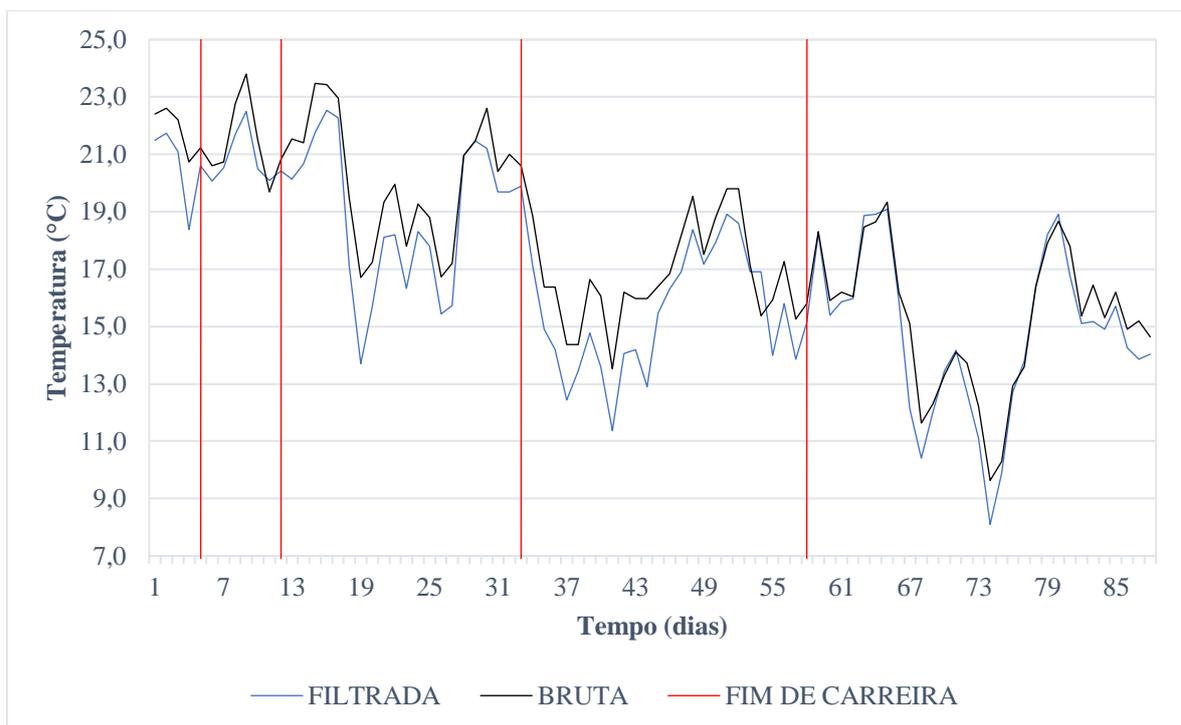
Fonte: Autora (2023).

Figura 55 - Valores de Oxigênio Dissolvido de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.



Fonte: Autora (2023).

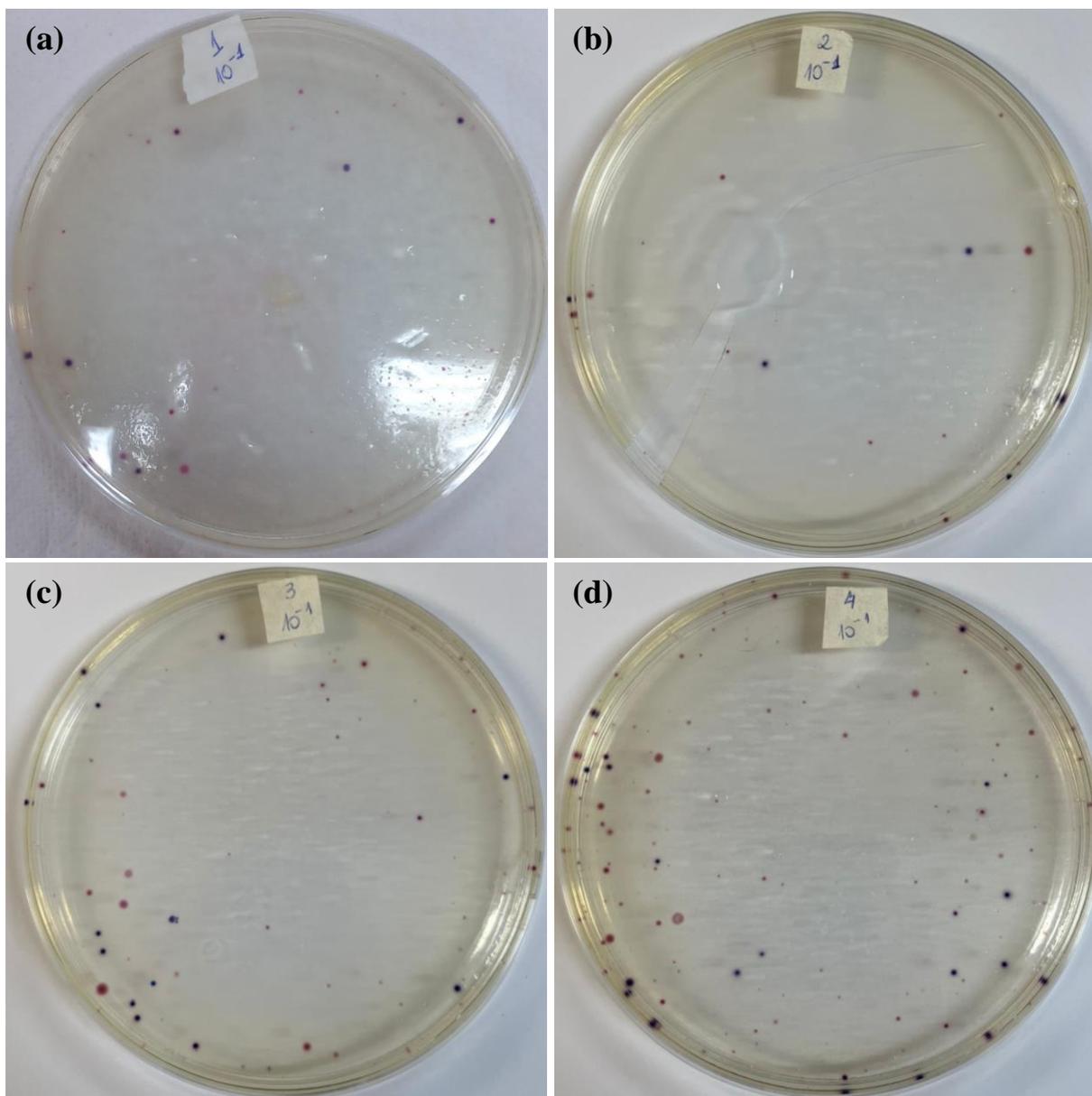
Figura 56 - Valores de Temperatura de água bruta e filtrada por tempo de monitoramento.

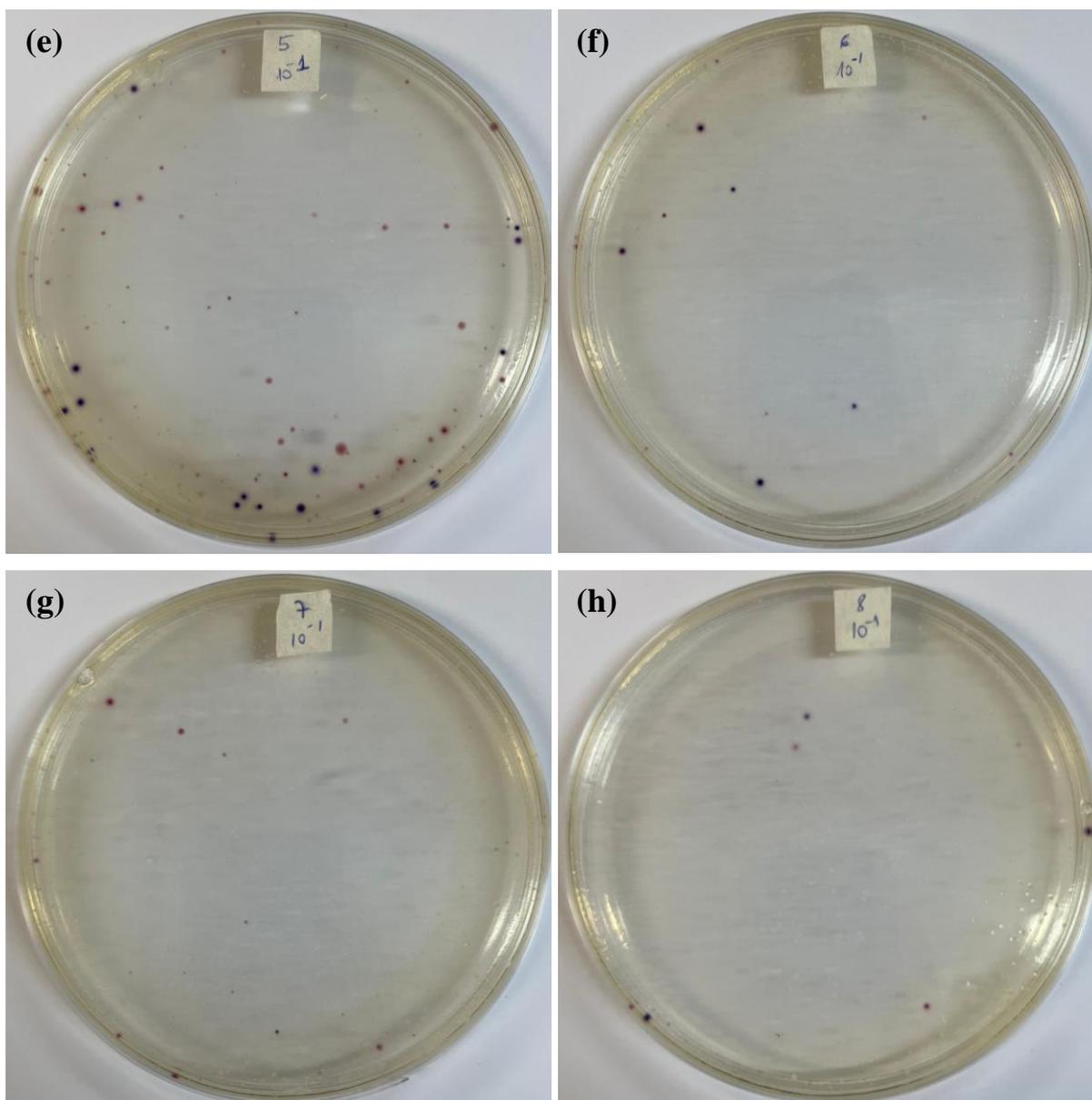


Fonte: Autora (2023).

## APÊNDICE B

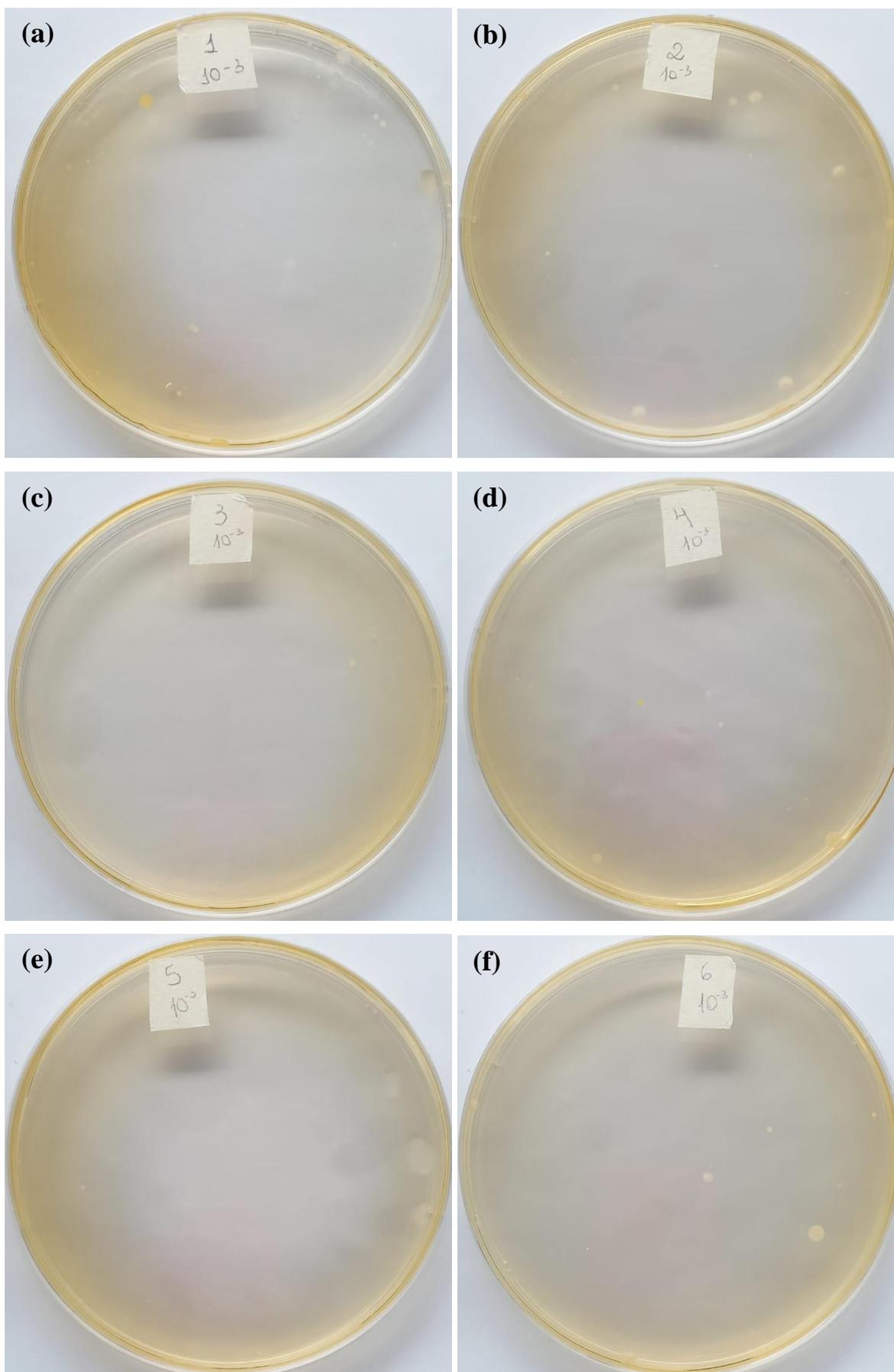
## ANÁLISES DE MICROBIOLÓGICAS

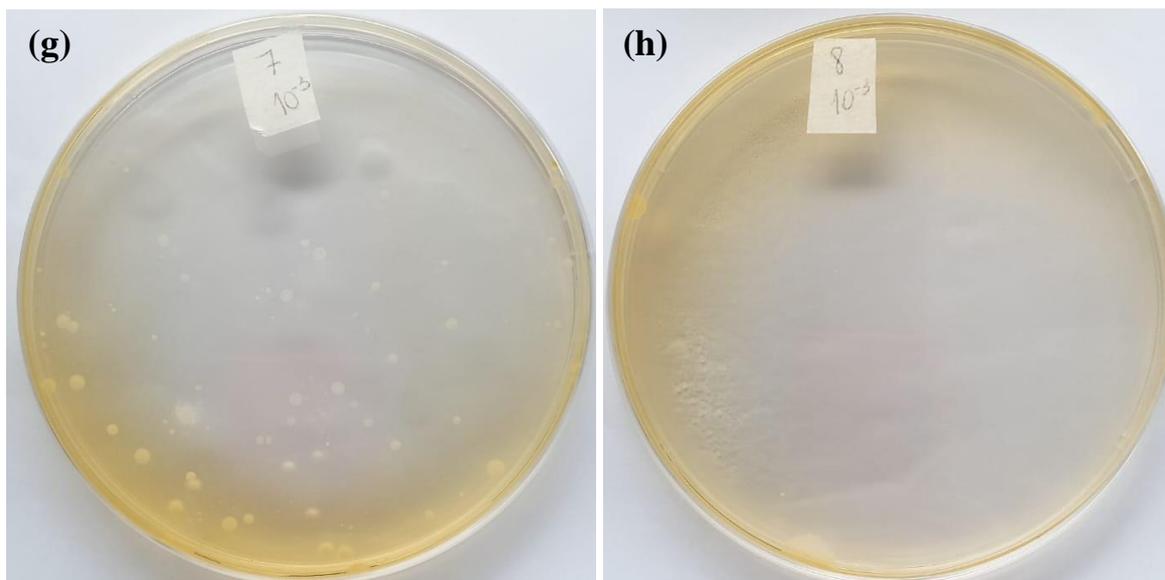
Figura 57 – Análises Microbiológicas *E-Coli* e Coliformes Totais.



Legenda: (a) Análise camada 1 (0-2 cm); (b) Análise camada 2 (2-4 cm); (c) Análise camada 3 (4-6 cm);  
(d) Análise camada 4 (6-8 cm); (e) Análise camada 5 (8-10 cm); (f) Análise camada 6 (14-16 cm);  
(g) Análise camada 7 (26-28 cm); (h) Análise camada (38-40 cm). Fonte: Autora (2023).

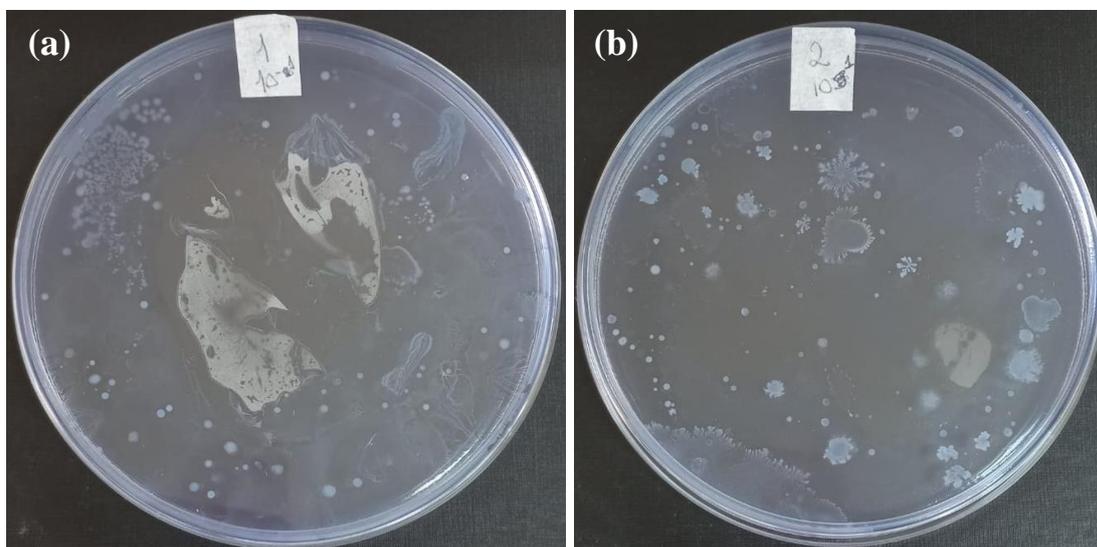
Figura 58 – Análises Microbiológicas de Bactérias.

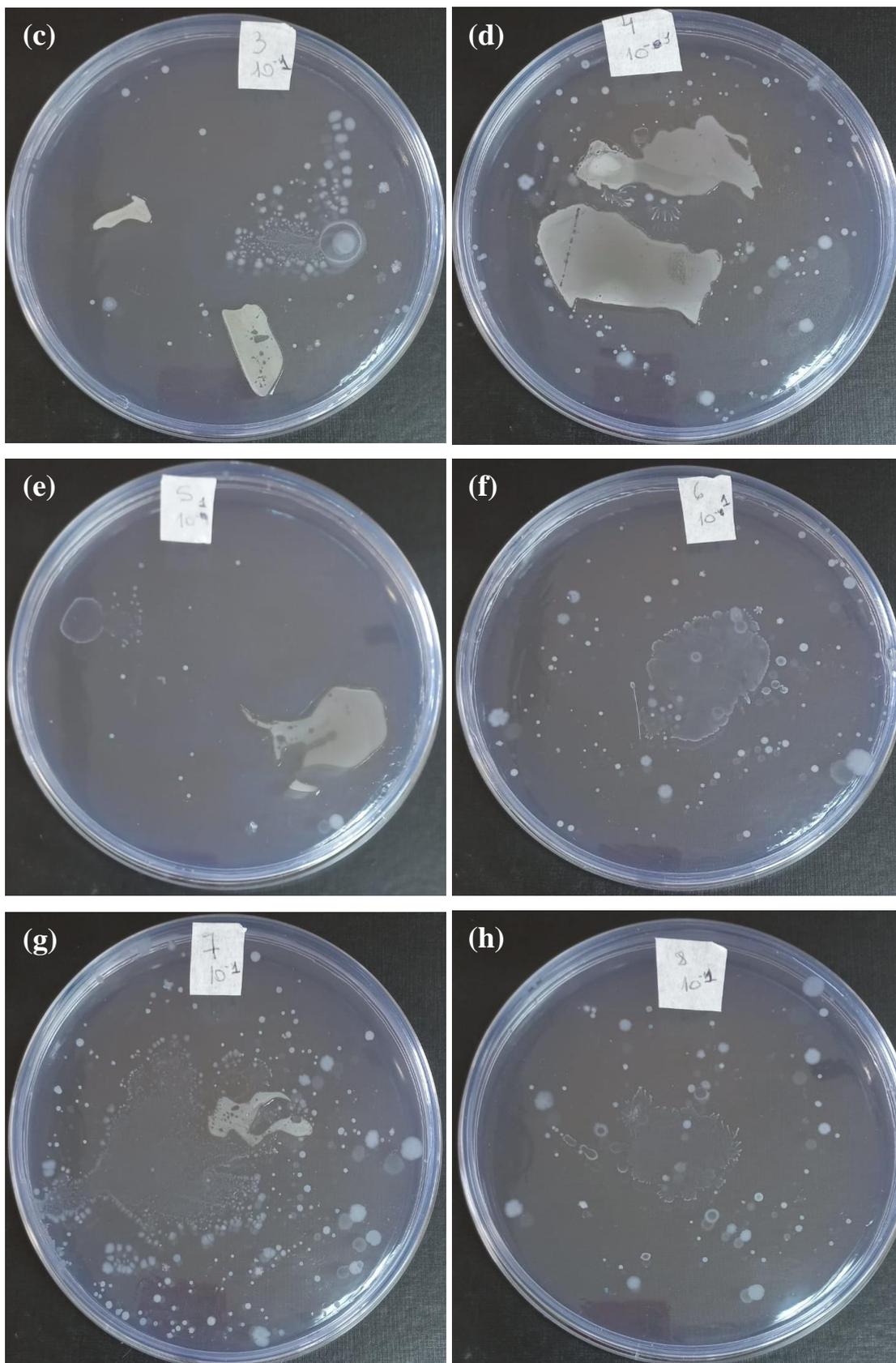




Legenda: (a) Análise camada 1 (0-2 cm); (b) Análise camada 2 (2-4 cm); (c) Análise camada 3 (4-6 cm);  
(d) Análise camada 4 (6-8 cm); (e) Análise camada 5 (8-10 cm); (f) Análise camada 6 (14-16 cm);  
(g) Análise camada 7 (26-28 cm); (h) Análise camada (38-40 cm). Fonte: Autora (2023).

Figura 59 – Análises Microbiológicas de Esporos.





Legenda: (a) Análise camada 1 (0-2 cm); (b) Análise camada 2 (2-4 cm); (c) Análise camada 3 (4-6 cm); (d) Análise camada 4 (6-8 cm); (e) Análise camada 5 (8-10 cm); (f) Análise camada 6 (14-16 cm); (g) Análise camada 7 (26-28 cm); (h) Análise camada (38-40 cm). Fonte: Autora (2023).