

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JOSEFINA DIB

Filtros lentos em escala domiciliar como alternativa de tratamento de água para comunidades sem  
acesso a água potável no Brasil

São Carlos  
2018

JOSEFINA DIB

Filtros lentos em escala domiciliar como alternativa de tratamento de água para comunidades sem acesso a água potável no Brasil

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lyda Patricia Sabogal Paz

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

D543f Dib, Josefina  
Filtros lentos em escala domiciliar como  
alternativa de tratamento de água para comunidades sem  
acesso a água potável no Brasil / Josefina Dib;  
orientadora Lyda Patricia Sabogal Paz; coorientador  
Ulisses Costa Terin. São Carlos, 2018.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2018.

1. tratamento alternativo de água. 2. filtração  
lenta. 3. comunidades isoladas. I. Título.

# FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Josefina Dib**

Data da Defesa: 05/10/2018

Comissão Julgadora:

Resultado:

**p/** Profa. Dra. Lyda Patricia Sabogal Paz (Orientador(a))

APROVADA

Ulisses Costa Terin

APROVADA

Prof. Dr. Davi Gasparini Fernandes Cunha

APROVADA



**Prof. Dr. Marcelo Zaiat**

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

## AGRADECIMENTOS

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lyda Patricia Sabogal Paz, pela oportunidade de fazer parte desta pesquisa e por todo o apoio.

Ao Ulisses Costa Terin, por todo o empenho, ajuda e atenção ao longo do projeto.

A todos os meus professores, por contribuírem imensamente para o meu crescimento profissional e pessoal.

À toda minha família, pelo carinho e incentivo constante.

Aos meus amigos, por tornar esses anos de graduação inesquecíveis.

To The Global Challenges Research Fund (GCRF) UK Research and Innovation for funding SAFEWATER (EPSRC Grant Reference EP/P032427/1).

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC.

À Empresa Amanco® pelo fornecimento dos materiais necessários para a construção dos filtros avaliados neste projeto.

## RESUMO

DIB, J. **Filtros lentos em escala domiciliar como alternativa de tratamento de água para comunidades sem acesso a água potável no Brasil.** 2018. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

O desenvolvimento de tecnologias alternativas de tratamento de águas de abastecimento que sejam econômicas, de fácil acesso e operação são de extrema importância, uma vez que uma parcela significativa da população não possui acesso a esse recurso. Como solução para o difícil acesso à água potável, surgiu a filtração lenta domiciliar (FLD), que consiste em um filtro de areia de fácil operação e alta eficiência de tratamento, podendo atingir 99% de remoção de bactérias (*E. coli* e coliformes) e 90% de turbidez. Neste estudo, o objetivo foi construir quatro modelos (intermitente e contínuo) de filtros lentos domiciliares de areia com materiais acessíveis de baixo custo, operar somente os filtros intermitentes e avaliar sua eficiência de remoção de diversos parâmetros, de acordo com a Portaria de Consolidação MS-GM nº 5, de 2017 e as recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS). O sistema de operação dos filtros consistiu em um pré-tratamento da água bruta oriunda do Rio Monjolinho de São Carlos, a fim de controlar a turbidez da água de alimentação. Os filtros analisados, em duplicata, foram alimentados três vezes ao dia (às 8h, 14h e 18h), com períodos de pausa de 2,5h e 11,5h. Durante a operação de 51 dias foi feita a determinação semanal de *E. coli*, coliformes totais, turbidez e cor aparente. A construção teve duração de 120 min por filtro, em duas pessoas. Os filtros apresentaram uma eficiência de remoção de até 1,5 Log para *E. coli*, e até 1,72 Log para coliformes totais, sendo os menores valores registrados de 4 UFC/100mL e 43 UFC/100mL respectivamente, não atendendo os parâmetros de potabilidade nacional. Para turbidez, a eficiência média foi de 42,6%, atendendo as recomendações da OMS de turbidez abaixo de 5 NTU. Para cor aparente, a eficiência média foi de 50,4%, e o limite de 15 uH foi atendido em alguns dias da operação, no geral quando a cor aparente da água bruta resultou abaixo de 30 uH. Além disso, as amostras provenientes do maior período de pausa obtiveram melhores resultados para turbidez e cor aparente, para ambos filtros. Os filtros lentos, em escala domiciliar com operação intermitente possuem potencial de aplicação devido à sua facilidade de construção e cumprimento dos requisitos de turbidez da OMS. Contudo, é necessária a avaliação do desempenho do filtro com um maior tempo de maturação. Destaca-se que a pesquisa foi financiada pelo *The Global Challenges Research Fund (GCRF) UK Research and Innovation*

(EPSRC Grant Reference EP/P032427/1), e os materiais utilizados no projeto foram todos fornecidos pela empresa Amanco®.

Palavras-chave: tratamento alternativo de água, filtração lenta, comunidades isoladas.

## ABSTRACT

DIB, J. **Household slow sand filters as an alternative water treatment for communities without access to potable water in Brazil.** 2018. Monograph (Undergraduate Work in Environmental Engineering) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2018.

The development of economically accessible and easily operated alternative water treatment technologies is extremely important, given that a significant part of the population does not have access to this resource. As a solution to the difficult access to potable water, the slow sand filtration emerged as an alternative treatment, which consists of an easy to operate and highly efficient sand filter, capable of achieving 99% removal of bacteria (*E. coli* and coliforms) and 90% turbidity removal. This project aimed to build four slow sand filtration models (intermittent and continuous) with low cost and accessible materials, and to operate and evaluate the intermittent filters' efficiency of removal of several parameters, to meet the current national water quality standards and the World Health Organization's (WHO) guidelines. The operation of the intermittent filters consisted of a pre-treatment of the source water from Monjolinho river in São Carlos, to control the affluent turbidity. The filters were operated in duplicate and fed three times a day (at 8 a.m., 2 p.m. and 6 p.m.), with two different pause periods of 2,5 h and 11,5 h. During the 51 days of operation, *E. coli*, coliforms, turbidity and color were measured weekly. The construction of the filters required approximately 120 minutes per filter and two people. The filters' removal of *E. coli* was up to 1,5 Log and removal of coliforms was up to 1,72 Log, the lowest recorded values being 4 UFC/100mL and 43 UFC/100mL respectively, thus not meeting the national standards for drinking water. On average, removal of turbidity was 42,6%, in accordance with WHO's guidelines for turbidity inferior to 5 NTU. Removal of color was 50,4% on average, and the 15 uH limit was achieved during part of the operation, especially when the source's water color was below 30 uH. Furthermore, the samples from the greater pause period presented better results for turbidity and color removal, for both type of filters. The intermittent household slow sand filters have potential for application due to their easy construction process and compliance to WHO's turbidity guidelines for drinking water. Nonetheless, the assessment of the filters' performance with a greater maturation period is necessary. The authors would like to thank The Global Challenges Research Fund (GCRF) UK Research and Innovation for funding



SAFEWATER (EPSRC Grant Reference EP/P032427/1). It is also important to state that all materials used in the project were provided by the company Amanco®.

Keywords: alternative water treatment, slow sand filtration, isolated communities.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	1
2. OBJETIVOS .....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. Filtração lenta convencional para tratamento de águas de abastecimento .....	3
3.2. Filtros lentos domiciliares para tratamento de água.....	4
3.3. Experiências com filtros lentos domiciliares.....	6
3.4. Remoção de microrganismos nos filtros lentos domiciliares .....	7
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	9
4.1. Seleção do meio filtrante.....	9
4.2. Preparação do meio filtrante e camadas suporte .....	9
4.3. Caracterização do meio filtrante.....	10
4.3.1. Determinação granulométrica .....	10
4.3.2. Solubilidade em ácido .....	10
4.3.3. Massa específica.....	11
4.3.4. Índice de vazios máximo e mínimo.....	11
4.4. Montagem da estrutura dos filtros.....	12
4.5. Preenchimento dos filtros.....	18
4.6. Sistema de operação dos filtros.....	19
4.7. Parâmetros microbiológicos e físico-químicos .....	20
4.8. Custo estimado dos FLD.....	20
4.9. Análise estatística.....	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	21
5.1. Seleção do meio filtrante.....	21
5.2. Lavagem do material.....	25
5.3. Caracterização do meio filtrante.....	26
5.3.1. Distribuição granulométrica .....	26
5.3.2. Solubilidade em ácido .....	28
5.3.3. Massa específica dos sólidos.....	28
5.3.4. Índice de vazios máximo.....	31
5.3.5. Índice de vazios mínimo .....	32
5.3.6. Porosidade .....	34
5.4. Montagem da estrutura dos filtros.....	35

5.4.1.	Filtro intermitente h=85cm (com reservatório extra) .....	35
5.4.1.1.	Corpo .....	35
5.4.1.2.	Saída d'água .....	36
5.4.1.3.	Reservatório extra e Tampa.....	39
5.4.2.	Filtro intermitente h=100cm (com difusor).....	41
5.4.2.1.	Corpo.....	41
5.4.2.2.	Saída d'água .....	41
5.4.2.3.	Difusor e tampa .....	41
5.4.3.	Filtro contínuo h=90cm.....	42
5.4.3.1.	Corpo.....	42
5.4.3.2.	Saída d'água .....	42
5.4.3.3.	Tampa.....	43
5.4.4.	Filtro contínuo h=65cm.....	43
5.4.4.1.	Corpo.....	43
5.4.4.2.	Saída d'água .....	44
5.4.4.3.	Tampa.....	44
5.4.5.	Ajustes finais e considerações da montagem da estrutura dos filtros.....	44
5.5	Custo estimado dos FLD .....	46
5.6.	Operação dos filtros intermitentes.....	48
5.6.1.	Parâmetros microbiológicos .....	48
5.6.2.	Turbidez .....	51
5.6.3.	Cor Aparente .....	55
6.	CONCLUSÕES.....	59
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de um FLD em areia. ....	5
Figura 2. Esquema e fotografia da estrutura do filtro intermitente h = 100 cm, com balde difusor. ....	16
Figura 3. Esquema e fotografia da estrutura do filtro intermitente h = 85 cm, com reservatório extra. ....	16
Figura 4. Esquema e fotografia da estrutura do filtro contínuo h = 90 cm. ....	17
Figura 5. Esquema e fotografia da estrutura do filtro contínuo h = 65 cm. ....	17
Figura 6. Preenchimento do filtro com pedregulho. ....	18
Figura 7. Manta não tecida de feltro. (1) Colocação da manta. (2) Manta posicionada acima da camada de areia. ....	19
Figura 8. Configuração dos filtros. ....	20
Figura 9. Curva granulométrica da areia fina da Godoy. ....	21
Figura 10. Curva granulométrica da areia fina da Taurus. ....	22
Figura 11. Curva granulométrica da areia média da Godoy. ....	22
Figura 12. Curva granulométrica da areia grossa da Taurus. ....	23
Figura 13. Curva granulométrica da areia grossa da Godoy. ....	23
Figura 14. Curva granulométrica do pedregulho fino. ....	26
Figura 15. Curva granulométrica do pedregulho grosso. ....	27
Figura 16. Medição e corte do corpo do filtro. ....	36
Figura 17. Corpo com chanfro. ....	36
Figura 18. Colocação do adaptador de caixa d'água. (1) Detalhe da serra copo. (2) Detalhe do acessório. ....	37
Figura 19. Tubulação interna ao filtro. ....	38
Figura 20. Tubulação da saída de água do filtro intermitente finalizada. (1) Tubulação de saída. (2) Detalhe do cap com o espigão colocado. ....	39
Figura 21. Colocação do balde no corpo do filtro. (1) Detalhe do corte com serra manual. (2) Balde colocado no corpo do filtro. ....	40
Figura 22. Colocação da boia do filtro intermitente. (1) Detalhe do uso da furadeira. (2) Detalhe da aplicação de silicone. ....	40
Figura 23. Esquema do difusor do filtro intermitente. ....	41
Figura 24. Detalhe da boia instalada no filtro contínuo. ....	42
Figura 25. Saída de água do filtro contínuo finalizada. ....	43
Figura 26. Detalhe da veda calha aplicada no filtro. ....	45
Figura 27. Variação da eficiência de remoção e do número de colônias de E. coli em amostra de 100mL para água bruta, clarificada e filtrada. ....	49
Figura 28. Variação da eficiência de remoção e do número de colônias de coliformes totais em amostra de 100mL para água bruta, clarificada e filtrada. ....	50
Figura 29. Variação da eficiência de remoção de E. coli e coliformes totais do pré tratamento. .	48
Figura 30. Variação de turbidez ao longo da operação para as amostras compostas. ....	52

Figura 31. Variação dos valores de turbidez com o decorrer da operação dos filtros para o intervalo de alimentação de 5h. ....	54
Figura 32. Variação dos valores de turbidez com o decorrer da operação dos filtros para o intervalo de alimentação de 14h. ....	54
Figura 33. Variação de cor aparente ao longo da operação para as amostras compostas. ....	56
Figura 34. Variação dos valores de cor aparente com o decorrer da operação dos filtros para o intervalo de alimentação de 5h. ....	57
Figura 35. Variação dos valores de cor aparente com o decorrer da operação dos filtros para o intervalo de alimentação de 14h. ....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões das aberturas das peneiras comerciais utilizadas no preparo do material filtrante e determinação do tamanho dos materiais de preenchimento.	10
Tabela 2. Lista de materiais e ferramentas utilizados na construção da estrutura dos filtros.	13
Tabela 3. Materiais da estrutura dos filtros.	13
Tabela 4. Valores de CU e D10 obtidos das curvas granulométricas para seleção do meio filtrante	24
Tabela 5. Turbidez de amostras de água das lavagens dos materiais filtrantes.	25
Tabela 6. Valores de CU e D10 obtidos das curvas granulométricas.	27
Tabela 7. Valores do ensaio de solubilidade em ácido.	28
Tabela 8. Valores do fator K e da massa específica da água para diferentes temperaturas.	28
Tabela 9. Resultados do ensaio de massa específica da amostra de areia fina.	29
Tabela 10. Resultados do ensaio de massa específica da amostra de areia grossa.	30
Tabela 11. Resultados do ensaio de massa específica da amostra de pedregulho fino.	30
Tabela 12. Resultados do ensaio de massa específica da amostra de pedregulho grosso.	30
Tabela 13. Resultados obtidos de índice de vazios máximo para areia média.	31
Tabela 14. Resultados obtidos de índice de vazios máximo para a areia grossa.	31
Tabela 15. Resultados obtidos de índice de vazios máximo para o pedregulho fino.	32
Tabela 16. Resultados obtidos de índice de vazios máximo para o pedregulho grosso.	32
Tabela 17. Resultados obtidos de índice de vazios mínimo para a areia média.	32
Tabela 18. Resultados obtidos de índice de vazios mínimo para a areia grossa.	33
Tabela 19. Resultados obtidos de índice de vazios mínimo para o pedregulho fino.	33
Tabela 20. Resultados obtidos de índice de vazios mínimo para o pedregulho grosso.	33
Tabela 21. Valores de porosidade para cada material.	34
Tabela 22. Volume teórico de água armazenado no meio filtrante.	34
Tabela 23. Peso da estrutura dos filtros.	45
Tabela 24. Custos dos materiais necessários para construção dos FLD.	46
Tabela 25. Custo total para construção dos diferentes FLD, desconsiderando o custo da mão de obra.	47

## ABREVIACOES

CAWST – Centre for Affordable Water and Sanitation Technology

CU – Coeficiente de Uniformidade

FLD – Filtro lento domiciliar

FLDs – Filtros lentos domiciliares

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez

OMS – Organização Mundial da Sude

PVC – Policloreto de vinila

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Segundo o relatório de progresso em água de abastecimento e saneamento realizado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em conjunto com a Unicef, aproximadamente 2,1 bilhões de pessoas não tiveram acesso à um serviço básico de água potável mundialmente em 2015, ou seja, não tiveram água de qualidade adequada e de fácil acesso em casa. Dessas pessoas, estima-se que cerca de 263 milhões de pessoas gastaram mais de 30 minutos para poder coletar água potável de uma fonte confiável, ou seja, tiveram acesso ao serviço, porém com grande dificuldade. Já o restante dessa população usou poços e outras fontes inadequadas, como captação direta de águas superficiais. O cenário é mais grave em áreas rurais em comparação a áreas urbanas (WHO, 2017).

No Brasil em 2016, 87,3% dos domicílios ligados à rede geral possuíam disponibilidade diária de água, sendo essa proporção no Nordeste de 66,6%, segundo a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua realizada pelo IBGE. No entanto, segundo dados desse mesmo ano da Funasa, somente 34,5% dos domicílios nas áreas rurais estão ligados a redes de abastecimento de água com ou sem canalização interna.

Dessa maneira, o desenvolvimento de tecnologias econômicas, de fácil acesso e operação são de extrema importância, pois oferecem uma alternativa ao tratamento de águas de abastecimento e possibilitam o aumento do número de pessoas com acesso a esse recurso. Uma solução são os filtros lentos domiciliares (FLD), tecnologia criada em 1998 pelo Dr. David Manz, derivada da filtração lenta convencional e promovida pela instituição canadense *Center for Affordable Water and Sanitation Technology (CASWT)*.



## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

Este projeto tem como objetivo construir e avaliar a eficiência de filtros lentos domiciliares em PVC, visando gerar água que atenda as exigências da Portaria de Consolidação MS-GM nº 5, de 2017.

### 2.2. Objetivos específicos:

- Construir quatro modelos, dois modelos de operação contínua e dois modelos de operação intermitente, em escala real, do filtro lento domiciliar a partir de materiais de fácil acesso, baixo custo e montagem simples;
- Selecionar os meios filtrantes e suporte que atenda às recomendações do CAWST para filtros lentos domiciliares, através da avaliação da granulometria, massa específica e porcentagem de finos das areias e pedregulhos selecionados;
- Identificar oportunidades e eventuais dificuldades na construção dos filtros e preparo dos materiais;
- Operar os filtros intermitentes e avaliar sua eficiência de remoção de *E. coli*, coliformes totais, turbidez e cor aparente.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Filtração lenta convencional para tratamento de águas de abastecimento

A filtração lenta em areia é uma tecnologia de tratamento de água de abastecimento para consumo humano caracterizada pela sua capacidade de remoção de microrganismos patogênicos, além de outras impurezas (tanto dissolvidas como suspensas), sendo principalmente empregada em comunidades de pequeno porte (até 5000 habitantes), para águas com baixa turbidez e cor (abaixo de 50 NTU) (RIBEIRO et al., 2011). As principais vantagens da filtração lenta em relação à filtração rápida são o baixo consumo de energia e o fato de não haver necessidade de adição de coagulantes (DI BERNARDO *et. al.*, 1998).

Segundo Souza (2015), a filtração lenta consiste na passagem da água através de um meio granular, sendo os principais mecanismos da filtração o transporte e a aderência. Dentre os mecanismos de transporte (que incluem impacto inercial, sedimentação, entre outros), a ação mais influente é a ação de coar, a qual ocorre quando a água escoar através da superfície de coesão no filme biológico, na interface água/areia (SÁ, 2006). Em relação aos mecanismos de aderência, os principais incluem forças de Van de Waals e mecanismos de soltura, sendo a atração eletrostática a mais importante pelo fato de influenciar significativamente a remoção de impurezas (SÁ, 2006).

Outro aspecto importante do funcionamento dos filtros lentos é a atividade biológica associada a bactérias, algas, e outros microrganismos que se concentram em um biofilme denominado *schmutzdecke*, o qual se forma na camada superficial do filtro durante a fase de maturação e é responsável pela remoção da matéria orgânica, sendo essencial para uma boa qualidade da água filtrada (SOUZA, 2015).

Os filtros lentos utilizam areia com granulometria fina (grãos entre 0,15 e 1 mm) e funcionam com taxas de filtração em torno de 3 a 6 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, que devem ser preferencialmente constantes, pois caso contrário podem afetar negativamente as populações bacterianas presentes através do desprendimento do biofilme ou perturbações e, conseqüentemente, causar impactos negativos na eficiência do tratamento e qualidade do efluente final (DI BERNARDO & VERAS, 2008). A limpeza do filtro deve ser realizada uma vez que a coluna d'água atinja o nível máximo previsto no projeto através da raspagem e retirada

de alguns centímetros da camada superficial do leito do filtro, sendo a areia resultante do processo de limpeza lavada, seca e armazenada para reaproveitamento no filtro (MANZ, 2004).

### 3.2. Filtros lentos domiciliares para tratamento de água

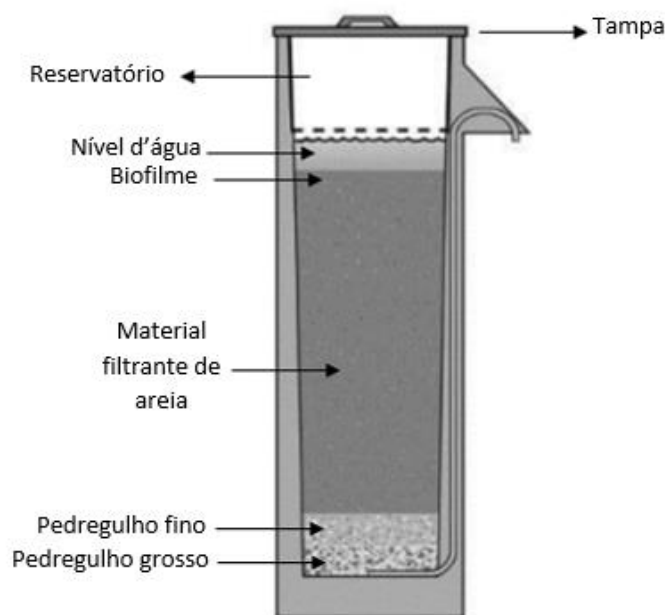
Os filtros lentos domiciliares (FLD) são uma tecnologia recente derivada da filtração lenta convencional e destinada ao uso domiciliar, que visa tornar o tratamento de água para consumo humano mais acessível, econômico e simples, sendo promissora para países em desenvolvimento (SOBSEY et. al., 2012). Os seus mecanismos de ação (físicos e biológicos) são similares aos da filtração lenta convencional descritos anteriormente, também ocorrendo aderência das partículas e formação do *schmutzdecke*.

Em comparação aos filtros lentos, os FLD apresentam diferenças importantes e vantajosas, sendo a principal delas a escala domiciliar. Além disso, também possuem a possibilidade de operar somente quando demandado (fluxo intermitente) sem o comprometimento da qualidade do tratamento (com no máximo 48h sem alimentação), possibilidade de realizar algum tipo de pós ou pré tratamento, taxa de filtração maior em comparação ao filtro lento convencional e estrutura mais leve e compacta (JADHAV et. al., 2015). Além disso, não há necessidade de remoção ou substituição da camada superficial de areia para limpeza, eliminando perda de material e desperdício excessivo de água, impedindo que o desempenho do filtro seja afetado (MANZ, 2004). No entanto, apesar de apresentar eficiência no tratamento da água, esta pode ser comprometida por águas com elevado valor de turbidez, que caso apresentem valores acima de 50 NTU, é recomendado o uso de um pré-tratamento de sedimentação (CAWST, 2012).

Em relação ao modelo e operação do FLD, a altura recomendada do leito de material filtrante é em torno de 40 cm e a areia ter granulometria com valores de coeficiente de uniformidade (CU) de 1,5 a 2,5, diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ) entre 0,15 mm e 0,2 mm, e uma porcentagem de finos (porcentagem de grãos que passe por uma peneira #150, com abertura de 10 mm) igual ou inferior a 4% (CAWST, 2009). A carreira de filtração começa no topo do filtro, onde a água entra, passa por um difusor e atravessa lentamente as camadas de material filtrante e material suporte, sendo posteriormente coletada no fundo do filtro e sai pela tubulação de saída, a qual é elevada para poder manter o material filtrante saturado enquanto o filtro não estiver operando (SOBSEY et. al., 2008). O difusor é uma placa ou caixa com furos (usualmente com

diâmetro de 3 mm e espaçamento de 2,5 cm) colocada acima da camada de material filtrante, a qual possui a função de cobrir toda a camada superficial e distribuir a água de maneira homogênea no filtro, com o objetivo de impedir a perturbação da areia e do biofilme (MANZ, 2007). A fase na qual o filtro não está operando recebe o nome de período de pausa, sendo de extrema importância para promover a remoção de patógenos pelo biofilme, podendo durar no mínimo 1 hora e no máximo 48 horas após a interrupção no fluxo de água, para garantir que o biofilme não seque e nem morra por falta de nutrientes (CAWST, 2012). Um modelo de FLD está ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Modelo de um filtro lento domiciliar.



Fonte: Adaptado de CAWST (2012).

O nível de água mínimo no filtro – que ocorre durante os períodos de pausa – deve ser de aproximadamente 5 cm a fim de garantir a proteção do biofilme, fornecendo um ambiente aquático aeróbio. Caso o nível de água no filtro for muito raso (inferior a 5 cm) o biofilme sofrerá perturbação devido ao fluxo de água que passa pelo difusor, e caso for muito alto (superior a 5 cm), será sufocado pela inabilidade do oxigênio de atingir o *Schmutzdecke* (JADHAV *et. al.*, 2015).

O material da estrutura dos FLD apresentado pelo manual do *Centre for Affordable Water and Sanitation Technology* (CAWST) é cimento, pelo fato de apresentar resistência, durabilidade, e impedimento de vazamentos (MANZ, 2007). No entanto, já foram estudadas adaptações utilizando outros materiais, principalmente o PVC, com o objetivo de reduzir o peso da estrutura e facilitar a construção e operação do filtro (SOBSEY *et. al.*, 2012). Apesar do maior custo e maior fragilidade, a utilização de PVC como material do corpo do filtro apresenta diversas vantagens em relação ao uso do cimento, como: mais leveza, maior facilidade na construção (não é necessária a fabricação e utilização de um molde), maior facilidade e aumento da capacidade de transporte dos filtros, e eficiência equivalente na remoção de turbidez e patógenos (BAKER, 2015).

As principais desvantagens dos FLD são a dificuldade de transporte devido a uma estrutura pesada (principalmente quando material é concreto), custo inicial elevado, e eficiência de tratamento comprometida por águas de alta turbidez (CDCP, 2008). Ademais, a eficiência do filtro depende das características da água bruta, podendo requerer a realização de um pré tratamento (MANZ, 2004). Outra limitação é o fato de que os FLDs somente apresentam remoção de patógenos adequada após o período de maturação (SOBSEY *et. al.*, 2008). Além disso, o FLD não pode permanecer mais de 2 dias sem ser alimentado com água, e caso a água seja proveniente de uma fonte diferente, o desempenho do filtro pode ser comprometido por alguns dias, sendo necessário realizar algum tipo de pós tratamento em alguns casos (CAWST, 2012).

### 3.3. Experiências com filtros lentos domiciliares em comunidades

Apesar das limitações apresentadas anteriormente, existem diversos estudos que comprovam a eficiência e confiabilidade dos FLD, os quais analisaram tanto a eficiência de tratamento dos filtros quanto a aceitação e adaptação da tecnologia por parte da população em comunidades isoladas de diversos países.

Um estudo feito por Stauber *et. al.* (2009) em Bona, na República Dominicana comparou 75 domicílios utilizando FLD com 79 domicílios sem FLD, durante seis meses. Durante o período de intervenção do experimento, houve melhoria na qualidade da água, sendo possível observar em mais de 60% das casas com FLD instalado, água filtrada com valores de *E. coli* abaixo de 10 NMP/100mL, em contraste com as casas sem FLD instalado, nas quais apenas

45% apresentou esse resultado. Além disso, os domicílios com FLD instalados apresentaram metade da incidência de casos de diarreia em relação aos domicílios sem o FLD, sendo o maior impacto observado em crianças de 2 a 4 anos durante a estação climática úmida (STAUBER *et. al.*,2009).

Outro estudo conduzido por Sisson *et. al.* (2013) no Haiti, avaliou 55 filtros instalados entre 1999 e 2010, e revelou que a eficiência do tratamento não diminuiu após anos de uso, sendo a remoção microbiológica (*E. coli* e coliformes) de 92% e concentração de *E. coli* inferior a 10 NMP/100mL na água filtrada. Além disso, observou-se que após 7 anos, 85% dos filtros ainda estavam em uso, e após 12 anos, 53% dos filtros permaneceram ativos, sendo os principais motivos do interrompimento do uso problemas com entupimento, alterações estéticas da água filtrada, e incompatibilidade com o estilo de vida do usuário (Sisson *et. al.*,2013).

Um terceiro estudo realizado por Brown *et. al.* (2011) em uma pequena comunidade rural em Camarões com problemas na água devido a parasitas e bactérias, demonstrou que 81,1% das famílias que utilizaram água proveniente de FLD não apresentou diarreia (20% a mais em relação aos consumidores de água não filtrada), sendo a eficiência de remoção de bactérias nos filtros de 90 a 92%. O experimento também demonstrou que ao longo dos anos de uso aumentou-se a satisfação dos usuários em relação aos filtros e notou-se melhoria na manutenção da limpeza dos filtros, porém mais da metade dos FLD não foram mantidos com o nível de água correto (Brown *et. al.*, 2011).

#### 3.4. Remoção de microrganismos nos filtros lentos domiciliares

Como demonstrado anteriormente, os FLD estabeleceram-se como uma alternativa promissora para o tratamento de água domiciliar em comunidades. Essa tecnologia possui capacidade de remoção de 100% dos parasitas presentes na água, e de 90-99% das bactérias e vírus, se operado adequadamente e a camada biológica ou *schmutzdecke* estiver devidamente desenvolvida (Manz, 2007). Dessa maneira, os FLDs são capazes de cumprir com as exigências estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde (WHO) e a Portaria de Consolidação MS-GM nº 5, de 2017, as quais instituem que a água destinada para consumo humano deve apresentar baixa turbidez e ausência de *E. coli* e coliformes.

Um estudo realizado por Jenkins *et. al.* (2011) avaliou a eficiência de remoção de vírus (bacteriófago MS2), bactérias (coliformes) e turbidez em FLD de PVC operados durante 10 semanas de modo intermitente, com diferentes tempos de residência, intervalos de alimentação e tipos de areias (fina e grossa). Em média, observou-se eficiência de remoção de 96% para bactérias, 71% para vírus e 89% para turbidez, sendo as maiores eficiências verificadas nos filtros com areia mais fina e maior tempo de residência, enquanto uma menor eficiência de remoção de vírus foi observada com o aumento da turbidez afluyente (Jenkins *et. al.*, 2011).

Em outro estudo, realizado por Jellison e Napotnik (2014), foram testados FLD de diferentes capacidades (FLD versão 10 do CAWST e tamanhos reduzido para 7,57 e 18,93 litros). Os autores notaram que todas as configurações avaliadas atingiram 98% de remoção de turbidez e remoção de  $3,8\log_{10}$  a  $4\log_{10}$  de *E. coli*. Não foram observadas alterações na eficiência dos filtros com variações na turbidez da água afluyente (entre 5 e 50 NTU). Além disso, o experimento também avaliou o impacto de transportar de um local a outro em uma distância de 1 km um FLD (de concreto e PVC) com mais de 9 meses de uso, e observaram que 8 semanas após o transporte houve uma redução na taxa de filtração (possivelmente devido à compactação da areia), e um aumento da remoção de *E. coli*, que já era superior a 99% previamente ao deslocamento para ambos os tipos de filtros.

Além disso, Wang *et. al.* (2014) avaliaram as características microbiológicas do *schmutzdecke* e sua eficiência de remoção do bacteriófago MS2 em FLDs, e observaram uma redução de  $4\log_{10}$  após 43 dias de operação, a qual manteve-se entre  $4\log_{10}$  e  $7\log_{10}$  por até 294 dias, sendo uma maior redução relacionada a maior diversidade de comunidades microbiológicas. Sobsey *et. al.* (2015) também comprovou que a eficiência de remoção do vírus MS2, e principalmente de *E. coli*, em FLDs aumenta com o amadurecimento do filtro e o crescimento do *schmutzdecke*, porém o experimento demonstrou eficiências de remoção mais limitadas.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Seleção do meio filtrante

Foram realizados ensaios granulométricos com a finalidade de selecionar o melhor meio filtrante dentre 5 areias adquiridas de 2 estabelecimentos na região de São Carlos – SP. As areias foram designadas de acordo com seu nome comercial e estabelecimento de origem como: i) areia fina Godoy; ii) areia média Godoy; iii) areia grossa Godoy; iv) areia fina Taurus; e v) areia grossa Taurus. Os parâmetros para seleção do meio filtrante foram diâmetro efetivo (D10), coeficiente de uniformidade (CU) e porcentagem de finos. O método utilizado nos ensaios granulométricos são apresentados no item 4.3.1.

### 4.2. Preparação do meio filtrante e camadas suporte

A preparação do material foi necessária e consistiu na lavagem, secagem e peneiramento das areias, uma vez que os materiais disponibilizados não estavam adequadamente limpos e continham materiais indesejáveis.

A lavagem dos materiais foi feita com água extraída de um poço localizado na área 1 do campus da USP de São Carlos. Os materiais foram colocados em baldes, em seguida a água do poço foi adicionada à cada balde e agitou-se o conteúdo manualmente por aproximadamente 1 minuto. Deixou-se decantar por aproximadamente 30 segundos e então a água foi removida. Esse processo foi repetido até que a água resultante da lavagem estivesse praticamente translúcida. A turbidez da água de bruta e de lavagem foram medidas.

Uma vez finalizada a lavagem dos materiais, estes eram dispostos esparsamente sobre lonas plásticas expostas ao sol, em local seco e sem risco de contaminação, até que estivessem completamente secos. O tempo de secagem foi variável e sujeito às condições climáticas, e dessa maneira armazenou-se o material em recipientes limpos e secos quando necessário, até que as condições estivessem favoráveis para a secagem.

Após finalizado esse processo de lavagem e secagem, foi realizado o peneiramento de cada material utilizando peneiras comerciais e acessíveis à população. A seleção dos materiais foi feita de acordo com a Tabela 1.



Tabela 1. Dimensões das aberturas das peneiras comerciais utilizadas no preparo do material filtrante e determinação do tamanho dos materiais de preenchimento.

Material	Diâmetro da abertura (mm)	Material selecionado
Areia média (meio filtrante)	1 <sup>1</sup>	Areia de tamanho inferior à abertura da peneira
Areia grossa	1 <sup>1</sup>	Areia de tamanho superior à abertura da peneira
	2,1 <sup>2</sup>	Areia de tamanho inferior à abertura da peneira
Pedregulho fino	3,7 <sup>3</sup>	Pedregulho de tamanho superior à abertura da peneira
	5,5 <sup>4</sup>	Pedregulho de tamanho inferior à abertura da peneira
Pedregulho grosso	12 <sup>5</sup>	Pedregulho de tamanho superior à abertura da peneira
	15 <sup>6</sup>	Pedregulho de tamanho inferior à abertura da peneira

Nota: nome comercial das peneiras: <sup>1</sup> peneira de fubá; <sup>2</sup> peneira de arroz; <sup>3</sup> peneira de feijão; <sup>4</sup> peneira de café; <sup>5</sup> tela de galinheiro plástica; <sup>6</sup> tela de galinheiro metálica.

Após a finalização desse procedimento, os materiais foram armazenados em local limpo e seco.

#### 4.3. Caracterização do meio filtrante

As caracterizações do meio filtrante e materiais suporte foram realizadas no Laboratório Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia e no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR) do Departamento de Hidráulica e Saneamento, ambos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Os ensaios foram realizados para o meio filtrante (areia média), camadas de separação (areia grossa e pedregulho fino) e camada suporte (pedregulho grosso), todos já preparados conforme o item 4.2.

##### 4.3.1. Determinação granulométrica

A determinação granulométrica foi feita com base na EB 2097/1990: Material filtrante - areia, antracito e pedregulho, da ABNT.

##### 4.3.2. Solubilidade em ácido

A determinação da solubilidade em ácido foi feita segundo a EB 2097/1990: Material filtrante - areia, antracito e pedregulho, da ABNT.

A solubilidade foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Solubilidade (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde,

$m_1$ : massa seca inicial da amostra;

$m_2$ : massa seca da amostra após o período de repouso em contato com o ácido.

#### 4.3.3. Massa específica

O ensaio de massa específica foi feito com base na NBR 6508/1984 (Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica).

A massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ ) foi calculada com a seguinte equação:

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_s + M_1 - M_2} \times \rho_w \quad (\text{Equação 2})$$

Onde,

$M_s$ : massa de sólidos determinada no final do ensaio;

$M_1$ : massa de (água + balão volumétrico + sólidos) numa dada temperatura T;

$M_2$ : massa de (água + balão volumétrico) numa dada temperatura T;

$\rho_w$  é a massa específica da água numa dada temperatura T.

#### 4.3.4. Índice de vazios máximo e mínimo

Para a determinação do índice de vazio máximo e mínimo das amostras, utilizou-se a metodologia definida pela ABNT através dos métodos MB 3324 e MB 3328, respectivamente.

Para o cálculo de índice de vazios máximo ( $e_{\text{máx}}$ ), foi necessário calcular primeiro massa específica aparente seca ( $\rho_{d,\text{min}}$ ). Utilizaram-se as seguintes equações:

$$\rho_{d,\text{min}} = \frac{M_s}{V_m} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

$\rho_{d,\text{min}}$ : massa específica aparente do solo ( $\text{g/cm}^3$ );

$M_s$ : massa do solo seco que preencheu o molde (g);

$V_m$ : volume do molde ( $\text{cm}^3$ ).

$$e_{m\acute{a}x} = \frac{\delta}{\rho_{d,min}} - 1 \quad (\text{Equa\c{c}\~{a}o 4})$$

Onde,

$e_{m\acute{a}x}$ : \u00edndice de vazios m\u00e1ximo do solo;

$\delta$ : espec\u00edfica dos gr\u00e3os do solo de acordo com a NBR 6508 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\rho_{d,min}$ : massa espec\u00edfica aparente seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

A porosidade ( $\varepsilon$ ) foi calculada segundo a equa\u00e7\u00e3o:

$$\varepsilon = \frac{e}{1+e} \quad (\text{Equa\c{c}\~{a}o 5})$$

Onde,

$e$ : \u00edndice de vazios do solo.

#### 4.4. Montagem da estrutura dos filtros

Os filtros foram constru\u00eddos utilizando materiais de f\u00e1cil acesso, que foram adquiridos em lojas de materiais de constru\u00e7\u00e3o da cidade de S\u00e3o Carlos – SP. O processo de montagem foi realizado no Laborat\u00f3rio Piloto e na oficina mec\u00e2nica, do departamento de Engenharia Hidr\u00e1ulica e Saneamento da EESC/USP. No total, foram constru\u00eddos quatro modelos de filtros, dois modelos de opera\u00e7\u00e3o cont\u00ednua (um com altura de 90cm e outro com altura de 65cm) e dois modelos de opera\u00e7\u00e3o intermitente (um com altura de 85cm e outro com altura de 100cm).

Apesar do projeto n\u00e3o prever a opera\u00e7\u00e3o dos FLD cont\u00ednuos, o seu processo construtivo \u00e9 importante devido ao fato de serem uma outra op\u00e7\u00e3o vi\u00e1vel de tratamento alternativo de \u00e1gua, assim como os FLD intermitentes. Em rela\u00e7\u00e3o \u00e0 opera\u00e7\u00e3o intermitente, a opera\u00e7\u00e3o cont\u00ednua \u00e9 vantajosa por n\u00e3o ocasionar perturba\u00e7\u00f5es \u00e0 camada biol\u00f3gica atrav\u00e9s de varia\u00e7\u00f5es no n\u00edvel

d'água e vazão no filtro. Por outro lado, é mais complexa operacionalmente devido à necessidade de um reservatório e bombeamento (YOUNG-ROJANSCHI, 2004).

Os materiais usados para auxiliar o processo de montagem dos filtros estão listados na Tabela 2, e os tubos e conexões de PVC utilizados para compor a estrutura estão listados na Tabela 3.

Tabela 2. Lista de materiais e ferramentas utilizados na construção da estrutura dos filtros.

<b>Materiais utilizados</b>
Cola adesiva plástica para tubos e conexões de PVC
Solução limpadora para tubulações de PVC
Trena metálica
Fita crepe
Fita veda rosca
Lixa
Serra manual
Veda calha
Aplicador de veda calha
Solução preparadora para tubos e conexões de PVC

Tabela 3. Materiais da estrutura dos filtros.

	<b>Filtro intermitente h=85cm</b>	<b>Filtro intermitente h=100cm</b>	<b>Filtro contínuo h=90cm</b>	<b>Filtro contínuo h=65cm</b>
Corpo	1 trecho de 82,5 cm PVC Defoyo DN250	1 trecho de 97,5 cm PVC Defoyo DN250	1 trecho de 87,5 cm PVC Defoyo DN250	1 trecho de 62,5 cm PVC Defoyo DN250
	1 cap de PVC Defoyo DN250	1 cap de PVC Defoyo DN250	1 cap de PVC Defoyo DN250	1 cap de PVC Defoyo DN250
			1 boia de caixa d'água	1 boia de caixa d'água
Saída d'água	1 união soldável com anel de vedação DN250	1 união soldável com anel de vedação DN250	1 união soldável com anel de vedação DN250	1 união soldável com anel de vedação DN250

	1 trecho de 11,5 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 11,5 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 11,5 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 11,5 cm de tubo de PVC marrom DN25
	1 trecho de 22,5 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 22,5 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 22,5 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 22,5 cm de tubo de PVC marrom DN25
	1 adaptador soldável de caixa d'água com anel de vedação DN25	1 adaptador soldável de caixa d'água com anel de vedação DN25	1 adaptador soldável de caixa d'água com anel de vedação DN25	1 adaptador soldável de caixa d'água com anel de vedação DN25
	2 cotovelos 90° de PVC marrom DN25	2 cotovelos 90° de PVC marrom DN25	2 cotovelos 90° de PVC marrom DN25	2 cotovelos 90° de PVC marrom DN25
	2 trechos de 3,8 cm de tubo de PVC marrom DN25	2 trechos de 3,8 cm de tubo de PVC marrom DN25	3 trechos de 3,8 cm de tubo de PVC marrom DN25	3 trechos de 3,8 cm de tubo de PVC marrom DN25
	1 trecho de 23,4 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 23,4 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 23,4 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 10 cm de tubo de PVC marrom DN25
	1 trecho de 18 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 18 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 18 cm de tubo de PVC marrom DN25	1 trecho de 6,9 cm de tubo de PVC marrom DN25
	1 união soldável de PVC DN25	1 união soldável de PVC DN25	1 união soldável de PVC DN25	1 união soldável de PVC DN25
	1 cap de PVC marrom DN25	1 cap de PVC marrom DN25	1 cap de PVC marrom DN25	1 cap de PVC marrom DN25
	1 espigão de ¼.	1 espigão de ¼.	1 espigão de ¼.	1 espigão de ¼.
	1 torneira de esfera metálica DN25	1 torneira de esfera metálica DN25	1 tê marrom de PVC DN25	1 tê marrom de PVC DN25
	1 tê azul roscável DN25	1 tê azul roscável DN25	1 cotovelo roscável azul de PVC	1 cotovelo roscável azul de PVC
			1 registro do tipo agulha	1 registro do tipo agulha
Tampa	1 boia de filtro por gravidade	1 balde plástico	1 tampa de balde plástico	1 tampa de balde plástico

---

2 baldes de plástico

1 tampa de balde  
plástico

---

Para todos os filtros, o corpo foi construído com uma tubulação e um cap, ambos de PVC Defofo e com diâmetro nominal de 250 mm. A saída d'água foi construída com os acessórios de PVC Defofo marrom com diâmetro nominal de 25 mm, conforme listado na Tabela 3. Todos os cortes da tubulação foram realizados com uma serra manual. O corpo do filtro e o adaptador de caixa d'água na saída da tubulação foram vedados com veda calha a fim de evitar vazamentos, aplicada nos lugares onde não há contato com a água. Todas as peças e conexões foram lixadas e limpas com solução limpadora, antes de serem coladas com cola específica para PVC, a fim de garantir uma boa aderência das peças.

Existem algumas diferenças na construção de cada filtro. Nos filtros contínuos foi colocada uma boia de caixa d'água posicionada a 6 cm do topo do corpo do filtro, e uma tampa plástica de um dos baldes para cobrir a superfície. No filtro intermitente de 85 cm foi colocado um reservatório extra com uma boia de filtro por gravidade, feito com dois baldes. Já no intermitente de 100 cm, um balde foi perfurado e utilizado como difusor. No caso dos filtros intermitentes, o modelo com difusor é sujeito a uma vazão variável, uma vez que depende da quantidade de água que é alimentada ao filtro. Essa variação pode afetar o amadurecimento do filtro devido às forças de cisalhamento, que podem soltar o biofilme. Já no modelo com reservatório extra e boia, essa variação de vazão é evitada, uma vez que a mesma é controlada pela boia. Portanto, independentemente da quantidade de água no reservatório, a vazão permanecerá constante, evitando possíveis perturbações ao biofilme e problemas no amadurecimento do filtro.

No corpo de todos os filtros foram instalados seis piezômetros, posicionados em diferentes alturas no filtro a fim de medir a perda de carga ao longo do meio filtrante. Além disso, foram instalados mais seis espigões para tomada d'água. No caso do filtro com 65 cm de altura, foram instalados apenas 4 piezômetros e 4 tomadas d'água. As peças listadas na Tabela 3 foram posicionadas e fixadas para compor a estrutura de cada filtro conforme as Figura 2 a Figura 5.

Figura 2. Esquema e fotografia da estrutura do filtro intermitente  $h = 100$  cm, com balde difusor.

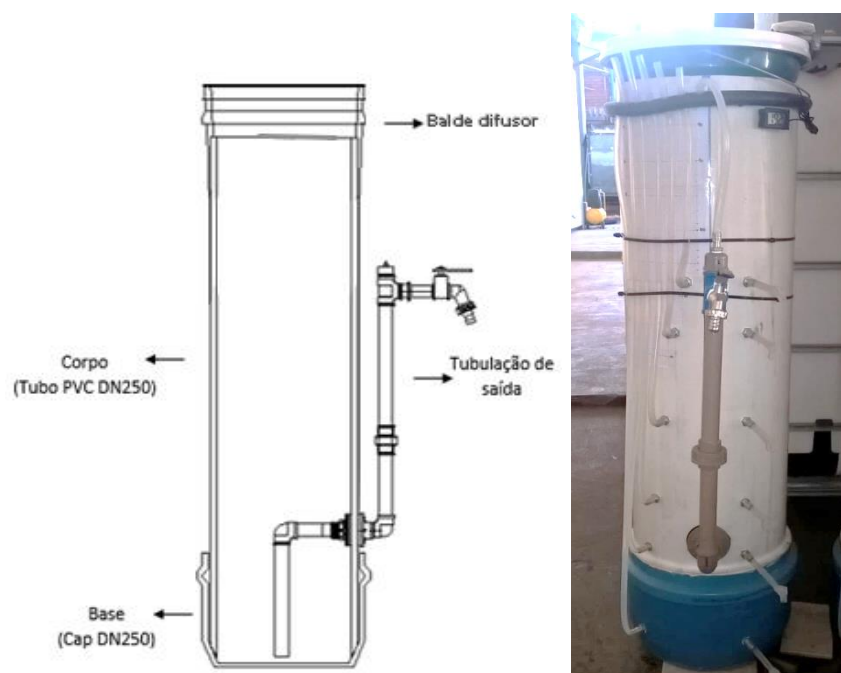


Figura 3. Esquema e fotografia da estrutura do filtro intermitente  $h = 85$  cm, com reservatório extra.

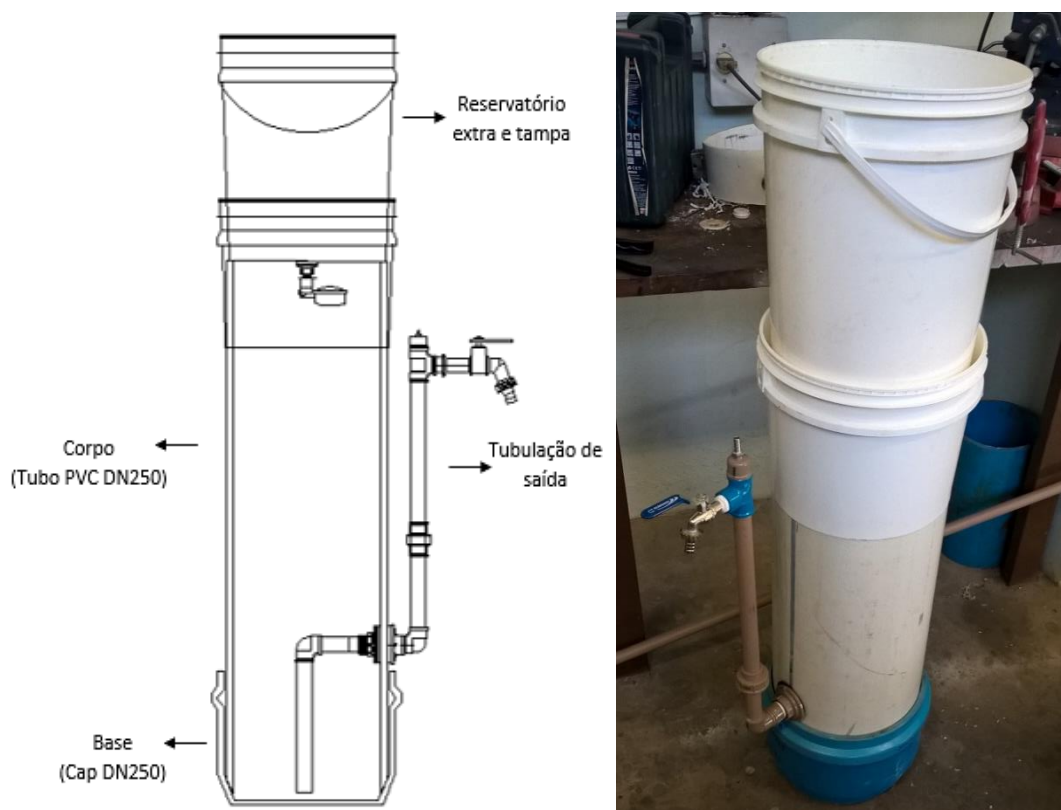


Figura 4. Esquema e fotografia da estrutura do filtro contínuo  $h = 90$  cm.

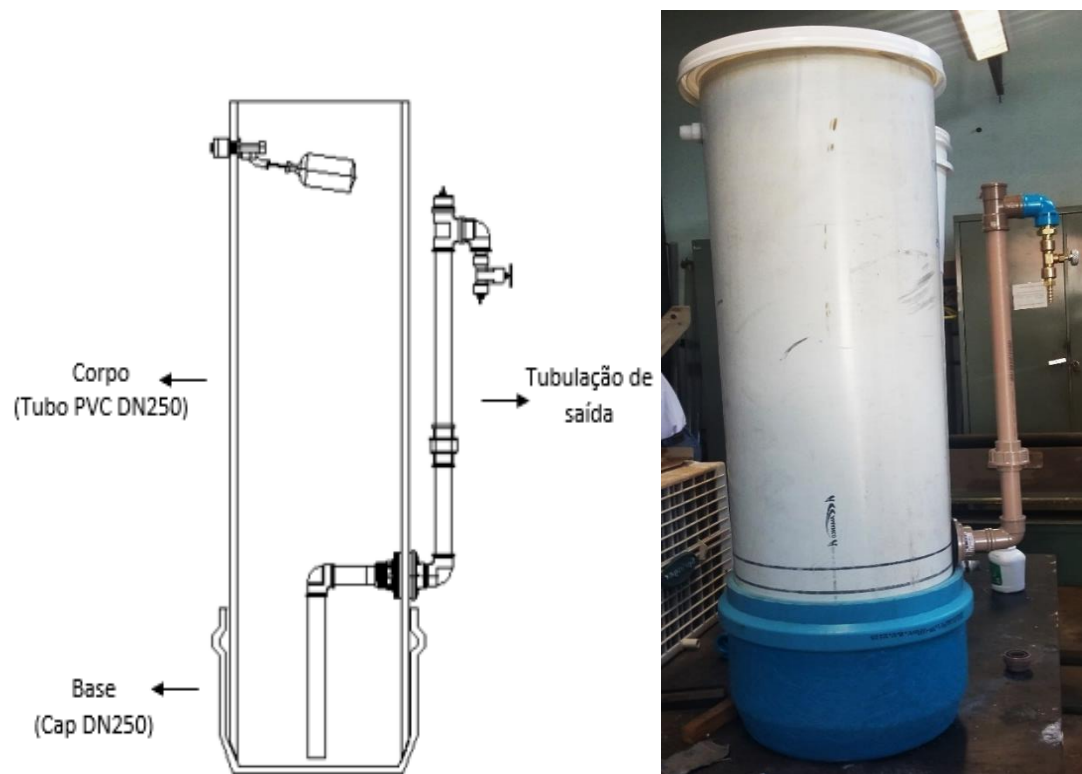
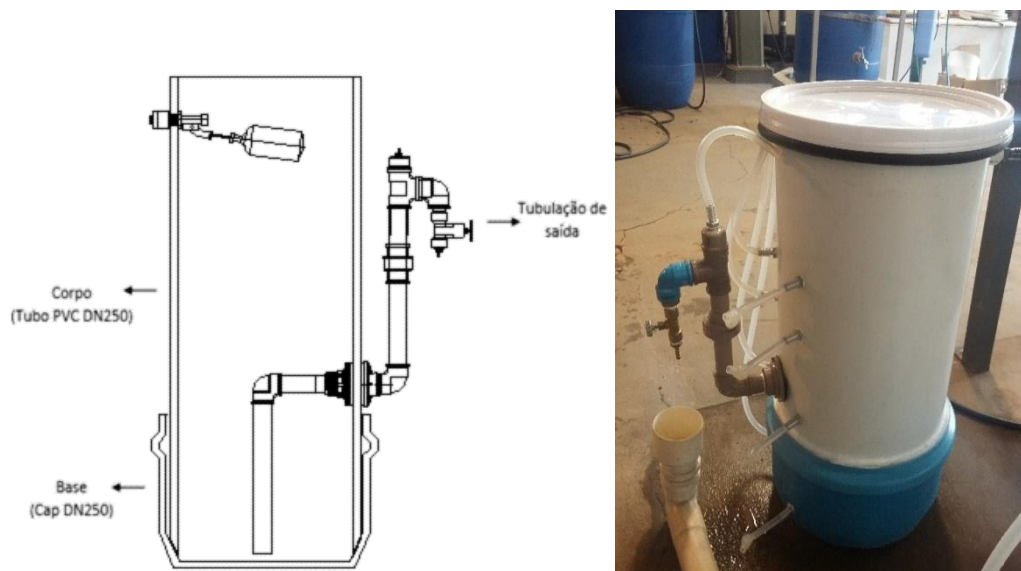


Figura 5. Esquema e fotografia da estrutura do filtro contínuo  $h = 65$  cm.





#### 4.5. Preenchimento dos filtros

Após a finalização da lavagem dos materiais e da estrutura, os filtros foram preenchidos com os materiais suporte e filtrante. Para isso, utilizou-se uma trena metálica colocada dentro do corpo do filtro, na qual marcou-se a altura de cada meio a ser inserido. Então, preencheu-se cada filtro com o meio (filtrante ou suporte) até a respectiva altura marcada, como demonstrado na Figura 6. No caso da colocação das areias média e grossa, o processo foi realizado com o filtro parcialmente preenchido com água, a fim de evitar caminhos preferenciais pela formação de bolsões de ar, e a medição da altura foi realizada após a completa sedimentação das areias. Tomou-se cuidado para que o material estivesse homogeneamente distribuído, de modo a obter uma superfície plana.

Figura 6. Preenchimento do filtro com pedregulho.



Finalmente, uma manta não tecida de feltro foi colocada no topo da camada filtrante, fixada com um anel de PVC. A manta foi cortada em formato circular, com um diâmetro cerca de 2 cm maior que do anel de PVC utilizado. Então, a manta foi inserida no corpo do filtro com o anel, pressionando a borda da manta contra a parede da tubulação, como demonstrado pela Figura 7. A manta não tecida de feltro foi colocada com o objetivo de facilitar as atividades de operação e manutenção, de maneira similar aos filtros lentos convencionais. Na filtração lenta convencional, a manta possibilita a redução da espessura da camada de areia sem prejudicar a qualidade do efluente e reter parte das impurezas encaminhadas ao meio filtrante granular, aumentando a

duração da carreira de filtração, além de reduzir custos operacionais (facilita a limpeza e manutenção) e aumentar a taxa de filtração (DI BERNARDO E SABOGAL PAZ, 2008).

Figura 7. Manta não tecida de feltro. (1) Colocação da manta. (2) Manta posicionada acima da camada de areia.



#### 4.6. Sistema de operação dos filtros

O sistema de operação dos filtros consistiu em um pré-tratamento da água bruta, oriunda do rio Monjolinho, com o objetivo de controlar e melhorar a qualidade da água a ser alimentada nos filtros, principalmente a turbidez. A água do rio Monjolinho foi captada por bombeamento através de uma adutora no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR) do Departamento de Hidráulica e Saneamento. O pré-tratamento utilizado consistiu em um processo de 24h de sedimentação, seguido pela passagem da água por duas camadas de uma manta de feltro não tecida. A água clarificada era então utilizada para alimentar os filtros. A necessidade do pré tratamento foi verificada após uma análise da turbidez da água bruta utilizada no experimento, a qual apresentou valores de turbidez acima daqueles recomendados pelo CAWST para FLDs de areia.

Os filtros analisados foram os filtros intermitentes com reservatório extra e com difusor, em duplicata, conforme a Figura 8. A alimentação dos filtros intermitentes foi realizada três vezes ao dia (às 8h, 14h e 18h), com dois períodos de pausa diferentes durante 51 dias. Durante esse período, amostras pontuais foram coletadas diariamente às 8h, representando um intervalo

de alimentação de 14h ou período de pausa de 11,5h, e às 13h, representando um intervalo de alimentação de 5h ou período de pausa de 2,5h. Além das amostras pontuais, foram coletadas amostras compostas. A coleta das amostras foi definida em função de ensaios hidrodinâmicos realizados previamente, os quais demonstraram que o tempo médio da carreira de filtração para a capacidade total de 16L é de 2,5h.

Figura 8. Configuração dos filtros.



#### 4.7. Parâmetros microbiológicos e físico-químicos

A determinação de *E. coli* e coliformes totais foi feita pela técnica de membrana filtrante conforme descrito em APHA (2012), utilizando Chromocult®. Diluições em série foram utilizadas quando necessárias. Para a leitura de turbidez, utilizou-se o turbidímetro HACH® 2100 (Hach Company, EUA). Para a leitura de cor aparente, utilizou-se colorímetro Digimed DM-COR (Digimed, Brasil). As análises foram feitas semanalmente.

#### 4.8. Custo estimado dos FLD

O custo dos FLD foi estimado com base nos preços disponibilizados por lojas de construção dos materiais e ferramentas utilizados no processo construtivo.

#### 4.9. Análise estatística

Aplicou-se aos resultados dos ensaios de filtração a análise de variância (*analysis of variance* – Anova) com o auxílio do software Past (Hammer & Harper, 2001). As análises estatísticas foram realizadas para as seguintes condições: entre os dados prévios aos tratamentos e após os tratamentos para determinar se resultou em remoções estatisticamente diferentes; e entre os dados do experimento realizados em diferentes períodos de pausa para determinar se essa variável operacional foi estatisticamente significativa. As análises de variância foram realizadas em um intervalo de significância de 5%.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1. Seleção do meio filtrante

As curvas de distribuição granulométrica das areias analisadas são apresentas nas Figuras Figura 9 a Figura 13.

Figura 9. Curva granulométrica da areia fina da Godoy.

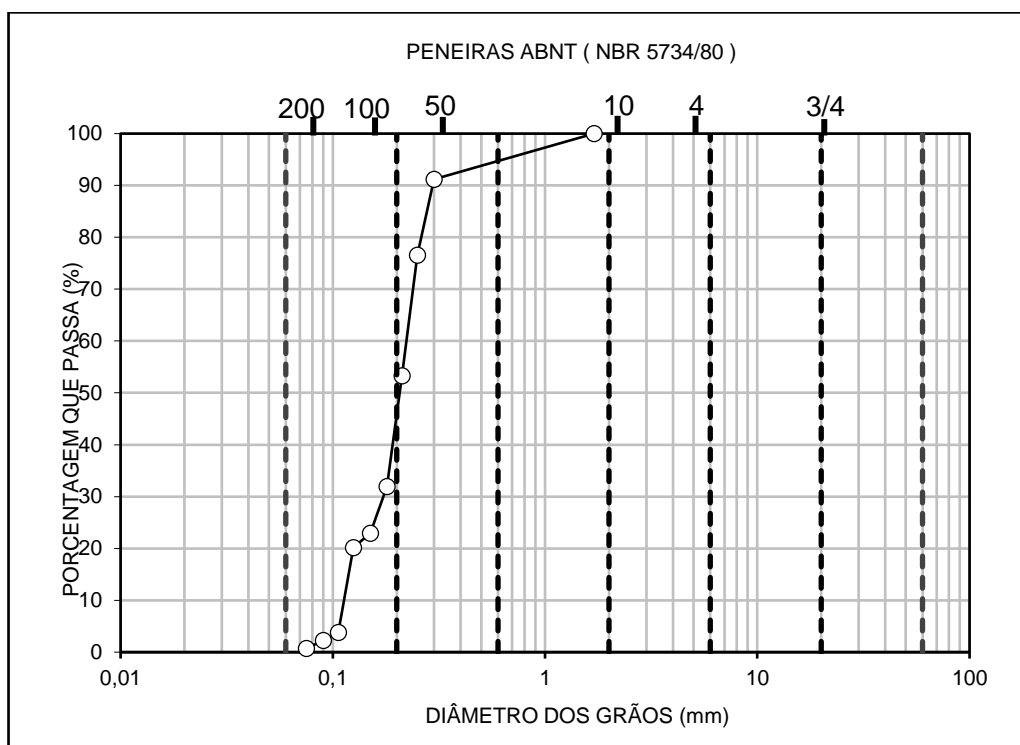


Figura 10. Curva granulométrica da areia fina da Taurus.

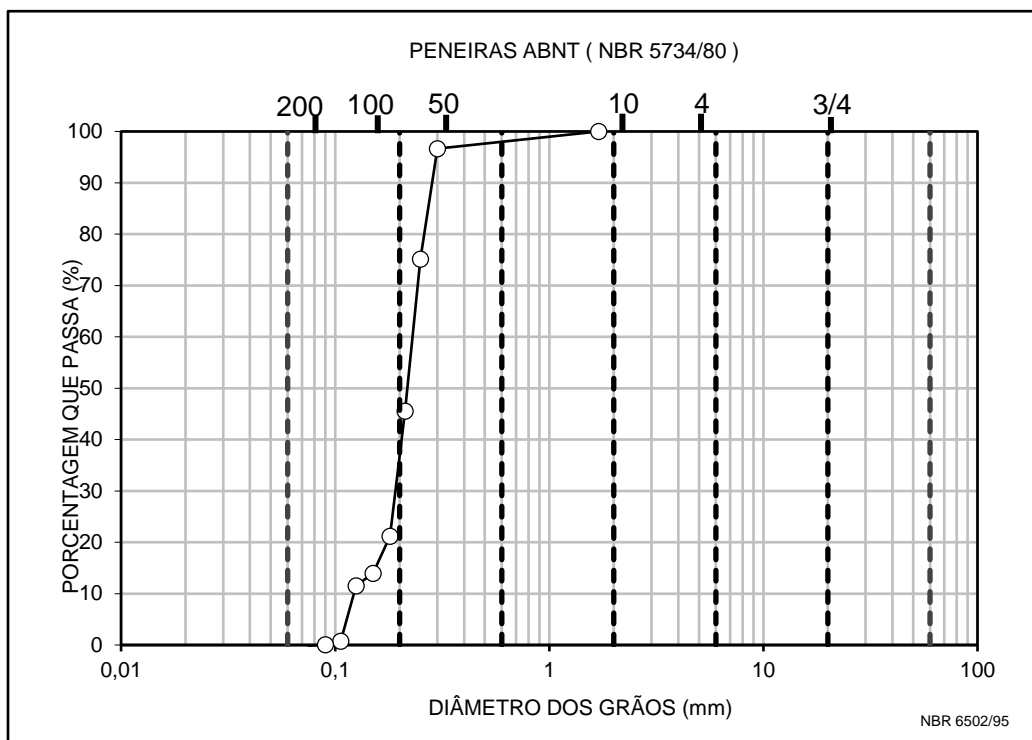


Figura 11. Curva granulométrica da areia média da Godoy.

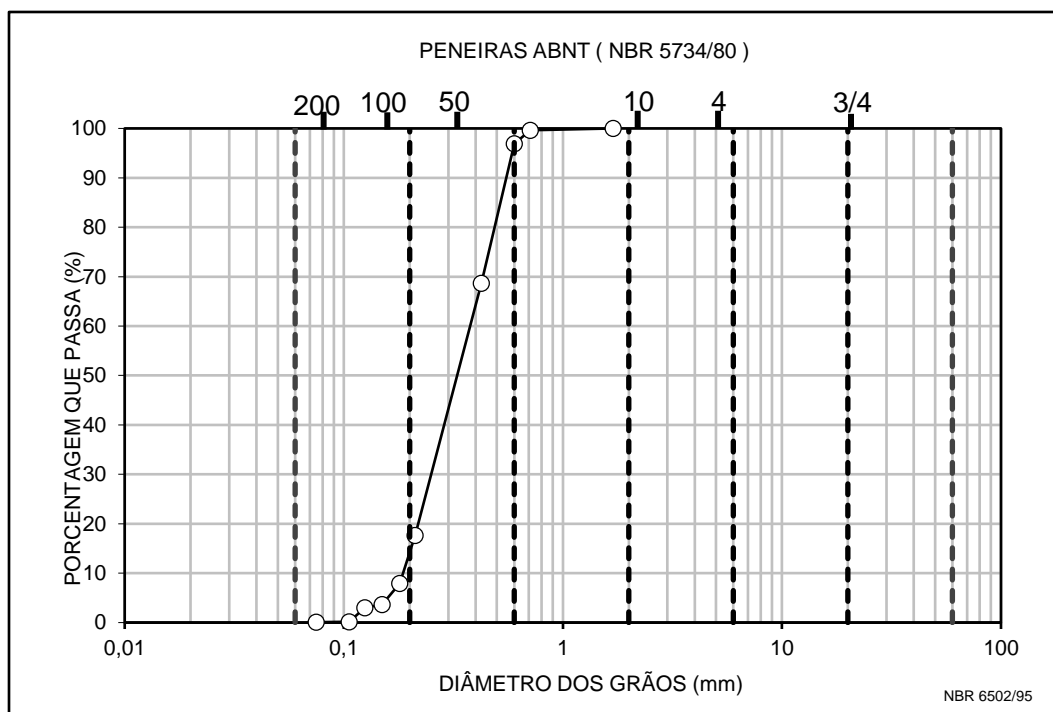


Figura 12. Curva granulométrica da areia grossa da Taurus.

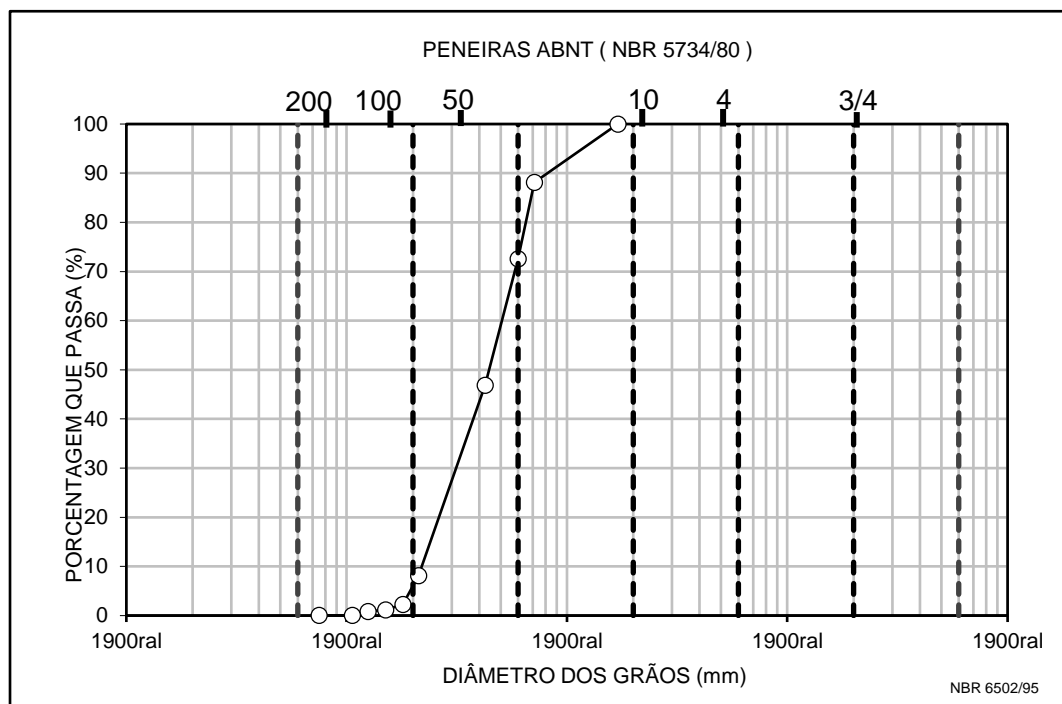
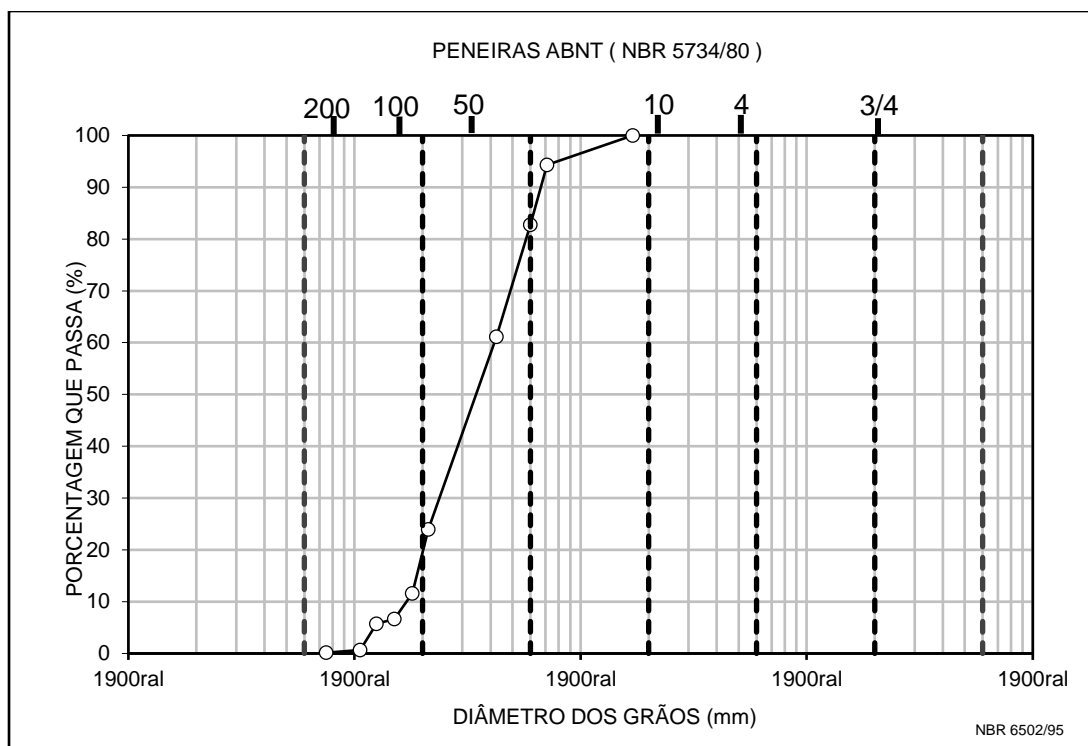


Figura 13. Curva granulométrica da areia grossa da Godoy.



Os resultados obtidos para D10, CU e porcentagem de finos, a partir dos ensaios granulométricos, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de CU e D10 obtidos das curvas granulométricas para seleção do meio filtrante.

Material	Diâmetro Efetivo (D10)	Coefficiente de Uniformidade (CU)	Porcentagem que passa pela peneira #140
Areia fina Godoy	0,11	1,97	0,8
Areia fina Taurus	0,12	1,89	3,8
Areia média Godoy	0,17	2,27	0,2
Areia grossa Godoy	0,17	2,46	0,6
Areia grossa Taurus	0,22	2,31	0,1

De acordo com as recomendações do manual do CAWST de 2009 o meio filtrante deve apresentar D10 entre 0,15 mm e 0,2 mm, CU entre 1,5 mm e 2,5 mm, e porcentagem de finos

inferior a 4%. Dessa maneira, analisando os resultados obtidos, é possível observar que a areia grossa Godoy e as areias finas Godoy e Taurus não atendem os padrões estabelecidos pelo CAWST, portanto foram excluídas das opções de material filtrante. Já a areia média Godoy e a areia grossa Godoy se adequaram aos valores recomendados, sendo selecionadas como meio filtrante e camada de separação, respectivamente. Dessa maneira, esses parâmetros garantem uma boa taxa de filtração, pois caso o meio filtrante for muito grosseiro, a taxa do filtro pode se tornar muito elevada, afetando a sua capacidade de remoção de turbidez (Campos *et. al.*, 2002). Um estudo feito por Jenkins *et. al.*, 2011, constatou que um meio filtrante mais fino (D10 de 0,17mm e CU abaixo de 3) aumentou significativamente a remoção de E. coli e coliformes totais, em relação a um meio filtrante mais grosso (D10 de 0,52mm), principalmente quando combinado com um maior período de pausa. Além disso, o estudo concluiu que as características do meio filtrante foram os fatores mais importantes no design do filtro, uma vez que estas definem as características de taxa de filtração, a qual é decisiva na performance do mesmo.

## 5.2. Lavagem do material

Como descrito anteriormente na seção 4, fez-se a leitura da turbidez da água de lavagem para cada material. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Turbidez de amostras de água das lavagens dos materiais filtrantes.

Material	Turbidez ( $\mu\text{T}$ )	
	Água da primeira lavagem	Água da última lavagem
Areia fina da Godoy	274	7,41
Areia fina da Taurus	518	6,83
Areia média da Godoy	279	5,45
Areia grossa da Godoy	158	9,8
Areia grossa da Taurus	129	3,14

Assim, é possível notar que a turbidez diminuiu consideravelmente, sendo a turbidez das últimas lavagens consideradas baixas. Portanto, comprova-se que a lavagem da areia foi adequada.



### 5.3. Caracterização do meio filtrante

Para a análise dos ensaios de caracterização do meio filtrante, é importante ressaltar que os materiais suporte e do meio filtrante foram adquiridos em lojas de materiais de construção, que são de fácil acesso, porém, possuem uma finalidade diferente, ou seja, não são normalmente utilizadas como meio filtrante. Dessa maneira, é possível que o material nem sempre atenda as condições necessárias ou as mais adequadas para uso no filtro.

#### 5.3.1. Distribuição granulométrica

Os ensaios granulométricos dos materiais da camada suporte são apresentados a seguir, nas Figura 14 e Figura 15.

Figura 14. Curva granulométrica do pedregulho fino.

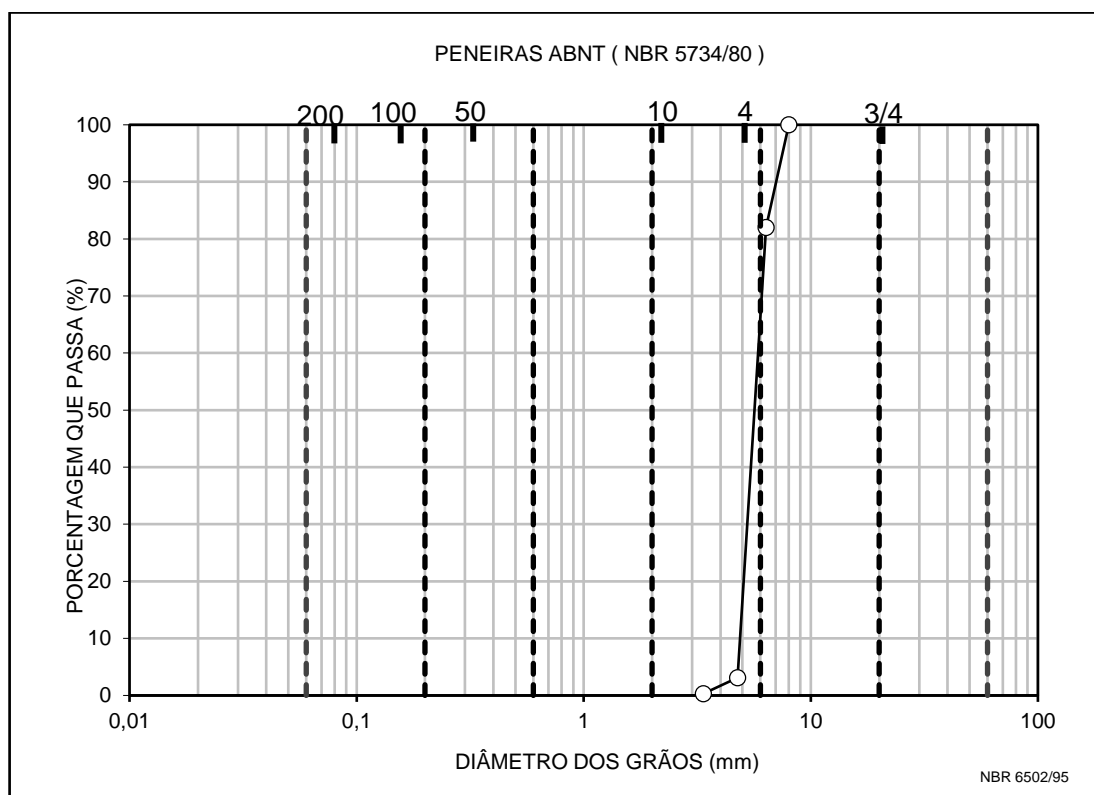
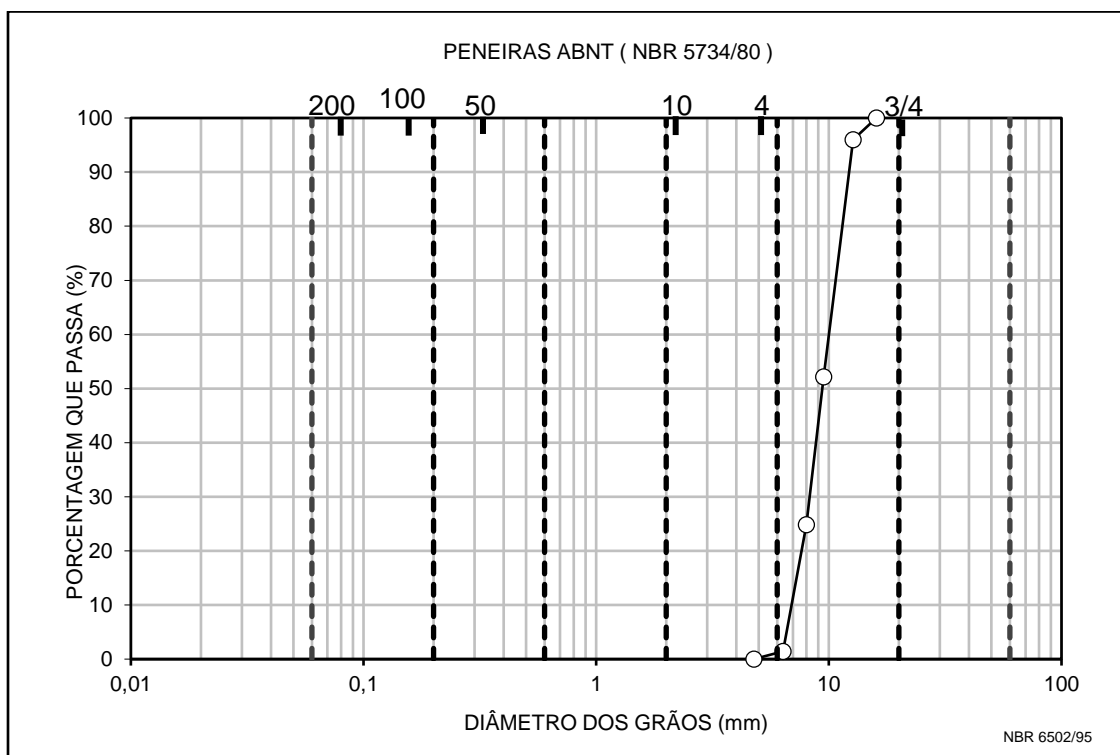


Figura 15. Curva granulométrica do pedregulho grosso.



A partir dos dados obtidos com o ensaio granulométrico, foi possível determinar o coeficiente de uniformidade (CU) e os parâmetros de diâmetro D10 e D60. O resumo dos resultados encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6. Valores de CU e D10 obtidos das curvas granulométricas.

Material	Granulometria			
	D10	D60	CU	Porcentagem que passa pela peneira #140
Pedregulho fino	4,89	5,90	1,2	-
Pedregulho grosso	6,95	10,08	1,44	-

Segundo o manual do CAWST (2012), recomenda-se para o filtro que o pedregulho fino possua um diâmetro máximo de 6 mm e o pedregulho grosso um diâmetro máximo de 12 mm. Portanto, os pedregulhos analisados são adequados para o uso nos filtros, pois atendem satisfatoriamente as recomendações do CAWST. Além disso, recomenda-se que a tubulação de

saída dos filtros esteja a 2 cm do fundo e que os pedregulhos tenham em sua maioria diâmetro superior a 10mm, a fim de não obstruir a saída do filtro. Os resultados e análise das areias do meio filtrante encontram-se no item 5.1.

### 5.3.2. Solubilidade em ácido

Os resultados dos testes de solubilidade em ácido encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7. Valores do ensaio de solubilidade em ácido.

Material	M <sub>1</sub> <sup>1</sup>	M <sub>2</sub> <sup>2</sup>	Solubilidade em ácido (%)
Areia média	100,0	99,8	0,2
Areia grossa	100,0	99,8	0,2
Pedregulho fino	100,0	100,0	0,0
Pedregulho grosso	100,0	100,0	0,0

Nota: nome comercial das areias: <sup>1</sup> massa seca inicial da amostra; <sup>2</sup> massa seca da amostra após o período de repouso em contato com o ácido.

Os materiais filtrantes avaliados apresentaram valores de solubilidade em ácido em consonância com os recomendados pela norma EB 2097/1990: Material filtrante - areia, antracito e pedregulho da ABNT, que determina que a solubilidade em ácido não deve exceder 10% para pedregulhos com diâmetro superior a 9,5 mm e 5% para diâmetros inferiores a 9,5 mm.

### 5.3.3. Massa específica dos sólidos

Os dados coletados e resultados obtidos de massa específica encontram-se nas Tabelas Tabela 9 a Tabela 12. Os valores de K necessários para corrigir a massa específica da água ( $\rho_w$ ) utilizada no cálculo da massa específica encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8. Valores do fator K e da massa específica da água para diferentes temperaturas.

T (°C)	Fator K	$\rho_w^1$ (g/cm <sup>3</sup> )
15.0	1.0009	0.99913
15.5	1.0008	0.99905
16.0	1.0007	0.99897
16.5	1.0007	0.99889

17.0	1.0006	0.99880
17.5	1.0005	0.99871
18.0	1.0004	0.99862
18.5	1.0003	0.99853
19.0	1.0002	0.99843
19.5	1.0001	0.99833
20.0	1.0000	0.99823
20.5	0.9999	0.99763
21.0	0.9998	0.99702
21.5	0.9997	0.99741
22.0	0.9996	0.99780
22.5	0.9995	0.99769
23.0	0.9993	0.99757
23.5	0.9992	0.99745
24.0	0.9991	0.99732
24.5	0.9990	0.99720
25.0	0.9988	0.99707

Nota: <sup>1</sup> massa específica da água

Tabela 9. Resultados do ensaio de massa específica da amostra de areia fina.

T (°C)	17,0
$\rho_w^1$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,99878
Balão volumétrico + Sólidos + Água (M1) (g)	730,17
Balão volumétrico + Água (M2) (g)	667,53
Massa Final de Sólidos (MS) (g)	100,03
Massa específica Sólidos T °C (g/cm <sup>3</sup> )	2,672
Fator K	1,0006
Massa específica Sólidos (20 °C) (g/cm <sup>3</sup> )	2,673

Nota: <sup>1</sup> massa específica da água

Tabela 10. Resultados do ensaio de massa específica da amostra de areia grossa.

T (°C)	17,0
$\rho_w^1$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,99878
Balão volumétrico + Sólidos + Água (M1) (g)	699,95
Balão volumétrico + Água (M2) (g)	637,74
Massa Final de Sólidos (MS) (g)	100,02
Massa específica Sólidos T°C (g/cm <sup>3</sup> )	2,642
Fator K	1,0006
Massa específica Sólidos (20 °C) (g/cm <sup>3</sup> )	2,644

Nota: <sup>1</sup> massa específica da água

Tabela 11. Resultados do ensaio de massa específica da amostra de pedregulho fino.

T (°C)	19,0
$\rho_w^1$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,99841
Balão volumétrico + Sólidos + Água (M1) (g)	699,41
Balão volumétrico + Água (M2) (g)	636,52
Massa Final de Sólidos (MS) (g)	99,96
Massa específica Sólidos T°C (g/cm <sup>3</sup> )	2,692
Fator K	1,0002
Massa específica Sólidos (20 °C) (g/cm <sup>3</sup> )	2,693

Nota: <sup>1</sup> massa específica da água

Tabela 12. Resultados do ensaio de massa específica da amostra de pedregulho grosso.

T (°C)	18,0
$\rho_w^1$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,99860
Balão volumétrico + Sólidos + Água (M1) (g)	723,85
Balão volumétrico + Água (M2) (g)	661,11

Massa Final de Sólidos (MS) (g)	100,84
Massa específica Sólidos T°C (g/cm <sup>3</sup> )	2,643
Fator K	1,0004
Massa específica Sólidos (20 °C) (g/cm <sup>3</sup> )	2,644

Nota: <sup>1</sup>massa específica da água

Os valores típicos de massa específica para areia na filtração lenta convencional são acima de 2,65 g/cm<sup>3</sup> (ENGELHARDT, 2012). Dessa maneira, os resultados obtidos são similares com aqueles propostos na literatura.

#### 5.3.4. Índice de vazios máximo

Os resultados para o índice de vazios máximo encontram-se nas Tabelas Tabela 13 a Tabela 16 a seguir.

Tabela 13. Resultados obtidos de índice de vazios máximo para areia média.

Ensaio	M[c] + M <sub>s</sub> <sup>1</sup> (kg)	M <sub>s</sub> <sup>2</sup> (g)	ρ <sub>d,min</sub> <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	e máx <sup>4</sup>
1	7,22	1560	1,567	0,706
2	7,22	1560	1,567	0,706
3	7,23	1570	1,577	0,695
Média	7,223	1563,333	1,570	0,70
Desvio padrão	0,006	5,774	0,006	1%

Nota: <sup>1</sup> massa solo + cilindro; <sup>2</sup> massa do solo seco que preencheu o molde; <sup>3</sup> massa específica aparente do solo; <sup>4</sup> índice de vazios máximo.

Tabela 14. Resultados obtidos de índice de vazios máximo para a areia grossa.

Ensaio	M[c] + M <sub>s</sub> <sup>1</sup> (kg)	M <sub>s</sub> <sup>2</sup> (g)	ρ <sub>d,min</sub> <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	e máx <sup>4</sup>
1	7,22	1370	1,376	0,921
2	7,22	1370	1,376	0,921
3	7,23	1390	1,396	0,893
Média	7,223	1376,667	1,383	0,91
Desvio padrão	0,006	11,547	0,012	2%

Nota: <sup>1</sup> massa solo + cilindro; <sup>2</sup> massa do solo seco que preencheu o molde; <sup>3</sup> massa específica aparente do solo; <sup>4</sup> índice de vazios máximo.

Tabela 15. Resultados obtidos de índice de vazios máximo para o pedregulho fino.

Ensaio	M[c] + M <sub>s</sub> <sup>1</sup> (kg)	M <sub>s</sub> <sup>2</sup> (g)	ρ <sub>d,min</sub> <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	e máx <sup>4</sup>
1	7,22	1480	1,487	0,811
2	7,22	1460	1,467	0,836
3	7,23	1490	1,497	0,799
Média	7,223	1476,667	1,483	0,82
Desvio padrão	0,006	15,275	0,015	2%

Nota: <sup>1</sup> massa solo + cilindro; <sup>2</sup> massa do solo seco que preencheu o molde; <sup>3</sup> massa específica aparente do solo; <sup>4</sup> índice de vazios máximo.

Tabela 16. Resultados obtidos de índice de vazios máximo para o pedregulho grosso.

Ensaio	M[c] + M <sub>s</sub> <sup>1</sup> (kg)	M <sub>s</sub> <sup>2</sup> (g)	ρ <sub>d,min</sub> <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	e máx <sup>4</sup>
1	7,22	1500	1,507	0,755
2	7,22	1520	1,527	0,732
3	7,23	1550	1,557	0,698
Média	7,223	1523,333	1,530	0,73
Desvio padrão	0,006	25,166	0,025	3%

Nota: <sup>1</sup> massa solo + cilindro; <sup>2</sup> massa do solo seco que preencheu o molde; <sup>3</sup> massa específica aparente do solo; <sup>4</sup> índice de vazios máximo.

### 5.3.5. Índice de vazios mínimo

Os resultados para o índice de vazios máximo encontram-se nas Tabelas Tabela 17 a Tabela 20.

Tabela 17. Resultados obtidos de índice de vazios mínimo para a areia média.

Ensaio	M[c] + M <sub>s</sub> <sup>1</sup> (kg)	M <sub>s</sub> <sup>2</sup> (g)	ρ <sub>d,min</sub> <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	e máx <sup>4</sup>
--------	---	---------------------------------	--	--------------------

1	7,42	1760	1,768	0,512
2	7,43	1770	1,778	0,503
3	7,44	1780	1,788	0,495
Média	7,430	1770	1,778	0,50
Desvio padrão	0,010	10,000	0,010	1%

Nota: <sup>1</sup> massa solo + cilindro; <sup>2</sup> massa do solo seco que preencheu o molde; <sup>3</sup> massa específica aparente do solo; <sup>4</sup> índice de vazios máximo.

Tabela 18. Resultados obtidos de índice de vazios mínimo para a areia grossa.

Ensaio	$M[c] + M_s^1$ (kg)	$M_s^2$ (g)	$\rho_{d,min}^3$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{máx}^4$
1	7,14	1480	1,487	0,778
2	7,18	1520	1,527	0,732
3	7,2	1540	1,547	0,709
Média	7,173	1513,333	1,520	0,74
Desvio padrão	0,0305	30,551	0,031	4%

Nota: <sup>1</sup> massa solo + cilindro; <sup>2</sup> massa do solo seco que preencheu o molde; <sup>3</sup> massa específica aparente do solo; <sup>4</sup> índice de vazios máximo.

Tabela 19. Resultados obtidos de índice de vazios mínimo para o pedregulho fino.

Ensaio	$M[c] + M_s^1$ (kg)	$M_s^2$ (g)	$\rho_{d,min}^3$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{máx}^4$
1	7,18	1520	1,527	0,764
2	7,17	1510	1,517	0,775
3	7,18	1520	1,527	0,764
Média	7,177	1516,667	1,524	0,77
Desvio padrão	0,006	5,774	0,006	1%

Tabela 20. Resultados obtidos de índice de vazios mínimo para o pedregulho grosso.

Ensaio	$M[c] + M_s^1$ (kg)	$M_s^2$ (g)	$\rho_{d,min}^3$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e_{máx}^4$
--------	---------------------	-------------	--	-------------



1	7,22	1560	1,567	0,687
2	7,21	1550	1,557	0,698
3	7,23	1570	1,577	0,677
Média	7,220	1560,000	1,567	0,69
Desvio padrão	0,010	10,000	0,010	1%

Nota: <sup>1</sup> massa solo + cilindro; <sup>2</sup> massa do solo seco que preencheu o molde; <sup>3</sup> massa específica aparente do solo; <sup>4</sup> índice de vazios máximo.

### 5.3.6. Porosidade

A partir dos dados dos índices de vazios máximo e mínimo, foi possível calcular a porosidade ( $\epsilon$ ). Os resultados encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21. Valores de porosidade para cada material.

Material	$e_{\text{máx}}^1$	$e_{\text{mín}}^2$	$\epsilon_{\text{máx}}^3$	$\epsilon_{\text{mín}}^4$
Areia média	0,70	0,50	0,41	0,33
Areia grossa	0,91	0,74	0,48	0,43
Pedregulho fino	0,82	0,77	0,45	0,43
Pedregulho grosso	0,73	0,69	0,42	0,41

Nota: <sup>1</sup> índice de vazios máximo; <sup>2</sup> índice de vazios mínimo; <sup>3</sup> porosidade máxima; <sup>4</sup> porosidade mínima.

A porosidade dos filtros lentos está geralmente em torno de 0,4 (ITACANET, 2005). Dessa maneira, as porosidades obtidas estão dentro do esperado para os materiais filtrantes. Além disso, com a porosidade foi possível calcular o volume de alimentação do filtro. O volume teórico de água encontra-se na Tabela 22, o qual foi calculado a partir do produto do volume total da camada pela porosidade.

Tabela 22. Volume teórico de água armazenado no meio filtrante.

Camada do filtro	Areia média	Areia grossa
Volume da camada (L)	25,72	2,34
Volume mínimo de água (L)	8,49	1,01
Volume máximo de água (L)	10,54	1,12

O volume armazenado no filtro com os pedregulhos colocados foi medido durante o preenchimento do filtro com o meio filtrante, obtendo-se o resultado de 1,04L para o pedregulho grosso e 1,56L para o pedregulho fino. Além disso, o volume camada de água estacionária, acima do meio filtrante, foi de 2,39L e o volume da tubulação de saída de 0,28L. Portanto, somando todos os volumes obtidos, tem-se que o volume mínimo do filtro é 14,76L e o máximo é 16,94L. A partir desse resultado determinou-se o volume de alimentação de 16L, visando máxima produção.

#### 5.4. Montagem da estrutura dos filtros

Estima-se que para a montagem de cada filtro foram gastos aproximadamente 120 minutos, feito por duas pessoas. Além disso, considerou-se a construção da estrutura dos filtros suficientemente simples e acessível para a reprodução por qualquer pessoa, uma vez fornecidas instruções adequadas e detalhadas. A seguir estão detalhados os processos de montagem de cada filtro.

##### 5.4.1. Filtro intermitente $h=85\text{cm}$ (com reservatório extra)

###### 5.4.1.1. Corpo

Primeiramente, realizou-se o corte do tubo de adução para atingir 85 cm de altura interna. Para isso, encaixou-se o tubo de adução dentro do cap e cortou-se a tubulação com uma serra circular com disco widea para madeira, de modo que o comprimento interno total fosse de 85 cm. Para garantir esse comprimento, fez-se a medição a partir do fundo do cap encaixado a extremidade chanfrada da tubulação. Considerando que a tubulação não atinge o fundo do cap quando encaixada, ficando 2,5 cm acima da base devido a angulação do cap, a tubulação foi cortada com 2,5 cm a menos, ou seja, 82,5 cm, para que a altura interna do filtro tivesse 85 cm. O procedimento está demonstrado na Figura 16.

Figura 16. Medição e corte do corpo do filtro.



É importante ressaltar que a tubulação utilizada é vendida em comprimentos de 6 m com uma das extremidades já chanfradas - extremidade utilizada na medida do cap citada anteriormente. Dessa forma, a seção de tubo utilizada para um dos filtros precisou ser chanfrada manualmente para assegurar um melhor encaixe ao cap. Para isso prendeu-se a base da tubulação com um grampo e fez-se um chanfro na extremidade em um ângulo de aproximadamente 45° com uma lixa. O resultado encontra-se na Figura 17.

Figura 17. Corpo com chanfro.



#### 5.4.1.2. Saída d'água

Primeiramente, fez-se um furo com uma serra copo no corpo do filtro 27 cm acima da base e finalizou-se com lixa. A altura do furo (27 cm) foi tal que permitisse o encaixe do adaptador de caixa d'água sem comprometer a passagem de veda calha entre o cap e o tubo. O adaptador de caixa de água foi colocado ao contrário, com a porção rosqueada para fora do corpo do filtro, previsto para facilitar o encaixe da parte externa da tubulação de saída e sua substituição em eventos de danificação. Uma borracha de vedação adicional foi colocada na

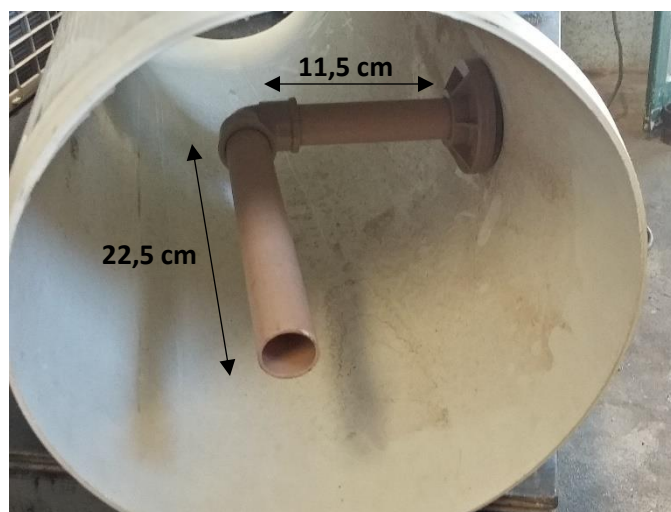
parte de fora do encaixe do adaptador (Figura 18), uma vez que ele foi projetado para superfícies retas e não curvas, como a do filtro, o que poderia ocasionar vazamentos. O furo do tubo e encaixe do adaptador de caixa d'água é ilustrado na Figura 18.

Figura 18. Colocação do adaptador de caixa d'água. (1) Detalhe da serra copo. (2) Detalhe do acessório.



Nos procedimentos descritos a seguir, todas as peças antes de serem coladas foram limpas com a solução limpadora e lixadas para uma melhor aderência. Para a tubulação interna ao filtro ligada ao adaptador de caixa de água, cortou-se 11,5 cm de um tubo de PVC marrom DN25. A seguir, cortou-se 22,5 cm de um tubo de PVC marrom DN25, de modo a deixar uma distância de 2 cm do fundo da base do filtro, altura suficiente para permitir o fluxo de água e impedir a saída do material suporte. Ambos tubos foram unidos com um cotovelo, e as peças foram coladas. Esse encaixe possibilitou que a parte interna da tubulação de saída ficasse posicionada no centro da base do filtro, o que, em teoria, permitirá uma coleta homogênea de água e reduzirá efeitos hidrodinâmicos indesejáveis como caminhos preferenciais e zonas mortas. O resultado encontra-se na Figura 19.

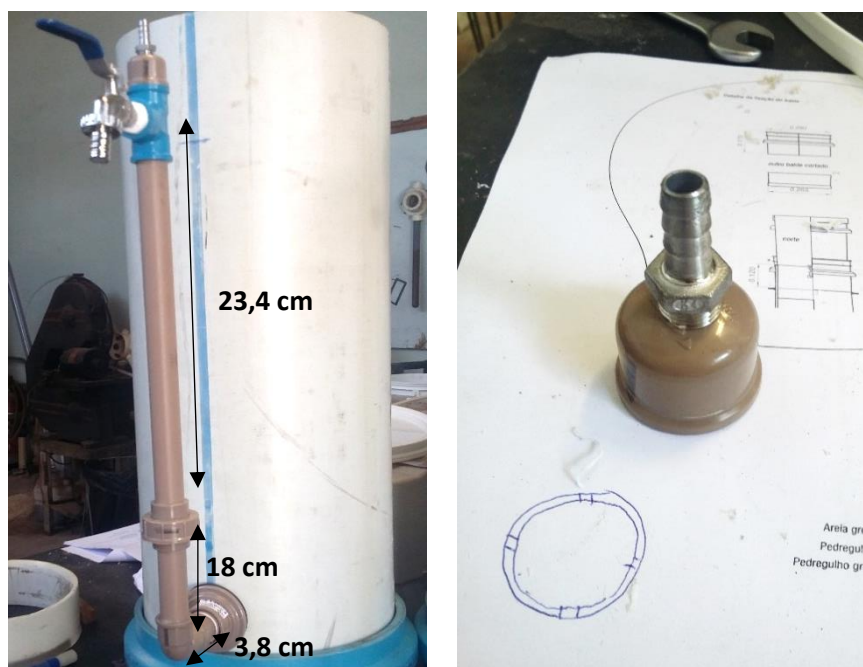
Figura 19. Tubulação interna ao filtro.



Para a saída d'água externa ao filtro, uniu-se um cotovelo ao adaptador da caixa de água utilizando um tubo de PVC marrom com comprimento de 3,8 cm. Para a tubulação principal, cortou-se um tubo de PVC marrom de 18 cm de comprimento, que foi colocado na saída do filtro. Este então foi unido a um tubo de PVC marrom de 23,4 cm, através de uma união soldável DN25. Dessa maneira, obteve-se uma tubulação a uma altura de 72 cm do fundo do filtro, que corresponde à altura do nível d'água. A união soldável foi colocada para possibilitar a troca da torneira ou da tubulação caso sejam danificadas, além de permitir que a torneira seja móvel e possa ser ajustada (na posição frontal ou lateral) conforme a necessidade do usuário.

No final dessa tubulação colocou-se um tê azul roscável. A seguir, encaixou-se uma torneira de esfera metálica, na qual colocou-se fita veda rosca conforme necessário. Para tampar o topo da tubulação com o tê azul roscável, utilizou-se um cap de PVC marrom DN25 com um espigão de  $\frac{1}{4}$ . Para a colocação do espigão no cap, fez-se um furo com broca de 10,5 mm e depois passou-se um macho de  $\frac{1}{4}$ . Finalmente, uniu-se esse cap à extremidade do tê azul roscável com um tubo de 3,8 cm de PVC marrom DN25. Na Figura 20 encontra-se a tubulação de saída d'água finalizada e o detalhe do cap. Uma alternativa ao espigão é realizar somente um furo no cap e colocar uma tela que permita a entrada de ar sem contaminação. Essa pequena abertura no topo da tubulação de saída é importante para manter a pressão atmosférica no interior da tubulação e assim evitar sifonamento.

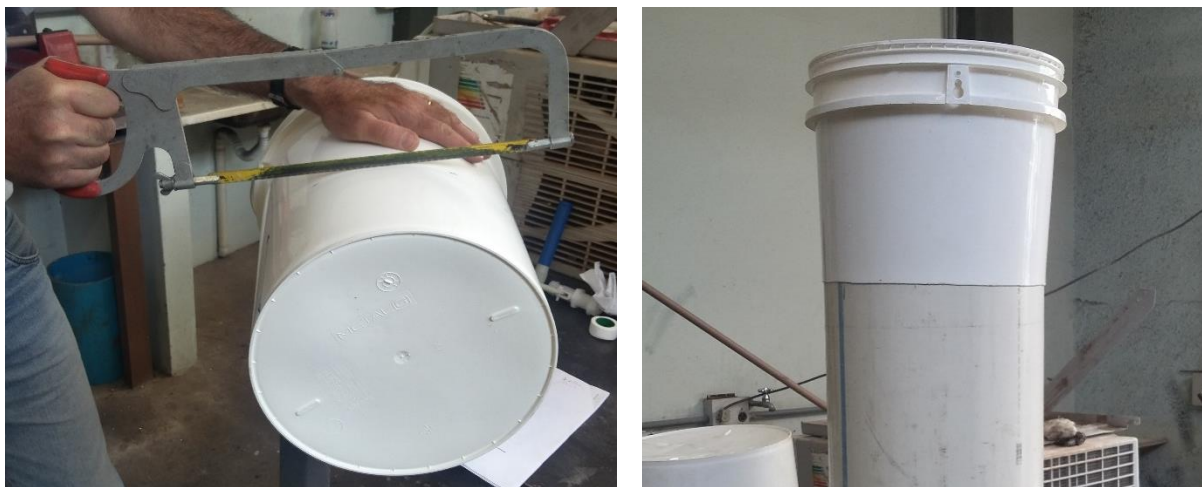
Figura 20. Tubulação da saída de água do filtro intermitente finalizada. (1) Tubulação de saída. (2) Detalhe do cap com o espigão colocado.



#### 5.4.1.3. Reservatório extra e Tampa

Para o filtro intermitente foi construído um reservatório extra com o intuito de controlar a entrada de água de acordo com o nível dentro do filtro durante a operação. Tal reservatório foi constituído por um balde plástico de 20 L com tampa, com um furo no fundo no qual foi colada uma boia de filtro de gravidade. Primeiro, cortou-se 12,5 cm a partir da base de um balde idêntico ao utilizado para o reservatório, de modo a ajustá-lo ao corpo do filtro. A utilização do balde extra foi necessária para que o reservatório com boia não ficasse solto sobre o filtro, uma vez que o diâmetro de sua base é maior que o diâmetro nominal do filtro – 267 mm – o que impossibilitou seu encaixe. O resultado está ilustrado na Figura 21.

Figura 21. Colocação do balde no corpo do filtro. (1) Detalhe do corte com serra manual. (2) Balde colocado no corpo do filtro.



Para a instalação da boia, fez-se um furo no centro do segundo balde com uma broca de 10,5 mm. Primeiro, lixou-se as superfícies da boia e do balde, e então usou-se solução limpadora para limpá-las. A seguir, a boia foi colada com algumas gotas de adesivo instantâneo, e uma vez seca, foi selada com silicone, como ilustrado na Figura 22.

Figura 22. Colocação da boia do filtro intermitente. (1) Detalhe do uso da furadeira. (2) Detalhe da aplicação de silicone.



A distância entre o topo da camada filtrante e a boia do reservatório extra (quando fechada) foi de aproximadamente 10 cm, ou seja, o nível máximo de água no interior do filtro foi de 10 cm.

#### 5.4.2. Filtro intermitente h=100cm (com difusor)

##### 5.4.2.1. Corpo

A construção do corpo do filtro intermitente de altura de 100 cm foi similar à do intermitente com altura de 85 cm descrito anteriormente. Também foi utilizado um tubo de adução de PVC Defoyo com diâmetro nominal de 250 mm e um cap de PVC Defoyo para água potável com diâmetro nominal de 250 mm como base. A única diferença na construção do corpo deste filtro intermitente em relação ao anterior é que a altura interna total do filtro é de 100 cm.

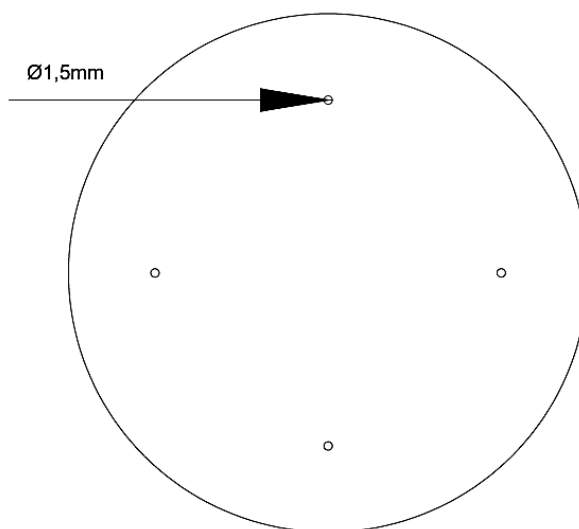
##### 5.4.2.2. Saída d'água

A saída d'água do filtro intermitente com 100 cm de altura foi construída seguindo o mesmo procedimento do filtro intermitente anterior de 85 cm, incluindo as medidas.

##### 5.4.2.3. Difusor e tampa

Para a construção do difusor, foi utilizado um balde plástico. Foram feitos quatro furos com uma broca de 1,5mm de diâmetro e 8 cm de espaçamento entre si. Finalmente, o balde foi colocado dentro do filtro e a tampa do balde plástico foi colocada para tampá-lo. O resultado encontra-se na Figura 23. Ensaios prévios demonstraram que a utilização do difusor proposto possibilitou atingir uma taxa máxima de filtração dentro das recomendações da CAWST, de  $10,8\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ . Além disso, o difusor permitiu manter as taxas de filtração de ambos os filtros intermitentes muito próximas:  $10,58\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  para o filtro intermitente com difusor e  $10,17\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$  do filtro intermitente com boia.

Figura 23. Esquema do difusor do filtro intermitente.





### 5.4.3. Filtro contínuo h=90cm

#### 5.4.3.1. Corpo

A construção do corpo do filtro contínuo foi similar à do intermitente (item 5.4.1.1.), e também se utilizou tubo de adução de PVC Defoyo com diâmetro nominal de 250 mm. Como base do filtro foi empregado um cap de PVC Defoyo para água potável com diâmetro nominal de 250 mm. As únicas diferenças na construção do corpo do filtro contínuo em relação ao intermitente é que a altura interna total do filtro é de 90 cm e que uma boia de caixa d'água foi utilizada para controlar a entrada de água durante a operação. Para a instalação da boia no corpo do filtro, fez-se um furo com uma furadeira com broca chata 13/16 a uma distância 6 cm do topo do corpo do filtro, finalizando com lixa e o uso da solução limpadora. Similar ao filtro intermitente, a distância do topo da camada filtrante a boia do filtro contínuo - na posição de fechada - foi de 10 cm, resultando num nível d'água máximo de 10 cm. O resultado pode ser visto na Figura 24.

Figura 24. Detalhe da boia instalada no filtro contínuo.



#### 5.4.3.2. Saída d'água

A saída d'água do filtro contínuo foi construída seguindo o mesmo procedimento do filtro intermitente, incluindo as medidas (item 5.4.1.2.). A diferença entre a saída d'água dos filtros está na torneira. Para a finalização da saída d'água, tê marrom de PVC DN25 foi colado no final da tubulação, após lixar e limpar as peças com solução limpadora. A seguir, colou-se um cotovelo azul roscável de PVC a um tubo marrom de PVC DN25 de 3,8 cm de comprimento. Então, colocou-se um registro do tipo agulha. A utilização do registro tipo agulha foi prevista

para controlar a taxa de filtração do filtro com o intuito de permitir maior controle sobre o processo de filtração. Para tampar o topo da tubulação, realizou-se o mesmo procedimento de adaptação do cap. Na

Figura 25 encontra-se a tubulação de saída d'água finalizada.

Figura 25. Saída de água do filtro contínuo finalizada.



#### 5.4.3.3. Tampa

Para tampar o filtro, utilizou-se a tampa do balde plástico utilizado no filtro intermitente de 85 cm de altura.

#### 5.4.4. Filtro contínuo h=65cm

##### 5.4.4.1. Corpo

A construção do corpo do filtro contínuo de 65 cm de altura foi similar à do filtro contínuo apresentado anteriormente (item 5.4.3.1.). Também se utilizou um tubo de adução de PVC Defoyo com diâmetro nominal de 250 mm e como base foi empregado um cap de PVC Defoyo para água potável com diâmetro nominal de 250 mm. O procedimento para a construção

do corpo do filtro foi idêntico a aquele utilizado no filtro contínuo anterior, sendo a altura interna total do filtro de 65 cm. Uma boia de caixa d'água também foi colocada a 6 cm do topo do filtro, da mesma forma.

#### 5.4.4.2. Saída d'água

A saída d'água do filtro contínuo de 65 cm de altura foi construída da mesma maneira dos filtros descritos anteriormente, porém com medidas diferentes para a tubulação externa ao filtro. Para a saída d'água externa ao filtro, uniu-se um cotovelo ao adaptador da caixa de água utilizando um tubo de PVC Defofo marrom com comprimento de 3,8 cm. Para a tubulação principal, cortou-se um tubo de PVC Defofo marrom de 6,9 cm de comprimento, que foi colocado na saída do filtro. Este então foi unido a um tubo de PVC Defofo marrom de 10 cm, através de uma união soldável DN25. Dessa maneira, obteve-se uma tubulação a uma altura de 47 cm do fundo do filtro, que corresponde à altura do nível d'água.

#### 5.4.4.3. Tampa

Para tampar o filtro, utilizou-se a tampa do balde plástico utilizado no filtro intermitente de 85 cm de altura.

#### 5.4.5. Ajustes finais e considerações da montagem da estrutura dos filtros

O cap utilizado para a base do filtro possui um anel de vedação, porém o seu encaixe na tubulação somente é viável fazendo uso de máquinas como uma prensa hidráulica. No entanto, o uso desses tipos de equipamento torna o processo de montagem mais complexo e menos acessível para regiões com carência de recursos.

Dessa maneira, optou-se por utilizar cola veda calha para colar e impermeabilizar a junção do corpo com a base, como demonstrado na Figura 26. É importante ressaltar que a veda calha não pode entrar em contato com a água devido a possível toxicidade e contaminação da água do filtro, e por esse motivo deve ser aplicada em lugares onde não há contato com a água. Dessa maneira, é preferível optar por utilizar outros elementos como um anel de vedação, ou uma base para o filtro que encaixe sem a necessidade de colocar algum tipo de vedação adicional, quando possível.

Figura 26. Detalhe da veda calha aplicada no filtro.



Além disso, para a montagem da estrutura dos filtros, é importante a utilização de equipamentos de proteção como óculos para proteção contra impacto (de respingos e pequenos objetos), e uso de luvas para proteção contra materiais cortantes, como por exemplo a fibra de vidro no cap. O uso da solução limpadora é muito importante para remover impurezas presentes nas peças, e assim garantir máxima aderência na etapa de colagem.

Um fator importante a respeito da estrutura dos filtros é o peso, uma vez que a proposta de utilizar um material como PVC é tornar o filtro mais leve em comparação à estrutura de cimento proposta pela CAWST, que pesa em média 95 kg (CAWST, 2009). O peso medido dos filtros vazios encontra-se na Tabela 23.

Tabela 23. Peso da estrutura dos filtros.

Filtro	Peso (kg)
Intermitente h=100 cm	13,7
Intermitente h=85cm	13,0
Contínuo h=90cm	12,4
Contínuo h=65cm	10,3

É possível afirmar que os pesos das estruturas dos filtros construídos com materiais de PVC é muito inferior ao peso da estrutura feita de cimento, que pesa em torno de 95 kg, e consequentemente mais fácil de transportar caso necessário (CAWST,2009).

### 5.5 Custo estimado dos FLD

Os custos dos materiais necessários para a construção dos diferentes FLD encontram-se na Tabela 24, estimados a partir dos preços encontrados em lojas do Estado de São Paulo em Abril de 2018. O custo total da construção de cada FLD encontra-se na Tabela 25 e não considera custos com mão de obra e consumo de água, calculado apenas com os custos dos materiais.

Tabela 24. Custos dos materiais necessários para construção dos FLD.

Item	Custo unitário (R\$)
Trecho de tubulação de PVC Defofo DN250 (1m)	200,00
Cap de PVC Defofo DN250	13,63
Boia de caixa d'água	5,52
União soldável com anel de vedação DN250	5,61
Trecho de tubo de PVC marrom DN25 (3m)	7,99
Adaptador soldável de caixa d'água com anel de vedação DN25	10,19
Cotovelo 90° de PVC marrom DN25	0,59
União soldável de PVC DN25	4,50
Cap de PVC marrom DN25	1,49
Espigão metálico de ¼	3,28
Torneira de esfera metálica DN25	8,80
Tê marrom de PVC DN25	1,29
Tê azul roscável DN25	12,59
Cotovelo roscável azul de PVC	4,49
Registro do tipo agulha	13,84
Boia de filtro por gravidade	7,90
Balde plástico com tampa (20L)	24,50
Balde plástico (13,6L) para difusor	6,86
Veda rosca (18mmx25m)	3,71
Solução Limpadora (200g)	10,15

Cola para PVC (175g)	10,6
Lixa	1,64
Trena metálica	4,41
Serra manual	8,99
Veda calha	16,0
Aplicador de veda calha	26,0
Alicate	14,23
Solução preparadora para PVC (200 ml)	8,18
Areia média (20 kg)	2,99
Areia grossa (20 kg)	2,99
Pedregulho fino(20 kg)	4,99
Pedregulho grosso (20 kg)	2,90

Tabela 25. Custo total para construção dos diferentes FLD, desconsiderando o custo da mão de obra.

Tipo de filtro	Custo (R\$)
Filtro intermitente h=85cm	443,94
Filtro intermitente h=100cm	418,40
Filtro contínuo h=90cm	415,29
Filtro contínuo h=65cm	415,29

Segundo a ONG *OHorizons*, o custo de um FLD de concreto com capacidade de 11L pode variar de U\$25 a U\$65, aproximadamente R\$101,5 a R\$263,8 (segundo a cotação de R\$4,06/U\$1 de Setembro de 2018). Comparando esses valores com os custos estimados na Tabela 25, conclui-se que o FLD feito com PVC é economicamente menos acessível. No entanto, é importante ressaltar que apesar do maior custo, os FLD analisados possuem uma maior capacidade em termos de volume, além de maior facilidade de construção e transporte. Além disso, as ferramentas contabilizadas no custo da construção do filtro podem ser reutilizadas.

Outro fator importante a ser considerado é o fato de que esses custos são suscetíveis a grandes variações em função do país e região.

## 5.6. Operação dos filtros intermitentes

### 5.6.1. Parâmetros microbiológicos

Segundo a Portaria de Consolidação MS-GM nº 5, de 2017 (BRASIL, 2017) e a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2017a), a água destinada a abastecimento humano deve demonstrar ausência de *E. coli* e coliformes totais em 100mL. A Figura 29 contém a eficiência de remoção do pré-tratamento. A variação dos resultados das amostras semanais encontra-se nas Figura 28 e Figura 29, para a água bruta, água clarificada (água após o pré-tratamento) e água filtrada.

Figura 27. Variação da eficiência de remoção de *E. coli* e coliformes totais do pré tratamento.

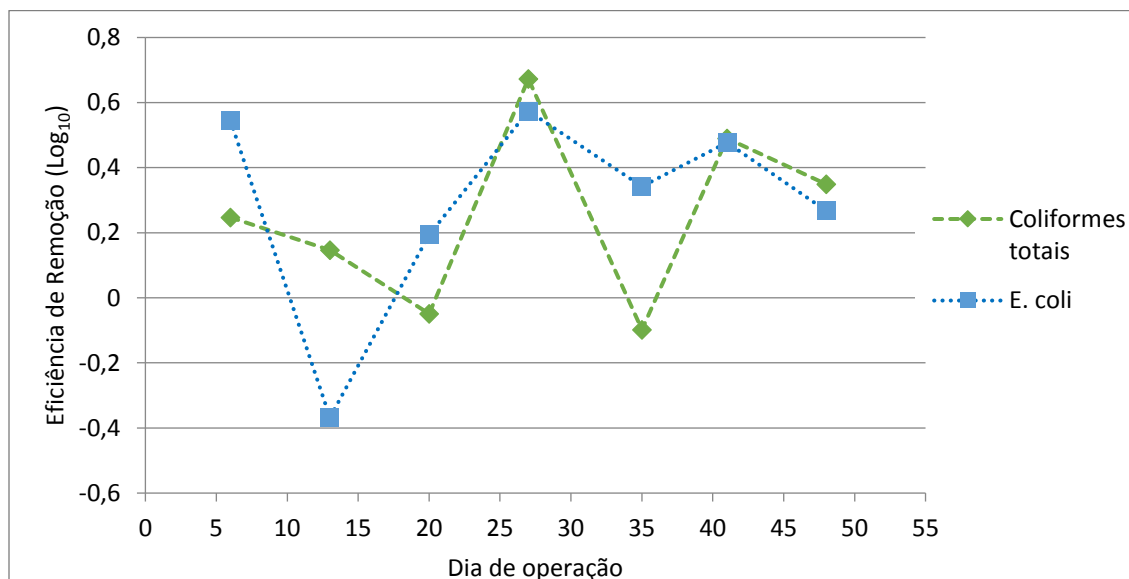


Figura 28. Variação da eficiência de remoção e do número de colônias de *E. coli* em amostra de 100mL para água bruta, clarificada e filtrada.

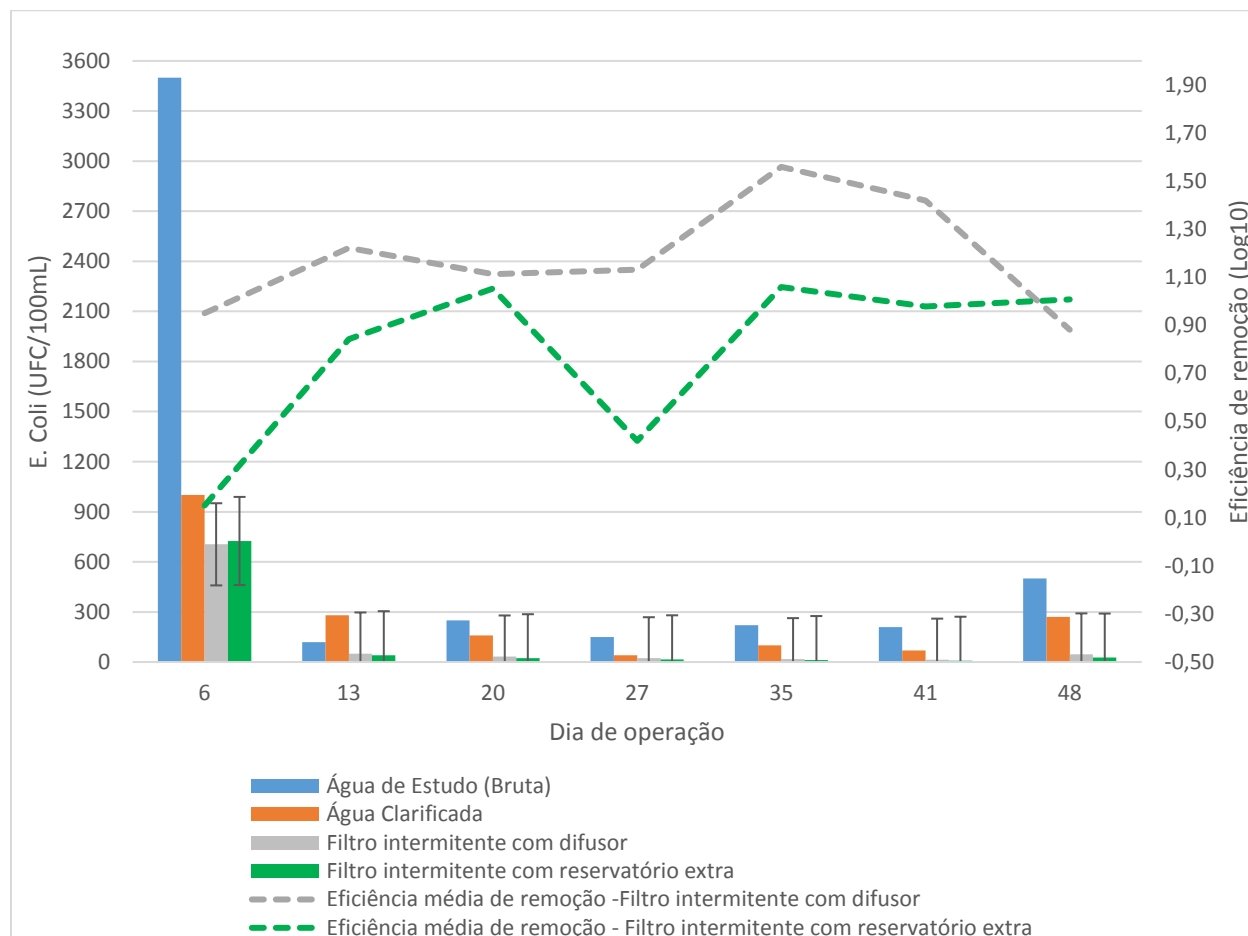
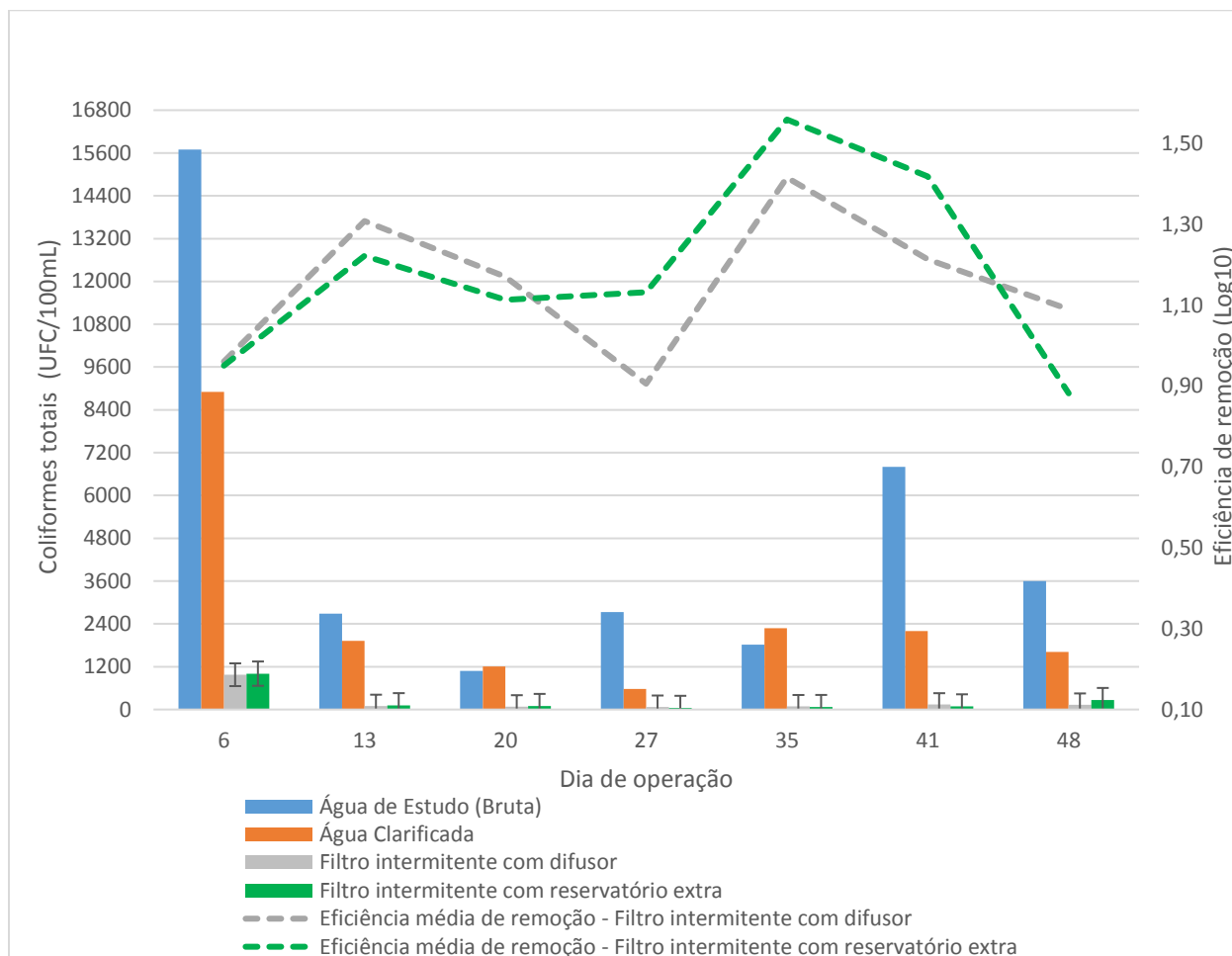




Figura 29. Variação da eficiência de remoção e do número de colônias de coliformes totais em amostra de 100mL para água bruta, clarificada e filtrada.



Dessa maneira, é possível observar que após as duas primeiras semanas de operação, especialmente a primeira, os números de *E. coli* e coliformes totais diminuíram consideravelmente na água filtrada. Apesar dessa diminuição dever-se, em parte, ao fato de que a água bruta também demonstrou menores níveis de *E. coli* e coliformes totais, os resultados dos filtros manteve-se constante, demonstrando estabilização. No entanto, nota-se que não foi possível conseguir ausência, sendo os menores níveis registrados de 4 UFC/100mL (filtro com reservatório extra e boia) e 13 UFC/100mL (filtro com difusor) para *E. coli*, e 39 UFC/100mL (filtro com reservatório extra e boia) e 59 UFC/100mL (filtro com difusor) para coliformes totais, após 30 dias de operação.

Observando os resultados, percebe-se que ao final do período de operação estudado, todos os filtros apresentaram uma eficiência de remoção de 0,05 Log<sub>10</sub> a 1,5 Log<sub>10</sub> para *E. coli*, e

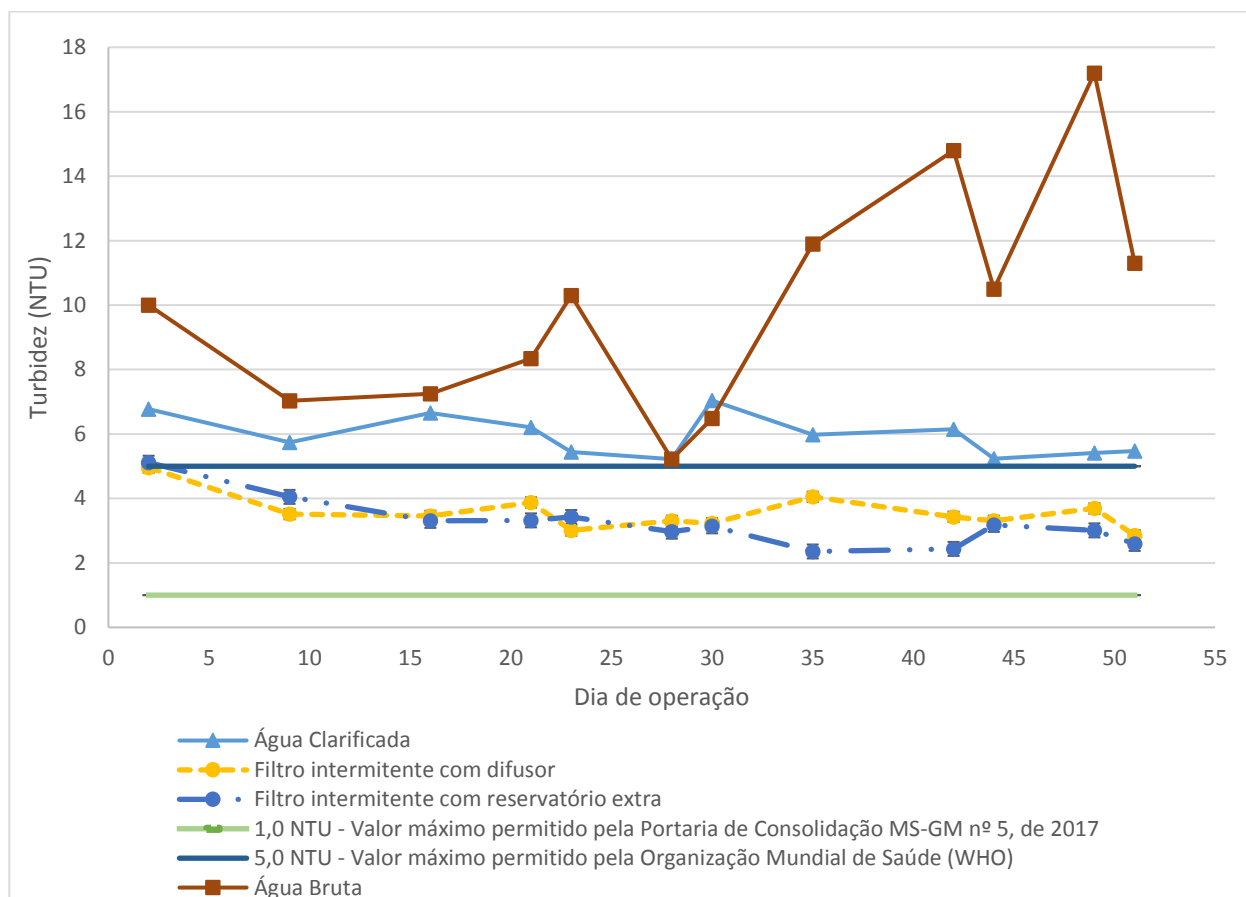
de 0,58 Log<sub>10</sub> a 1,72 Log<sub>10</sub> para coliformes totais. Apesar dos parâmetros de potabilidade não terem sido atendidos, a eficiência dos filtros condiz com aquela encontrada na literatura (Manz, 2007; Brown *et. al.*, 2011). Além disso, percebe-se que a eficiência do pré-tratamento não impactou diretamente na eficiência de remoção dos filtros. Portanto, os filtros apresentaram a capacidade de manter uma eficiência de remoção aproximadamente constante, comprovando sua estabilidade. Finalmente, para a remoção de *E. coli* e coliformes totais, é possível notar que, de modo geral, os filtros intermitentes com reservatório extra e boia obtiveram as melhores eficiências de remoção e o menor número de colônias em UFC/100mL, principalmente após um maior período de operação. No entanto, por meio da análise estatística, constatou-se que essa diferença de desempenho entre os dois filtros não foi significativa. Por outro lado, a melhoria de eficiência dos filtros ao longo da operação provavelmente deve-se ao desenvolvimento da camada biológica.

Além disso, é importante ressaltar que nos dias 29 e 47 de operação ocorreu a limpeza das mantas de pré-tratamento. Após a limpeza, é possível notar redução na eficiência do pré-tratamento, porém sem aparente alteração da eficiência de remoção dos microrganismos. No entanto, destaca-se que a principal finalidade do pré-tratamento foi a remoção de turbidez da água bruta.

#### 5.6.2. Turbidez

Segundo a Portaria de Consolidação MS-GM nº 5, de 2017 (BRASIL, 2017), a água destinada a abastecimento humano proveniente de filtração lenta não pode ultrapassar o valor de 1,0 NTU. O valor recomendado pela WHO é levemente mais permissivo quando se trata de tratamentos descentralizados, sendo o valor máximo 5,0 NTU (WHO, 2017b). A eficiência de remoção nos filtros variou de 36,9% a 44,57% para as amostras compostas, e 40,8% a 45,2% para as amostras pontuais. A eficiência para as amostras compostas dos filtros intermitentes com difusor foi de 40,0% ± 12,0% em média, enquanto a eficiência dos filtros intermitentes com reservatório extra e boia foi de 45,3% ± 12,9%. Os valores de turbidez das amostras compostas para os filtros encontram-se na Figura 30.

Figura 30. Variação de turbidez ao longo da operação para as amostras compostas.



Dessa maneira, é possível verificar que ao longo da operação dos filtros os resultados não atenderam o padrão de potabilidade exigido pela Portaria de Consolidação MS-GM nº 5, de 2017 (BRASIL, 2017). No entanto, após 6 dias de operação, nota-se que os filtros conseguiram atingir uma turbidez da água filtrada sempre abaixo de 5 NTU, atendendo as recomendações da OMS (WHO, 2017b). É importante ressaltar que o padrão de potabilidade da Portaria de Consolidação MS-GM nº 5, de 2017 desconsidera as limitações do tratamento de água descentralizado em locais isolados, enquanto a OMS considera essas condições e por esse motivo propõe um padrão um pouco mais permissivo. A eficiência atingida por ambos os filtros se encontra abaixo da média para filtros lentos domiciliares, que em outros estudos esteve acima de 80% (Jenkins *et. al.*, 2011; Jellison e Napotnik, 2014). Além disso, é possível observar que a turbidez da água bruta variou consideravelmente ao longo da operação, porém devido ao pré-tratamento aplicado a água clarificada utilizada para

alimentar os filtros manteve turbidez relativamente constante, amortecendo o impacto das variações sobre o desempenho dos filtros.

A média dos resultados das amostras pontuais para cada tipo de filtro do intervalo de alimentação de 5h encontra-se na Figura 31, e os resultados do intervalo de alimentação de 14h na Figura 32.

Figura 31. Variação dos valores de turbidez com o decorrer da operação dos filtros para o intervalo de alimentação de 5h.

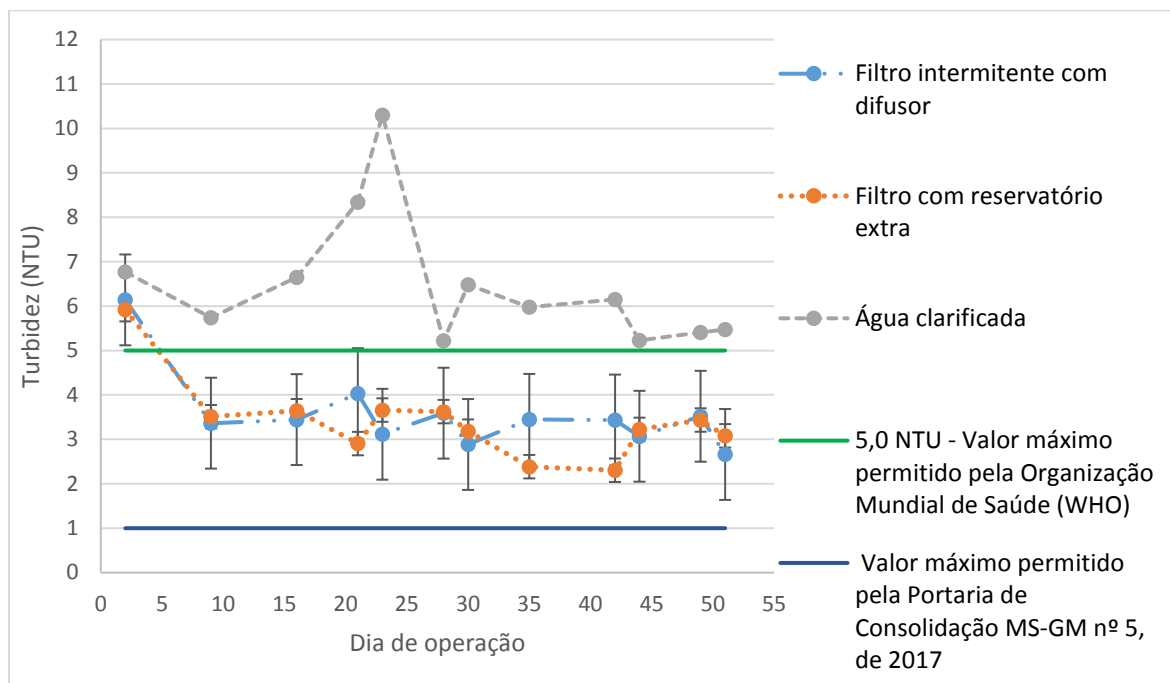
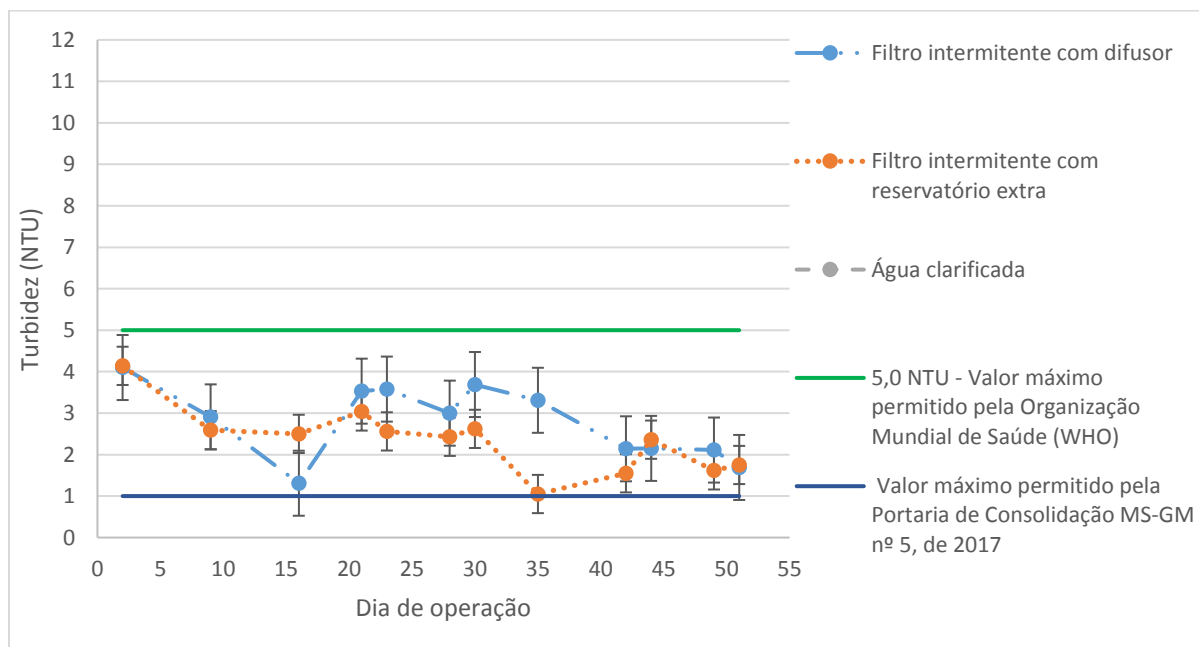


Figura 32. Variação dos valores de turbidez com o decorrer da operação dos filtros para o intervalo de alimentação de 14h.



Ao analisar os resultados das amostras destrinchadas nos dois períodos de pausa, percebe-se que um maior período de pausa apresenta melhores resultados, uma vez que permite tempo suficiente para a limpeza dos poros no meio filtrante e desenvolvimento do biofilme antes da próxima recarga, aumentando o potencial de remoção de matéria orgânica do filtro, como já observado em experimentos anteriores (Jenkins *et. al.*, 2011). O intervalo de alimentação de 14h ao decorrer da operação apresentou valores de turbidez menores em relação ao intervalo de alimentação de 5h, atingindo valores inferiores a 3 NTU ao final do período de operação. A análise estatística demonstrou que os resultados dos diferentes períodos de pausa foram significantes, comprovando a influência do maior período de pausa sobre os resultados obtidos.

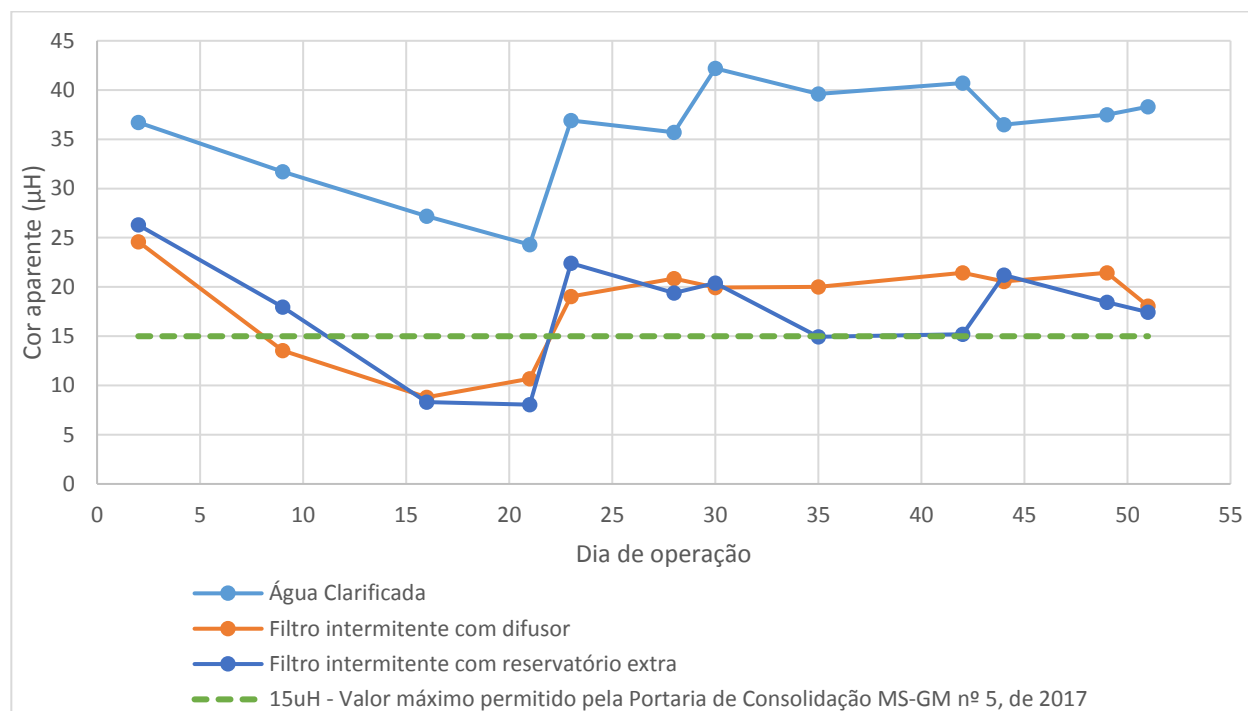
Por outro lado, comparando-se o desempenho de ambos filtros em cada período de pausa, o desempenho se mostrou parecido, havendo pouca variação na eficiência de remoção, que foi de fato estatisticamente insignificante. Para o intervalo de alimentação de 14h, o filtro intermitente com difusor obteve uma eficiência média de  $57,9\% \pm 16,2\%$ , enquanto o filtro intermitente com reservatório extra e boia atingiu uma eficiência média de  $56,1\% \pm 18,0\%$ . A água filtrada do intervalo de alimentação de 5h apresentou turbidez maiores, e eficiências médias de  $43,6\% \pm 16,5\%$  para o filtro intermitente com difusor e  $45,7\% \pm 16,6\%$  para o filtro intermitente com reservatório extra e boia.

Além disso é possível notar que, de modo geral ao final do período de operação observado, percebe-se que os dias que tiveram um aumento na eficiência de remoção de *E. coli* e coliformes totais, também apresentaram uma diminuição nos valores de turbidez da água filtrada. Como a água é proveniente de um rio, as bactérias estão comumente associadas aos sólidos suspensos na água, e dessa maneira é esperado que uma maior remoção de turbidez influencie a remoção bacteriológica (Jenkins *et. al.*, 2011).

### 5.6.3. Cor Aparente

A variação temporal de cor aparente nas amostras compostas é apresentada na Figura 33.

Figura 33. Variação de cor aparente ao longo da operação para as amostras compostas.



Em relação à Portaria MS 2914/2011 (BRASIL, 2017) e às diretrizes da OMS (WHO, 2017a), o valor máximo permitido de cor aparente é de 15µH. Analisando os resultados, nota-se que aproximadamente 27% das amostras de cor aparente estão em acordo com os padrões de potabilidade. O FLD intermitente com difusor obteve o melhor desempenho, com 42% das amostras atendendo o padrão máximo de 15µH. É possível notar que medidas de cor aparente apresentaram grande variação ao longo da operação, em função da variação de cor aparente apresentada pela água clarificada utilizada para alimentar os filtros. Consequentemente, a maturação do filtro aparenta não ter contribuído para melhorar a eficiência de remoção de cor aparente. No entanto, os filtros lentos domiciliares em geral não apresentam uma boa eficiência de remoção de cor (CAWST, 2007).

Os resultados para a variação das medidas de cor aparente das amostras pontuais são apresentados na Figura 34 para o intervalo de alimentação de 5h e na Figura 35 para o intervalo de alimentação de 14h.

Figura 34. Variação dos valores de cor aparente com o decorrer da operação dos filtros para o intervalo de alimentação de 5h.

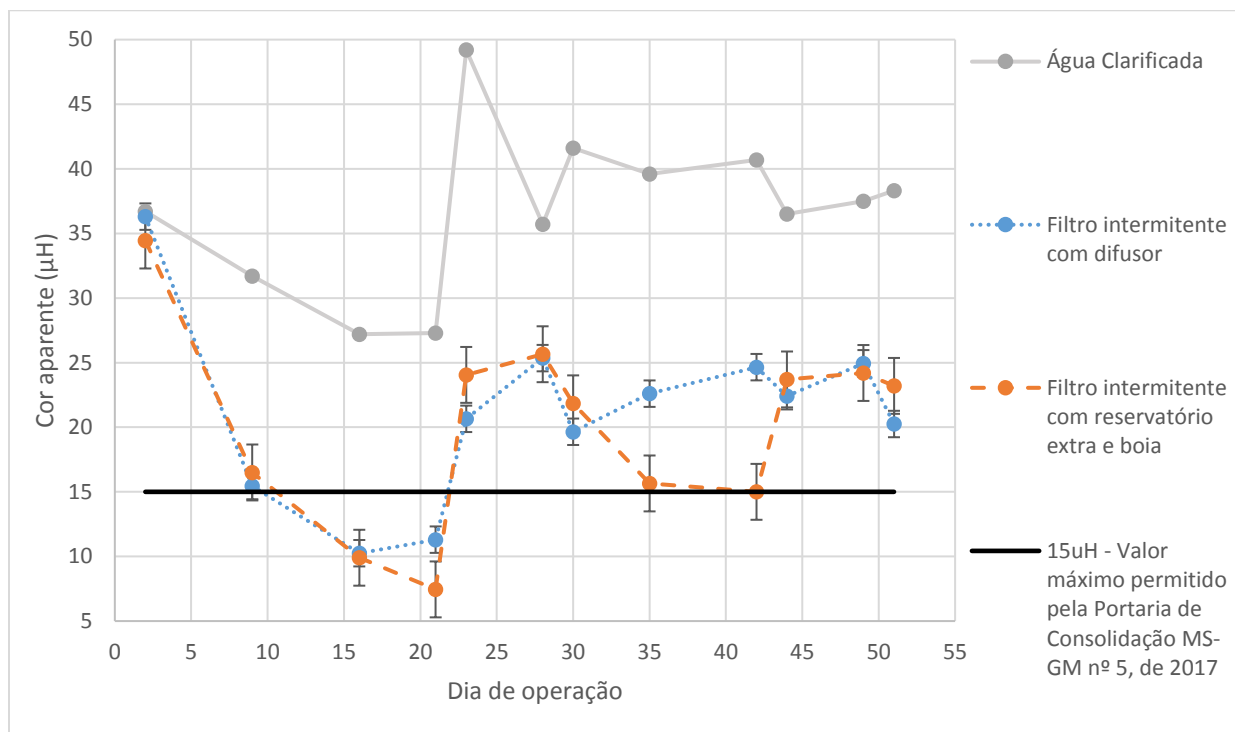
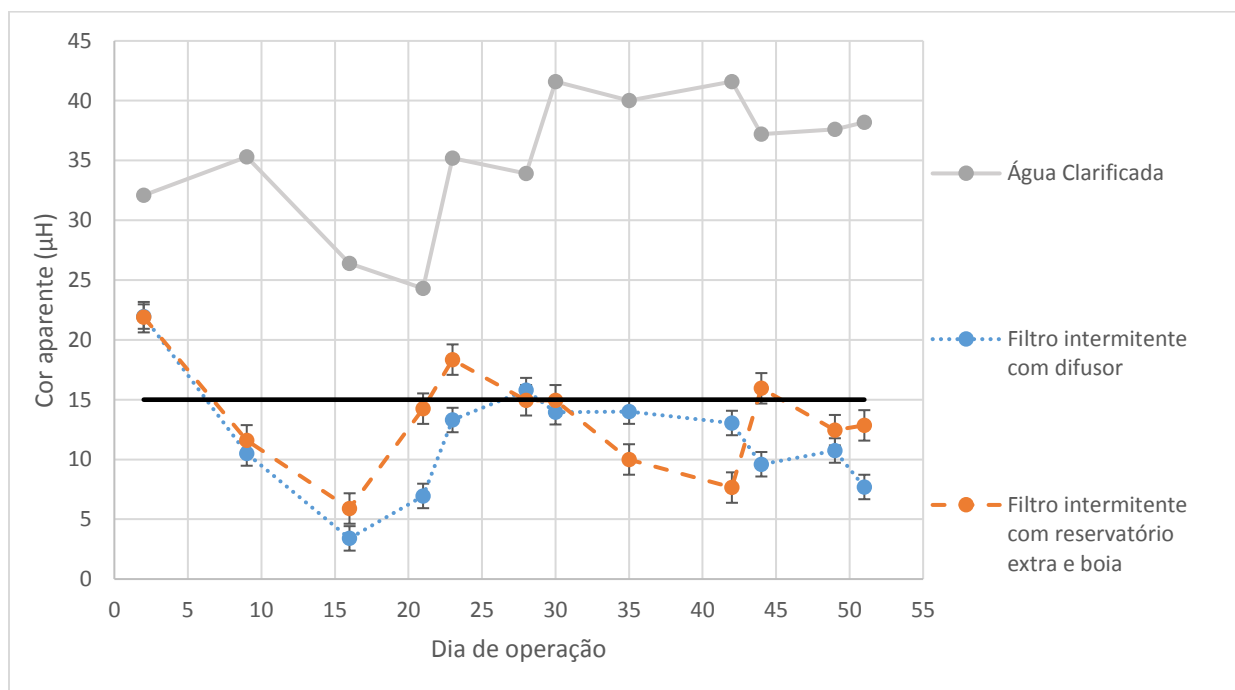


Figura 35. Variação dos valores de cor aparente com o decorrer da operação dos filtros para o intervalo de alimentação de 14h.





Analisando os resultados obtidos, é possível notar que o intervalo de alimentação de 14h obteve melhores medições de cor aparente da água filtrada em comparação ao intervalo de alimentação de 5h, que foram estatisticamente significantes, de modo similar aos resultados de turbidez. Para o intervalo de alimentação de 14h, 75% das amostras atenderam o limite máximo de  $15\mu\text{H}$ , enquanto para o intervalo de alimentação de 5h foram 17% das amostras. Dessa maneira, os filtros atingiram eficiências de remoção com grandes diferenças em função do intervalo de alimentação e período de pausa. O filtro intermitente com difusor atingiu uma eficiência média de  $43,2\% \pm 19,2\%$  para o intervalo de alimentação de 5h e  $66,8\% \pm 17,7\%$  para o intervalo de alimentação de 14h. Já o filtro intermitente com reservatório extra e boia atingiu uma eficiência média de  $45,9\% \pm 19,6\%$  para o intervalo de alimentação de 5h, e  $61,0\% \pm 17,5\%$  para o intervalo de alimentação de 14h. Assim, os dois modelos de filtros atingiram eficiências similares para remoção de cor aparente, e dentro do esperado para um FLD, que possui uma remoção de cor abaixo de 75% (Muhammad *et al.*, 1996).

## 6. CONCLUSÕES

As areias e pedregulhos comuns adquiridos para a composição do filtro demonstraram adequar-se de modo satisfatório às recomendações do CAWST para o meio filtrante. Além disso, a construção da estrutura dos filtros foi considerada fácil, acessível e rápida, exigindo apenas conhecimento de manuseio de equipamentos como furadeira e serra. Apesar do custo elevado em comparação com FLDs de concreto, os materiais foram facilmente encontrados e sua manipulação considerada fácil, tornando a estrutura do filtro até dez vezes mais leve em comparação a outros filtros e, conseqüentemente, facilitando a manipulação e transporte do filtro. Dessa maneira, comprovou-se a facilidade da construção de um filtro lento domiciliar de PVC e sua acessibilidade em termos de materiais e conhecimento prévio necessário.

Em relação à eficiência de remoção de microrganismos, ambos os filtros analisados obtiveram eficiências satisfatórias, porém não atenderam os parâmetros de potabilidade exigidos. Além disso, após pouco tempo o filtro demonstrou o início do desenvolvimento da camada biológica, obtendo resultados relativamente constantes ao longo da operação. O filtro intermitente com reservatório extra e boia apresentou resultados melhores em relação ao filtro com difusor, porém estes não foram significantes estatisticamente.

Para a turbidez, obtiveram água filtrada com características similares. A eficiência de remoção foi abaixo do esperado para filtros lentos domiciliares e os padrões de potabilidade da Portaria de Consolidação MS-GM nº 5, de 2017 não foram atingidos. Por outro lado, a variação de turbidez afluente ao filtro não desestabilizou o processo de filtração, e os padrões exigidos pela WHO foram atendidos.

Em relação à remoção de cor, o desempenho do filtro foi afetado pela variação da cor aparente da água afluente ao filtro. Os padrões de portabilidade da Portaria de Consolidação MS-GM nº 5 de 2017 não foram atingidos, e os padrões da WHO foram atendidos somente em alguns momentos ao decorrer da operação dos filtros.

De modo geral, a água filtrada proveniente de um maior período de pausa possuiu melhor qualidade. É importante ressaltar o desempenho do filtro intermitente com difusor em comparação ao filtro intermitente com reservatório extra e boia foi similar ao decorrer da operação sem diferenças significativas, porém o filtro intermitente com reservatório extra e boia apresentou ao decorrer da operação, melhor qualidade da água filtrada em relação à turbidez e microrganismos, apesar deste não possuir o difusor recomendado pelo CAWST. Além disso, a

retirada temporária da manta de feltro foi realizada em quase todos os dias de operação, porém esse fato não afetou a operação dos filtros.

É importante ressaltar que o experimento foi conduzido no começo da operação do filtro, o qual de forma geral é o período no qual o filtro apresenta resultados inferiores, uma vez que ainda não atingiu completamente a maturação após os primeiros 30 dias. Dessa maneira, é necessária a realização do experimento durante um maior período de operação, a fim de obter os resultados com o potencial máximo de desempenho e eficiência do filtro.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEITUNO, A.; DIGIANO, F.; ELLIOT, M.; SOBSEY, M.; STAUBER, C. Investigation of E. coli and Virus Reductions Using Replicate, Bench-Scale Biosand Filter Columns and Two Filter Media. *Int J Environ Res Public Health*. 2015 Sep; 12(9): 10276–10299. Disponível em: < <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4586611/> >. Acesso em 02 de Abril de 2018.

American Public Health Association (APHA). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 22 nd edition (2012) pp.9-52.

BAKER, D. PVC Biosand Filters. Water Expertise and Training Network Learning Exchange – CAWST. Junho, 2015. Disponível em: < <https://www.biosandfilters.info/document/72886928/pvc-biosand-filters-wetnet-presentation> >. Acesso em Acesso em 11 de Janeiro de 2018.

BRANDÃO, C. C. S.; WIECHETECK, G. K; MELLO, O. M. T.; et al. O uso da filtração em múltiplas etapas no tratamento de águas com elevado teor de algas. Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS), 1998, Lima, Peru.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 28 set. 2017. Anexo XX.

C. E. STAUBER; E. R. PRINTY; F. A. MCCARTY; K. R. LIANG; M. D. SOBSEY. Cluster Randomized Controlled Trial of the Plastic BioSand Water Filter in Cambodia. *Environmental Science & Technology* 2012, v. 46, p. 722-728.

Campos, L. C., Su, M. F. J., Graham, N. J. D. & Smith, S. R. 2002 Biomass development in slow sand filters. *Water Res.* 36, 4543–4551.

CAWST. Biosand Filter Construction Manual. 2009.

CAWST. Biosand Filter Construction Manual. 2007.

CAWST. Biosand Filter Construction Manual. 2012.

CENTER FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION. Household Water Treatment Options in Developing Countries: BioSand Filtration. Junho, 2008. Disponível em: <<https://pclive.peacecorps.gov/pclive/index.php/pclive-resources/resource-library/464-wash-tp-handout2-water-treatment-and-storage/file>> . Acesso em 10 de Janeiro de 2018.

CYBIS, L. F. et al. PROSAB 2 - Manual para estudo de cianobactérias planctônicas em mananciais de abastecimento público: caso da represa Lomba de Sabão e lago Guaíba, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 64p. 1 il.

DANGOL, B. and SPUHLER, D. (2010) Biosand Filter. Sustainable Sanitation and Water Management. [online] <http://www.sswm.info/content/biosand-filter>. Acesso em 25 de Julho de 2018.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L.P. Seleção de tecnologias de tratamento de água. v. 1 e 2. São Carlos: LDiBe. 1560 p. 2008.

DI BERNARDO, L.; VERAS, L. R. V. Tratamento de água de abastecimento por meio da tecnologia de filtração em múltiplas etapas – FiME. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro , v. 13, n. 1, p. 109-116, Março de 2008.

ENGELHARDT, T. Granular Media Filtration for Water Treatment Applications. Hach Company. 2012.

FUNASA, Panorama do Saneamento Rural no Brasil. 2016. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br/site/engenharia-de-saude-publica-2/saneamento-rural/panorama-do-saneamento-rural-no-brasil/>>. Acessado em 04 de Janeiro de 2018.

Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia Electronica 4(1): 9pp. [http://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm)

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua. 2016. Disponível em: <[https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa\\_resultados.php?id\\_pesquisa=149](https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=149)>. Acessado em 04 de Janeiro de 2018.

ITACANET. An introduction to slow sand filtration. 2015.

JADHAV, D.; HUSAIN, M; CHAVAN, F. I. Biosand Water Filter: A Boon International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). v. 02, n. 03. Junho de 2015.

JELLISON, K.; NAPOTNIK, J. Investigation on the effects of design and operational variables on the efficacy of biosand filters. 2014. Thesis and Dissertations. Lehigh University. Disponível em: <<https://preserve.lehigh.edu/etd/1570>>.

JENKINS, M. W.; TIWARI, S. K.; DARBY, J. Bacterial, viral and turbidity removal by intermittent slowsand filtration for household use in developing countries: Experimental investigation and modeling. Water Research, v. 45, p. 6227-6239, 2011.

KLOPFENSTEN, L.; PETRASKY, L.; WINTON, V.; BROWN, J. Addressing Water Quality Issues in Rural Cameroon with Household Biosand Filters. International Journal for Service Learning in Engineering, v. 6(1), 2011. Disponível em: <<http://commons.erau.edu/publication/>> . Acesso em 11 de Janeiro de 2018.

MANZ, D. H. BioSand Water Filter Technology Household Concrete Design. Abril, 2007. Disponível em: <<http://www.manzwaterinfo.ca/bsf/documents/BioSand%20Water%20Filter%20-%20Development%20and%20Design%20April%2030,%202007.pdf>>. Acesso em 11 de Janeiro de 2018.

MANZ, D. H. New Horizons for Slow Sand Filtration. Eleventh Canadian National Conference and Second Policy Forum on Drinking Water and the Biennial Conference of the Federal-Provincial-Territorial Committee on Drinking Water, Promoting Public Health Through Safe Drinking Water. Abril, 2004, Calgary, Alberta. pp 682 – 692.

OHorizons. Construction Manual. March, 2018. Disponível em: <[https://static1.squarespace.com/static/546b7f35e4b0af39afb05327/t/563a824ee4b019aecb259741/1446675022527/ohorizons BioSand Filter Introduction.pdf](https://static1.squarespace.com/static/546b7f35e4b0af39afb05327/t/563a824ee4b019aecb259741/1446675022527/ohorizons+BioSand+Filter+Introduction.pdf)>. Acesso em 10 de Abril de 2018.

SÁ, J.C. Influências das características da camada filtrante e da taxa de filtração na eficiência de remoção de *Microcystis aeruginosa* e microcistina na filtração lenta em areia. 2006. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília – Brasília/DF.

SISSON, A. J.; WAMPLER, P. J.; REDISKE, R. R.; MCNAIR, J. N.; FROBISH, D. J. Long-Term Field Performance of Biosand Filters in the Artibonite Valley, Haiti. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, v. 88(5), p. 862–867. Maio, 2013. Disponível em:< <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3752749/>>. Acesso em 11 de Janeiro de 2018.

SOBSEY, M. D. et al. Reductions of *E. coli*, echovirus type 12 and bacteriophages in an intermittently operated household-scale slow sand filter. *Environmental Science & Technology*, v. 42, p. 2662– 2670, jan. 2008.

SOUZA, F. H. Tratamento de água para abastecimento por meio de filtros lentos de fluxo ascendente com limpeza por retrolavagem e descarga de fundo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

STAUBER, C. E.; ORTIZ G. M.; LOOMIS D. P.; SOBSEY M. D. A Randomized Controlled Trial of the Concrete Biosand Filter and Its Impact on Diarrheal Disease in Bona, Dominican Republic. *The American Society of Tropical Medicine and Hygiene*, v. 80(2), p. 286–293. 2009.

WANG, H.; NARIHIRO, T.; STRAUB, A.; PUGH, C. R.; TAMAKI, H.; MOOR, J. F.; BRADLEY, I. M.; KAMAGATA, Y.; LIU, W.; NGUYEN, T. H. MS2 Bacteriophage Reduction and Microbial Communities in Biosand Filters. *Environmental Science & Technology*, 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO. Guidelines for drinking water quality:fourth edition incorporating the first addendum. Genebra. 2017a. Disponível em:< <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254637/9789241549950-eng.pdf;jsessionid=9004A39F239B791EF2B8884197803128?sequence=1>>. Acesso em 10 de Julho de 2018.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO. WATER QUALITY AND HEALTH - REVIEW OF TURBIDITY: Information for regulators and water suppliers. Technical Brief. Geneva. 2017b. Disponível em:<  
<http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254631/WHO-FWC-WSH-17.01-eng.pdf?sequence=1>>. Acesso em 10 de Julho de 2018.

YOUNG-ROJANSCHI, C. & MADRAMOOTOO, C. Intermittent versus Continuous Operation of Biosand Filters. Water Research. p.1-10. 2014.