



UNIVERSIDADE DE RIBEIRÃO PRETO

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS NATURAIS E TECNOLOGIAS

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA
DESCENDENTE PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO A PARTIR
DE EFLUENTE DE ESGOTO SANITÁRIO

MARÍLIA VASCONCELLOS AGNESINI

RIBEIRÃO PRETO

2020

MARÍLIA VASCONCELLOS AGNESINI

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA
DESCENDENTE PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO A PARTIR
DE EFLUENTE DE ESGOTO SANITÁRIO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutora em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini

RIBEIRÃO PRETO

2020

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Processamento
Técnico da Biblioteca Central da UNAERP
- Universidade de Ribeirão Preto -

Agnesini, Marília Vasconcellos , 1989-
A272a Avaliação de um sistema piloto de filtração direta descendente
para produção de água de reúso a partir de efluente de esgoto
sanitário / Marília Vasconcellos Agnesini. - - Ribeirão Preto, 2020.
168 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini.

Tese (doutorado) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP,
Tecnologia ambiental. Ribeirão Preto, 2020.

1. Água de reúso. 2. Filtração direta descendente.
3. Tratamento terciário. 4. Aumento de escala. Água residuária.
I. Título.

CDD 628

MARILIA VASCONCELLOS AGNESINI

**“AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA
DESCENDENTE PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO A PARTIR DE
EFLUENTE DE ESGOTO SANITÁRIO”**

Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora pelo programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini

Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Data de defesa: 06 de novembro de 2020

Resultado: APROVADA

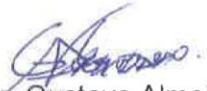
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini
Presidente/UNAERP


Prof. Dr. Marcelo Zalut
EESC/USP


Prof. Dr. Luciano Farias de Novaes
UNAERP


Prof. Dr. Olimpio Gomes da Silva Neto
IFSULDEMINAS


Prof. Dr. Gustavo Almeida Frata
UNAERP

**RIBEIRÃO PRETO
2020**

Dedico este trabalho e todas as conquistas da minha vida, à minha família, meu porto seguro. Dedico, também, a todos que acreditaram no meu potencial e que, hoje, presenciam minha grande vitória!

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sabedoria e oportunidade a mim concedidas para o desenvolvimento deste trabalho, e especialmente nesse ano difícil, agradeço pela minha saúde e o convívio com as pessoas que amo para viver essa conquista.

Ao meu orientador Murilo Daniel de Mello Innocentini, pelos ensinamentos, conselhos e orientações, que foram fundamentais durante a elaboração desta pesquisa.

Aos meus pais, irmãos, sobrinhos e a todos meus familiares, que estiveram sempre ao meu lado, apoiando-me e dando-me suporte nos momentos mais difíceis.

Ao Rodrigo, meu companheiro da vida, porto seguro nesta etapa, ouvindo-me, aconselhando-me e acalmando-me no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu doutorando Fernando Afonso Marrengula, amigo e parceiro, pelas horas dispendidas na estação na coleta de dados na estação de tratamento de esgoto durante a pesquisa de campo e toda amizade e apoio durante o desenvolvimento do projeto.

À professora e amiga Cristina Filomena Pereira Rosa Paschoalato, que idealizou o início do projeto e confiou em mim para desenvolvê-lo.

Ao professor Reinaldo Pisani Junior, que junto à professora Cristina, deu início ao projeto.

Às estagiárias do laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, Júnia Babone Saraiva e Thais Prado, que auxiliaram nas análises de laboratório.

À Ambient, que cedeu espaço na estação de tratamento de esgoto Caiçara, responsável por todo o trabalho de campo desenvolvido, e a todos os funcionários da Caiçara.

À UNAERP, pelo incentivo à pesquisa, sem o qual não teria sido possível a realização do trabalho.

À coordenadora Luciana Rezende Alves de Oliveira pelo apoio e suporte sempre.

À professora Maristela Silva Martinez pelas contribuições durante o exame de qualificação, fundamentais para a conclusão do trabalho.

Ao professor Luciano Farias de Novaes pelas contribuições e colaboração dadas no exame de qualificação e na defesa final.

Aos demais membros da banca de defesa, Olímpio Gomes da Silva Neto, Marcelo Zaiat e Gustavo Almeida Frata que deram contribuições fundamentais para o trabalho.

À minha colega de doutorado e amiga, Isadora Alves Lovo Ismail pelo apoio e principalmente, pelo ombro amigo.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado, entenderam por vezes minha ausência e comemoram comigo minha conquista.

Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.

O saber se aprende com mestres e livros.

A Sabedoria, com o corriqueiro, com a vida e com os humildes.

O que importa na vida não é o ponto de partida, mas a caminhada.

Caminhando e semeando, sempre se terá o que colher.

Cora Coralina

RESUMO

Frente aos problemas relacionados à quantidade e à qualidade da água, ganha relevância o estudo do reúso de água como alternativa no gerenciamento hídrico. Este trabalho propõe o uso da tecnologia de filtração direta descendente aplicada em esgoto tratado, efluente de estação de tratamento de esgoto, após tratamento secundário em reator biológico aerado. A tecnologia selecionada requer efluentes com baixos valores de turbidez e cor, pois envolve apenas processos de coagulação e filtração. Os efluentes de estações de tratamento de esgoto, geralmente, apresentam tais características, pois já foram tratados por processos físicos e biológicos. Assim, o objetivo deste trabalho foi a utilização da tecnologia para a produção de água de reúso, a partir da instalação de uma unidade piloto nas dependências de uma estação de tratamento de esgoto. O trabalho experimental consistiu inicialmente na montagem da unidade piloto, caracterização do efluente da estação e a coleta de dados operacionais da estação de tratamento de esgoto para a definição dos ensaios. Determinou-se a dosagem de coagulante em ensaios de bancada e foram selecionados os meios granulares da filtração. Após a instalação e calibração da unidade piloto, foram realizados ensaios em três taxas de filtração (120, 360 e 500 m³/m².dia) e dois meios granulares com grãos médios de 0,93 mm e 1,09 mm. Com os tempos de duração de carreira e os dados sobre o volume de água de lavagem utilizado em cada condição experimental, foram obtidas as produções efetivas de água e a eficiência na produção de água, cuja taxa que apresentou melhor resultado foi caracterizada a água de reúso produzida. Os resultados obtidos mostraram que a taxa de filtração menor gerou as maiores carreiras e as menores perda de carga. Em relação ao meio granular, o leito composto de grãos menores apresentou maior retenção de partículas, com carreiras de filtração mais longas e maior perda de carga. A maior produção efetiva de água foi observada na taxa de 360 m³/m².dia, no meio composto com os grãos médios de 0,93 mm. Na mesma condição experimental, também foram verificados os melhores resultados na remoção dos parâmetros analisados, 80%, em média, de turbidez, de 42 e 53% de cor aparente, superiores a 80% de *Escherichia coli*, entre 16 e 25% de carbono orgânico total e acima de 72% de sólidos suspensos. Os resultados desses parâmetros confirmam a possibilidade da aplicação da tecnologia para a produção de água de reúso para fins não potáveis. Com a seleção da condição otimizada, foi realizado um pré-dimensionamento de um sistema para tratamento de 10000 m³/dia de efluente, com área de filtração de 27,8 m², composto por 6 filtros, com cerca de 5 lavagens diárias. A partir dos ensaios na unidade piloto, concluiu-se a possibilidade do uso da filtração direta descendente para produção de água de reúso e com os dados obtidos foi possível o aumento de escala, com viabilidade técnica.

Palavras-chave: Água de reúso. Filtração direta descendente. Tratamento terciário. Aumento de escala. Água residuária.

ABSTRACT

In view of the problems related to the quantity and quality of water, the study of water reuse as an alternative in water management becomes relevant. This work proposes the use of direct downward filtration technology applied in treated sewage, from the treatment plant effluent, after secondary treatment in an aerated biological reactor. The selected technology requires effluents with low values of turbidity and color, as it involves only coagulation and filtration processes. The effluents from sewage treatment plants generally have such characteristics, as they have already been treated by physical and biological processes. Thus, the objective of this work was the use of technology for the production of reused water, from the installation of a pilot unit on the premises of a sewage treatment plant. The experimental work initially consisted of assembling the pilot unit, characterizing the effluent from the station and collecting operational data from the sewage treatment plant to define the tests. Coagulant dosage was determined in bench tests and granular filtration media were selected. After the installation and calibration of the pilot unit, tests were carried out at three filtration rates (120, 360 and 500 m³ / m².day) and two granular media with average grains of 0.93 mm and 1.09 mm. With the duration of the career and the data on the volume of washing water used in each experimental condition, effective water production and water production efficiency were obtained, the rate of which showed the best result was the reuse water produced. The results obtained showed that the lower filtration rate generated the largest careers and the lowest pressure losses. In relation to the granular medium, the bed composed of smaller grains showed greater particle retention, with longer filtration races and greater pressure loss. The highest effective water production was observed at a rate of 360 m³ / m².day, in the composite medium with the average grains of 0.93 mm. In the same experimental condition, the best results were also found in removing the analyzed parameters, 80%, on average, turbidity, 42 and 53% apparent color, greater than 80% *Escherichia coli*, between 16 and 25% carbon total organic and above 72% suspended solids. The results of these parameters confirm the possibility of applying the technology to produce reused water for non-potable purposes. With the selection of the optimized condition, a pre-dimensioning of a system for treating 10,000 m³ / day of effluent was performed, with a filtration area of 27.8 m², consisting of 6 filters, with about 5 daily washes. From the tests at the pilot unit, the possibility of using direct descending filtration for the production of reused water was concluded and with the data obtained it was possible to increase the scale, with technical feasibility.

Keywords: Reuse water. Direct downward filtration. Tertiary treatment. Scale up. Wastewater

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagnóstico da população brasileira urbana atendida com sistema coletivo de tratamento de esgotos.....	30
Figura 2 – Diferença percentuais das vazões hídricas médias ocorridas em 2018 em relação à vazão média do histórico até 2017 nas regiões brasileiras	31
Figura 3 – Fluxograma das etapas do tratamento convencional de esgoto	34
Figura 4 – Fluxogramas esquemáticos dos sistemas de filtração direta	48
Figura 5 – Perfil de turbidez da água na saída da retrolavagem	58
Figura 6 – Fluxograma das etapas experimentais do trabalho.....	61
Figura 7 – Vista aérea da ETE Caiçara, em Ribeirão Preto	63
Figura 8 – Ponto de coleta para caracterização dos ensaios e captação do efluente da ETE para realização dos ensaios.....	65
Figura 9 – Data das coletas de efluente secundário da ETE Caiçara para caracterização, nos anos de 2018 e 2019.....	66
Figura 10 – Equipamento utilizado nos ensaios em bancada: jarteste e filtros de areia de laboratório	67
Figura 11 – Série de peneiras utilizadas para separação granulométrica dos meios granulares	70
Figura 12 – Montagem do filtro de areia com meio suporte composto por brita e leito de areia	72
Figura 13 – Esquema da unidade piloto de filtração direta descendente para produção de reúso de água não potável	74
Figura 14 – Imagem da unidade piloto de filtração direta descendente na Estação de Tratamento de Esgoto Caiçara.....	75
Figura 15 – Esquema da coluna de filtração e da determinação da variação de líquido durante a operação da unidade piloto.....	78
Figura 16 – Lavagem do filtro e expansão do leito durante a lavagem	83
Figura 17 – Diagrama de coagulação para turbidez remanescente obtido nos ensaios em bancada, após a filtração em filtros de areia de laboratório	93
Figura 18 – Diagrama de coagulação para cor remanescente obtido nos ensaios em bancada, após a filtração em filtros de areia de laboratório	93

Figura 19 – Curvas granulométricas dos meios granulares 1 e 2	95
Figura 20 – Influência da queda de pressão em função da velocidade de escoamento no meio granular e comparação com os valores teóricos.....	97
Figura 21 – Expansão do leito de filtração em função da velocidade ascensional da água durante a retrolavagem	99
Figura 22 – Aumento da porosidade do leito em função da velocidade ascensional da água durante a retrolavagem	99
Figura 23 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração nos ensaios 1 a 4, referente à taxa de 120 m ³ /m ² .dia, meio granular 1	102
Figura 24 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração nos ensaios 5 a 8, referente à taxa de 360 m ³ /m ² .dia, meio granular 1	105
Figura 25 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração nos ensaios 9 a 12, referente à taxa de 500 m ³ /m ² .dia, meio granular 1 ...	107
Figura 26 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração dos ensaio 13 a 16, na taxa de 120 m ³ /m ² .dia, meio granular 2	109
Figura 27 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração dos ensaio 17 a 20, na taxa de 360 m ³ /m ² .dia, meio granular 2	111
Figura 28 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração dos ensaio 21 a 24, na taxa de 500 m ³ /m ² .dia, meio granular 2	112
Figura 29 – Volume de água utilizado na lavagem durante a fluidização do leito nas taxas nos dois meios granulares avaliados	114
Figura 30 – Produção efetiva de água de reúso calculada para os ensaios de coagulação seguida de filtração direta descendente na unidade piloto	116
Figura 31 – Eficiência de produção de água durante a filtração, na condições experimentais investigadas	116
Figura 32 – Remoção de turbidez da água filtrada após filtração direta descendente, nos meios granulares 1 e 2	119
Figura 33 - Remoção de cor aparente da água filtrada após filtração direta descendente, nos meios granulares 1 e 2.....	120
Figura 34 - Remoção de <i>Escherichia coli</i> da água filtrada após filtração direta descendente, nos meios granulares 1 e 2.....	121
Figura 35 – Remoção de carbono orgânico total da água filtrada após filtração direta descendente, nos meios granulares 1 e 2.....	122

Figura 36 – Remoção de sólidos totais, suspensos e dissolvidos da água filtrada após filtração direta descendente, nos meios granulares 1 e 2123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais constituintes no tratamento de esgoto e sua importância	36
Tabela 2 – Classes de reúso, parâmetros recomendados e níveis de tratamento recomendado, segundo NBR 13969	41
Tabela 3 – Qualidade da água de reúso e tipos de tratamento sugeridos para cada categoria de reúso direto, segundo USEPA (2012).....	42
Tabela 4 – Padrões de qualidade definidos para as categorias da água de reúso, segundo resolução conjunta SES/SIMA número 1 de 2020 do estado de São Paulo	43
Tabela 5 – Características gerais da água bruta a ser tratada pela tecnologia da filtração direta descendente	50
Tabela 6 – Principais características do meio filtrante em filtração direta descendente	54
Tabela 7 – Parâmetros, metodologias, equipamentos e limite de detecção dos métodos (LDM).....	64
Tabela 8 – Condições experimentais dos ensaios em jarreste e parâmetros de controle	69
Tabela 9 – Descrição dos ensaios realizados na unidade piloto de filtração direta descendente.....	80
Tabela 10 – Descrição do monitoramento do sistema piloto de filtração direta descendente.....	81
Tabela 11 - Resultados do monitoramento do efluente da ETE Caiçara expressos em valores médios e desvio padrão.....	91
Tabela 12 – Características dos meios granulares 1 e 2	94
Tabela 13 – Vazões calculadas para a realização dos ensaios na unidade piloto de filtração direta descendente	96
Tabela 14 – Resultados dos ensaios preliminares de queda de pressão teórica e experimental em função da vazão de filtração e erro experimental	98
Tabela 15 – Duração da carreira de filtração e as condições de lavagem do leito nos ensaios realizados na unidade piloto	103

Tabela 16 – Caracterização da água filtrada, após coagulação química e filtração direta descendente, na taxa de 360m ³ /m ² .dia e no meio granular 1	124
Tabela 17 – Resumo das condições operacionais do ensaio que apresentou melhor desempenho nos ensaios da unidade piloto	126
Tabela 18 – Projeção do sistema de filtração em escala real para a produção de água de reúso na ETE Caiçara	127

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABC	Região Metropolitana de São Paulo: Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano
ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWWA	American Water Works Association
ANA	Agência Nacional de Águas
CAB	Carvão ativado biológico
CAG	Carvão ativado granular
CBHPARDO	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CO	Coagulação
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono orgânico total
DAERP	Departamento de Água e Esgoto de Ribeirão Preto
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DF	Dupla filtração
DQO	Demanda química de oxigênio
EPAR	Estação produtora de água de reúso
ETA	Estação de tratamento de água
ETAR	Estação de tratamento de água de reúso
ETE	Estação de tratamento de esgoto
EUA	Estados Unidos da América
FDA	Filtração direta ascendente
FDD	Filtração direta descendente

LDM	Limite de detecção dos métodos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Registrada
OMS	Organização Mundial da Saúde
OD	Oxigênio dissolvido
ONU	Organização das Nações Unidas
OR	Osmose reversa
PAC	Policloreto de alumínio
PURAE	Programa de Conservação e Uso Racional da Água nas Edificações
POA	Processos oxidativos avançados
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
RAS	Razão de Adsorção de Sódio
SANASA	Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento
SES	Secretaria de Estado da Saúde
SMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SSRH	Secretaria de Estado de Saneamento e Recursos Hídricos
SST	Sólidos suspensos totais
UNAERP	Universidade de Ribeirão Preto
UNESCO	Programa Hidrológico Internacional da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UV	Radiação Ultravioleta
WHO	World Health Organization

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
A_{filtro}	Área de um filtro em escala real
$A_{\text{filtração}}$	Área de filtração necessária em escala real
C	Carbono
C_{filtro}	Comprimento do filtro em escala real
Cl_2	Gás cloro
cm	Centímetro
cm^2	Centímetros quadrados
C_{PAC}	Concentração do PAC
$C_{\text{PAC reservatório}}$	Concentração do PAC no reservatório
ΔH	Variação do nível de água na coluna
$\Delta P/L$	Queda de pressão em função do comprimento do leito
ΔP	Queda de pressão
ΔP_0	Queda de pressão inicial
ΔP_{mf}	Perda de carga na condição de mínima fluidização
D_{10}	Diâmetro efetivo, em que 10% das partículas são retidas
D_{60}	Diâmetro corresponde a 60% das partículas retidas
D_{pi}	Diâmetro médio das partículas
D_{vs}	Diâmetro médio de Sauter
dS/m	DeciSiemens por metro
E_{PE}	Eficiência de produção efetiva de água de reúso
ε	Porosidade do leito
ε_{ex}	Porosidade do leito na expansão
ε_{mf}	Porosidade do leito na condição de mínima fluidização
ε_0	Porosidade inicial do leito
g	Grama (unidade de medida de massa)

g/L	Gramas por litro
H_{inicial}	Nível inicial de água na coluna
H_{final}	Nível final de água na coluna
km ²	Quilômetro quadrado
km ³ /ano	Quilômetro cúbico por ano
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
L	Litro
L_{filtro}	Largura do filtro em escala real
$L \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$	Litro por habitante por dia
L/h	Litros por hora
L_{ex}	Altura do leito na expansão
L_{mf}	Altura do leito na condição de mínima fluidização
L_0	Altura do leito inicial
Log	Logarítimo
L/s	Litros por segundo
m	Metro
m ³	Metro cúbico
m ³ /m ² dia	Metros cúbicos por metro quadrado por dia
m_1	Parâmetros determinados experimentalmente
m_2	Parâmetros determinados experimentalmente
mg/L	Miligramas por litro
mg CaCO ₃ /L	Miligramas de carbonato de cálcio por litro
mg NH ₃ /L	Miligramas de amônia por litro
mg NO ₃ /L	Miligramas de nitrato por litro
mg O ₂ /L	Miligramas de gás oxigênio por litro
mm	Milímetros
NaOH	Hidróxido de sódio
N_{carreira}	Número de carreiras de filtração por dia

N_{filtros}	Número de filtros
NMP/100 mL	Número mais provável de organismos em 100 mililitros de amostra
O_2	Gás oxigênio
Ovo/L	Ovo por litro
pH	Potencial hidrogeniônico
Q_{ef}	Vazão volumétrica do efluente na piloto
$Q_{\text{ef real}}$	Vazão volumétrica do efluente da ETE
Q_{Lav}	Vazão volumétrica durante a lavagem dos filtros
Q_{PAC}	Vazão volumétrica do PAC
Q_{total}	Vazão volumétrica total
ρ	Densidade do fluido
ρ_{aparente}	Densidade aparente da areia
ρ_{absoluta}	Densidade real da areia
ρ_p	Densidade real da partícula
s^{-1}	Uma rotação por segundo
σ	Relação entre o volume de partículas e do meio filtrante
t_{carreira}	Tempo da carreira de filtração
t_{lav}	Tempo de duração da lavagem do filtro
TF	Taxa de filtração
UFC/100mL	Unidade formadora de colônia em 100 mililitros de amostra
uH	Unidade de cor
uT	Unidade de turbidez
μ	Viscosidade do fluido
μm	Micrômetro
v	Velocidade de escoamento
$V_{\text{gerado 24h}}$	Volume de água de reúso gerado em 24 h na escala real
$V_{\text{lavagem 24h}}$	Volume utilizado na lavagem em 24 h na escala real
$]V_{\text{Lav}}$	Volume utilizado na lavagem do leito

V_{PE}	Volume efetivo de água produzida
$W_{i \text{ acumulada}}$	Fração mássica de grãos acumulada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	26
2 OBJETIVOS.....	28
2.1 OBJETIVO GERAL	28
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
3 REVISÃO DA LITERATURA	29
3.1 DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO BRASIL.....	29
3.2 TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO	32
3.3.1 Processos de tratamento de esgoto	33
3.3.2 Parâmetros de qualidade do esgoto.....	34
3.3 REÚSO DE ÁGUA	36
3.3.1 Legislação de reúso	39
3.4 FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE	47
3.4.1 Coagulação e floculação na filtração direta descendente	50
3.4.2 Filtração rápida descendente	51
3.4.3 Lavagem dos filtros	57
3.4.4 Aplicação da filtração direta para produção de água de reúso.....	59
4 MATERIAL E MÉTODOS	61
4.1 INSTALAÇÃO DA UNIDADE PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE	62
4.1.1 Caracterização da estação de tratamento de esgoto em estudo	62
4.1.2 Monitoramento da qualidade do efluente da estação de tratamento de esgoto Caiçara.....	64
4.1.3 Ensaios em bancada para a definição da dosagem ótima de coagulante.....	67
4.1.4 Seleção e caracterização do meio filtrante.....	70
4.1.5 Montagem da unidade piloto de filtração direta descendente.....	72

4.1.6 Cálculo das vazões de alimentação da unidade piloto	76
4.1.7 Pré-operação da instalação piloto para verificação dos parâmetros hidráulicos do meio filtrante	77
4.2 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE NA INSTALAÇÃO PILOTO	79
4.2.1 Descrição dos ensaios de filtração direta descendente no sistema piloto	79
4.2.1.1 Parâmetros de controle dos ensaios	81
4.2.1.2 Parâmetros de encerramento da carreira de filtração	81
4.2.1.3 Avaliação geral dos ensaios de filtração direta descendente na unidade piloto	82
4.2.1.4 Lavagem do leito de filtração	83
4.2.1.5 Cálculo da produção efetiva de água de reúso	84
4.2.2 Caracterização da água de reúso	85
4.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO DIRETA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO EM ESCALA REAL	86
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
5.1 UNIDADE PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO	90
5.1.1 Monitoramento do efluente da ETE Caiçara	90
5.1.2 Obtenção dos dados de coagulação nos ensaios em bancada	92
5.1.3 Caracterização dos meios granulares	94
5.1.4 Vazões utilizadas nos ensaios de filtração direta descendente	96
5.1.4 Ensaios preliminares para verificação de parâmetros fluidodinâmicos do meio filtrante na retrolavagem	96
5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA UNIDADE PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE	100
5.2.1 Ensaios de filtração direta descendente na unidade piloto	101
5.2.2 Lavagem dos filtros	114

5.2.3 Produção efetiva de água de reúso.....	115
5.2.4 Caracterização da água de reúso após filtração direta descendente	118
5.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO EM ESCALA REAL	125
6 CONCLUSÕES	129
RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	132
REFERÊNCIAS.....	133
APÊNDICE A	139
APÊNDICE B	142
APÊNDICE C	148
APÊNDICE D	152
APÊNDICE E	164
APÊNDICE F.....	166
APÊNDICE G	168

1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional, com o consequente aumento da demanda por água tratada, a poluição dos corpos d'água e episódios de escassez de chuvas, estão reduzindo a quantidade de água nos reservatórios, a recarga de aquíferos e o nível dos rios, contribuindo para uma escassez hídrica. Dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) revelam que quase metade da população mundial não é beneficiada com o serviço de saneamento básico e que uma em cada seis pessoas não possui sistema de abastecimento de água adequado. Estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU), publicadas no 8º Fórum Mundial da Água, em 2018, mostram que, se a crise hídrica continuar, em 2050 mais de 45% da população mundial viverá com cota diária mínima de 50 litros de água por habitante.

Mesmo os países que possuem recursos hídricos em abundância, como o Brasil, não estão livres da ameaça de uma crise. Recentemente, em 2014, várias regiões brasileiras enfrentaram problemas de falta de água, devido à diminuição do nível dos reservatórios e à quantidade de água disponível para sua captação.

O município de Ribeirão Preto, sede do estudo, apresenta abastecimento 100% subterrâneo, utilizando-se do Aquífero Guarani. Existe uma intensa exploração dessa fonte, não acompanhada pela reposição natural de água subterrânea. Além disso, um grande volume diário efluentes são gerados. Políticas públicas estudam a viabilidade da implantação de uma estação de tratamento de água a partir de água superficial, visando o gerenciamento hídrico e a conservação do aquífero.

Diversos instrumentos de gestão de recursos hídricos vêm sendo implantados: Planos de Bacias Hidrográficas, outorgas para o uso de recursos hídricos, cobranças pelo uso da água, enquadramento em classes de água, entre outros.

No entanto, é necessário considerar recursos hídricos, que antes não eram convencionais, no planejamento do uso da água, como, por exemplo, a água de reúso. Estudos sobre a produção e reutilização de água ganham destaque e relevância frente ao gerenciamento hídrico. As ameaças de falta de água são iminentes e os efeitos na qualidade e na quantidade de água disponível, muitas vezes, inviabilizam o tratamento e distribuição de água potável.

Dentre as pesquisas realizadas que visam soluções hídricas, este trabalho trás o tratamento de efluente de esgoto sanitário doméstico, a nível terciário, com objetivo de produzir água de reúso. A prática de reúso apresenta vantagens: a diminuição da geração de efluente das estações de tratamento de esgoto que são despejados nos corpos d'água, um menor volume de captação de água para o abastecimento público, a possibilidade do surgimento de economia circular nas indústrias e estações de tratamento de água e esgoto.

A água de reúso provém do reaproveitamento da água por algum processo, sendo necessário estudo para a verificação da aplicação do tratamento adequado. Estudos apontam o uso crescente dessa prática para fins menos nobres, como por exemplo, irrigação de jardins, paisagismo e lavagem de pisos.

No Brasil, existem alguns entraves para a efetivação da prática do reúso. Entre eles, destaca-se a situação econômica brasileira, que torna inviável a utilização de tecnologias custosas para a produção de água de reúso, o que acaba sendo vantajoso o uso de água de abastecimento. Outros fatores também podem ser citados, como a ausência de uma normatização que regule a prática de reúso, a falta de aceitação pela sociedade e dos incentivos governamentais. A produção de água de reúso, no país, muitas vezes ocorre de acordo com a finalidade e as necessidades locais.

Apesar de ser aplicada em água de abastecimento, a tecnologia de filtração direta, que consiste no processo de coagulação química seguida da filtração rápida em meio granular, merece destaque no reúso, pois é uma técnica relativamente simples e barata. Para a sua aplicação é necessário que a água bruta apresente baixos valores de turbidez e cor para ser eficiente. Dessa forma, o efluente da estação de tratamento de esgoto, que já foi tratado com processos físicos, químicos e biológicos, apresenta, por muitas vezes, características viáveis para a aplicação da tecnologia de filtração direta.

Dentro desse contexto, este trabalho teve a finalidade de estudar a tecnologia de filtração direta descendente para a produção da água de reúso para fins não potáveis. O estudo foi realizado em uma planta piloto instalada dentro de uma estação de tratamento de esgoto, com a investigação do tratamento contínuo do efluente, gerando dados realísticos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho teve como objetivo geral a avaliação da tecnologia de filtração direta descendente em meio granular na produção de água de reúso, para fins não potáveis, a partir de esgoto sanitário tratado, em uma planta piloto instalada nas dependências de uma estação de tratamento de esgoto, utilizando o efluente de forma contínua.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos foram:

- Avaliação da qualidade do efluente da estação de tratamento para verificação da aplicabilidade da filtração direta descendente;
- Obtenção da dosagem ótima de coagulação em escala de bancada;
- Montagem e instalação de uma unidade de filtração rápida, em escala piloto, nas dependências da estação de tratamento de esgoto Caiçara de Ribeirão Preto;
- Determinação, em estudos preliminares, dos parâmetros de operação do leito da filtração direta descendente, através da investigação das condições fluidodinâmicas, da granulometria do meio e das vazões de alimentação do filtro;
- Avaliação do sistema piloto de filtração direta em fluxo descendente, através de ensaios variando a taxa de filtração e a granulometria do meio filtrante, em relação aos critérios de encerramento da carreira de filtração, pelo transpasse de turbidez e da perda de carga máxima do sistema;
- Seleção da condição experimental otimizada, através da maior produção de água de reúso e relação entre a água gerada e a água utilizada na lavagem do filtro;
- Determinação da qualidade da água de reúso produzida e avaliação frente aos parâmetros recomendados para reutilização com fins não potáveis;
- Pré-dimensionamento de uma unidade de filtração direta descendente com capacidade de tratamento do efluente nas condições geradas atualmente na estação de tratamento de esgoto Caiçara, para a produção de água de reúso para fins não potáveis.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo estão compilados os principais aspectos da revisão literária referentes à situação atual brasileira quanto à disponibilidade hídrica, ao reúso de água, ao tratamento de esgoto doméstico e à tecnologia de filtração direta descendente. Compreende também uma breve descrição do município e da estação de tratamento de esgoto selecionados para o estudo deste trabalho.

3.1 DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO BRASIL

Estima-se que 97% da água existente no mundo é salgada, portanto, não é adequada ao consumo direto ou por exemplo, à irrigação. Dos 3% que representam a parcela de água doce, cerca de 70% é de difícil acesso, pois estão concentradas em geleiras, aproximadamente 29% se encontram em porções subterrâneas, e somente 1% é encontrado na superfície do globo terrestre. Além da disparidade de água doce disponível, em relação ao montante de água presente no planeta, a distribuição da água doce é heterogênea. A América do Sul possui 26% do total de água doce disponível no planeta, abrigando apenas 6% da população mundial, enquanto o continente asiático possui 36% do total de água e 60% da população mundial.

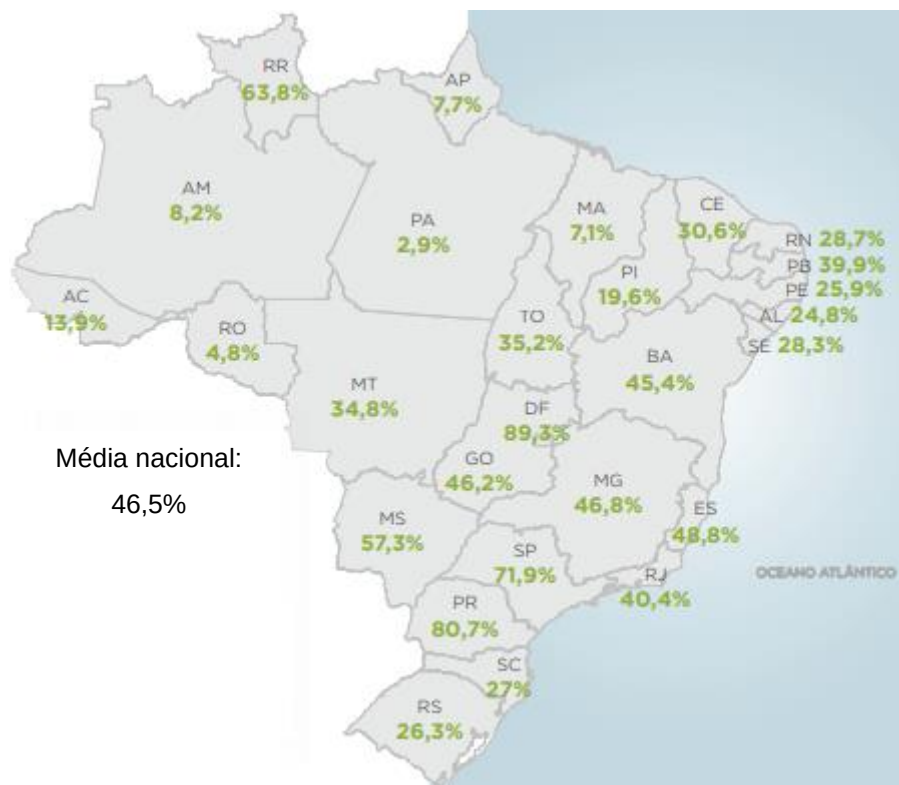
Em termos globais, o Brasil é privilegiado quanto ao volume de recursos hídricos, possui cerca de 12% da água doce do mundo, volume maior do que os continentes da África, da Oceania e da Europa. Apesar da abundância, cerca de 80% desse total encontra-se na Região Norte, na Bacia Amazônica, onde vive a menor parte da população, e conseqüentemente a demanda é menor.

Além da distribuição regional heterogênea da população e dos recursos hídricos, o crescimento demográfico não foi acompanhado por serviços de saneamento básico e nem por políticas de racionalização do uso da água. Dados do Sistema Nacional de Informação do Saneamento (SNIS) apontam que a média de perdas de água foi de 38,5 % no ano de 2018, seja por vazamentos, por falhas nos sistemas de medição ou por ligações clandestinas (SNIS, 2019).

Efeitos na qualidade e na quantidade da água disponível, relacionados com o crescente aumento do consumo (crescimento acelerado da população), o

desperdício, a poluição das águas superficiais e subterrâneas por esgotos domésticos e pelos resíduos tóxicos provenientes da indústria e da agricultura, tornam-se evidentes e preocupantes. Dados estatísticos do Atlas Esgoto (ANA, 2020) apontam que 13,5% da população brasileiro tem esgoto coletado e disposto sem tratamento em corpos d'água e 7,8% dos brasileiros não possuem acesso à coleta e nem ao tratamento, contribuindo para poluição dos corpos hídricos. Na Figura 1 estão os índices por estado da população com coleta e tratamento de esgoto, sendo a média nacional de 46,5% da população que é atendida com sistema de tratamento de esgoto. Vale ressaltar que a ausência ou ineficiência de tratamento de água, pode desencadear não só problemas relacionados à poluição de rios, mas, principalmente, problemas de saúde pública.

Figura 1 – Diagnóstico da população brasileira urbana atendida com sistema coletivo de tratamento de esgotos

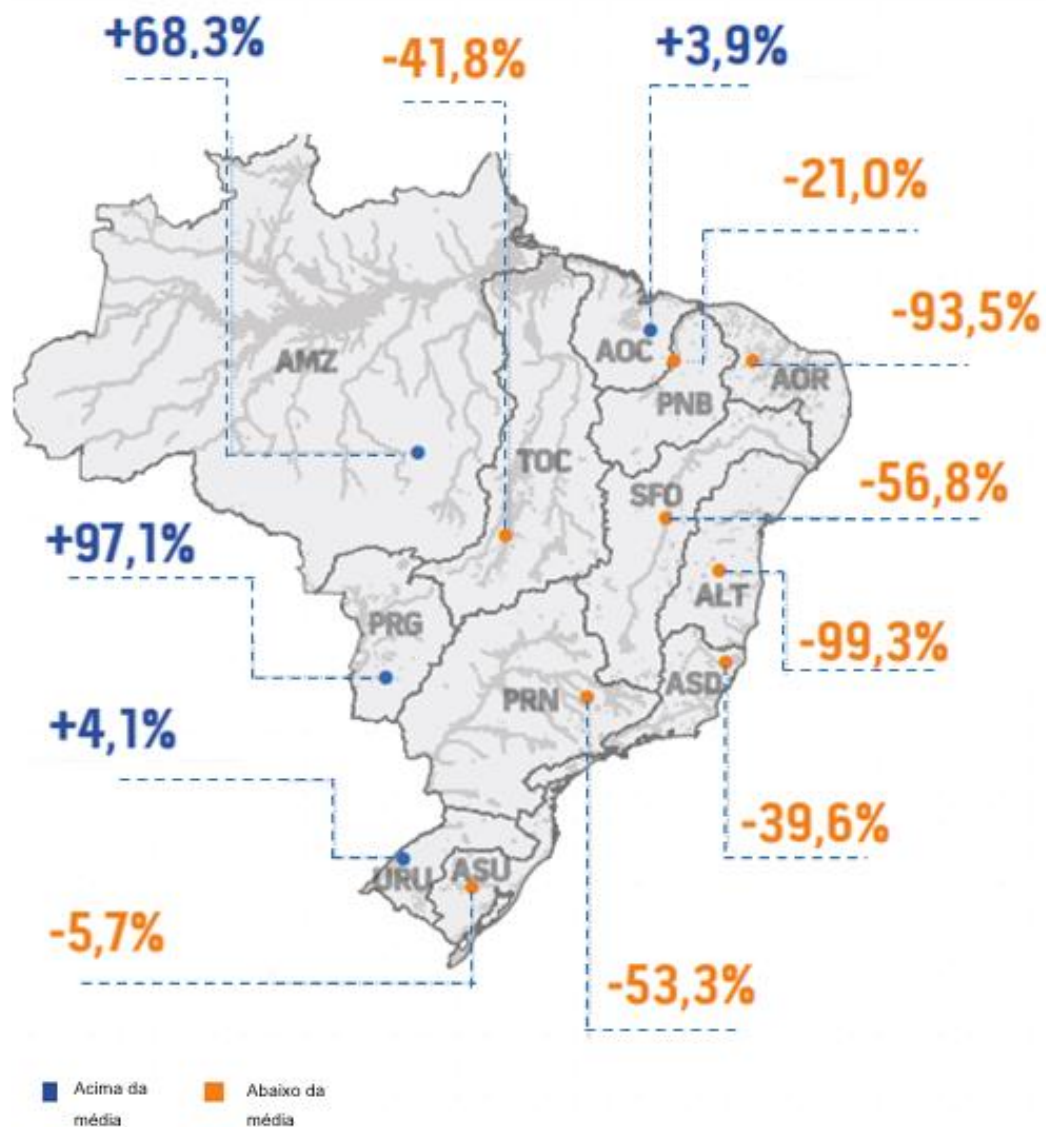


Fonte: adaptado de ANA, 2019

É comum ocorrerem variações de precipitação a cada ano, no entanto, cenários mundiais relativos à mudança climática apontam variações na dinâmica do ciclo da água, e provavelmente secas irão alterar muitas bacias hidrográficas em todo o mundo, com consequências danosas em termos socioeconômicos e

ambientais. Os episódios de seca que antes atingiam as regiões semiáridas, devido aos baixos índices de precipitação, à irregularidade do seu regime e às temperaturas elevadas durante todo ano, se estenderam às Regiões Sul e Sudeste do Brasil, como a crise hídrica ocorrida entre os anos de 2013 e 2015. Na Figura 2, apresentada no relatório anual da ANA, relativo ao ano de 2018, a maioria das bacias hidrográficas brasileiras tiveram redução no percentual médio das vazões hídricas, englobando as Regiões Nordeste, Sudeste, e partes das regiões Centro-oeste e Sul.

Figura 2 – Diferença percentuais das vazões hídricas médias ocorridas em 2018 em relação à vazão média do histórico até 2017 nas regiões brasileiras



Fonte: adaptado de ANA, 2019

O uso da água no mundo aumentou em seis vezes ao longo dos últimos 100 anos e esse consumo aumenta à uma taxa anual em torno de 1%, de acordo com UNESCO (2017). A demanda mundial de água foi estimada em torno de 4.600 km³/ano pela UNESCO, no ano de 2010, a qual projetou um aumento na faixa de 5.500 a 6.000 km³/ano até 2050. O volume destinado às produções agrícola e energética, atividades que envolvem uso intensivo de água, deve crescer por volta de 60% e 80%, respectivamente, até 2025, de acordo com UNESCO (2017).

Este cenário alerta para a necessidade de um melhor gerenciamento hídrico. Políticas públicas ambientais investem em Planos de Bacias Hidrográficas, cobrança pelo uso de água, outorgas de direito de uso de recursos hídricos, entre outros instrumentos visando o uso mais consciente da água. Paralelamente, busca-se o desenvolvimento de novas fontes de suprimento de água potável, o aumento da capacidade de armazenamento de água bruta, o controle das perdas nos sistemas de abastecimento, incentivo ao uso racional da água e o incentivo ao uso de tecnologias de fontes alternativas para o suprimento de água. Destaca-se, nesta última questão, o uso de águas residuais, com a alteração do paradigma de sua gestão: de tratamento e eliminação para o reúso e reciclagem da água.

3.2 TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO

A situação do tratamento de esgotos no Brasil ainda é precária, conforme foi apresentado na Figura 1. As estações de tratamento de esgoto (ETE) devem incorporar vários aspectos, não se restringindo apenas às exigências ambientais, de saúde pública, estéticas ou legais, mas também, considerar questões tecnológicas, econômicas e aos interesses da comunidade em geral. Fatores como automação, produção de lodo e eficiência na operacionalidade são relevantes e de suma importância para a concepção e o funcionamento de uma ETE.

A remoção eficiente de poluentes é muitas vezes obtida com uso de tecnologias mais eficazes e dispendiosas, porém, o custo é um fator limitante. A tecnologia a ser adotada na ETE deve obedecer a alguns fatores básicos, apontados por Jordão e Pessoa (2017), para a concepção e adoção da tecnologia de uma nova ETE:

- Grau de tratamento necessário, que depende das exigências legais, características do esgoto, entre outros;
- Possibilidade de reúso de água;
- Disponibilidade de recursos financeiros;
- Facilidades operacionais;
- Características do esgoto afluente;
- Geração de lodo; e
- Impactos ambientais.

3.3.1 Processos de tratamento de esgoto

Os processos de tratamento são de natureza física, química e biológica. Em função das unidades de tratamento, o processo de uma ETE pode ser classificado (JORDÃO e PESSÔA, 2017; METCALF e EDDY, 2016) em:

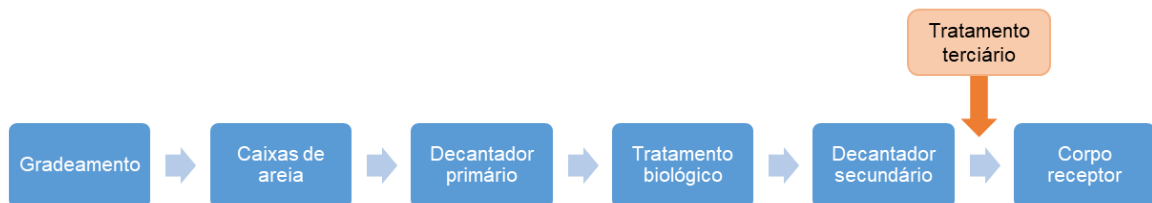
- a) Tratamento preliminar: onde ocorre a remoção de sólidos grosseiros, de gorduras e de areia;
- b) Tratamento primário: onde ocorre sedimentação e/ou flotação para a remoção dos sólidos suspensos;
- c) Tratamento secundário: filtração biológica, processos de lodos ativados e lagoas de estabilização aeróbias (facultativas ou aeradas), sistemas anaeróbios (lagoas, tanques, reatores), visando a remoção de matéria orgânica biodegradável; e
- d) Tratamento terciário: processos que removem organismos patogênicos, nutrientes e de tratamento avançado (adsorção em carvão, membranas).

Uma estação de tratamento de esgoto (Figura 3), geralmente, é composta por gradeamento, para remoção de sólidos grosseiros, seguida de desarenador para retenção de partículas de areia ou semelhantes, compondo-se do tratamento preliminar, seguido dos tratamentos primário e secundário.

A fase do tratamento primário é composta por um decantador primário para remoção dos sólidos sedimentáveis. No tratamento secundário utilizam-se tanques de aeração (lodos ativados), filtros biológicos ou processos anaeróbios para degradação da matéria orgânica. Posteriormente, vêm os decantadores

secundários, para a sedimentação do lodo biológico. O lodo gerado do decantador primário deve ser digerido, seco e encaminhado para a destinação final ambientalmente correta, assim como os resíduos sólidos retidos nas grades e caixa de areia.

Figura 3 – Fluxograma das etapas do tratamento convencional de esgoto



Fonte: Autora, 2020

3.3.2 Parâmetros de qualidade do esgoto

Além dos fatores apresentados, a natureza do esgoto, seja doméstico ou industrial, é fundamental para a concepção do projeto e da operação da ETE, tanto nas fases de coleta e tratamento, bem como em processos de reúso.

Os parâmetros de qualidade são grandezas que indicam características físicas, químicas e biológicas do esgoto, e de acordo com Jordão e Pessoa (2017), os principais são:

- a) Cor: indica a quantidade de matéria em solução e é de suma importância em relação ao aspecto estético;
- b) Turbidez: indica a presença de matéria em suspensão, é um parâmetro relacionado à estética e usado na avaliação do efluente tratado, como controle operacional;
- c) Absorbância: é a medida de luz, em determinado comprimento de onda, que é absorvida pelos constituintes da solução;
- d) pH: é um parâmetro importante no controle operacional e nos processos oxidativos e de coagulação, que indica a acidez do meio;
- e) Alcalinidade: é medida pela presença de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, que influenciam diretamente no pH da água;
- f) Cloretos: é medida pela presença de íons cloreto, originados pela dissolução de minerais e solo, água salina, lançamento de esgotos ou despejos industriais;

- g) Nitrogênio: pode estar presente na forma de nitrogênio orgânico, nitrito ou nitrato;
- h) Fósforo: presente na forma de ortofosfato, polifosfato e fósforo orgânico;
- i) Oxigênio Dissolvido (OD): é o parâmetro que melhor indica a qualidade do esgoto, pois indica a concentração de gás oxigênio dissolvido na água, o qual é fundamental para a respiração dos microrganismos aeróbios que realizam a degradação do esgoto;
- j) Demanda bioquímica de oxigênio (DBO): indica a quantidade de matéria orgânica presente na água, parâmetro usado para medir o grau de poluição do esgoto;
- k) Demanda química de oxigênio (DQO): indica a quantidade de oxigênio necessária para que ocorra a oxidação da matéria orgânica;
- l) Sólidos: indica a concentração de sólidos no esgoto, podendo ser divididos em sedimentáveis, em suspensão ou dissolvidos, e em fixos ou voláteis;
- m) Carbono orgânico total (COT): é um parâmetro que indica a presença de matéria orgânica no esgoto, através da presença de carbono orgânico;
- n) Microrganismos: indicam a contaminação do esgoto, medidos por Coliformes totais, Coliformes fecais, *Escherichia coli*, *Streptococos* fecais e *Enterococos* fecais.

A importância da mensuração de tais parâmetros está relacionada aos problemas advindos, caso o tratamento não seja eficiente. Na Tabela 1 foram listados os constituintes dos esgotos e as razões da importância da sua remoção, segundo Metcalf e Eddy (2016).

Legislações pertinentes definem padrões, que são valores de parâmetros que não devem ser excedidos em um intervalo de tempo estabelecido. Os padrões legais no Brasil são definidos pelas Resoluções do CONAMA 357 (2005) e 430 (2011), que classificam os corpos d'água e dispõe sobre lançamento de efluentes, respectivamente; Resolução do CONAMA 274 (2000) que define padrões de balneabilidade nos corpos d'água e a Portaria de Consolidação número 5 de 2017, anexo XX, que define padrões de potabilidade da água de abastecimento, intrinsecamente ligada a qualidade dos corpos d'água e ao lançamento de efluentes nos corpos que são usados para abastecimento público.

Tabela 1 – Principais constituintes no tratamento de esgoto e sua importância

Constituintes	Razão da importância
Sólidos Suspensos	Podem provocar depósitos de lodo e condições anaeróbias quando o esgoto bruto é descarregado nos corpos de água.
Orgânicos biodegradáveis	Comumente medidos em DBO e DBO, caso sejam lançados ao ambiente aquático, podem causar a diminuição de oxigênio dissolvido.
Patogênicos	Doenças podem ser transmitidas.
Nutrientes	Fósforo e Nitrogênio são responsáveis pelo crescimento de espécies aquáticas indesejáveis, podem também contaminar águas subterrâneas.
Poluentes	Alguns compostos orgânicos e inorgânicos podem apresentar carcinogenicidade, mutagenicidade, teratogenicidade ou elevada toxicidade.
Orgânicos refratários	Podem resistir aos métodos convencionais de tratamento.
Metais pesados	Provenientes de atividades comerciais e industriais devem ser removidos, pois causam sérios riscos à saúde.
Inorgânicos dissolvidos	Cálcio, Sódio e Sulfatos, adicionados durante o sistema de abastecimento público devem ser removidos.

Fonte: METCALF e EDDY, 2016

3.3 REÚSO DE ÁGUA

O reúso de água constitui-se em uma prática de racionalização e conservação de recursos hídricos. Fatores já mencionados, como o aumento populacional que gera maior consumo de água, elevação dos custos com tratamento de água em função da poluição dos mananciais, alterações climáticas que reduzem a recarga em águas superficiais e subterrâneas e deficiências no setor de infraestrutura de saneamento, gerando perdas de água tratada por exemplo, requerem gerenciamento dos recursos hídricos. Nesse contexto, o incentivo ao reúso da água prevê a redução da descarga de efluentes nos corpos d'água, contribuindo para a proteção do meio ambiente e da saúde pública; substituição de usos de água tratada, causando menor captação de água nas estações de tratamento de água; além de benefícios econômicos, devido à minimização de recursos e da geração de rejeitos.

Pode-se citar que o conceito de reúso indicado por vários autores é, de forma geral, reutilizar água significa reaproveitar, para múltiplos fins, as águas descartadas ou residuárias oriundas de diversas atividades humanas (ABES, 1992; ASANO e LEVINE, 1998; MANCUSO e SANTOS, 2003; TELLES e COSTA, 2007; entre outros).

O reúso de água pode ser definido como o aproveitamento de água residuária ou de qualidade inferior, submetida a tratamento prévio ou não. É considerado reúso também o tratamento a nível terciário do efluente secundário das estações de tratamento de esgoto, que podem ser utilizado, muitas vezes, para fins menos nobres.

Metcalf e Eddy (2016) definem ainda o reúso de água como a recuperação de efluentes de modo a utilizá-los em aplicações menos exigentes, diminuindo assim o ciclo hídrico, a favor do balanço energético.

Dentre as vantagens da prática do reúso de água, destacam-se:

- Minimização da descarga de esgoto nos corpos hídricos;
- Preservação dos recursos subterrâneos;
- Propicia o uso sustentável dos recursos hídricos;
- Minimiza a poluição hídrica nos mananciais;
- Reduzindo a poluição dos corpos d'água, afeta diretamente a saúde da população, reduzindo problemas de saúde de veiculação hídrica; e
- Redução da captação de águas superficiais e subterrâneas possibilitando uma situação ecológica mais equilibrada.

A prática de reúso complementa as fontes de abastecimento de água de forma direta ou indireta, através de ações planejadas ou não planejadas e para fins potáveis e não potáveis. A Organização Mundial da Saúde (OMS) publicou em 1973 um documento onde foram classificados os tipos de reúso em diferentes modalidades, de acordo com seus usos e finalidades (WHO,1973):

- Reúso indireto: ocorre quando efluentes domésticos ou industriais são descarregados nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizados novamente a jusante, de forma diluída. Nesta prática espera-se que a autodepuração do

corpo de água seja suficiente para degradar os poluentes descartados com o esgoto *in natura*;

- Reúso direto: é o uso planejado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquífero, entre outras, por meio da concepção e implantação de tecnologias apropriadas de tratamento para a adequação da qualidade da água produzida pelo uso requerido;
- Reúso potável direto: após tratamento avançado do esgoto, a água de reúso é reutilizada no sistema de água potável;
- Reúso potável indireto: quando o esgoto tratado é disposto em águas superficiais ou subterrâneas para diluição e autodepuração e, posteriormente, é captado, tratado e utilizado como água potável; e
- Reúso direto para fins não potáveis: pode ser aplicado para fins agrícolas, para dessedentação de animais, em fins industriais, em alguns usos comerciais tais como a lavagem de veículos, para fins recreacionais, para fins domésticos, para reserva de incêndio, lavagem de automóveis e pisos.

No Brasil, ações relacionadas ao reúso estão em andamento, grandes conquistas e avanços podem já ser observados. O projeto Aquapolo é um caso de sucesso no país, pois possibilita o aumento da oferta de água potável para a Região Metropolitana de São Paulo, já que o volume de água de abastecimento que seria usado pelo Polo Petroquímico, em diversas atividades industriais, é substituído pela água de reúso produzida a partir do tratamento avançado de parte do efluente tratado da estação de tratamento de esgoto do ABC Paulista.

Existem ainda algumas práticas utilizadas em edificações que se caracterizam como reúso, pois se baseiam no reaproveitamento da água. Destacam-se: águas cinzas – provenientes de banhos, máquina de lavar roupa e lavatórios de banheiro – são reutilizadas em residências, em descargas e limpezas de pisos, após serem coletadas em cisternas domésticas; e águas pluviais – resultantes da chuva que escoam sobre os telhados, coberturas, terraços, varandas – que podem ser reaproveitadas em várias atividades não potáveis, normatizada pela NBR 15527 (1997).

Nos Estados Unidos da América, os estados do Arizona, Califórnia, Colorado, Flórida, Geórgia, Havaí, Massachusetts, Nevada, Nova Jersey, Novo México,

Carolina do Norte, Ohio, Oregon, Texas, Utah, Washington e Wyoming incentivam a prática do reúso com estratégia de conservação dos recursos hídricos (USEPA, 2012).

Anderson (2003) e Mancuso e Santos (2003) citam algumas experiências internacionais de incentivo ao reúso na agricultura, em Monterey na Califórnia (EUA), na Cidade do México (México), na Região de Dan (Israel) e na Virgínia, Austrália. Os autores também exemplificam casos de reúso na indústria, como em Phoenix (EUA) que utiliza em sistemas de resfriamento, em Sidney na Austrália, que usa na geração de vapor, Port Kembla, também na Austrália, que utiliza em resfriamento e para apagar chamas em fornos.

Nota-se que, diante da situação precária do sistema de saneamento básico, conforme foi apresentado anteriormente, esgoto sem tratamento ou tratado ineficientemente são descarregados nos corpos d'água diariamente, o que implica que cidades a jusante, captam água para abastecimento público com alta carga poluidora, caracterizando a prática de reúso de água não planejado. Situações assim tornam-se cada vez mais comum, ressaltando a importância do estudo do reúso de água planejado, seja para fins potáveis ou não potáveis, como serão apresentadas adiante. Todavia, a complexidade do tema deixa explícito que a prática da reutilização das águas deve ser estudada e difundida amplamente.

Segundo Moruzzi (2008), aspectos relacionados à proteção da saúde pública, com o estabelecimento de padrões de qualidade seguros e aplicáveis é fundamental para a prática de reúso e constituem o principal desafio para a difusão e a aplicação da técnica. O autor ainda ressalta que a definição de parâmetros muito restritivos pode inviabilizar a aplicação de técnicas de reúso, sendo necessário adequação à realidade local baseado no uso e aplicação.

3.3.1 Legislação de reúso

O processo de aceitação e implantação de práticas de reúso pelo mundo está intrinsicamente relacionado aos projetos ou à elaboração de legislação de práticas de reúso.

Existem, basicamente, duas normas federais brasileiras que tratam sobre o reúso de água: a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR

13969 (1997) e Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) número 54 de 28 de novembro de 2005.

A NBR 13969 é composta por uma série de três normas referentes ao sistema de tratamento de esgotos, ao tratamento e disposição de efluentes de tanques sépticos. A norma dá sugestões de alternativas que devem ser selecionadas de acordo com as necessidades e condições locais onde é implantado o sistema de tratamento, para atender ao maior rigor legal ou para a efetiva proteção do manancial hídrico, a critério do órgão fiscalizador competente. Em um item dedicado à prática de reúso, é sugerido que o esgoto de origem essencialmente doméstica ou com características similares, deve ser reutilizado para fins que exigem qualidade de água não potável, mas sanitariamente segura. Tais como irrigação dos jardins, lavagem dos pisos e dos veículos, na descarga dos vasos sanitários, na manutenção paisagística dos lagos e canais com água, na irrigação dos campos agrícolas e pastagens. O grau de tratamento para a produção de água de reúso é definido pelo uso mais restritivo quanto à qualidade de esgoto tratado. De forma geral, a NBR abrange a classificação com os respectivos valores dos parâmetros para esgotos, os quais são apresentados na Tabela 2.

A resolução do CNRH nº 54 de 2005 estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. São descritas quatro modalidades para prática de reúso não potável: agrícola, ambiental, industrial e aquicultura, em que as diretrizes, critérios e parâmetros específicos para as modalidades de reúso devem ser estabelecidos pelos órgãos competentes.

O desenvolvimento de regulamentações americanas teve um papel fundamental no avanço e no aperfeiçoamento da prática do reúso nos Estados Unidos e no mundo todo. Os guias de referências mundiais são o *Guidelines for water reuse* da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency*) (USEPA, 2012) e o *World Health Organization Guidelines for Water Reuse* (2006). Segundo USEPA (2012) as seguintes categorias de reúso são sugeridas: urbano; industrial; agrícola; ambiental e recreacional; recarga de aquíferos, com requisitos de qualidade da água para cada tipo de aplicação, assim como tratamento requerido, conforme Tabela 3.

Tabela 2 – Classes de reúso, parâmetros recomendados e níveis de tratamento recomendado, segundo NBR 13969

Classes	Usos recomendados	Parâmetros recomendados	Nível de tratamento
1	Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes	Turbidez < 5 uT Coliformes Fecais < 200 NMP/100mL Sólidos dissolvidos totais < 200 mg/L Cloro residual: entre 0,5 e 1,5 mg/L pH: 6 a 8	Tratamento aeróbio, filtração convencional e cloração.
2	Lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos	Turbidez < 5 uT Coliformes fecais < 500 NMP/100 mL Cloro residual > 0,5 mg/L	Tratamento biológico aeróbio, filtração de areia e desinfecção.
3	Descargas dos vasos sanitários	Turbidez < 10 uT Coliformes fecais < 500 NMP/100 mL	Tratamento aeróbio, filtração e desinfecção.
4	Pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual	Coliforme fecal < 5 000 NMP/100 mL Oxigênio dissolvido > 2,0 mg/L	As aplicações devem ser interrompidas pelo menos 10 dias antes da colheita.

Fonte: ABNT, 1997

Em 2017 foi publicada, no estado de São Paulo, a resolução conjunta entre as Secretarias de Estado da Saúde, do Meio Ambiente e de Saneamento e Recursos Hídricos (SES/SMA/SSRH) número 1, de 28 de junho de 2017, que disciplina o reúso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de estações de tratamento de esgoto sanitário.

O decreto estadual foi reformulado pela resolução conjunta da Secretaria de Estado da Saúde (SES) e da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente (SIMA) em 13 de fevereiro de 2020. De acordo com a norma estadual de 2020, a água de reúso para fins urbanos abrange as modalidades: irrigação paisagística; lavagem de logradouros e outros espaços públicos e privados; construção civil; desobstrução de galerias de água pluvial e rede de esgotos; e lavagem de veículos e combate aos incêndios.

Tabela 3 – Qualidade da água de reúso e tipos de tratamento sugeridos para cada categoria de reúso direto, segundo USEPA (2012)

Categoria	Tratamento	Qualidade da água de Reúso
Reúso Urbano Irrestrito	Secundário	DBO ₅ < 10 mg/L
	Filtração	Coliformes Fecais: ausência/100mL
	Desinfecção	Cl ₂ residual: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reúso Urbano Restrito		DBO ₅ ≤ 10mg/L, SST ≤ 30 mg/L
	Secundário	Coliformes Fecais ≤ 200 NMP/100 mL
Reúso Agrícola em culturas de alimentação processadas comercialmente	Desinfecção	Cl ₂ residual: 1 mg/L pH: 6 a 9
	Secundário	DBO ₅ ≤ 10 mg/L Turbidez ≤ 2 uT
	Filtração	Coliformes Fecais: ausência NMP/100 mL
Reúso Agrícola em culturas não-alimentícias	Desinfecção	Cl ₂ residual: 1 mg/L pH: 6 a 9
	Secundário e desinfecção	DBO ₅ ≤ 10 mg/L, SST ≤ 30 mg/L Coliformes Fecais: 200 NMP/100mL Cl ₂ residual: 1 mg/L pH: 6 a 9
Reúso recreacional irrestrito	Secundário,	DBO ₅ < 30 mg/L, SST < 30 mg/L
	Filtração	Coliformes Fecais < 200NMP/100 mL
	Desinfecção	Cl ₂ Residual: 1 mg/L
Reúso ambiental	Variável, geralmente secundário e desinfecção	Variável, mas não deve exceder: DBO ₅ < 30 mg/L, SST < 30 mg/L Coliforme Fecais < 200 NMP/100 mL
Reúso em construção	Secundário	DBO ₅ < 30 mg/L, SST < 30 mg/L
	Desinfecção	Coliformes Fecais < 100 a 200 NMP/100mL Cl ₂ residual: 1 mg/L
Reúso Industrial		Dependo do tipo de uso, mas geralmente:
	Secundário	DBO ₅ < 30 mg/L, SST < 30 mg/L
	Desinfecção	Coliformes fecais < 200 a 1000 NMP/100mL Cl ₂ residual mínimo: 1 mg/L
Reúso em recarga de aquífero	Primário infiltração e percolação; secundário por injeção	Variável, dependendo do local e dos usos da água
Reúso recreacional restrito	Secundário	DBO ₅ < 30 mg/L, SST < 30 mg/L
	Desinfecção	Coliformes Fecais < 100 a 200NMP/100mL Cl ₂ residual: 1 mg/L

Fonte: USEPA, 2012

A resolução estadual considera duas categorias de água de reúso: Classe A – reúso irrestrito não potável, para as modalidades descritas acima; e Classe B – reúso restrito não potável, para as modalidades descritas com exceção de lavagem interna de veículos e combate aos incêndios. Na Tabela 4 são apresentados os padrões que as águas de reúso devem obedecer.

Tabela 4 – Padrões de qualidade definidos para as categorias da água de reúso, segundo resolução conjunta SES/SIMA número 1 de 2020 do estado de São Paulo

Padrões de qualidade		Categorias de reúso	
Parâmetro	Unidade de Medida	Classe A Reúso irrestrito não potável	Classe B Reúso restrito não potável
pH	-	6 a 9	6 a 9
DBO _{5,20}	mg/L	≤10	≤30
Turbidez	uT	≤2 ≤0,2 (filtração por membrana)	-
Sólidos Suspensos totais	mg/L	- ≤0,5 (filtração por membrana)	≤30
Coliforme Termotolerante ou <i>E. coli</i>	UFC/100mL	Não detectável Não detectável	≤200 ≤120
Ovos helmintos ou Ovos viáveis <i>Ascaris sp.</i>	Ovo/L	<1 <0,1	1 0,1
Cloro Residual Total	mg/L	≥1 ≥0,5 (filtração em membrana)	≥1
<i>Giardia e Cryptosporidium</i>	(o) cistos/L	<1 <0,1	1 0,1
Condutividade	dS/m	≤0,7	≤3,0
RAS	-	<3	3-9
Cloreto	mg/L	≤106	≤50
Boro	mg/L	≤0,7	≤2,0

Fonte: SÃO PAULO (2020)

O valor de turbidez apresentado na Tabela 4 representa uma média dentro de um período de 24 horas, antes da desinfecção. O parâmetro RAS é Razão de Adsorção de Sódio, determinado na água de irrigação e que indica a quantidade relativa de sódio (mg/L), em relação aos íons cálcio e magnésio e utilizado somente em reúso para fins de irrigação.

3.3.2 Tecnologias aplicadas ao tratamento de água para fins de reúso

Os tratamentos geralmente empregados para efluente de estação de tratamento de esgoto na utilização como reúso são: adsorção em carvão ativado; filtração em areia; oxidação com ozônio, dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio; separação por membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa); destilação e precipitação (CROOK, 1993; SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001; METCALF e EDDY, 2016; MANCUSO e SANTOS, 2003; MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Segundo Crook (1993), Califórnia (EUA) possui tradição em práticas de reúso, com sua primeira regulamentação em 1918. Com a publicação em 1978 de critérios de recuperação da qualidade das águas residuárias, que serviu de base para outros países, incluindo os processos de tratamento requerido, os requisitos operacionais e os critérios de avaliação da qualidade da água de reúso produzida. De acordo com o autor, os critérios de qualidade para reúso de água devem ser baseados nos usos específicos, levando em conta os efeitos dos constituintes para a padronização, e ainda citou as diferenças entre os países desenvolvidos, como é o caso da Califórnia, nos EUA, em relação aos países em desenvolvimento, cujas medidas restritivas devem levar em conta principalmente a remoção de patogênicos.

A seleção da tecnologia adequada e das técnicas de certificação da qualidade da água de reúso estão relacionadas à produção de água segura a partir dos esgotos domésticos, respeitando critérios econômicos e de saúde pública, de acordo com Hespanhol (2015). O mesmo aponta que o sistema de membranas é eficiente para a remoção de poluentes químicos, incluindo os de pequena massa molecular e os organismos patogênicos de pequenas dimensões. O sistema de carvão ativado é eficiente para a remoção de material orgânico, não orgânico e organismos patogênicos: ele é muito utilizado em sistema de abastecimento de água, podendo também ser aplicado na prática de reúso. Por último, o autor cita os processos

oxidativos avançados, que envolvem o uso de um oxidante forte capaz de oxidar vários compostos orgânicos que não seriam degradados por processos convencionais.

Hespanhol (2015) relatou a prática do município de Windhoek, na Namíbia, que há mais de 40 anos pratica o reúso potável direto. A tecnologia aplicada é uma combinação de processos convencionais e avançados: ao esgoto bruto é adicionado carvão ativado em pó em uma câmara de contato; após adsorção, o esgoto passa por uma pré-ozonização; segue então ao tratamento convencional de tratamento de água – coagulação, floculação, filtração; em seguida, o efluente filtrado é ozonizado, oxidado com peróxido de hidrogênio e passa em coluna contendo carvão ativado granular, por último, é filtrado em escala de ultrafiltração, e posteriormente é clorado e distribuído.

Em Denver, no Colorado (EUA), Hespanhol (2015) citou que o sistema de produção de água de reúso potável direto é alimentado com efluente secundário da estação de tratamento de esgoto doméstico, com múltiplas barreiras em paralelo, que são utilizadas dependendo da qualidade da água a ser tratada. O efluente é coagulado, floculado e filtrado. Caso a qualidade indique que os parâmetros foram obedecidos, o filtrado passa pela desinfecção com dióxido de cloro e segue para distribuição. Caso contrário, o efluente filtrado é oxidado com luz ultravioleta, passa por etapa de adsorção em carvão ativado e dependendo da qualidade da água, pode seguir dois processos: ultrafiltração ou osmose reversa, seguidos de extração de amônia, ozonização e cloração.

A aplicação de práticas de reúso de água no Brasil é feita mais especificamente nas áreas industriais e de irrigação, porém já existem iniciativas para o reúso doméstico. O caso Aquapolo é o maior exemplo de sucesso do país, pois possibilita o aumento da oferta de água potável para a Região Metropolitana de São Paulo, já que o volume que seria usado pelo Polo Petroquímico é substituído pela água de reúso para fins industriais. O Aquapolo está apto a produzir 1.000 L/s de água de reúso, utilizando os mais avançados e complexos processos tecnológicos existentes e atualmente fornece por contrato 650 L/s de água de reúso para o Polo Petroquímico da Região do ABC Paulista. Os parâmetros e a qualidade da água do processo foram determinadas pelo próprio Polo Petroquímico, que a utiliza para limpar torres de resfriamento e caldeiras, principalmente. O projeto

consiste em desviar parte do efluente da ETE do ABC para tratamento. O efluente ao chegar na estação produtora da água de reúso passa por filtração em filtro tipo disco de 400 µm, vai para tratamento biológico composto por tanque de aeração tipo carrossel, e passa por membranas de ultrafiltração. O efluente passa por osmose reversa e, então, é reservado para distribuição (BRK e AQUAPOLO, 2019).

Hespanhol, Rodrigues e Mierswa (2019) avaliaram o reúso direto da água a partir do efluente tratado da Estação de Tratamento de Águas Residuárias Capivari (ETAR) – Capivari II, a partir de uma planta piloto combinando quatro tecnologias de tratamento: osmose reversa (OR), processos oxidativos avançados (POA), carvão ativado granular (CAG) e carvão ativado biológico (CAB). Na planta piloto foram testadas cinco configurações diferentes: OR; OR + POA; OR + CAG; OR + POA + CAG e CAB, todas seguidas de desinfecção. Em todos os processos notaram desempenho significativo na remoção de bactérias heterotróficas, sulfato, manganês, sólidos dissolvidos, sódio, cor aparente, entre outros. Concluíram que o arranjo com o maior potencial para produção de água de reúso foi a combinação da osmose com processos de oxidação e desinfecção.

Em Campinas (São Paulo), foi criada a Estação Produtora de Água de Reúso, EPAR CAPIVARI II pela Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento (SANASA) por meio da implantação e operação de uma unidade de tratamento que possibilitasse a produção de água de reúso e o recebimento de efluentes não domésticos, com capacidade para produzir 363 L/s de água de reúso, a partir dos estudos realizados por Hespanhol et al (2019). A água de reúso é utilizada pela própria SANASA e pela prefeitura Municipal de Campinas para fins urbanos, e em 2014, passou a ser disponibilizada para as indústrias a um custo mais baixo com relação à água potável.

Pohlmann (2010) avaliou os resultados obtidos de uma estação de tratamento dos esgotos sanitários visando reúso, este tratamento foi constituído de reator anóxico, tanque de oxidação, decantador, filtro biológico, tanque de reaeração, pré-filtração ascendente, filtração lenta, desinfecção por UV e cloração em linha. A pesquisa foi conduzida por 9 meses (de outubro de 2008 a junho de 2009) e os resultados obtidos pelo sistema de tratamento alcançaram as seguintes remoções médias: 94% de sólidos suspensos totais, 96,4% de DBO, 97,5% de DQO e 99% de cor aparente.

Hespanhol (2002) reforça a importância de se implementar projetos pilotos para a produção de água de reúso, pois no Brasil, a experiência em reúso planejado e institucionalizado ainda estão em desenvolvimento.

São diversos os processos e tecnologias aplicadas para a produção de água de reúso, e portanto, neste trabalho foi priorizado a seleção de uma tecnologia eficiente com baixo custo, detalhada no tópico a seguir.

3.4 FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE

A filtração direta é aplicada no tratamento de águas com turbidez e cor verdadeira relativamente baixas, simplificando o tratamento convencional, muito utilizado nas estações de tratamento de água brasileiras. Apesar de se referir à água de abastecimento público, a mesma pode ser utilizada para o estudo e o dimensionamento de estações produtoras de água de reúso.

Esta tecnologia preconiza o método de coagulação na adsorção/neutralização de cargas, diferentemente do ciclo completo que coagula na varredura, implicando na formação de flocos com baixa velocidade de sedimentação, sendo dispensada a etapa de decantação da água (DI BERNARDO et al, 2017).

São vários os fatores que influenciam a seleção da tecnologia de tratamento de água, contudo os parâmetros de qualidade da água a ser tratada são os indicativos para a escolha da tecnologia mais eficiente e conveniente. Para tal, é importante o monitoramento da água bruta e a realização de ensaios preliminares em laboratório (nível de bancada) e em instalações piloto com escoamento contínuo, para a concepção de uma nova unidade produtora de água, otimização de processos existentes ou em reforma e ampliações de estações.

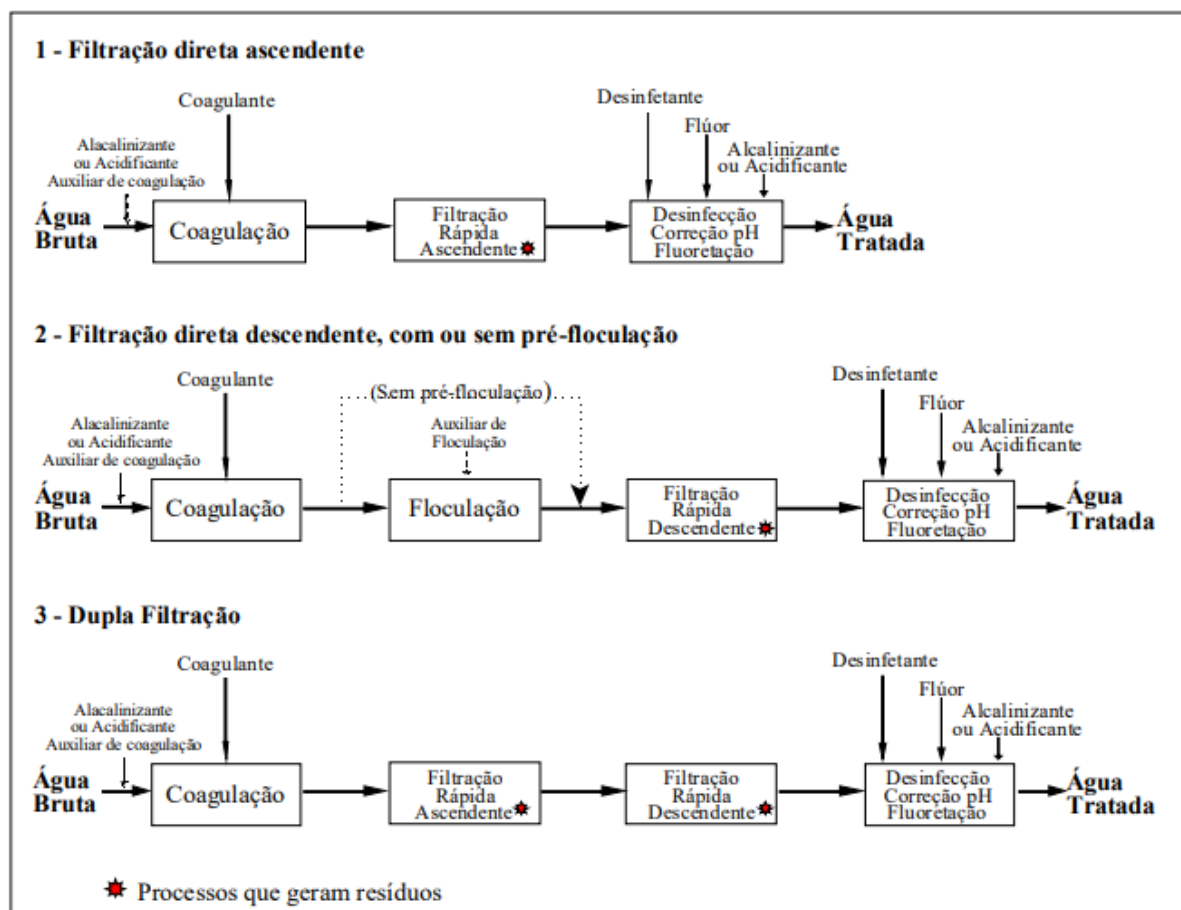
A filtração direta pode variar em função do fluxo de escoamento: filtração direta ascendente, filtração direta descendente e dupla filtração, conforme fluxograma apresentado na Figura 4.

A filtração direta ascendente (FDA) é um processo em que a água escoar no sentido dos grãos maiores (meio suporte) para os menores (leito de filtração). Nas partículas que compõem a camada suporte de pedregulho ocorre intensa formação de flocos, retraindo pelo menos 30% das impurezas, segundo Di Bernardo et al (2017), o que representa a principal vantagem da tecnologia. No entanto, a fim de se

evitar a fluidização do meio filtrante quando o fluxo for ascendente, as taxas de filtração devem ser baixas.

A filtração direta descendente (FDD) apresenta a etapa da mistura rápida, podendo ou não ser seguida de floculação, mas seguida da filtração com a solução escoando no leito em sentido descendente. O uso da floculação depende do tamanho e distribuição das partículas presentes, das características do meio filtrante e da taxa de filtração, de acordo com Di Bernardo et al. (2017). Pesquisas do PROSAB (2003), apontam que muitas ETA brasileiras que utilizam o tratamento em ciclo completo, também são projetadas para operar, quando necessário, em épocas de estiagem, quando a turbidez é menor, por exemplo, usando a tecnologia de filtração direta descendente.

Figura 4 – Fluxogramas esquemáticos dos sistemas de filtração direta



Fonte: PROSAB (2003)

A dupla filtração (DF) é considerada uma tecnologia em potencial para a produção de água de alta qualidade, pois associa a filtração em sentido ascendente seguida da filtração descendente. Esta tecnologia garante maior remoção de microrganismos, possibilita taxas de filtração maiores que a FDA e maior economia de produtos químicos (DI BERNARDO et al., 2017).

Di Bernardo et al. (2017) apontam as seguintes vantagens da tecnologia FDD em relação ao ciclo completo:

- O investimento inicial é menor, podendo chegar a até 70% de redução;
- Menor consumo de produtos químicos;
- Menor consumo de energia elétrica;
- Volume menor de resíduos; e
- A tecnologia facilita o tratamento de águas com baixa turbidez.

Em relação às desvantagens, são apontadas:

- A tecnologia não é vantajosa para água com altos valores de turbidez e cor;
- Monitoramento mais frequente e eficiente, pois tempo de detenção é pequeno; e
- Devido ao baixo tempo de detenção, a oxidação de substâncias orgânicas pode não ser eficiente.

A eficiência da tecnologia de filtração direta descendente está relacionada à qualidade da água bruta, sendo recomendado, por Di Bernardo et al. (2017), que a turbidez máxima seja de 25 uT e a concentração de sólidos suspensos totais de 50 mg/L. A cor verdadeira, proveniente da presença de matéria orgânica natural, também influencia o uso desta tecnologia, e, quanto maior a sua concentração, maior a dosagem de coagulante, o qual inviabiliza o uso da filtração direta; assim, o valor limite indicado é de 50 uH. Como o mecanismo de coagulação indicado é o da neutralização/adsorção de cargas, é fundamental o controle do pH de coagulação, sendo necessário em muitas situações o uso de auxiliares de coagulação ou o uso de alcalinizante para ajuste do pH. Em relação à presença de coliformes é recomendado um valor máximo de 200 NMP/100 mL.

Na Tabela 5 é apresentado um resumo das principais características da água bruta a ser tratada pela tecnologia da filtração direta descendente, segundo recomendações de Di Bernardo e Dantas (2005) e PROSAB (2003).

Tabela 5 – Características gerais da água bruta a ser tratada pela tecnologia da filtração direta descendente

Parâmetros	PROSAB (2003)	Di Bernardo e Dantas (2005)
Ferro (mg/L)	-	100% < 10 e 95% < 5
Manganês (mg/L)	-	100% < 2 e 95% < 1
Turbidez (uT)	100% ≤ 100 e 95% ≤ 25 90% ≤ 10	100% < 100 e 95% < 25
Cor verdadeira (uH)	100% ≤ 50 95% ≤ 25 90% ≤ 20	100% < 50 e 95% < 25
Coliformes totais (NMP/100mL)	100% ≤ 1000	100% < 2500 e 95% < 500
Escherichia coli (NMP/100mL)	100% ≤ 500	100% < 500 e 95% < 100
Carbono orgânico total (mg/L)	-	100% < 5
Sólidos suspensos totais (mg/L)	100% ≤ 100 95% ≤ 25	100% < 75 e 95% < 50
Taxa de filtração (m³/m²dia)	200 a 600	200 a 600

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005) e PROSAB (2003)

3.4.1 Coagulação e floculação na filtração direta descendente

Na coagulação, geralmente são utilizados sais de alumínio ou ferro, podendo ou não serem adicionados auxiliares de coagulação, como por exemplo, polímeros e produtos químicos para correção de pH. O objetivo da coagulação é a desestabilização e neutralização das partículas através de um fenômeno químico, onde ocorrem reações entre coagulante e as partículas coloidais, formando espécies hidrolisadas com carga positiva, seguido de um fenômeno físico, em que as partículas são transportadas e entram em contato com outras impurezas, formando aglomerados maiores, onde é necessária alta agitação, a qual é garantida por unidades mecanizadas ou hidráulicas, por isso chamada de mistura rápida.

Dentre os processos de coagulação, existem os mecanismos de varredura e de neutralização de cargas. No primeiro mecanismo, são utilizados grandes

quantidades de produtos químicos com altos valores de pH, pois a quantidade de impurezas é alta. Já no segundo, a coagulação é baseada na neutralização de cargas das impurezas, viabilizando a formação de flocos. Na filtração direta recomenda-se o uso da coagulação visando a neutralização, que requer menor dosagem de coagulante e com pH menor (DI BERNARDO et al., 2017). No entanto, é necessário que a qualidade da água a ser tratada seja melhor do que com relação do primeiro mecanismo.

A escolha do melhor coagulante e as condições de mistura rápida (gradiente de velocidade e tempo) devem ser obtidas a partir de testes em laboratório, em equipamentos jarreste para a obtenção dos diagramas de coagulação. No caso específico da filtração direta, os diagramas são obtidos a partir de ensaios de coagulação seguidos de filtros de laboratório, os quais são fundamentais para a otimização do processo e a seleção da melhor dosagem de coagulante.

WAGNER e HUDSON (1982) estudaram dados operacionais de várias estações de filtração direta em diversos países e apontaram a possibilidade de se trabalhar com baixas dosagens de coagulante nesta tecnologia.

A floculação, em processos de filtração direta, tem o objetivo de potencializar a filtrabilidade dos flocos, aumentando o tamanho do material em suspensão presente, sendo então, necessária apenas na filtração direta descendente (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). No entanto, Di Bernardo e Paz (2008) recomendam pesquisas experimentais para determinar o uso ou não da floculação, pois são inúmeros os fatores que influenciam esta escolha, além do tamanho das partículas, o meio filtrante, a taxa de filtração, a carga hidráulica, entre outros.

3.4.2 Filtração rápida descendente

A filtração é uma operação unitária que consiste na remoção de partículas suspensas e dos microrganismos presentes na água, a qual escoar por um meio poroso. A *American Water Works Association* (AWWA) (2011), recomenda a remoção de 2,0 Log, 1,0 Log e 2,5 Log para *Giardia*, Vírus e *Cryptosporidium*, respectivamente, na filtração direta descendente e também que em 95% das amostras mensais de turbidez do efluente dos filtros seja menor ou igual a 0,3 uT. Payment et al. (2000) monitoraram por um ano a turbidez da água filtrada de uma

ETA de ciclo completo nos Estados Unidos da América e os resultados mostraram que em 98% do tempo a turbidez foi menor que 0,2 uT, removendo vírus, *Giardia*, *Cryptosporidium*, colifagos (indicador de poluição fecal) e *Clostridium Perfringens*. Assim, quanto menor a turbidez da água filtrada, menor a quantidade de microrganismos presentes.

A filtração descendente em meio granular, em geral, ocorre por ação superficial e por profundidade, sendo ambas importantes para a remoção das partículas. Na filtração em profundidade, as impurezas são retidas ao longo do meio e na filtração superficial a retenção é significativa no topo do meio filtrante. De forma geral, Di Bernardo et al. (2017) recomendam que, independente da tecnologia usada antes do filtro, a filtração, preferencialmente, deve ocorrer por ação de profundidade para resultar em carreiras mais longas e produção efetiva de água filtrada.

A filtração em profundidade consiste em colmatar as partículas mais próximas às superfícies inicialmente. Quando as forças de cisalhamento, devido ao escoamento da água, superam as forças que aderem aos grãos do meio, as partículas se desprendem, ocupando camadas mais inferiores. Esse fenômeno ocorre até que todas as porções do meio filtrante sejam saturadas. Os mecanismos ligados à filtração em profundidade são o transporte, a aderência e o desprendimento (IVES, 1975). O transporte das impurezas até a superfície do meio granular é importante para que ocorra a aderência das mesmas no meio. Os mecanismos de transporte envolvem impacto inercial, ação hidrodinâmica, interceptação, difusão e sedimentação. Uma vez que as partículas foram transportadas para regiões próximas aos grãos, ocorre a aderência entre as partículas transportadas e os coletores. A eficiência da aderência depende da interação entre elas, que podem ser de origem física (forças eletrostáticas e de Van der Waals) e de origem química. O mecanismo da aderência explica o fato de que a filtração em meio granular é capaz de reter partículas menores que os vazios intergranulares. Ressalta-se, assim, a importância da coagulação química, sobretudo, na questão da aderência das partículas. A aplicação da filtração sem o uso de coagulante pode resultar em remoção de impurezas devido aos mecanismos de transporte, mas não aos de aderência. A coagulação química neutraliza as partículas da água, facilitando a aderência ao meio granular.

Após certo tempo de filtração, os espaços vazios intergranulares passam a ser ocupados pelas impurezas retidas. Considerando a vazão afluyente do filtro constante, a diminuição dos espaços intergranulares aumenta a velocidade intersticial e as forças de cisalhamento, causando o desprendimento das partículas. Segundo Di Bernardo et al. (2017), o desprendimento das partículas pode ser descrito por meio da teoria fenomenológica (que considera a variação da concentração de partículas) ou da teoria das trajetórias (que leva em conta os mecanismos de transporte).

Os mecanismos de transporte levam em conta a trajetória das partículas suspensas até as superfícies do material granular, detalhados a seguir:

- O primeiro mecanismo se refere à ação de coar, onde as partículas são retidas porque o seu tamanho é maior que os vazios intergranulares do leito de filtração;
- O movimento de difusão (Browniano) faz com que partículas, de dimensões da ordem de micrômetros, se dispersem nos poros do meio granular;
- Se as partículas forem maiores e com tendência a sedimentar, pode ocorrer o mecanismo da sedimentação, em que elas não seguem o fluxo do movimento e, conseqüentemente, sedimentam-se sobre o leito;
- Existe ainda o mecanismo de interceptação, em que partículas de diâmetros maiores se chocam com grãos de diâmetros menores;
- A ação hidrodinâmica ocorre com partículas que adquirem rotação em torno de si próprias, colidindo nas superfícies granulares, devido à gradientes de velocidade no interior dos poros;
- E o mecanismo da inércia se refere às partículas que tendem a desenvolver sua própria direção de deslocamento, colidindo com os grãos.

O desempenho da filtração depende da qualidade da água bruta, das características dos processos anteriores (tipo e dosagem de coagulante, uso de auxiliares de coagulação, existência da floculação), do meio filtrante e das características hidráulicas (DI BERNARDO E PAZ, 2008).

Os principais parâmetros utilizados para caracterizar o meio filtrante são (DI BERNARDO et al, 2017):

- Tamanho e distribuição do tamanho dos grãos, obtidos por ensaio de distribuição granulométrica;
- A partir da curva de distribuição granulométrica obtêm-se o tamanho dos grãos, sendo que o tamanho da partícula equivalente a 10% do material que passa pela peneira é chamado tamanho efetivo (D10), e D60 (quando são retidos 60% das partículas);
- Na relação entre D₆₀ e D₁₀ encontra-se um parâmetro importante, o coeficiente de uniformidade, que quanto mais próximo a 1, mais uniforme é o material do meio, o qual possibilita a filtração em profundidade e carreiras de filtração maiores;
- Geometria dos grãos, pois quanto mais irregular a forma, melhor o desempenho da filtração, apresentando, também, relação com a perda de carga no meio filtrante limpo, na velocidade mínima de fluidização e na expansão do leito durante a lavagem;
- Porosidade do meio, definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total do meio filtrante, podendo ser obtida pela relação entre as densidades real e aparente do leito.

O meio filtrante é constituído de areia, podendo ser combinado com antracito e/ou granada. Estão resumidas as principais características dos meios filtrantes para filtração direta descendente na Tabela 6.

Tabela 6 – Principais características do meio filtrante em filtração direta descendente

Características	Duas ou três camadas			Areia	Antracito
	Antracito	Areia	Granada		
Tamanho dos grãos (mm)	0,71 – 2,4	0,42 – 2,0	0,21 – 0,59	1,0 – 1,68	1,0 – 2,4
Tamanho efetivo (mm)	1,0 – 1,3	0,5 – 0,66	0,25	1,1 – 1,3	1,2 – 1,5
Coeficiente de uniformidade	<1,6	<1,6	<1,6	<1,25	<1,3
Espessura da camada (m)	0,5 – 0,8	0,2 -0,3	0,1 – 0,15	1,0 – 1,5	1,2 – 1,8

Fonte: Di Bernardo e Paz (2008)

A avaliação da filtração é feita com relação às condições do meio filtrante, o transpasse de impurezas e a eficiência da lavagem. O levantamento de dados para avaliar, de acordo com Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011), pode ser realizado nas próprias unidades filtrantes:

- Construção de curvas granulométricas do meio filtrante;
- Conhecimento das características do meio filtrante;
- Medição da perda de carga no meio em função da taxa de filtração; e
- Determinação das condições de lavagem do meio.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), a carreira de filtração tem uma etapa inicial, onde a água da lavagem anterior, ainda continua no filtro, e dessa forma água filtrada pode apresentar qualidade inferior. No decorrer da filtração, denominada pelo autor como etapa intermediária, há a produção de água filtrada com qualidade desejada e se a taxa de filtração permanecer constante, a velocidade intersticial aumenta, em função das partículas retidas nos poros do leito. O aumento da velocidade de escoamento pelos poros ocorre até que as partículas sejam arrastadas para camadas inferiores, até que saiam na água filtrada, etapa denominada transpasse. O ideal em uma carreira de filtração é que o transpasse ocorra a medida que a perda de carga no filtro atinja o valor máximo.

A perda de carga em meios granulares pode ser expressa em termos das características do meio granular (diâmetro das partículas, porosidade e esfericidade), das características do fluido que escoar pelo meio filtrante (densidade e viscosidade) e da velocidade de escoamento. Através da equação de Ergun, pode-se estimar a perda de carga (ΔP) em meios granulares uniformes com partículas esféricas, em qualquer tipo de escoamento, de acordo com a Equação 1.

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{\mu \cdot (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \cdot D_p^2} \cdot v + 1,75 \cdot \frac{\rho \cdot (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot D_p} \cdot v^2 \quad (1)$$

Em que, μ e ρ são, respectivamente, viscosidade (Pa.s) e densidade do fluido que escoar pelo meio granular (kg/m^3); ε é a porosidade do leito; D_p é o diâmetro médio da partícula esférica (m), L é o comprimento do leito (m) e v é a velocidade de escoamento do fluido (m/s). No caso de meios granulares compostos por areia, cuja

a esfericidade é diferente de 1, deve-se corrigir o D_p , multiplicando a esfericidade pelo diâmetro médio das partículas.

No entanto, no decorrer da filtração, ocorre retenção das partículas nos espaços intergranulares vazios, impedindo a passagem do fluido. Logo, ocorre aumento na perda de carga. Segundo Ives (1967, 1970), nesse caso, a perda de carga no leito é modificada e pode ser obtida pela Equação 2:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_0} = \frac{1}{(1 - m_1 \cdot \sigma)^{m_2}} \quad (2)$$

Na qual, ΔP_0 é a queda de pressão inicial do meio granular (Pa), σ é o parâmetro que relaciona o volume de partículas pelo volume do meio filtrante, chamado de depósito específico, e m_1 e m_2 são parâmetros a serem determinados experimentalmente.

A seleção da taxa de filtração deve ser feita a partir de pesquisas experimentais, pois está intimamente relacionada a outros fatores do processo, conforme explicitado anteriormente. Recomenda-se no entanto, que em filtração direta descendente as taxas de filtração estejam entre 200 e 600 m³/m².dia, conforme os autores indicados na Tabela 6.

Di Bernardo e Henriquez (1998) estudaram 6 unidades piloto de filtração direta descendente, com 6 taxas de filtração e 3 espessuras diferentes. Os resultados dos ensaios apontaram que quanto menor o tamanho dos grãos do leito filtrante, maior o tempo de duração da carreira de filtração, no entanto, requerem maior espessura da camada. Concluíram, também que, o aumento da taxa de filtração aumenta a probabilidade de ocorrer o traspasse quando comparado com mesma espessura do meio filtrante.

Em relação a composição dos grãos que compõe o leito de filtração, sabe-se que os materiais filtrantes mais finos removem mais partículas, no entanto, são sujeitos à colmatção dos filtros e à carreiras de filtração mais curtas.

Di Bernardo e Henriquez (1998), Di Bernardo (1993) e Mota Filho et al. (2003), obtiveram resultados semelhantes em relação à uniformidade do leito: leitos mais uniformes apresentaram carreiras de filtração maiores que em leitos estratificados (compostos de várias granulometrias ou composição de areia e antracito).

3.4.3 Lavagem dos filtros

A carreira de filtração deve ser interrompida quando ocorrer um dos parâmetros de encerramento: transpasse por turbidez ou quando ocorrer a igualdade entre a perda de carga total do sistema e a carga hidráulica disponível. Após o encerramento da carreira, os filtros devem ser lavados antes de entrarem novamente em operação novamente.

A lavagem dos filtros, geralmente, é feita utilizando água no sentido ascensional para promover a fluidização do meio e, dessa forma, com a expansão do meio filtrante, as impurezas retidas são liberadas.

Os principais métodos de lavagem, segundo AWWA (1999), são:

- Lavagem com água;
- Lavagem com água e sistema de lavagem superficial auxiliar;
- Lavagem com ar e posteriormente com água; e
- Lavagem com água e ar simultaneamente.

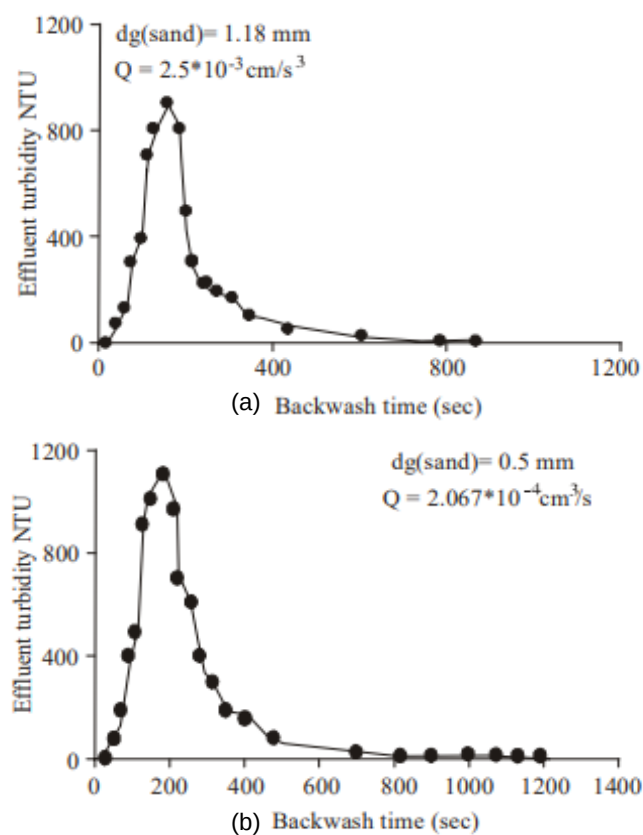
Durante a retrolavagem, o comportamento da turbidez da água de lavagem diminui com o aumento do tempo da operação, o que indica o desprendimento das partículas. Naseer, Alhail e Xi-Wu (2011) construíram um perfil típico de efluente de retrolavagem em função do tempo, conforme a Figura 5. Os autores afirmam que o pico da curva inicialmente alto e declínio rápido de turbidez são indicativos de lavagem de leito relativamente eficiente (a), enquanto que pico baixo e declínio lento na turbidez geralmente indica retrolavagem ineficiente (b).

Quando um fluido percola um leito poroso, em escoamento ascendente, perde pressão, porém não movimenta as partículas. A medida que a velocidade de escoamento aumenta, a perda de carga também aumenta, fato previsto pela equação de Ergun (Equação 1), e consequentemente, as partículas do leito começam a se movimentar. A fluidização ocorre quando o peso das partículas equilibra-se à perda de carga do escoamento, não havendo mais alteração na queda de pressão. Igualando as equações da força peso das partículas e da perda de carga, obtém-se a Equação 3:

$$\frac{\Delta P_{mf}}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g \quad (3)$$

Em que, ΔP_{mf} é a perda de carga na condição de mínima fluidização; L_{mf} é a altura do leito na condição de mínima fluidização; ε_{mf} é a porosidade do leito na condição de mínima fluidização; ρ_p é a densidade real da partícula (kg/m^3) e ρ_f é a densidade do fluido (kg/m^3).

Figura 5 – Perfil de turbidez da água na saída da retrolavagem



Fonte: Naseer, Alhail e Xi-Wu (2011)

Através da Equação 3, é possível a determinação da queda de pressão na condição de mínima fluidização, uma vez conhecidas a porosidade e a altura do leito na mínima fluidização. Para partículas maiores que $500 \mu\text{m}$, considera-se que a porosidade mínima de fluidização é igual à porosidade inicial do leito estático.

O aumento contínuo da velocidade, durante a fluidização, aumenta a expansão do leito. A expansão do leito pode ser analisada juntamente com o aumento da

porosidade, que pode chegar a 100%. Os parâmetros podem ser relacionados de acordo com a Equação 4:

$$\frac{L_{ex}}{L_0} = \frac{(1-\varepsilon_0)}{(1-\varepsilon_{ex})} \quad (4)$$

Na qual, L_0 e ε_0 representam, respectivamente, o comprimento e a porosidade iniciais do leito e L_{ex} e ε_{ex} representam comprimento e a porosidade após expansão do leito.

Quando o meio granular é composto de partículas com diferentes tamanhos ou diferentes composições, cada tipo específico de grão assume uma velocidade ascensional, e devido às diferenças de peso (massa específica) na fluidização das partículas ocorre a inversão da posição dos materiais, sendo que os materiais com maiores massas específicas e tamanho ficam dispostos no fundo do leito e os menores na parte superior.

3.4.4 Aplicação da filtração direta para produção de água de reúso

A utilização da tecnologia de filtração direta vem ganhando destaque com suas vantagens apresentadas. Casaril (2011) estudou a tecnologia de filtração direta descendente para tratar o esgoto doméstico para fins de reúso e concluiu que os parâmetros pré-estabelecidos pela NBR 13.969/97 para as águas classe I foram alcançados com o processo, sendo mais eficiente sem a etapa de floculação. No entanto, o autor propõe a otimização dos custos para a viabilização da produção de água residuária, principalmente, na quantidade de água necessária para a retrolavagem.

Junior et al. (2010) verificaram que com o uso de filtros de areia em fluxo ascendente para tratamento de lixiviado de aterro sanitário foram obtidas reduções de até 74% de DQO, 47% de DBO, 93% de cor e 90% de amônia.

Silva et al. (2012) utilizaram a tecnologia de dupla filtração seguida por filtro de carvão ativado granular (CAG) para tratar água de reservatório com baixa presença de matéria orgânica, comprovada pelas baixas concentrações de carbono orgânico total e cor verdadeira, e verificaram que, após a FDA o efluente apresentou cor aparente entre 1 e 14, enquanto que o efluente da FDD apresentou cor aparente

entre 1 a 5, e após o filtro de CAG, a cor aparente estava entre 1 e 2. Concluíram que os ensaios realizados foram suficientes para produzir água com as características obrigatórias segundo a norma de potabilidade de água (Portaria do Ministério da Saúde nº 2914, de 2011), e que, mesmo sem os processos de oxidação e adsorção em CAG, a DF é uma alternativa eficiente para produzir efluentes da estação com baixos valores de cor e de turbidez.

A partir do estudo em escala de laboratório com o efluente da ETE Caiçara, Marrengula (2016) concluiu que para produzir água de reúso é necessário o emprego de uma tecnologia complementar ao tratamento biológico, com destaque para os altos valores de DBO, sólidos dissolvidos e principalmente *Escherichia Coli*. Destacou, ainda que devidos aos valores elevados de COT, indicativo de matéria orgânica natural, que são reconhecidamente precursores da formação de subprodutos halogenados. Assim, foi selecionada a tecnologia de filtração direta, e os resultados do monitoramento apontam para a possibilidade de aplicação da tecnologia no Efluente da ETE Caiçara, considerando valores baixos de turbidez ($3,9 \text{ uT} \pm 1,8$) (MARRENGULA, 2016).

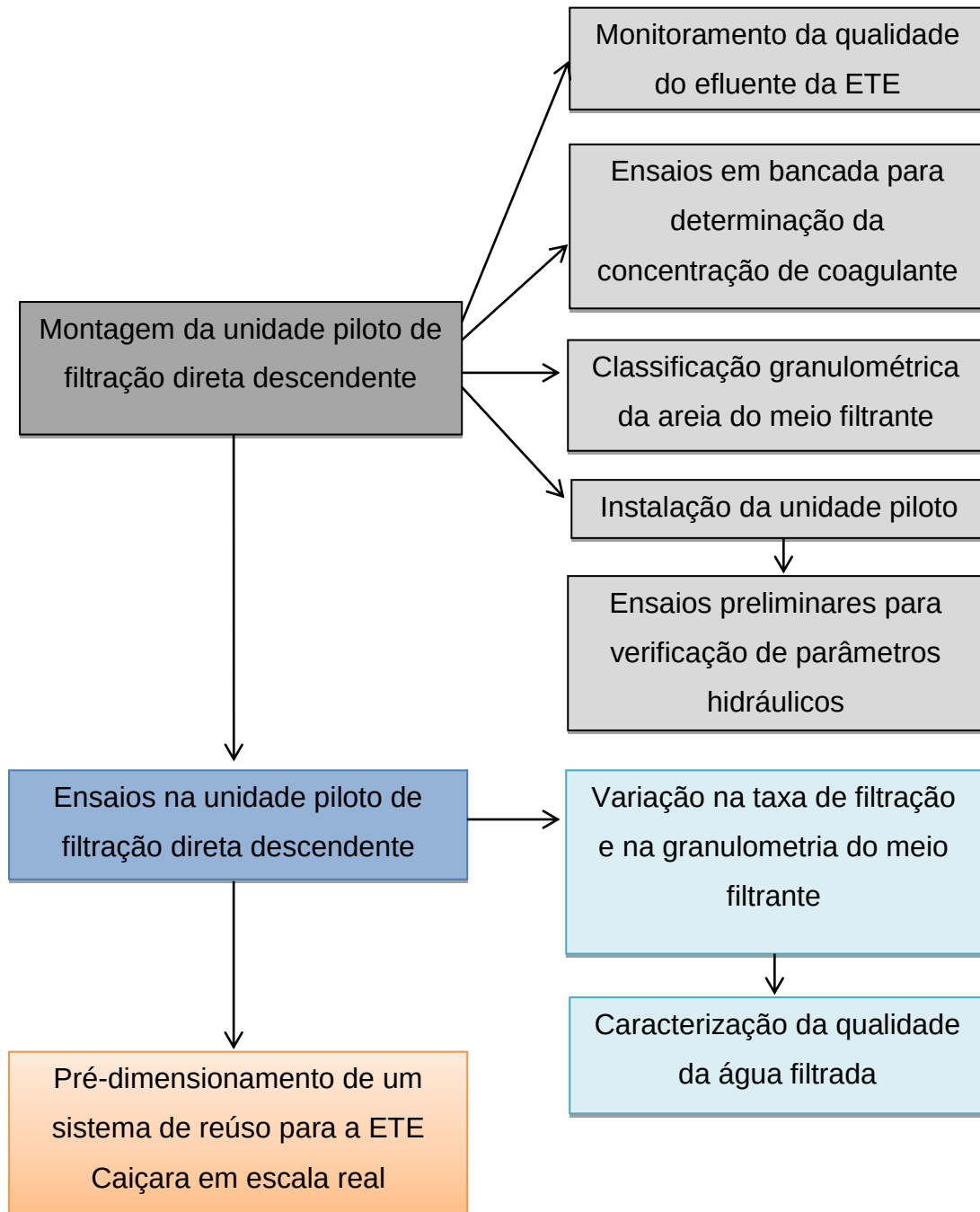
Tosetto (2005) analisou a eficiência do tratamento terciário de esgoto sanitário, visando o reúso para fins urbanos, utilizando a filtração direta descendente, com pré-floculação e posterior desinfecção com radiação ultravioleta. O efluente terciário produzido na instalação piloto, após a aplicação dos processos citados, apresentou concentração de ovos de helmintos e cistos de *Giardia* ainda com valores elevados, portanto, não foi considerado seguro, sob o aspecto de saúde pública, para aplicação em reúso urbano em razão do não atendimento às recomendações da Organização Mundial de Saúde. No entanto, em relação aos parâmetros turbidez, DBO, sólidos suspensos totais, Coliformes Totais e *E. coli* estavam de acordo com os padrões recomendados para reúso urbano.

Os desafios da implantação da água de reúso são grandes, pois além da dificuldade de aceitação pela população, a tecnologia utilizada para obtenção de uma água com boa qualidade e segura do ponto de vista sanitário deve romper o principal entrave: o custo da água produzida. Portanto, esse trabalho buscou a utilização de efluente contínuo de uma ETE para produção de água de reúso utilizando uma tecnologia simples e de baixo custo operacional.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho experimental foi desenvolvido de acordo com as etapas apresentadas na Figura 6, as quais serão detalhadas nos itens seguintes.

Figura 6 – Fluxograma das etapas experimentais do trabalho



Fonte: Autora, 2020

4.1 INSTALAÇÃO DA UNIDADE PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE

O sistema piloto foi instalado na estação de tratamento de esgoto Caiçara, localizada no município de Ribeirão Preto – São Paulo. O projeto da unidade piloto foi baseado na tecnologia de filtração direta descendente. As etapas que compreenderam a montagem da unidade piloto foram: monitoramento do efluente da ETE Caiçara para a confirmação da tecnologia aplicada, ensaios em bancada para determinação da dosagem de coagulação, seleção do meio filtrante e determinação das vazões de alimentação do sistema. Posteriormente, com a unidade instalada nas dependências da Caiçara, foram realizados ensaios preliminares para calibragem da piloto e obtenção de parâmetros fluidodinâmicos.

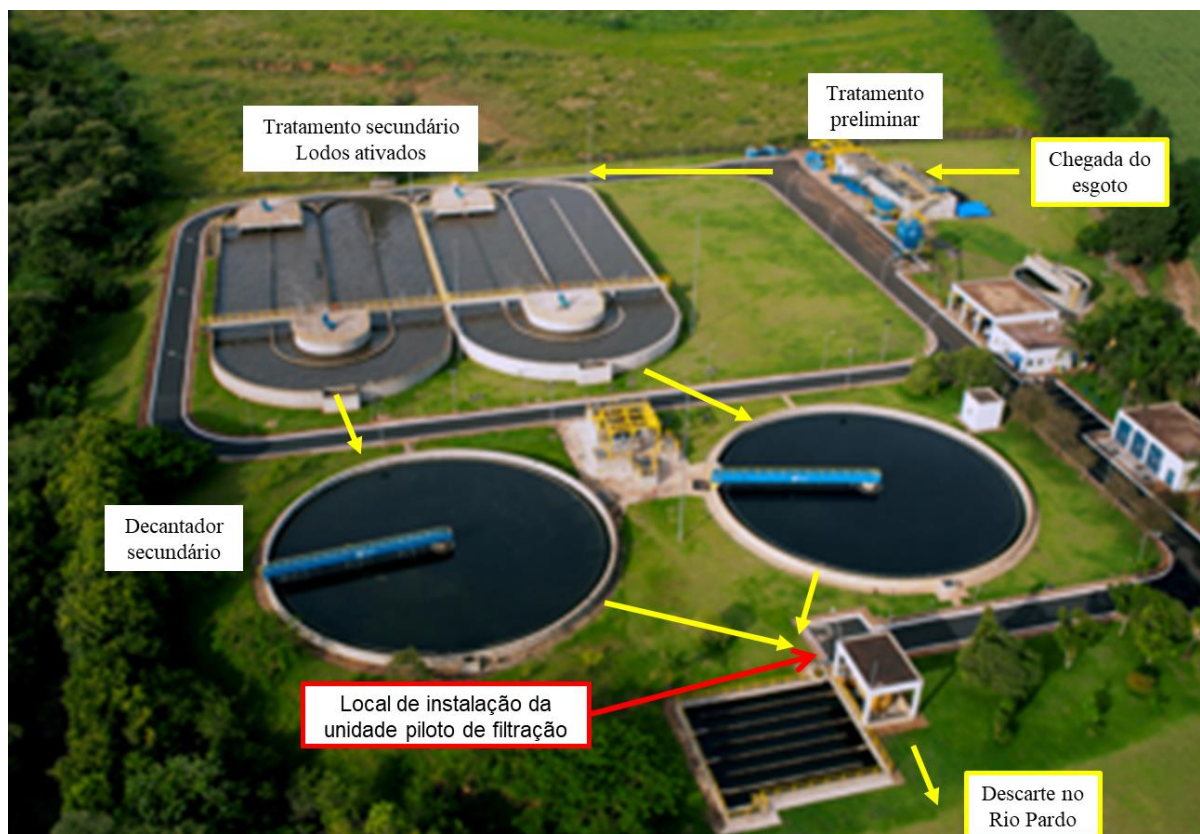
4.1.1 Caracterização da estação de tratamento de esgoto em estudo

O estudo foi realizado no município Ribeirão Preto, localizado na região nordeste do estado de São Paulo, possui área territorial de 650,916 km² e população estimada de 711.825 habitantes para o ano de 2020, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020). O município faz parte do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Pardo (CBHPARDO), sendo que 100% do abastecimento é por captação subterrânea no Aquífero Guarani, contendo cerca de 100 poços artesianos legalizados e autorizados. O sistema de abastecimento público é administrado pelo Departamento de Água e Esgoto de Ribeirão Preto (DAERP), com taxa de consumo per capita de 225,74 L.hab⁻¹.d⁻¹, e índice de perdas de água tratada de 55%, segundo indicadores do SNIS (2020).

À coleta e o tratamento de esgotos no município é administrada por uma concessionária privada, a Ambient. Há atualmente duas estações: ETE Ribeirão Preto, que atende 85% da população, e os demais 15% são atendidos pela ETE Caiçara, criada em 2000. A unidade piloto foi instalada na ETE Caiçara, responsável pela coleta e tratamento de esgoto doméstico proveniente dos bairros da zona leste da cidade e atende a 120.000 habitantes. A área de Caiçara é caracterizada pelo Plano Diretor atual como zona de uso especial, pois é uma área de afloramento do Aquífero Guarani. O local de instalação do sistema piloto, apontado na Figura 7, está situado próximo à câmara de saída do efluente tratado a nível secundário da ETE.

O tratamento de esgoto na ETE Caiçara é realizado por processo aeróbico de lodos ativados através de dois módulos do tipo Carrossel, com volume médio de esgoto tratado de 18.000 m³ por dia. O esgoto coletado que chega à ETE é encaminhado ao pré-tratamento, composto pelas fases de remoção de sólidos por gradeamento grosso e fino, desarenador e desgordurador, para que a areia sedimente e a gordura seja removida. O esgoto isento de sólidos, areia e gordura é enviado ao tratamento biológico, um reator aerado com microrganismos que degradam a carga orgânica do esgoto. O efluente do reator é encaminhado ao decantador secundário, onde uma parte do lodo retorna ao reator e a outra é descartada. O lodo é desidratado antes de ser enviado para disposição final ambientalmente correta. Existe ainda uma câmara de cloração por medida de segurança, caso haja necessidade de desinfecção, e então é lançado no Rio Pardo.

Figura 7 – Vista aérea da ETE Caiçara, em Ribeirão Preto



Fonte: Autora, 2020

4.1.2 Monitoramento da qualidade do efluente da estação de tratamento de esgoto Caiçara

A seleção da tecnologia de tratamento para a produção de água é baseada no conhecimento da qualidade da água a ser tratada, dentro dos padrões exigidos ou requeridos. Assim, utilizou-se da mesma metodologia para a produção da água de reúso.

Estudos anteriores sobre a qualidade do efluente da ETE Caiçara (MARRENGULA, 2016 e DIAS, 2018) indicavam a possibilidade da aplicação da tecnologia de filtração direta, devido aos baixos valores de turbidez do efluente da ETE observados. Para garantia da eficiência da tecnologia a ser aplicada e que as características desse efluente não se alteraram ao longo dos anos, o procedimento experimental começou com o monitoramento da qualidade do esgoto tratado da Caiçara. Foram realizadas análises sobre a qualidade do efluente da ETE durante o ano de 2018 e 2019. Os parâmetros avaliados estão apresentados na Tabela 7, bem como o método analítico, o equipamento e o seu limite de detecção.

Tabela 7 – Parâmetros, metodologias, equipamentos e limite de detecção dos métodos (LDM)

Parâmetro	Unidade	Método	Equipamento	LDM
Carbono orgânico total	mg/L C	Combustão Infravermelho	TOC- Shimatzu	0,5
Cor aparente	uH	Espectrofotométrico	Espectrofotômetro, marca Hach, modelo DR/2000	1
DBO 5 dias a 20°C	mg/L O ₂	Potenciométrico	Oxímetro, modelo DM4 Marca Digimed e incubadora 20°C, MODELO 347-G FANEM	1
DQO	mg/L O ₂	Espectrofotométrico	Espectrofotômetro visível, modelo DR/2000, marca Hach	10
pH	-	Eletrométrico	pH-metro, marca Orion modelo 230	0,01
Sólidos Totais	mg/L	Gravimétrico	Balança analítica marca Sartorius	1
Turbidez	uT	Neftelométrico	Turbidímetro, marca HACH, modelo 2100P	0,1
<i>Escherichia Coli</i>	NMP/100mL	Tubos Múltiplos	Incubadora Fanem modelo 002Cb	5

Fonte: APHA (2005)

Entre as etapas de caracterização do efluente e realização dos ensaios na ETE, ao todo, foram realizadas 20 coletas da água de estudo, com volume de 20 L cada, Figura 8. O efluente tratado foi coletado em reservatórios limpos, sempre no período da manhã, e fechado, adequadamente, para ser transportado ao Laboratório de Recursos Hídricos da Universidade de Ribeirão Preto (UNAERP), onde foram realizadas as análises apresentadas na Tabela 7.

Figura 8 – Ponto de coleta para caracterização dos ensaios e captação do efluente da ETE para realização dos ensaios

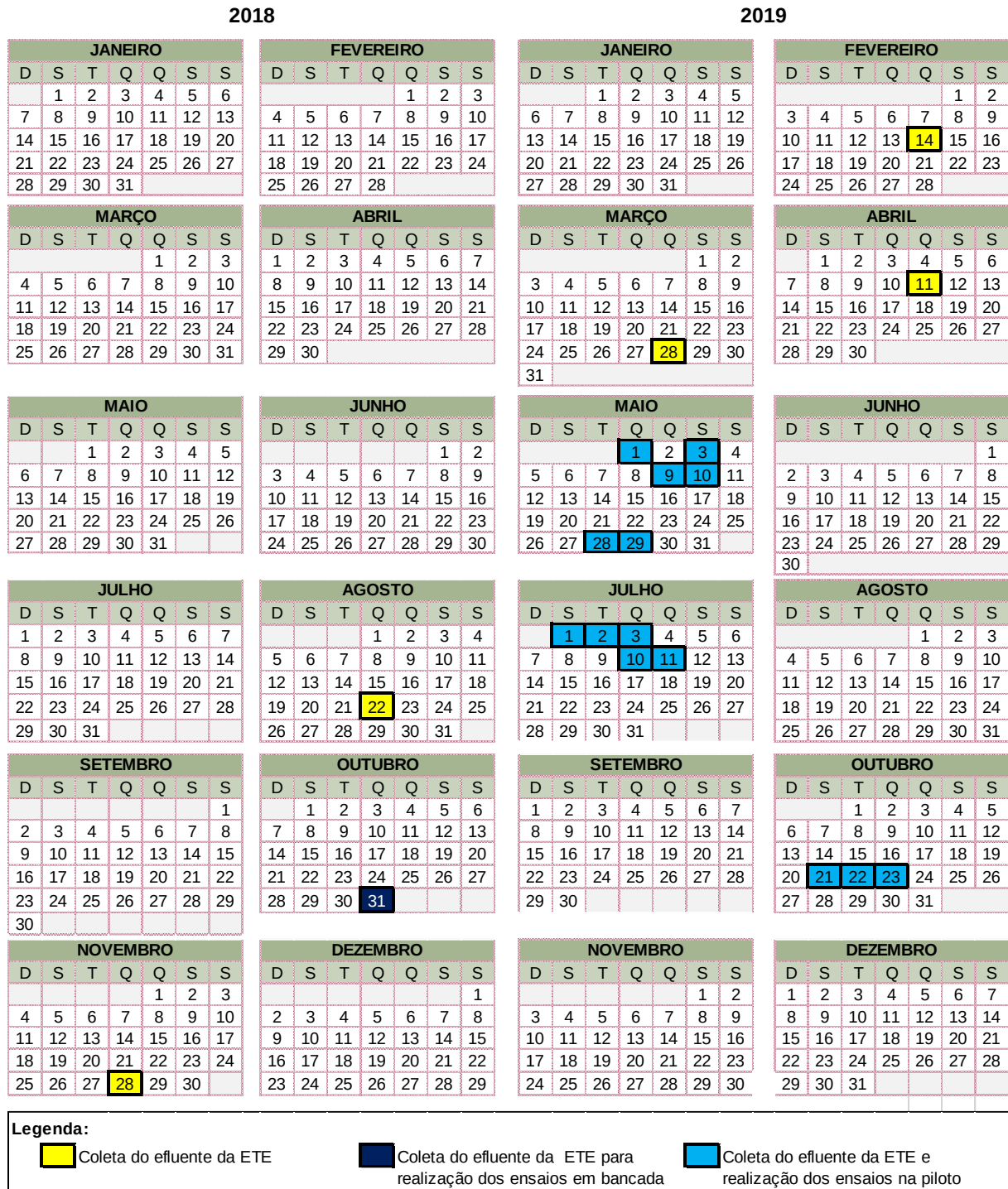


Fon

te: Autora, 2020

Na Figura 9 estão destacadas as datas das 20 coletas, sendo que a partir do dia 01/05/2019 correspondem ao período de execução dos ensaios na unidade piloto na ETE Caiçara. O critério das datas de realização das coletas de maneira aleatória foi proposital, com o intuito de verificar a ocorrência de variações nas características do efluente tratado ao longo do ano.

Figura 9 – Data das coletas de efluente secundário da ETE Caiçara para caracterização, nos anos de 2018 e 2019



Fonte: Autora, 2020

4.1.3 Ensaios em bancada para a definição da dosagem ótima de coagulante

Concomitante ao monitoramento do efluente da ETE, foram realizados os ensaios em bancada com a finalidade de construir o diagrama de coagulação e selecionar a dosagem ótima de coagulante e o pH de coagulação. Os ensaios foram realizados no equipamento jarteste, onde foi acoplado o kit de filtros de areia de laboratório (Figura 10).

Figura 10 – Equipamento utilizado nos ensaios em bancada: jarteste e filtros de areia de laboratório



Fonte: Autora, 2020

O efluente da ETE Caiçara foi coletado em 20 tambores de 20 L, cada um, e levados ao Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP. O efluente foi armazenado em um recipiente com tampa, capacidade de 500 L, e mantido à temperatura ambiente. A coleta foi realizada em outubro de 2018, cuja data foi destacada na Figura 9, e os ensaios foram realizados no período de 15 dias, após a coleta, para que não ocorresse alteração das características do efluente.

O jarteste é um equipamento composto por seis jarros, com capacidade de 2 L cada, providos de eixos com paletas e rotações programáveis. Os procedimentos utilizados na realização dos ensaios estão descritos a seguir:

- a) Ligou e programou-se o equipamento com as condições operacionais do jarreste fixadas para um tempo de mistura rápida de 10 segundos e gradiente de velocidade de mistura rápida de 1000 s^{-1} ;
- b) Para garantir a homogeneidade da água bruta, foi adicionado, aleatoriamente, em porções pequenas e iguais, a água a ser tratada, em cada jarro, até os 6 jarros atingirem o volume de 2 L;
- c) Dosou-se o alcalinizante, quando necessário a correção do pH, e o coagulante com auxílio de pipeta volumétrica nas cubetas dos suportes de dosagem simultânea;
- d) O programa selecionado e o cronômetro foram acionados simultaneamente;
- e) Adicionou-se a solução de alcalinizante nos jarros para correção de pH;
- f) Após 60 segundos do início do ensaio, as paletas atingiram a rotação programada para o gradiente de mistura rápida e adicionou-se coagulante;
- g) Após os 10 segundos de mistura rápida, foram coletadas as amostras dos jarros para a leitura do pH de coagulação e, em seguida, a rotação das paletas diminuiu até pararem completamente;
- h) O equipamento foi desligado e iniciou-se a filtração nos filtros de laboratório, com taxa de filtração de aproximadamente $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$;
- i) Após 20 minutos a coleta de amostras da água filtrada foi iniciada, para garantir a eliminação da água de lavagem dos filtros de laboratório;
- j) Os parâmetros medidos na água filtrada foram turbidez e cor remanescentes (equipamentos apresentados na Tabela 7).

Na Tabela 8 foram resumidas as condições experimentais e os parâmetros de controle durante a realização dos ensaios em jarreste.

O coagulante químico utilizado foi o policloreto de alumínio (PAC), seguindo as recomendações de ensaios preliminares realizados por Marrengula (2016), que investigou alguns produtos químicos na coagulação, sendo o PAC aquele que apresentou melhor resultado, em relação à remoção de partículas e à dosagem utilizada. A solução de PAC foi preparada pesando 2,0 g do coagulante e diluído em 1,0 L de água destilada. Para a correção de pH foi utilizada uma solução de 10 g/L de hidróxido de sódio (NaOH – reagente grau analítico).

Tabela 8 – Condições experimentais dos ensaios em jarreste e parâmetros de controle

Tempo de ensaio	Procedimento	Condições experimentais	Parâmetros de controle
0	Início do ensaio. Adição do alcalinizante.	Dosagem de alcalinizante variava em cada ensaio.	-
1 min	Início da coagulação. Adição do coagulante.	Gradiente de mistura rápida – 1000 s^{-1} Tempo de mistura rápida – 10s	
1 min 10 s	Fim da coagulação.	Rotação das paletas diminuem até parar.	pH de coagulação
2 min	Início da filtração	Taxa de filtração - $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$	-
22 min	Coleta de água filtrada	-	Turbidez água filtrada Cor aparente água filtrada

Fonte: Autora, 2020

As dimensões dos filtros de areia de laboratório são 19 mm de diâmetro interno e 40 cm de altura. Eles contêm areia caracterizada com grãos medindo de 0,59 a 1,0 mm, selecionada conforme Di Bernardo et al (2011). A areia foi preparada após classificação granulométrica em peneiras e composta por 10% em massa de areia de 0,59 mm a 0,71 mm, 50% em massa de areia de 0,71 mm a 0,84 mm e 40% em massa de areia de 0,84 mm a 1,0 mm.

A partir dos dados coletados foram construídos dois diagramas de coagulação, relacionando o pH de coagulação com a concentração de coagulante, em um gráfico tipo bolha. No tamanho das bolhas foram inseridos, em um dos diagramas, os valores de turbidez da água filtrada e, no outro, a cor aparente da água filtrada. Para que os diagramas abrangessem uma ampla faixa de dados, foram utilizadas concentrações de 5 a 30 mg/L de PAC, variando de 5 em 5 mg/L e faixa de pH de 7,0 a 9,0, ajustados com alcalinizante. Assim, foram realizados 10 ensaios no jarreste, sendo que, em cada ensaio, cada um dos 6 jarros representavam uma condição de coagulação.

4.1.4 Seleção e caracterização do meio filtrante

Com a finalidade de verificar a influência da retenção de partículas e da perda de carga no meio granular, foram selecionados dois leitos de filtração distintos. Os meios granulares variaram de acordo com o diâmetro médio das partículas e, conseqüentemente, a porosidade do leito.

A seleção e a caracterização do meio filtrante foi iniciada com peneiramento de areia grossa comercial, em mesa vibratória, e com peneiras padronizadas (Figura 11). Foram utilizadas as peneiras, de acordo com o padrão ASTM, números 14, 16, 18, 20, 25 e 30, correspondentes às aberturas, em milímetros de: 1,40; 1,18; 1,00; 0,85; 0,71; e 0,6, respectivamente.

Figura 11 – Série de peneiras utilizadas para separação granulométrica dos meios granulares



Fonte: Autora, 2020

Após a separação granulométrica, nos tamanhos de partículas das peneira utilizadas, foram recolhidas as porções de grãos retidas entre as peneiras de abertura 0,85 e 1,00 mm, para compor o meio granular 1 e entre as peneiras de abertura 1,00 e 1,18 mm para compor o meio granular 2. Dessa forma, os leitos de filtração foram constituídos de areia praticamente uniforme, propiciando coeficientes de uniformidade próximos a 1 e diâmetros médios próximos a 1,0 mm. O critério de seleção foi baseado em recomendações de autores que concluíram que leitos mais

uniformes apresentaram carreiras de filtração maiores que em leitos estratificados (DI BERNARDO e HENRIQUEZ 1998; DI BERNARDO (1993) e MOTA FILHO et al., 2003) e nas recomendações apresentadas na Tabela 6, cujos grãos de areia devem apresentar diâmetros médios de 1,00 a 1,68 mm.

Para cada meio granular foi construída a curva granulométrica, relacionando o diâmetro médio da partícula (D_{pi}) pela fração mássica acumulada (W_i acumulada). A partir da curva granulométrica, foi possível encontrar o diâmetro efetivo D_{10} que corresponde à abertura da peneira para a qual se tem 10% em peso total de todas as partículas menores que ele, e o diâmetro D_{60} , correspondente a 60% das partículas em peso. A razão entre D_{60} e D_{10} representa um importante parâmetro dos meios granulares, e indica a uniformidade do meio granular, denominado coeficiente de uniformidade que quanto mais próximo a 1, mais uniforme são as partículas que compõe o meio.

O diâmetro médio de partícula, considerado neste trabalho foi o diâmetro médio de Sauter (D_{vs}), calculado pela Equação 5, que leva em conta o tamanho das partículas e a fração mássica correspondente:

$$D_{vs} = \frac{1}{\sum \frac{w_i}{D_{pi}}} \quad (5)$$

A densidade aparente da areia ($\rho_{aparente}$) foi medida por massa e volume em proveta. A densidade absoluta ($\rho_{absoluta}$) foi medida por picnometria de água. A porosidade do leito (ϵ) fixo foi calculada pela relação entre as densidades, representada pela Equação 6:

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_{absoluta}}{\rho_{aparente}} \quad (6)$$

Como camada suporte foi adotada a pedra brita zero, onde as partículas variam de 4,8 mm a 9,5 mm. A concepção desta camada foi adotada para, além de servir como suporte do meio granular, auxiliar o processo de lavagem com água, sem que houvesse a fluidização dessas partículas e a consequente mistura com a camada filtrante.

O preenchimento e preparo do meio filtrante seguiu as seguintes etapas (Figura 12):

- a) Preenchimento e acomodação da brita, de modo que ocupasse até a marca de 5 cm de altura;
- b) Pesagem e acomodação do meio granular, de modo que a areia ocupasse até a marca de 45 cm de altura; e
- c) Lavagem com água no sentido ascensional com leves batidas no filtro, para uma melhor acomodação das partículas e verificação da altura do leito de filtração, visando, também, a eliminação de bolhas de ar no interior do meio, para evitar a formação de caminhos preferenciais durante a filtração.

Figura 12 – Montagem do filtro de areia com meio suporte composto por brita e leito de areia



Fonte: Autora, 2020

Dessa forma, conforme apresentado na Figura 12, o leito apresentou altura de 40 cm, devido às limitações da coluna de filtração, a qual é justificada no próximo tópico.

4.1.5 Montagem da unidade piloto de filtração direta descendente

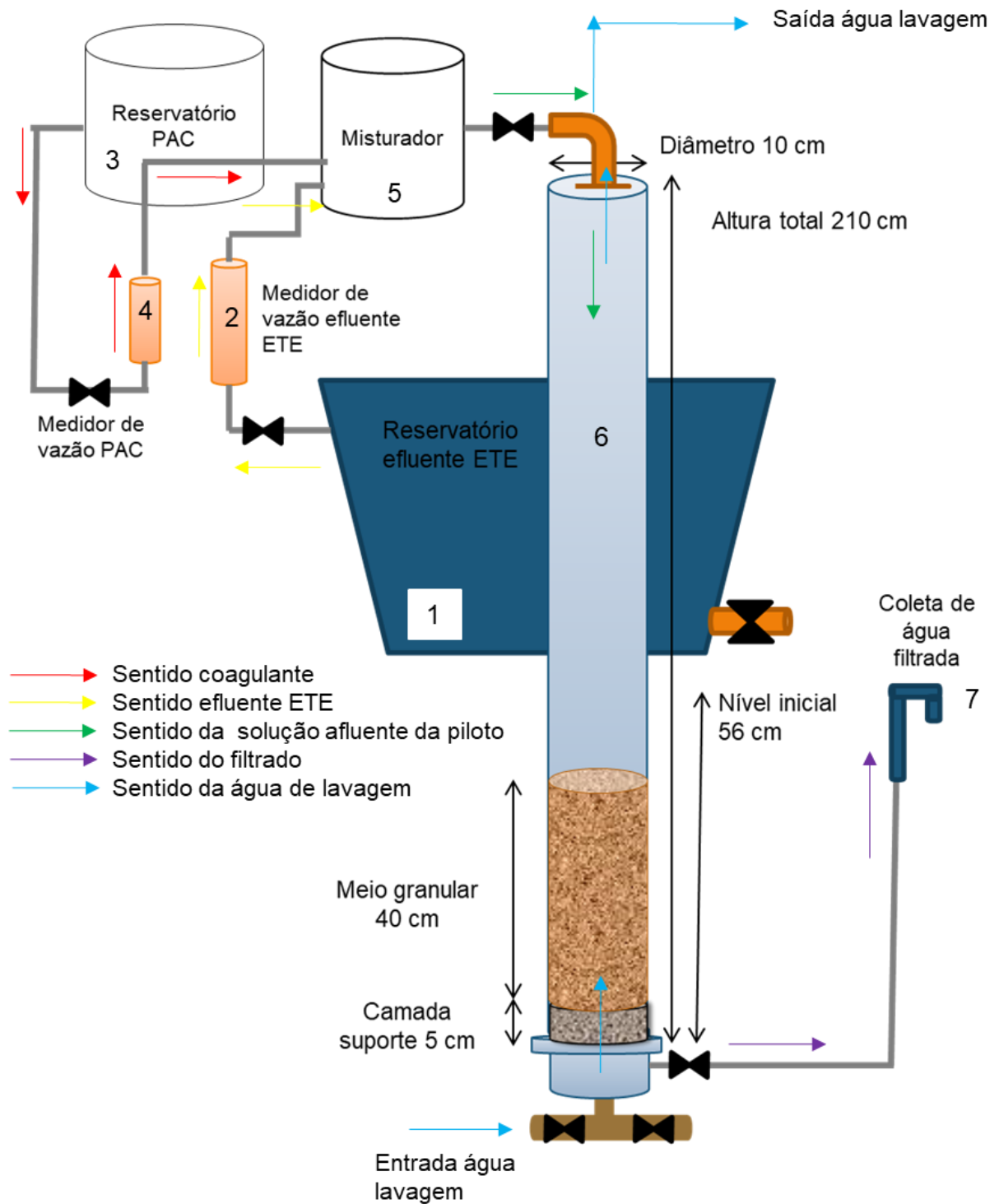
A montagem da instalação piloto foi baseada na tecnologia de filtração direta para produção de água de reúso (Figura 13). A unidade piloto era composta de:

1. Reservatório de polietileno com capacidade de 200 L para o armazenamento do efluente da ETE, adaptado com sistema de drenagem na parte inferior da caixa e bomba para aquário Sun Sun Submersa Jp-024 de vazão 1200 L/h para deslocamento do efluente para o sistema de filtração;
2. Rotâmetro de capacidade de até 200 L/h para controle e medição da vazão do afluente da unidade piloto (efluente da ETE);
3. Reservatório de polipropileno com capacidade de 30 L para o armazenamento do coagulante e bomba para aquário Sun Sun Submersa Hj-111 de vazão 200 L/h para deslocamento do coagulante para o tanque de agitação;
4. Rotâmetro de capacidade de até 6 L/h para controle e medição da vazão coagulante;
5. Tanque de polipropileno com capacidade de 15 L, para simular a mistura rápida e bomba submersa A-100 Vigo Ar para garantir a agitação entre a solução e o coagulante;
6. Filtro de acrílico com 10 cm de diâmetro e altura total de 210 cm, com fita métrica graduada fixada na parte externa da coluna, contendo suporte para entrada pelo topo da coluna e suportes na base da coluna para o sistema de drenagem, para a água de lavagem do filtro e para a saída da água filtrada; e
7. Suporte para coleta da água filtrada.

O sistema piloto foi montado em um suporte de ferro, com rodas na base, para facilitar a locomoção, e era composto de dois patamares que serviam de apoio para os tanques de armazenamento. No patamar inferior foi colocado o reservatório do efluente e, no superior, foram colocados os tanques de coagulante e de agitação.

No tanque de armazenamento de efluente foi instalado uma válvula boia de vazão total para garantir que o sistema fosse continuamente alimentado com efluente da ETE. Sendo assim, não foi necessária capacidade maior que 200 L para o reservatório. O tamanho dos tanques de coagulante e de mistura rápida estavam de acordo com a vazão máxima de estudo, correspondente a maior taxa de filtração utilizada neste trabalho, que corresponde a 500 m³/m².dia. Foram instaladas válvulas de ajuste de vazão na entrada dos rotômetros para garantir a vazão requerida nos ensaios.

Figura 13 – Esquema da unidade piloto de filtração direta descendente para produção de reúso de água não potável



Fonte: Autora, 2020

No suporte de saída da água filtrada foi instalada uma válvula esfera para permitir a passagem da água durante a filtração ou interromper o seu fluxo durante as lavagens dos filtros. Na tubulação de entrada da água de lavagem, também na

parte inferior da coluna, foi instalado um registro para controle de vazão da água e da expansão do leito de areia durante a retrolavagem.

A foto da instalação piloto após montada e instalada na ETE Caiçara está apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Imagem da unidade piloto de filtração direta descendente na Estação de Tratamento de Esgoto Caiçara



Fonte: Autora, 2020

A relação entre o diâmetro da coluna e o diâmetro das partículas que compõem o leito obedeceu às características especificadas na literatura que, apesar da pequena relevância do efeito de parede no desempenho dos filtros-piloto, utilizou-se a recomendação de Lang et al. (1993), superior a 50, plenamente atendida nesta pesquisa.

Como o comprimento total da coluna era de 2,10 m, devido à operacionalidade do sistema piloto na ETE, cujo local de instalação limitou a altura da unidade piloto, foi utilizado um leito de 40 cm, com 5 cm de camada suporte. Apesar dos autores consultados (DI BERNARDO E PAZ, 2008) indicarem leitos de 1,0 a 1,5 m de altura, de acordo com a Tabela 6 (com parâmetros operacionais do meio filtrante), foram encontrados estudos que utilizaram meios filtrantes menores que 1,0 m, obtendo resultados satisfatórios (TOSETTO, 2005; DI BERNARDO e MATSUMOTO, 1987). Dessa forma, optou-se por essa configuração do leito para que a carga hidráulica disponível fosse de 1,50 m, resultando em carreiras de filtração maiores.

4.1.6 Cálculo das vazões de alimentação da unidade piloto

Segundo as recomendações de Di Bernardo et al (2011), a filtração direta deve estar entre as taxas de 120 a 600 m³/m².dia. Neste trabalho, adotaram-se três diferentes taxas: mínima de 120 m³/m².dia, média de 360 m³/m².dia e máxima de 500 m³/m².dia. A taxa máxima foi escolhida com esse valor devido a limitações dos rotômetros utilizados para medir vazão do PAC e do efluente que alimentava o sistema piloto.

Com a área da seção transversal da coluna (A), igual a 78,5 cm², foram calculadas as vazões referentes a cada taxa de filtração estudada (TF) (Equação 7). De acordo com a dosagem de PAC obtida nos ensaios em bancada, calculou-se, pela Equação 8, utilizando uma vazão mínima de PAC de 1L/h, a concentração de PAC resultante no reservatório da piloto.

$$Q_{\text{total}} = TF \cdot A \quad (7)$$

$$Q_{\text{total}} \cdot C_{\text{coag}} = Q_{\text{PAC}} C_{\text{coag reservatório}} \quad (8)$$

Em que,

Q_{total} é a vazão do sistema total (L/h), definida pela Equação 7;

C_{coag} é a dosagem do coagulante obtida através do diagrama de coagulação (mg/L);

Q_{coag} é a vazão do coagulante (L/h);

$C_{\text{coag reservatório}}$ é a concentração de PAC que deve ser usada no reservatório para resultar na concentração determinada (C_{coag}) (mg/L).

Calculada a concentração do coagulante no reservatório, pela mesma equação (Equação 8), foi possível o cálculo das vazões de coagulante nas demais taxas, mantendo os valores de C_{coag} , $C_{\text{coag reservatório}}$ e Q_{total} que foram obtidas para as respectivas taxas de filtração.

A vazão em que o sistema foi alimentado com o efluente ($Q_{\text{ef piloto}}$) da ETE foi obtida através da Equação 9:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{coag}} + Q_{\text{ef piloto}} \quad (9)$$

4.1.7 Pré-operação da instalação piloto para verificação dos parâmetros hidráulicos do meio filtrante

Os ensaios preliminares foram realizados com meio filtrante limpo e água do poço da ETE Caiçara para a verificação dos parâmetros hidráulicos de filtração. Foi investigada a perda de carga no meio granular em função da vazão de alimentação do sistema e a relação entre a expansão do leito e a velocidade de fluidização do leito granular, com o respectivo aumento da porosidade do leito.

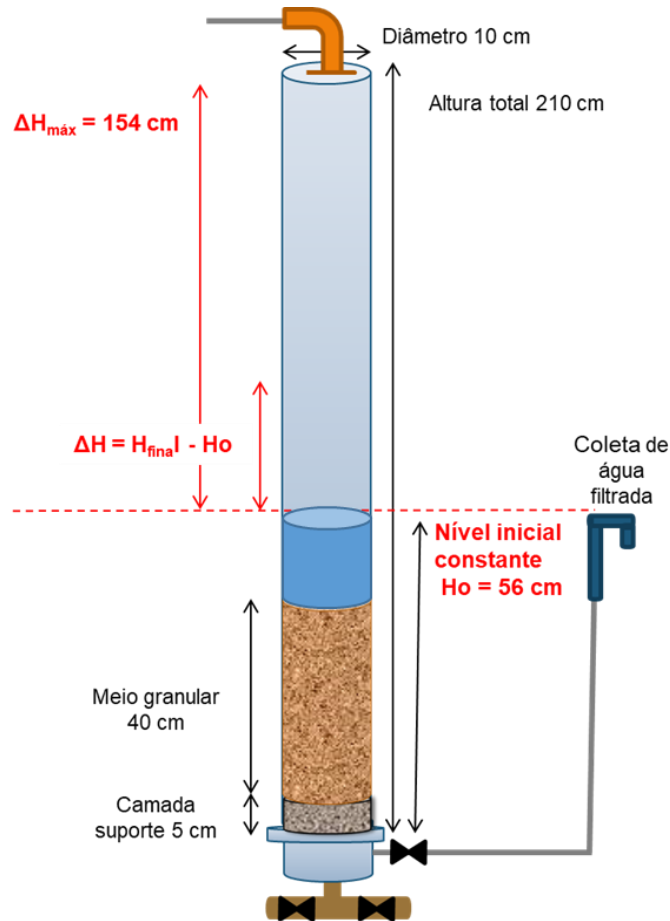
A perda de carga em meios granulares pode ser obtida teoricamente pela equação de Ergun, Equação 1, onde a densidade e a viscosidade da água foram calculadas para a temperatura média do efluente durante a realização dos ensaios. Foram realizados ensaios, também, variando as vazões de alimentação de 20 a 200 L/h, totalizado em 10 pontos, e para cada vazão foi medida a altura de líquido. Adotou-se um tempo de 15 minutos para a estabilização do nível.

A perda de carga experimental pode ser obtida através da força de pressão que a água exerce sobre o leito. Assim, pela Equação 10 foram calculadas as respectivas quedas de pressão. A variação do nível de água foi medida através da diferença de nível inicial (Figura 15) e o nível que estabilizou após cada vazão (Equação 11).

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot \Delta H \quad (10)$$

$$\Delta H = H_{\text{final}} - H_o \quad (11)$$

Figura 15 – Esquema da coluna de filtração e da determinação da variação de líquido durante a operação da unidade piloto



Fonte: Autora, 2020

Para a avaliação da perda de carga em meios granulares foram construídas as curvas de queda de pressão por velocidade de escoamento, calculadas conhecidas a vazão de alimentação e a área da coluna (78,5 cm²). Os valores de queda foram calculados teoricamente pela equação de Ergun (Equação 1) e comparados aos obtidos experimentalmente. A qualidade dos ensaios foi verificada, também, através dos erros experimentais em porcentagem, calculadas pela Equação 12:

$$E = \frac{|(\Delta P_{\text{teórico}} - \Delta P_{\text{experimental}})|}{\Delta P_{\text{teórico}}} \times 100 \quad (12)$$

Nos ensaios de fluidização do leito foi conectada uma mangueira para inserção de água no sentido ascendente. Dessa forma, a saída do sistema era na parte

superior da coluna, cuja vazão foi calculada pelo volume dividido por tempo, com o uso de proveta, para coletar o volume e de um certo tempo, obtido por um cronômetro. Foram coletados os dados da altura do leito expandido em função da vazão de alimentação do sistema de filtração. Foram plotados em curvas relacionando altura do leito expandido com velocidade de fluidização e curvas relacionando o aumento da porosidade do leito, calculada pela Equação 4, para cada velocidade ascensional.

4.2 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE NA INSTALAÇÃO PILOTO

Após a montagem e instalação da unidade piloto e selecionados os parâmetros de operação referentes à coagulação, às vazões de alimentação do sistema, à granulometria do leito e à lavagem do meio granular, foram realizados ensaios na unidade piloto de filtração com duas finalidades: determinação do tempo de carreira de filtração e caracterização da água produzida, descritas nos itens a seguir.

4.2.1 Descrição dos ensaios de filtração direta descendente no sistema piloto

Na Tabela 9 estão descritos os 24 ensaios realizados na unidade piloto de filtração direta descendente em areia, que variavam taxa de filtração (120, 360 e 500 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$), meio granular (1 e 2) e as etapas a que o afluente do piloto foram submetidas – coagulação seguida da filtração direta descendente (CO + FDD) e filtração sem a etapa de coagulação química (FDD).

Os ensaios seguiram a seguinte metodologia:

- a) No início de cada ensaio o filtro estava limpo, de forma que a turbidez da água de lavagem fosse inferior a 0,5 uT, que o nível de água estivesse acima do leito de filtração, de acordo com a Figura 15, e que as partículas devidamente acomodadas para evitar a formação de caminhos preferenciais, com leves batidas na coluna;
- b) O afluente do sistema era bombeado para o sistema com o ajuste da vazão pelo rotâmetro;
- c) Simultaneamente, acionava-se a bomba no reservatório de PAC, com a vazão regulada pelo respectivo rotâmetro, a qual alimentava o tanque de mistura;

- d) A solução afluenta e o coagulante eram misturados no tanque de mistura rápida, com o acionamento de uma bomba submersa e, posteriormente, seguiam para alimentar a coluna de filtração;
- e) O cronômetro iniciava assim que a solução alimentava o filtro;
- f) O registro de saída para filtração, no fundo da coluna, era aberto;
- g) A cada intervalo de tempo, especificados a seguir, a água filtrada e o efluente do reservatório eram coletados para a leitura da turbidez; era também anotada a altura do nível da água, para o cálculo da perda de carga da filtração;
- h) Os ensaios eram finalizados no momento em que fossem atingidos um dos critérios para encerramento de carreira, detalhado no item em sequência; e
- i) O sistema era desligado e iniciava-se uma nova lavagem do filtro.

Tabela 9 – Descrição dos ensaios realizados na unidade piloto de filtração direta descendente

Ensaio	Taxa (m ³ /m ² .dia)	Areia ¹	Etapas
1	120	1	CO + FDD ²
2	120	1	CO + FDD
3	120	1	CO + FDD
4	120	1	FDD ³
5	360	1	CO + FDD
6	360	1	CO + FDD
7	360	1	CO + FDD
8	360	1	FDD
9	500	1	CO + FDD
10	500	1	CO + FDD
11	500	1	CO + FDD
12	500	1	FDD
13	120	2	CO + FDD
14	120	2	CO + FDD
15	120	2	CO + FDD
16	120	2	FDD
17	360	2	CO + FDD
18	360	2	CO + FDD
19	360	2	CO + FDD
20	360	2	FDD
21	500	2	CO + FDD
22	500	2	CO + FDD
23	500	2	CO + FDD
24	500	2	FDD

¹ Meio granular 1: grãos médios 0,93 mm e meio granular 2: grãos médios 1,09 mm

² CO+FDD: etapas de coagulação seguida de filtração direta descendente

³ FDD: sem etapa de coagulação, apenas filtração direta descendente

Os ensaios de 1 a 24 tiveram como objetivo a avaliação de parâmetros hidráulicos e a análise de duração de carreira, investigados em diferentes meios granulares e taxas de filtração.

4.2.1.1 Parâmetros de controle dos ensaios

Os principais parâmetros de controle dos ensaios para a obtenção do tempo da carreira de filtração estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Descrição do monitoramento do sistema piloto de filtração direta descendente

Parâmetro	Método/equipamento	Ponto de amostragem	Frequência
Turbidez (uT)	Apresentado na Tabela 7	Efluente da ETE – entrada da piloto	De 10 a 30 min
		Água filtrada – saída da piloto	A cada 10 min
Perda de carga (cm)	Variação do nível da água acompanhada por fita graduada no filtro	Filtro	A cada 10 min

Fonte: Autora, 2020

Além dos parâmetros citados, era coletada uma amostra do efluente da ETE e armazenada para caracterização da mesma no laboratório de Recursos Hídrico da UNAERP, com o objetivo de dar continuidade ao monitoramento da qualidade do efluente, apresentado no item 4.1.2.

4.2.1.2 Parâmetros de encerramento da carreira de filtração

O encerramento de uma carreira de filtração acontecia quando:

- a) a turbidez da água filtrada era maior que 1,0 uT;
- b) a perda de carga, medida pela diferença do nível do líquido da coluna de filtração atingia o valor de 154 cm.

O valor máximo de unidades de turbidez igual a 1,0 uT foi baseado no tratamento de água para abastecimento público onde o valor máximo permitido da

água filtrada deve ser de 0,5 uT na filtração rápida e 1,0 uT na filtração lenta (DI BERNARDO et al, 2017). Com relação à turbidez na produção da água de reúso, recomenda-se que deve ser menor que 2,0 uT (SÃO PAULO, 2017; USEPA, 2012). No entanto, devido aos baixos valores de turbidez do efluente tratado a nível secundário da ETE, que foi o afluente do sistema piloto, foi adotado valor de 1,0 uT. Levou-se em conta, principalmente, o fato de que, a turbidez é um parâmetro que indica partículas suspensas do meio e, portanto, utilizar um padrão mais restritivo para esse valor indicaria melhor qualidade da água de reúso produzida.

Com relação à perda de carga, o encerramento da carreira de filtração foi estipulado pela altura total da coluna de 210 cm. Logo, como a camada filtrante ocupou 45 cm de altura (5 cm da camada suporte e 40 cm do meio granular) e o nível de líquido no início da filtração foi mantido constante em 56 cm, a variação máxima de água no interior da coluna de filtração foi de 154 cm, conforme mostrado na Figura 15.

Di Bernardo (2004), em pesquisas de dupla filtração para produção de água de abastecimento, adotou como transpasse do filtro descendente turbidez com valor de 1,0 uT ou carga hidráulica de 1,80 m. Tosetto (2005), cujo objetivo foi a produção de água de reúso para fins urbanos, com filtração seguida de desinfecção com radiação ultravioleta, adotou transpasse por turbidez máxima de 2,0 uT e carga hidráulica máxima de 60 e 70 cm.

4.2.1.3 Avaliação geral dos ensaios de filtração direta descendente na unidade piloto

Para a avaliação geral dos ensaios de filtração direta descendente foram elaborados dois tipos de gráfico: turbidez e perda de carga, ambas em função do tempo de filtração. O primeiro apresentava os valores de turbidez do efluente que alimentava o sistema piloto e da água após a filtração, na saída do sistema, em função do tempo do ensaio (duração da carreira de filtração). O segundo gráfico apresentava as evoluções da perda de carga, representadas pela variação no nível de água na coluna de filtração em função do tempo da filtração.

Por meio dos gráficos avaliou-se a influência das taxas de filtração e da granulometria do meio na eficiência da aplicação da filtração direta para a produção

de água de reúso a partir de efluente secundário de estação de tratamento de esgoto doméstico.

4.2.1.4 Lavagem do leito de filtração

Ao final de cada ensaio, era efetuada a limpeza do sistema de filtração. A retrolavagem foi efetuada através da passagem de água limpa no sentido ascensional, durante 5 min, de modo a promover a expansão do leito em 50% (Figura 16), segundo recomendações de Di Bernardo et al (2011), o qual estabelecia que o leito de areia fosse expandido entre 30 e 50% com lavagem com água no sentido ascensional.

O processo de lavagem era iniciado por meio da conexão de uma mangueira, no fundo da coluna, com água limpa, proveniente do poço da ETE. No topo do filtro, foi instalado uma mangueira para descarte da água de lavagem. O sentido do fluxo da água de lavagem dos filtros foi apresentado na Figura 13.

Figura 16 – Lavagem do filtro e expansão do leito durante a lavagem



Fonte: Autora, 2020

Durante as lavagens do filtro foram medidos: a vazão da água de lavagem, a expansão do leito, a turbidez da água na saída do processo e o tempo de duração

do processo de retrolavagem. A vazão da água de lavagem foi medida no topo da coluna de filtração, na mangueira de descarte, com auxílio de cronômetro e proveta, assim que a expansão do leito atingisse 50%, verificada pela fita graduada no filtro. O critério do fim da lavagem foi quando a turbidez da água de lavagem fosse menor que 0,5 uT. Para tal, foram efetuadas medidas de minuto a minuto até que o valor medido fosse menor que o estabelecido.

4.2.1.5 Cálculo da produção efetiva de água de reúso

O volume efetivo de água de reúso produzida foi calculado a partir da quantificação do volume de água consumida em cada lavagem (Equação 13) e do volume de água produzida durante os ensaios, até o encerramento da carreira de filtração (Equação 14). Assim, pela diferença entre os volumes quantificados, foi possível calcular a produção efetiva da água de reúso, Equação 15.

$$V_{Lav} = Q_{Lav} \cdot t_{Lav} \quad (13)$$

$$V_{prod} = TF \cdot A \cdot t_{carreira} \quad (14)$$

$$V_{PE} = V_{prod} - V_{Lav} \quad (15)$$

Em que, V_{Lav} (L) é o volume gasto na lavagem do filtro; Q_{Lav} (L/min) é a vazão calculada durante a lavagem; t_{Lav} (min) é o tempo de duração da lavagem do filtro; V_{prod} (L) é o volume de água produzida no ensaio, convertido de m^3 para L; TF ($m^3/m^2.dia$) é a taxa de filtração do ensaio; A (m^2) é a área da seção transversal da coluna; $t_{carreira}$ (dias) é o tempo de duração da carreira, convertido de min para dias; e o V_{PE} (L) é o volume de produção efetiva da água de reúso.

A eficiência de produção da água durante a filtração foi estimada pela relação entre o volume de produção efetiva de água em uma carreira de filtração (V_{PE}) e o volume total produzido na carreira de filtração (V_{prod}). Os percentuais de utilização efetiva da água gerada foram calculados, através da Equação 16, e representam a real quantidade de água gerada, desconsiderando a parcela que é gasta na lavagem. Ou seja, quanto mais próximo de 100%, menor a quantidade de água descartada durante a lavagem.

$$E_{PE} = \frac{V_{PE}}{V_{prod}} . 100 \quad (16)$$

4.2.2 Caracterização da água de reúso

Após a análise dos ensaios realizados para obtenção do tempo de carreira de filtração, com a variação das condições operacionais (taxa de filtração e meio filtrante), foi selecionada a condição experimental que apresentou os melhores resultados referentes à geração e à utilização da água produzida. Nessa condição, adotada como otimizada, por esse trabalho, foram coletadas as amostras de água filtrada para a verificação dos parâmetros de qualidade da água, inerentes à remoção de impurezas da tecnologia de filtração direta descendente.

Os parâmetros selecionados para análise da água filtrada foram: cor aparente, turbidez, série de sólidos, carbono orgânico total e *Escherichia coli*, cuja descrição dos métodos, equipamentos e limite de detecção foram apresentados na Tabela 7.

Foram coletadas amostras para quantificação dos parâmetros acima tanto no efluente da ETE (afluente do sistema piloto) como na água de reúso, após a filtração. Adotou-se o padrão de trinta minutos de ensaio para coletar a solução afluente, no reservatório de armazenamento da unidade piloto, e após uma hora de filtração para a coleta da água filtrada. Após as coletas, as amostras foram armazenadas em frascos limpos, fechados e levadas ao Laboratório de Recursos Hídricos da UNAERP, onde foram realizadas as análises.

Foram realizados três ensaios, na taxa de filtração que apresentou maior eficiência na geração de água de reúso, selecionada no item 4.2.1.5, para cada tipo de areia, cujas etapas experimentais foram coagulação seguida de filtração (CO+FDD) e um ensaio, para cada meio granular, sendo o afluente do sistema submetido à filtração, sem a coagulação química.

Para a análise dos resultados foram construídos gráficos de remoção dos parâmetros para os respectivos meios granulares, a fim de facilitar a comparação. Com os dados obtidos, foi possível selecionar a condição de taxa e o meio granular ótimos, que nesse trabalho foi considerada a que houve maior produção efetiva da água de reúso.

4.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO DIRETA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO EM ESCALA REAL

Na condição otimizada selecionada a partir dos ensaios experimentais foi realizado um pré-dimensionamento de uma unidade de filtração direta descendente em escala real para a ETE Caiçara, seguindo recomendações da NBR 12216 (ABNT, 1992) e Di Bernardo e Dantas (2005).

A vazão média real do efluente gerado na ETE Caiçara é de 18.000 m³/dia. Para fins de base de cálculo, adotou-se o valor de 10.000 m³/dia, para serem destinados ao tratamento da tecnologia de filtração direta descendente, visando a produção da água de reúso.

A partir da vazão de efluente gerado na ETE, e da definição de que a vazão corresponde ao produto da área pela taxa de escoamento, Equação 16, foi calculada a área de filtração necessária.

$$A_{\text{filtração}} = \frac{Q_{\text{ef}}}{TF} \quad (16)$$

Em que, $A_{\text{filtração}}$ é a área de filtração requerida, Q_{ef} é a vazão do efluente gerado na ETE Caiçara e TF é a taxa de filtração selecionada nas análises dos itens 4.2.1.5 e 4.2.2.

O número de filtros (N_{filtros}) foi estimado com base na interrupção do sistema para a lavagem, quando o transpasse é atingido. Pois, quando um filtro tem sua operação interrompida para a retrolavagem, os outros filtros continuam operando. Como a vazão de alimentação não se altera, os demais filtros não podem ser sobrecarregados, operando a uma taxa de filtração muito diferente da prevista no dimensionamento. Portanto, a partir da área de filtração calculada, foi selecionada uma quantidade de filtros, que, considerando a interrupção de um deles, o cálculo da taxa de filtração, pela equação 16, resultasse no valor da taxa próxima da selecionada.

A partir do número de filtros, calculou-se a área de cada filtro (A_{filtro}) (Equação 17):

$$A_{\text{filtro}} = \frac{A_{\text{filtração}}}{N_{\text{filtros}}} \quad (17)$$

O cálculo da largura de um filtro, geralmente, é baseado na extensão do decantador que alimenta o sistema de filtração e no número de filtros, pois na saída do decantador já ocorre a alimentação dos filtros. Como nesse trabalho propõe-se uma adaptação da ETE, e o decantador é circular, adotou-se a largura dos filtros de 1,5 m, com uma distância de 1 m entre eles, para a comporta da saída da água de lavagem. Essa configuração foi escolhida visando o aproveitamento das áreas livres existentes na ETE, observadas na imagem aérea da Caiçara, na Figura 7.

Utilizando filtros de seção retangular, o comprimento foi calculado pela Equação 18.

$$A_{\text{filtro}} = L_{\text{filtro}} \cdot C_{\text{filtro}} \quad (18)$$

Em que, L_{filtro} e C_{filtro} , correspondem respectivamente à largura e ao comprimento da unidade de filtração.

Para a quantificação da água filtrada produzida diariamente, foi calculado inicialmente o número de carreiras de filtração ($N_{\text{carreiras}}$) em 24 horas (Equação 19), considerando os tempos de carreira de filtração (t_{carreira}) e de lavagem do filtro (t_{Lav}) da escala piloto, ambos em horas.

$$N_{\text{carreiras}} = \frac{24}{t_{\text{carreira}} + t_{\text{Lav}}} \quad (19)$$

A partir da Equação 14, foi estimado o volume produzido (V_{prod}) em uma carreira de filtração, considerando a área de filtração em escala real. Pela Equação 20, foi calculado o volume diário da produção de água de reúso ($V_{\text{gerado 24h}}$).

$$V_{\text{gerado 24h}} = N_{\text{carreiras}} \cdot V_{\text{prod}} \quad (20)$$

Na quantificação da água de lavagem, foi necessário calcular a vazão de água para a expansão do leito, em 50%, para a escala real. Como a vazão é o produto da área pela velocidade, utilizou-se a vazão média de retrolavagem da unidade piloto e

a área da coluna para obter a velocidade de fluidização. Mantendo a mesma velocidade, utilizou-se a área em escala real, de cada filtro, para calcular a vazão da água de lavagem.

Assim, pela Equação 13, multiplicou-se a vazão pelo tempo de lavagem, mantido o mesmo utilizado em escala piloto, para obter o volume de água utilizado na lavagem de uma carreira de filtração (V_{Lav}). A estimativa do volume utilizado diariamente na lavagem dos filtros, em escala real, foi feita através da Equação 21.

$$V_{lavagem\ 24h} = N_{carreiras} \cdot V_{Lav} \quad (21)$$

A produção efetiva da água de reúso, em escala real, considerando a vazão de 10.000 m³/dia de efluente da ETE, foi calculada pela diferença entre o volume de água filtrado e o volume da água da lavagem (Equação 15).

Em relação à massa de areia, necessária para composição do filtro, foi calculada a partir da densidade aparente dos sólidos, através da Equação 22, em que, o volume do leito (V_{leito}) de filtração foi calculado pela multiplicação da área de filtração pela altura da camada filtrante, utilizada nesse trabalho como 40 cm.

$$\rho_{areia} = \frac{m_{areia}}{V_{leito}} \quad (22)$$

A quantidade de coagulante utilizada, diariamente, também foi calculada, através da quantidade de efluente diário a ser tratado e a concentração do coagulante estabelecida nos ensaios em bancada. Calculou-se o volume de coagulante utilizado por dia, utilizando as Equações 23 e 24.

$$m_{coag} = \frac{C_{coag}}{1000} \cdot Q_{ef} \quad (23)$$

$$V_{coag} = \frac{m_{coag}}{\rho_{coag}} \quad (24)$$

Em que, m_{coag} é a massa diária de coagulante em escala real (kg/dia), C_{coag} a concentração do coagulante, determinada no diagrama de coagulação (mg/L), Q_{ef} é a vazão diária do efluente da ETE, destinado a produção de água de reúso (m³/dia),

V_{coag} é o volume de coagulante necessário, por dia (m^3/dia) e ρ_{coag} (kg/m^3) é a massa específica do coagulante utilizado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados deste trabalho experimental, em que, a partir da análise dos parâmetros hidráulicos e da caracterização da água de reúso produzida, foi possível selecionar uma condição otimizada e avaliar a tecnologia de tratamento aplicada no efluente da ETE.

5.1 UNIDADE PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO

Nos itens a seguir estão compilados os principais resultados referentes à montagem e instalação da unidade piloto de filtração direta descendente para produção da água de reúso, para fins não potáveis.

5.1.1 Monitoramento do efluente da ETE Caiçara

O monitoramento do efluente da ETE Caiçara foi importante para a confirmação da seleção correta da tecnologia de tratamento, a nível terciário, visando a produção da água de reúso. Na Tabela 11 estão apresentados os valores médios e os respectivos desvios padrão dos parâmetros monitorados do efluente da ETE Caiçara. Os resultados completos podem ser consultados no Apêndice A.

Seguindo as recomendações de Di Bernardo e Dantas (2005), sobre a seleção correta da tecnologia de tratamento, os resultados do monitoramento se enquadram nos requisitos exigidos para a aplicação da filtração direta descendente no efluente da ETE Caiçara. As principais considerações que podem ser feitas são: a turbidez teve valor médio de $3,0 \pm 1,9$ uT, e o valor recomendado para 95% do tempo é de 25 uT; os sólidos suspensos foram de 27 ± 2 mg/L, e a concentração recomendada é de 50 mg/L; e, em relação a cor, os autores sugerem que a cor verdadeira seja de no máximo 50 uH, e na caracterização foi medida a cor aparente menor, com valor menor que o limite (48 ± 16 uH). Como a cor verdadeira é medida após submeter a água à filtração, para a remoção de partículas suspensas que causam turbidez à água, o valor obtido na caracterização para cor aparente, já se encontra dentro do limite estabelecido. Portanto, esse critério também se encaixa nos padrões recomendados.

Tabela 11 - Resultados do monitoramento do efluente da ETE Caiçara expressos em valores médios e desvio padrão

Parâmetros	Unidades	Média	Desvio Padrão	Recomendação para reúso restrito não potável (SÃO PAULO, 2020)
COT	mg/L C	5,0	1,7	-
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100mL	1026	596	≤ 120
Cor aparente	uH	48	16	-
DBO	mg/L O ₂	6	3	≤ 30
DQO	mg/L O ₂	35	14	-
pH	-	7,41	0,22	6 a 9
ST	mg/L	234	25	-
SDT	mg/L	207	25	-
SST	mg/L	27	2	≤ 30
Turbidez	uT	3,0	1,9	-

Fonte: Autora, 2020

Em relação aos resultados obtidos na caracterização do efluente da ETE, realizada anteriormente por Marrengula (2016) e Dias (2018), observou-se que o valor médio de *Escherichia coli* (1053 ± 596 NMP/100mL), deste trabalho, foi diferente do obtido por Marrengula (2016), e foi mais próximo com o valor médio obtido por Dias (2018). O resultado indica a redução de microrganismos ao longo dos anos, o que pode ser resultado de melhorias nos processos da ETE. Em relação aos parâmetros relacionados à carga orgânica, carbono orgânico total (COT) e DBO, os resultados não apresentam grandes diferenças no valor médio obtido, quando comparado à Dias (2018), a caracterização mais recente. O mesmo ocorreu para o pH, a cor aparente e a concentração de sólidos totais. Em relação à turbidez, houve uma redução em relação ao resultado de Dias (2018), que apresentou o valor médio de 5,41 uT, enquanto que o valor médio obtido por este trabalho foi de $3,0 \pm 1,9$ uT.

Os resultados de caracterização do efluente da ETE Caiçara apresentados por Marrengula (2016) e Dias (2018) também estão dentro dos parâmetros requeridos para a seleção da tecnologia de filtração direta descendente. Assim, a escolha do tratamento proposto neste trabalho fica ainda mais respaldada quanto às alterações da qualidade do efluente, que poderiam comprometer a eficiência do processo.

Com os resultados do monitoramento do efluente da ETE fica evidente a necessidade de um tratamento complementar ao tratamento biológico, com foco à produção da água de reúso com fins não potáveis. Na Tabela 11 são mostrados alguns dos parâmetros requeridos pela resolução conjunta SES/SIMA de 2020 (SÃO PAULO, 2020), nos quais, os parâmetros DBO, sólidos suspensos e *Escherichia Coli*, estão acima dos valores permitidos para reúso restrito não potável. Ressalta-se ainda que a presença de matéria orgânica, indicada pelo parâmetro carbono orgânico total, sugere o potencial de formação de subprodutos halogenados, pois de acordo com Dias (2018), são substâncias precursoras de tais compostos, após a etapa da desinfecção.

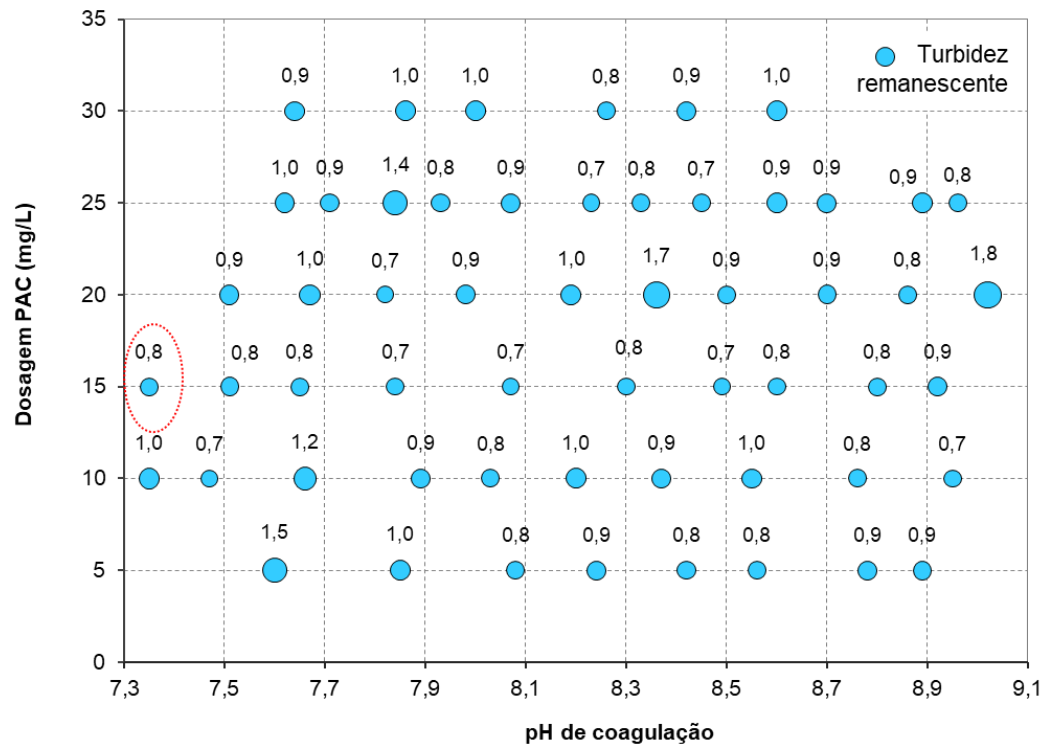
5.1.2 Obtenção dos dados de coagulação nos ensaios em bancada

O objetivo dessa etapa foi construir o diagrama de coagulação, no qual é selecionada a melhor dosagem de coagulante e o pH de coagulação, para a realização dos ensaios na unidade piloto. Nas Figuras 17 e 18 estão mostrados os diagramas elaborados a partir dos dados experimentais dos ensaios em bancada, em jarteste, com relação à turbidez e à cor remanescentes, respectivamente, após filtração em filtros de areia de laboratório. No Apêndice B podem ser verificados as medições e as informações mais detalhadas e completas dos ensaios.

Conforme as diretrizes de reúso da USEPA (2012) para reúso urbano irrestrito, o melhor coagulante, cujo pH está na faixa de 6,0 a 9,0, deve produzir água com turbidez remanescente abaixo de 2,0 uT. Por critérios já explicados no capítulo anterior, a escolha do melhor dosagem de coagulação adotou como critério a turbidez abaixo de 1 uT. Assim, para o pH entre 6,0 e 9,0, foi selecionada a menor concentração de coagulante, sem uso de produtos químicos para correção de pH.

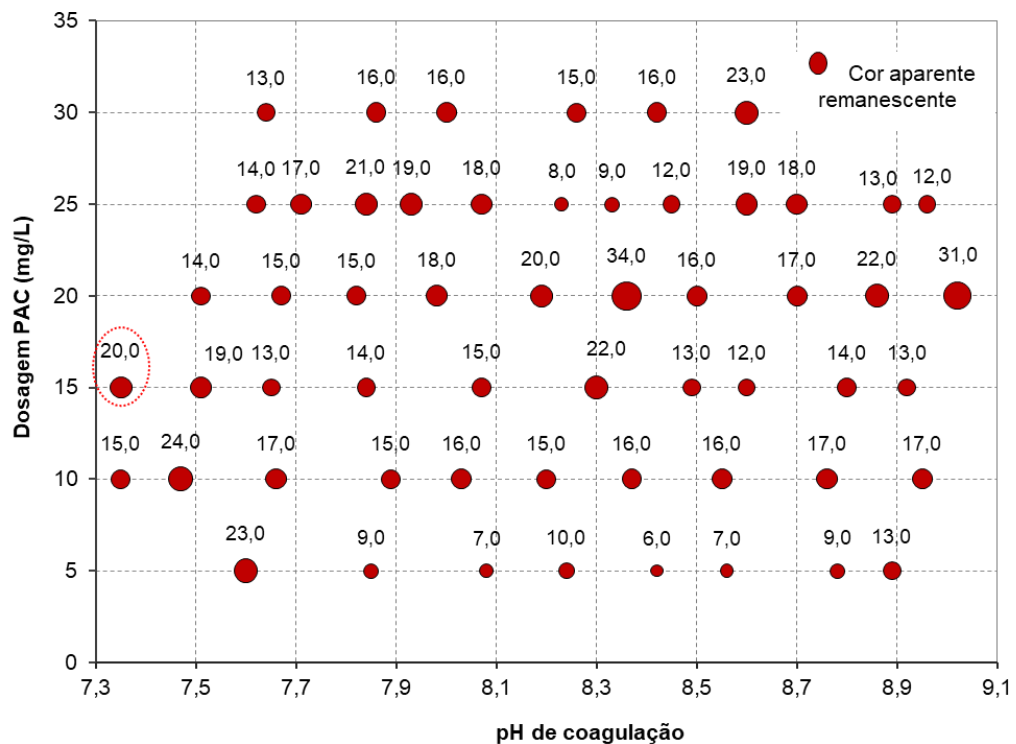
Na análise dos diagramas obtidos, foi definida a concentração de 15 mg/L de PAC, pois com o pH próximo a 7,4, o qual foi obtido sem alcalinizante para o ajuste do pH. Os valores obtidos, nessa condição experimental, para a turbidez e a cor aparente remanescentes foram de 0,8 uT e de 20 uH, respectivamente, conforme indicados nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Diagrama de coagulação para turbidez remanescente obtido nos ensaios em bancada, após a filtração em filtros de areia de laboratório



Fonte: Autora, 2020

Figura 18 – Diagrama de coagulação para cor remanescente obtido nos ensaios em bancada, após a filtração em filtros de areia de laboratório



Fonte: Autora, 2020

Outros pontos do diagrama apresentaram resultados de cor aparente menores, nessa mesma concentração, mas o ponto em destaque foi escolhido para a realização dos ensaios na unidade piloto de filtração direta descendente, uma vez que a remoção de turbidez foi considerada satisfatória e não houve a necessidade da utilização de outros produtos para ajuste do pH de coagulação.

O resultado obtido condiz com o trabalho em bancada realizado por Marrengula (2016), com o mesmo efluente. O autor testou vários coagulantes (sulfato de alumínio, PAC, cloreto férrico e tanfloc) e selecionou o PAC na dosagem de 16 mg/L, com pH 7,3, cor aparente 17 uH e turbidez 0,9 uT.

5.1.3 Caracterização dos meios granulares

A caracterização dos meios granulares 1 e 2, após separação granulométrica está apresentada na Tabela 12. A partir das curvas granulométricas apresentadas na Figura 19, foi possível obter o diâmetro efetivo D_{10} e o D_{60} para cálculo do coeficiente de uniformidade.

Tabela 12 – Características dos meios granulares 1 e 2

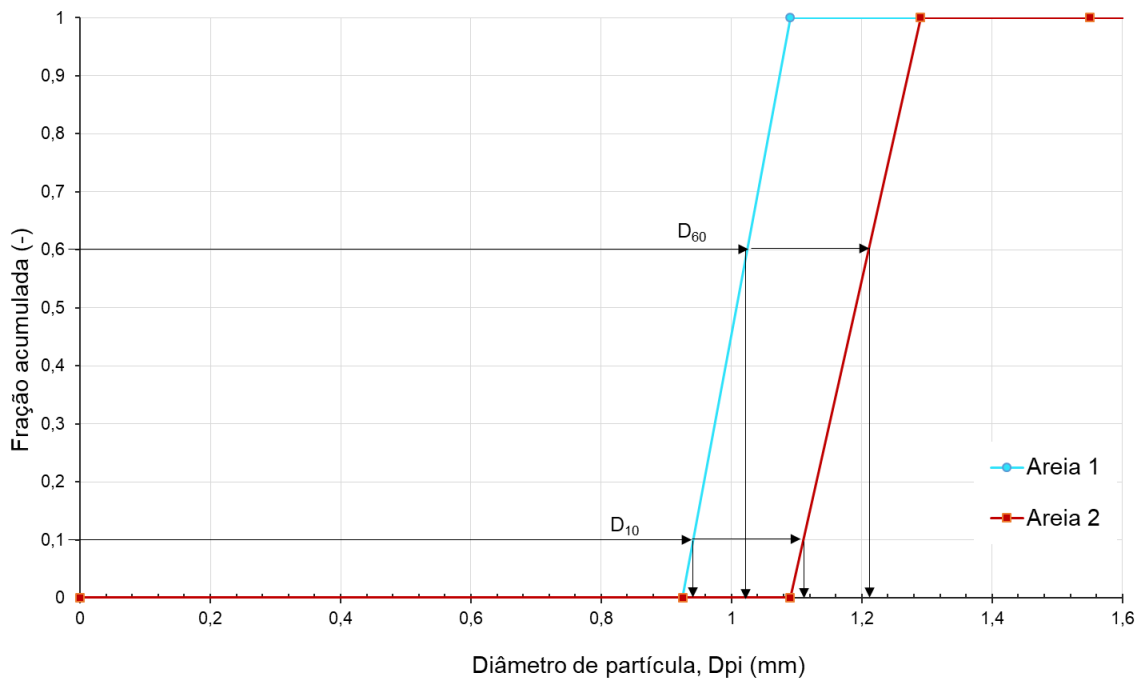
		Meio granular 1	Meio granular 2
Diâmetro das partículas (mm)	Máx	1,090	1,290
	Min	0,925	1,090
D_{vs} (mm)		0,925	1,090
D_{10} (mm)		0,93	1,15
D_{60} (mm)		1,10	1,21
Coeficiente de uniformidade		1,183	1,052
Porosidade (%)		46	47
Densidade (g/cm³)		1,389	1,409

Fonte: Autora, 2020

A granulometria de um leito granular de filtração influencia na retenção das partículas. Quando os grãos de areia compõem um leito, forma-se um vazio intergranular, onde as impurezas ocupam durante o processo. Por isso, a importância da caracterização do leito de filtração, com relação aos grãos médios que compõem o leito, à porosidade e ao coeficiente de uniformidade.

O uso de um leito composto por granulometrias distintas permite a otimização da carreira de filtração, pois diferentes tamanhos de partículas são retidos em profundidade, não causando o entupimento das camadas superiores do meio. No entanto, durante a retrolavagem do filtro, com expansão do leito em sentido ascendente, ocorre a segregação das partículas conforme o seu tamanho e densidade. O que pode levar a estratificação do leito em camadas, causando alterações na fluidodinâmica da filtração, principalmente na queda de pressão e na eficiência da retenção de partículas.

Figura 19 – Curvas granulométricas dos meios granulares 1 e 2



Fonte: Autora, 2020

Os meios selecionados para composição do leito de filtração foram praticamente uniformes, conforme pode ser observado pelos valores de coeficiente de uniformidade, 1,183 e 1,052, para os meios granulares 1 e 2, respectivamente. Os mesmos foram calculados a partir dos diâmetros D_{10} e D_{60} , em destaque nas curvas da Figura 19. A seleção de um meio uniforme foi baseada principalmente na retrolavagem, para que não ocorresse a estratificação do meio filtrante em camadas de porções distintas de areias. A principal diferença entre os leitos 1 e 2 foi baseada no tamanho médio dos grãos, de 0,93 e 1,09 mm, respectivamente.

5.1.4 Vazões utilizadas nos ensaios de filtração direta descendente

Os resultados calculados, a partir das equações 7, 8 e 9, para as vazões de alimentação do sistema com o efluente da ETE e do PAC estão representadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Vazões calculadas para a realização dos ensaios na unidade piloto de filtração direta descendente

	Unidade	Mínimo	Médio	Máximo
Taxas de filtração	m ³ /m ² .dia	120	360	500
Vazão total	L/h	39	115	164
Vazão PAC	L/h	1	3	4
Vazão efluente	L/h	38	112	160

Fonte: Autora, 2020

Partindo da equação 8, estabeleceu-se, para uma vazão mínima de coagulante de 1L/h, a concentração de PAC no reservatório de estoque, calculada no valor de 585 mg/L, de modo a resultar da concentração selecionada pelo diagrama de coagulação após a mistura das soluções afluente e PAC. Para facilitar o preparo das soluções de PAC no local dos ensaios, que eram feitas a cada nova carreira de filtração, foi utilizada a concentração de 600 mg/L. A solução de PAC era preparada em recipiente de plástico, com 5 L de água potável e uma massa de 3 g de PAC, previamente pesada e armazenada em frascos de vidro com tampa.

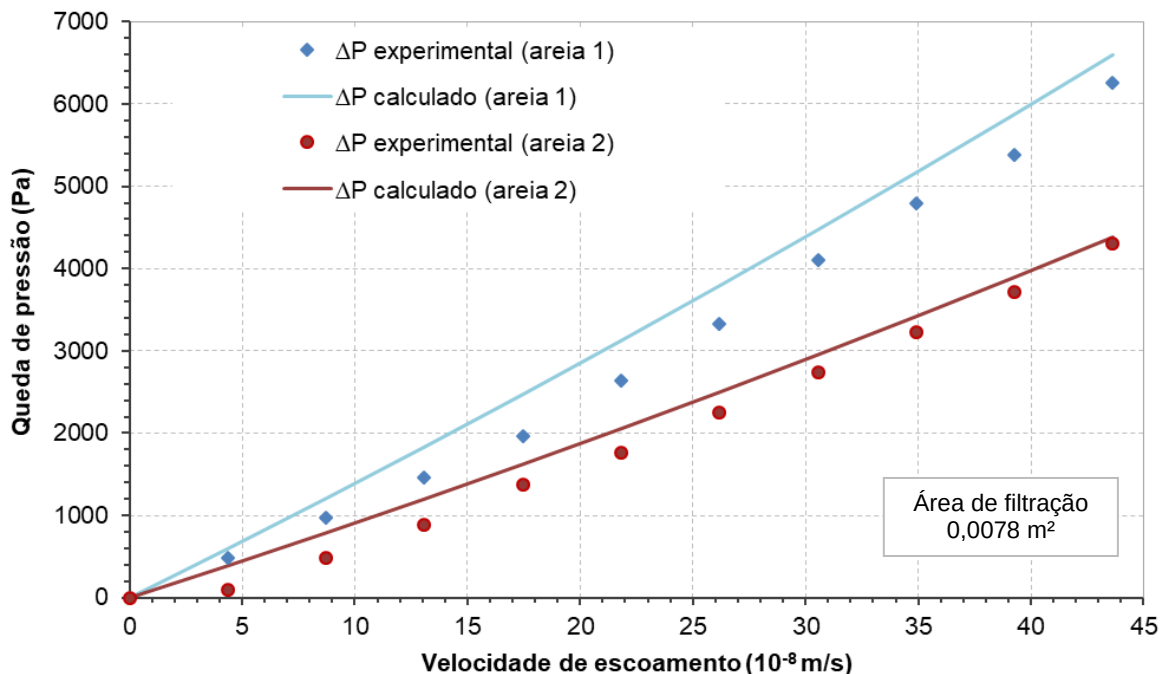
A partir da concentração de PAC no reservatório foram obtidas, pela Equação 8, as vazões de PAC para as taxas 120, 360 e 500 m³/m².dia, e pela Equação 9, definiram-se as vazões do efluente da ETE, apresentadas na Tabela 13.

5.1.4 Ensaios preliminares para verificação de parâmetros fluidodinâmicos do meio filtrante na retrolavagem

Para a análise do comportamento fluidodinâmico do leito de filtração, foram construídas curvas relacionando a queda de pressão experimental e teórica com a vazão de operação do sistema, para os meios granulares 1 e 2, apresentadas na Figura 20.

O comportamento apresentado nas curvas evidencia que o aumento da granulometria do leito, de 0,93 mm para 1,09 mm, reduziu a queda de pressão, pois foi facilitado o escoamento do fluido pelo meio granular. Quanto menor os grãos da areia, menores serão os espaços vazios no leito, sendo assim, o fluido em escoamento encontra uma maior resistência ao percolar o filtro. Dessa forma a queda de pressão aumenta e diminui o tempo de filtração, pois os poros do leito entopem mais rapidamente, e consequentemente, é necessário o filtro seja lavado com mais frequente.

Figura 20 – Influência da queda de pressão em função da velocidade de escoamento no meio granular e comparação com os valores teóricos



Fonte: Autora, 2020

Foi possível também, através da Figura 20, observar que as curvas dos pontos experimentais se assemelham às curvas dos pontos teóricos, calculados pela Equação de Ergun (Equação 1).

Na Tabela 14 estão apresentados os erros experimentais calculados, entre os valores obtidos nos ensaios preliminares e os valores calculados teoricamente. No ensaio com meio granular 1 os erros variaram de 5 a 21%, e no ensaio com a areia 2, as primeiras coletas apresentaram erros altos, de 75 a 27%, no entanto as demais foram erros entre 15 e 2%. Os altos erros podem ser justificados pela Equação de

Ergun (Equação 1), a qual está em função da esfericidade dos grãos que compõe o leito. Considerou-se uma esfericidade média e típica da areia de 0,75, mas alterações no formato do grão da areia, podem apresentar valores diferentes, causando a diferença entre a perda de carga calculada teoricamente e a obtida experimentalmente.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios preliminares de queda de pressão teórica e experimental em função da vazão de filtração e erro experimental

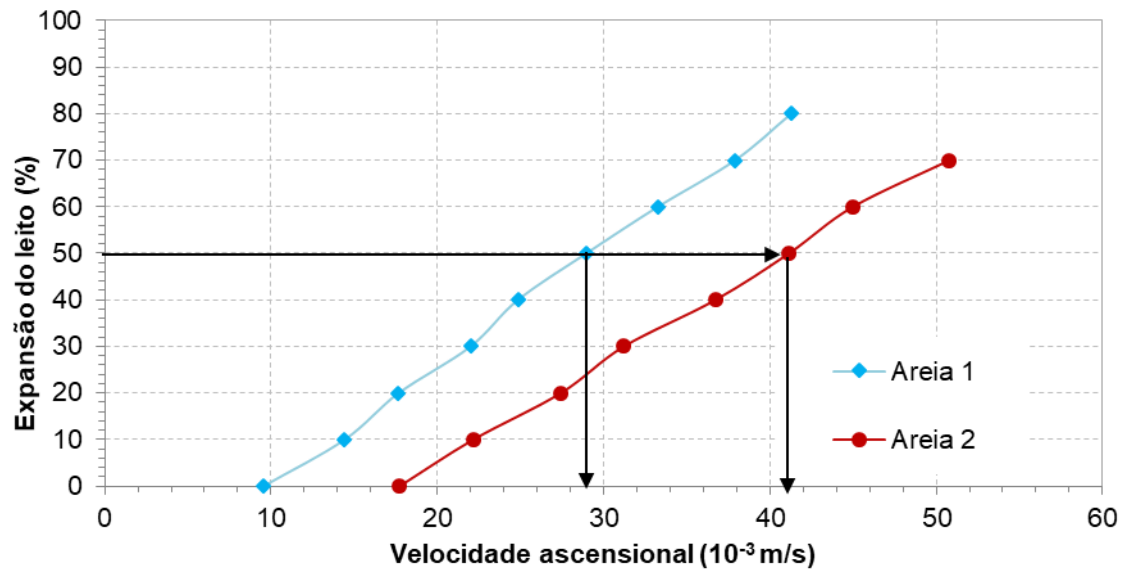
Q (L/h)	Areia 1				Areia 2			
	H_{medido} (cm)	ΔP_{exp} (Pa)	ΔP_{calc} (Pa)	Erro (%)	H_{medido} (cm)	ΔP_{exp} (Pa)	ΔP_{calc} (Pa)	Erro (%)
20	61	489,08	597,10	18,09	57	97,82	389,26	74,87
40	66	978,17	1208,17	19,04	61	489,08	789,43	38,05
60	71	1467,25	1833,20	19,96	65	880,35	1200,50	26,67
80	76	1956,33	2472,20	20,87	70	1369,43	1622,47	15,60
100	83	2641,05	3125,16	15,49	74	1760,70	2055,35	14,34
120	90	3325,77	3792,08	12,30	79	2249,78	2499,13	9,98
140	98	4108,30	4472,97	8,15	84	2738,87	2953,82	7,28
160	105	4793,02	5167,82	7,25	89	3227,95	3419,41	5,60
180	111	5379,92	5876,63	8,45	94	3717,03	3895,90	4,59
200	120	6260,27	6599,41	5,14	100	4303,93	4383,30	1,81

Fonte: Autora, 2020

Os resultados dos ensaios de fluidização do leito estão apresentados na Figura 21 e representam a expansão do meio granular por uma corrente de água no sentido ascendente para verificação da flutuação e da movimentação vigorosa das partículas durante a lavagem dos filtros de areia.

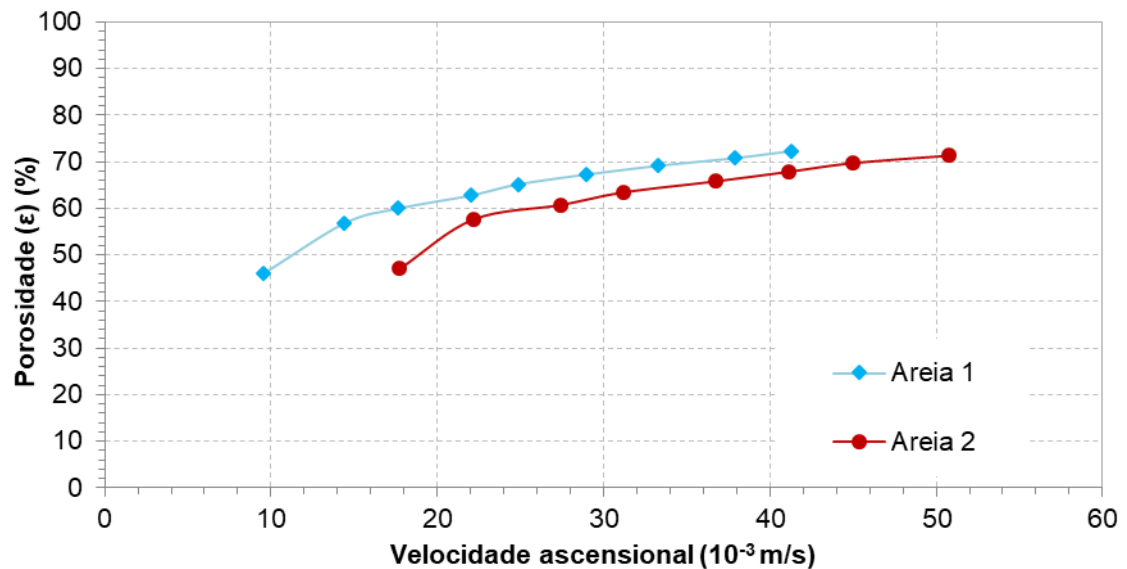
Na Figura 22, observou-se o aumento da porosidade do leito, em função da expansão, calculado a partir dos valores de altura do leito expandido a cada vazão de escoamento. Como a vazão da água utilizada na retrolavagem foi medida na saída do sistema, os dados iniciais de vazão não foram computados, pois ainda não havia saída de água pelo topo do filtro.

Figura 21 – Expansão do leito de filtração em função da velocidade ascensional da água durante a retrolavagem



Fonte: Autora, 2020

Figura 22 – Aumento da porosidade do leito em função da velocidade ascensional da água durante a retrolavagem



Fonte: Autora, 2020

Em ambos os gráficos ficou evidente o comportamento semelhante dos meios granulares 1 e 2 frente aos ensaios de pré-operação da unidade piloto de filtração direta em meio granular. No meio granular 2, por ser formado por partículas de maior granulometria, foi necessário que a vazão de água introduzida no sentido ascensional fosse maior que no meio 1 para obter mesma expansão do leito granular (Figura 21). A mesma observação vale para o aumento da porosidade

(Figura 22), à medida que o leito é fluidizado, aumenta-se a porosidade do mesmo, pois as partículas se distanciam.

A expansão do meio granular é fundamental para as lavagens do leito após o encerramento da carreira de filtração. A fluidização das partículas, desacomodando-as do leito, faz com que as impurezas retidas sejam carregadas com a água no sentido ascensional, provocando a limpeza do leito de filtração.

Durante a retrolavagem, conforme recomendações de Di Bernardo et al (2011) que sugerem expansão do leito de 30 a 50%, para lavagens no sentido ascensional com água, foi utilizado nesse trabalho expansão de 50%. Dessa forma, na Figura 21, foram destacados os pontos de expansão do leito durante a lavagem dos filtros, com as correspondentes velocidades. Nas condições experimentais do estudo, as velocidades de fluidização foram de 0,022 e 0,027 m/s dos meios granulares 1 e 2, respectivamente. Como a vazão é produto da área pela velocidade, e a área da coluna foi a mesma nas duas condições, a maior velocidade resulta na vazão mais alta. Dessa forma, com o aumento da granulometria do leito foi necessária uma maior vazão para expandir o leito em 50%, resultando em maiores volumes de água consumidos no processo de lavagem.

Curvas com comportamento semelhantes foram obtidas por Naseer, Alhail e Xi-Wu (2011), em que, para a fluidização do grão menor (0,5 mm) foi necessária taxa de retrolavagem inferior que nos grãos maiores (1,18 mm). O mesmo ocorreu com o aumento da porosidade devido à fluidização do leito, o que é fundamental para a limpeza dos filtros.

Os resultados completos dos ensaios preliminares podem ser consultados no Apêndice C.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA UNIDADE PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE

Os ensaios realizados na unidade de filtração direta descendente para produção de água de reúso, detalhados na Tabela 9, estão apresentados nos tópicos a seguir. Os resultados apresentados neste item referem-se aos tempos das carreiras de filtração, com relação às três taxas de filtração aplicadas e aos dois meios filtrantes. Foram apresentados os dados do monitoramento da turbidez do

afluente do sistema piloto, da turbidez da água filtrada e da variação do nível de água (ΔH), parâmetro que indica a perda de carga no sistema, durante o processo. No Apêndice D estão apresentados, em detalhes, os resultados obtidos nos ensaios de filtração direta na unidade piloto.

A partir dos dados apresentados, foi possível a seleção de uma taxa de filtração otimizada, dentre as variações experimentais investigadas, para então realizar a caracterização da água filtrada, cujos resultados estão apresentados nesse tópico também.

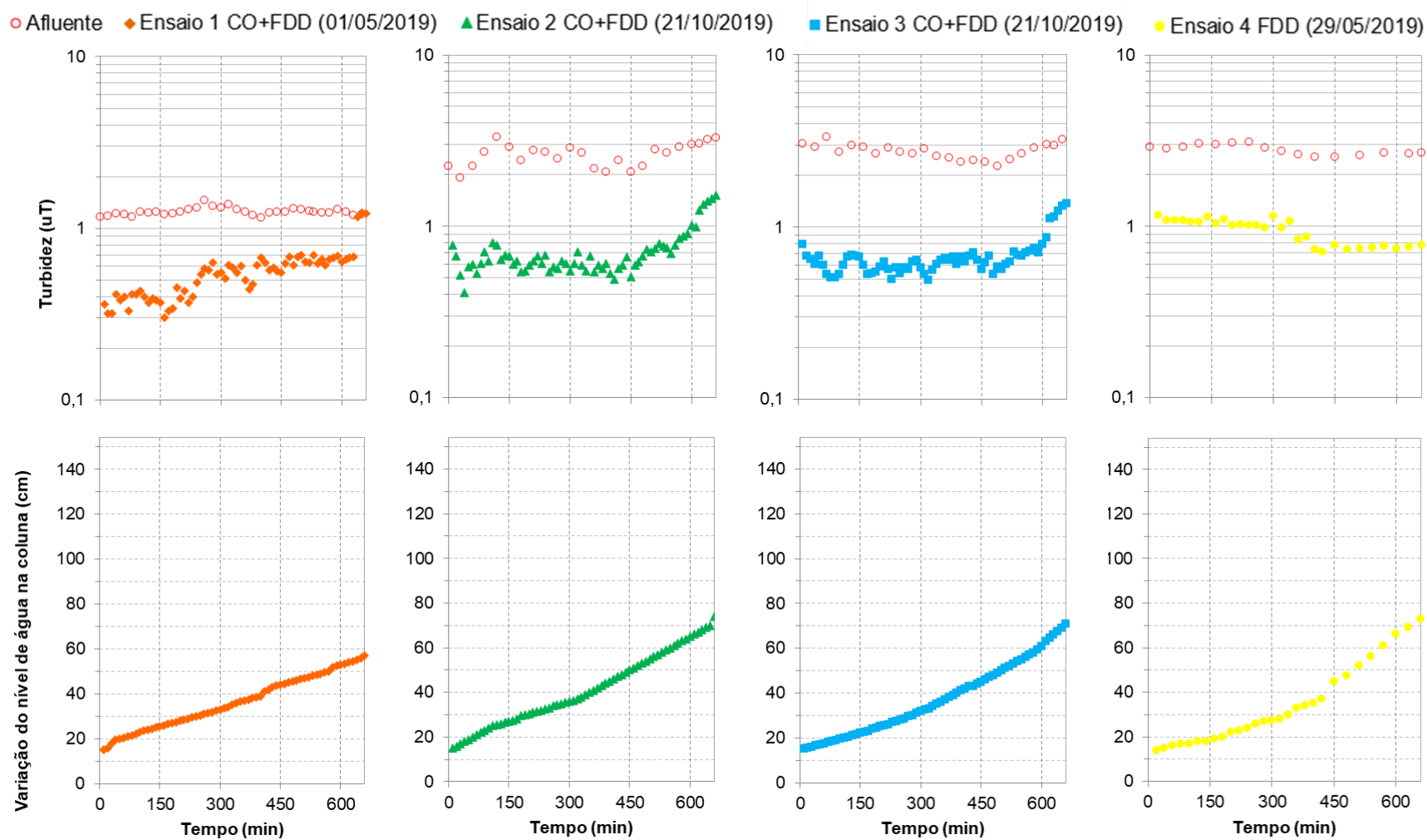
5.2.1 Ensaios de filtração direta descendente na unidade piloto

Nas Figuras 23, 24 e 25 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados com o meio granular 1, cujo diâmetro médio dos grãos foi 0,93 mm. Os tempos de carreira variaram de acordo com os critérios adotados para o encerramento da carreira de filtração, turbidez igual a 1 uT ou nível de água máximo de 210 cm, representado por uma variação do nível (ΔH) de 154 cm.

Na taxa de 120 m³/m².dia, os ensaios 1, 2 e 3, submetidos à coagulação (CO) seguida da filtração direta descendente (FDD), o transpasse foi obtido por turbidez maior que 1,0 uT. Os tempos de transpasse, apresentados na Tabela 15, foram 640, 620 e 600 minutos. Observando a Figura 23, a condição do afluente estava diferente no dia em que o ensaio 1 foi realizado, com baixos valores de turbidez, resultando em tempo de carreira maior, quando comparados aos demais ensaios, 2 e 3, realizados nas mesmas condições operacionais.

O ensaio 4 foi realizado sem adição do coagulante químico, o afluente foi submetido direto à filtração direta descendente (FDD). Pela Figura 23, é possível observar que a turbidez foi maior que o valor adotado como limite de encerramento de carreira, até aproximadamente o tempo de 300 minutos, em que de acordo com o monitoramento da turbidez afluente, houve uma redução do parâmetro na entrada, resultando na diminuição da turbidez do filtrado. Como a turbidez indica a presença de partículas em suspensão, as quais são removidas por filtração em areia. Durante o processo, as impurezas são retidas nos vazios intergranulares, causando o entupimento do mesmo, e quanto maior a quantidade no afluente do sistema, maior a retenção e mais rápido será a colmatação dos filtros.

Figura 23 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração nos ensaios 1 a 4, referente à taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, meio granular 1



Fonte: Autora, 2020

Tabela 15 – Duração da carreira de filtração e as condições de lavagem do leito nos ensaios realizados na unidade piloto

Ensaio	Taxa (m ³ /m ² .dia)	Meio granular	Duração da carreira de filtração (min)	Vazão da lavagem (L/min)	Tempo de duração da lavagem (min)
1	120	1	640	11,28	5
2	120	1	600	11,15	5
3	120	1	620	10,99	5
4*	120	1	NA**	11,31	5
5	360	1	270	10,86	5
6	360	1	270	10,92	5
7	360	1	260	11,76	5
8*	360	1	NA**	11,5	5
9	500	1	130	10,47	5
10	500	1	120	11,45	5
11	500	1	120	11,04	5
12*	500	1	120	11,23	5
13	120	2	150	12,75	4
14	120	2	150	12,77	4
15	120	2	130	12,63	4
16*	120	2	NA**	12,34	4
17	360	2	80	12,77	4
18	360	2	80	12,98	4
19	360	2	90	12,86	4
20*	360	2	30	13,01	4
21	500	2	50	12,90	5
22	500	2	50	13,09	5
23	500	2	50	12,90	5
24*	500	2	20	13,04	5

*Ensaio realizado somente com FDD (sem etapa coagulação)

**NA – não atendeu ao limite de turbidez menor que 1,0 uT, adotado como transpasse nesse trabalho.

Fonte: Autora, 2020.

A perda de carga, monitorada pela variação do nível de água na coluna de filtração, apresentou comportamento semelhante nas condições dos ensaios 1 a 3, que foram submetidos à coagulação e filtração direta descendente. No ensaio 4, pela Figura 23 notou-se que a elevação do nível de água na coluna estava ocorrendo mais lentamente e a curva apresentada possui menor inclinação. No entanto, a partir do tempo de 300 min, em que a turbidez foi menor que 1,0 uT, a curva da perda de

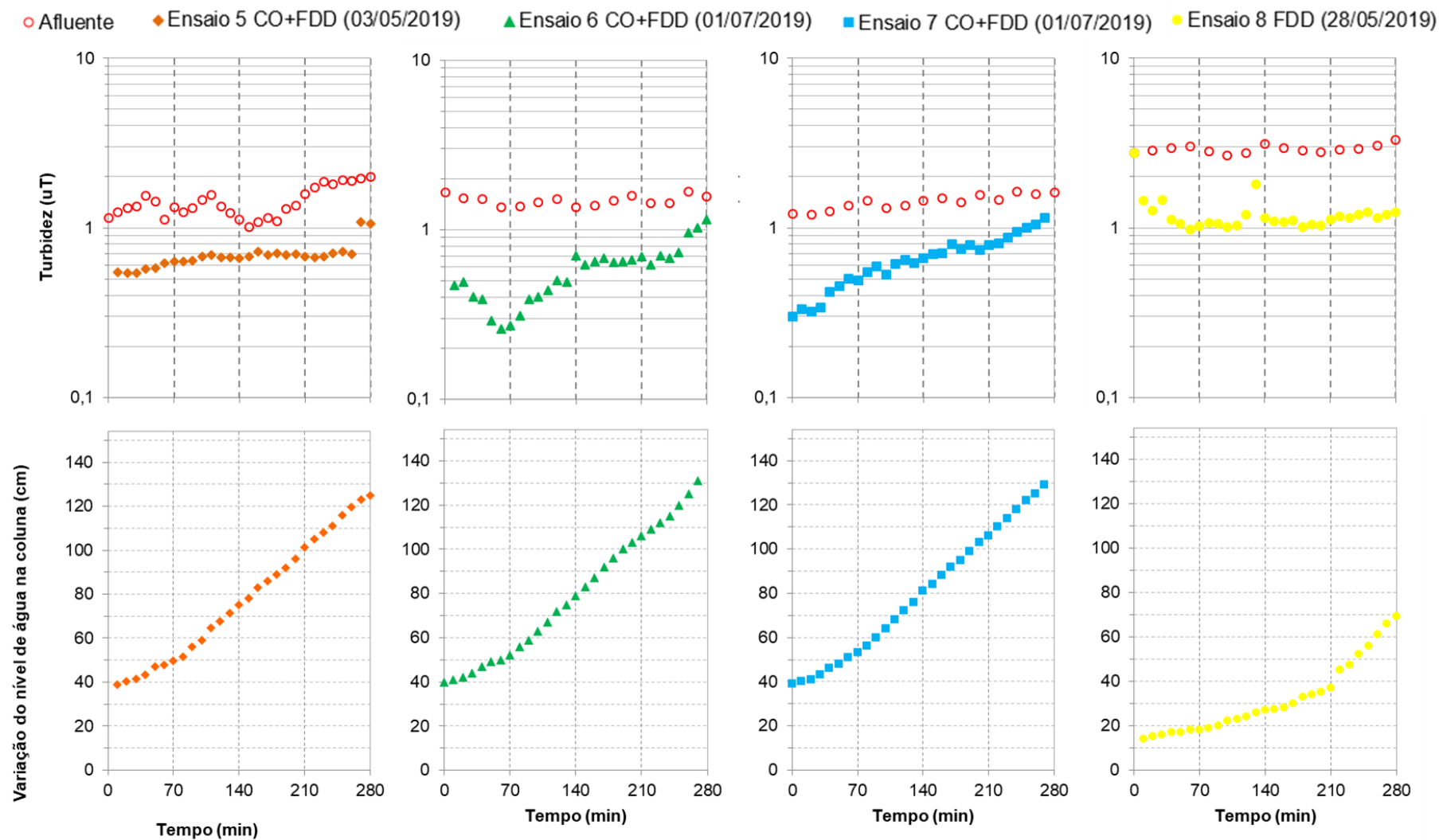
carga ficou mais inclinada, indicando que, o entupimento dos filtros aumentou a resistência à passagem de líquido do meio filtrante.

Na Figura 24 estão apresentados os ensaios realizados na taxa de $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, com o meio granular 1 ($0,93 \text{ mm}$). As condições experimentais submetidas à coagulação e filtração direta descendente (CO+FDD), ensaios 5, 6 e 7, apresentaram transpasse por turbidez, nos tempos 270, 270 e 260 minutos (Tabela 15), respectivamente. As curvas de turbidez do afluente do sistema apresentaram medições sem grandes alterações, com valores menores que $2,0 \text{ uT}$.

Pela Figura 24, pode-se observar que no ensaio 8, condição em que o afluente não foi coagulado, a turbidez na saída do filtro não atendeu ao critério do adotado para o transpasse por turbidez, pois foram verificados valores maiores que $1,0 \text{ uT}$. Vale ressaltar que, a turbidez do afluente no dia em que esse experimento foi realizado, apresentou valores maiores que os demais ensaios nessa mesma taxa de filtração, e assim, não é possível afirmar a menor eficiência do sistema nessa condição, analisando apenas a turbidez do filtrado.

No entanto, os resultados de perda de carga, indicados nos gráficos da Figura 24 pela variação do nível de água na coluna, demonstraram a diferença nas condições experimentais dos processos submetidos à coagulação e à filtração, e no ensaio em que foi submetido apenas à filtração. O comportamento das curvas nos ensaios 5, 6 e 7 foram semelhantes, indicando que a retenção das partículas promove a elevação da perda de carga, pois a ocupação dos vazios granulares pelas impurezas promoveu maior a resistência à passagem de líquido no meio granular. A curva do ensaio 8, realizado sem a coagulação, é menos inclinada, indicando menor perda de carga devido à quantidade inferior de remoção de partículas em relação às demais condições verificadas. Dessa forma, apesar da turbidez de entrada ter sido maior no ensaio sem o processo de coagulação, os comportamentos das curvas de perda de carga, nos quais foi menor na condição sem coagulante (ensaio 8), reproduziu o mesmo resultado discutido para a taxa anterior, de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.

Figura 24 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração nos ensaios 5 a 8, referente à taxa de $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, meio granular 1



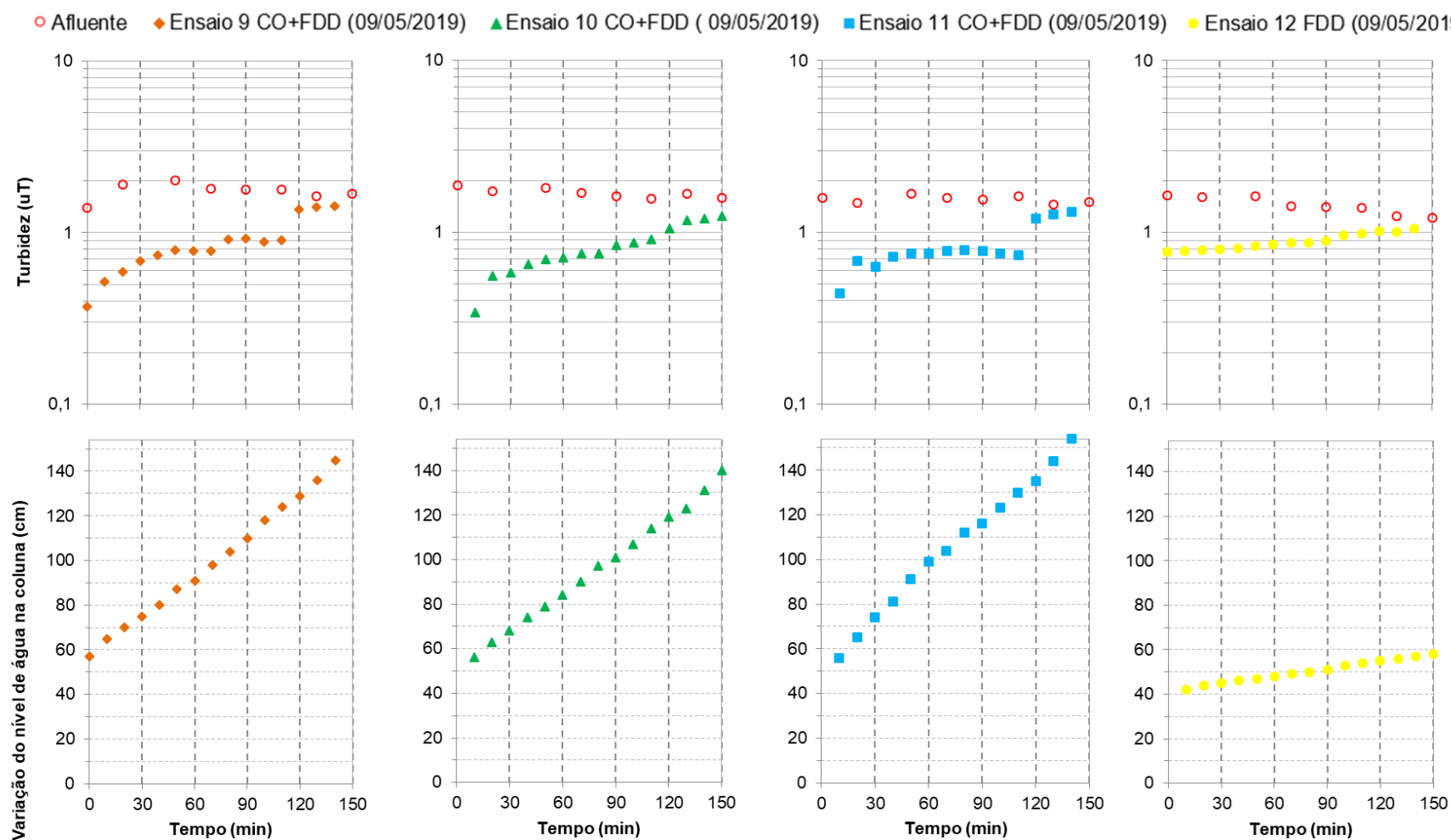
Fonte: Autora, 2020

Na Figura 25 estão apresentados os ensaios, também realizados no meio granular 1 (0,93 mm), na taxa de 500 m³/m².dia. O encerramento das carreiras dos ensaios 9, 10, 11 e 12 foram, respectivamente, 130, 120, 120 e 120 minutos (Tabela 15). Os resultados dos tempos de duração das carreiras de filtração indicam que, quanto maior a taxa de filtração, mais rápido o encerramento da filtração. Isso ocorre devido aos mecanismos de remoção de partículas, pois elas ficam retidas por ações de forças superficiais nos grãos, que compõem o meio filtrante. O aumento da velocidade de escoamento da água, como consequência do aumento da taxa, promove o aumento nas forças de cisalhamento e dessa forma, ocorre o desprendimento das partículas.

Nessa taxa, houve remoção de turbidez abaixo do limite estabelecido por esse trabalho, em ambas condições estudadas: coagulação seguida de filtração direta descendente (ensaios 9 a 11) e apenas filtração (ensaio 12). No entanto, em relação ao ensaio 12, que foi realizado na ausência de coagulação, notou-se baixos valores da turbidez de entrada, próximos a 1,0 uT. Assim, quando compara-se o ensaio na taxa de 500 m³/m².dia, sem adição de coagulante, com os ensaios 4 (taxa 120 m³/m².dia) e 8 (taxa 360 m³/m².dia), os quais não produziram água filtrada com turbidez menor que o valor estabelecido pelo transpasse, pode-se apontar como principal diferença a turbidez de entrada da solução que alimentou o sistema, pois nas condições 4 e 8, era próximo a 3,0 uT.

Em relação à perda de carga, na taxa de 500 m³/m².dia, as curvas representadas na Figura 25, reforçam os comportamentos verificados nas outras taxas avaliadas: os ensaios realizados com a coagulação seguida da filtração (CO+FDD) apresentam maior perda de carga. As curvas de queda de pressão nos ensaios 9, 10 e 11 são semelhantes e com inclinação maior que no ensaio 12, processo submetido à filtração, sem coagulação. Nessa taxa mais alta ficou ainda mais evidente tal comportamento, pois, devido à alta velocidade de escoamento, que reduz o tempo de duração de carreira de filtração, fica favorecida a ocorrência de mecanismos de desprendimento de partículas aderidas no meio granular.

Figura 25 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração nos ensaios 9 a 12, referente à taxa de $500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, meio granular 1



Fonte: Autora, 2020

Na filtração em areia, as impurezas são retidas nos poros do leito, com a ação de profundidade ou pela ação superficial. O resultado indicou que, no decorrer do processo, a perda de carga aumentou, devido ao aumento de partículas retidas no filtro, que, ofereceram maior resistência à filtração. Como consequência dos vazios ocupados, diminuem-se os poros vazios no leito granular, e funcionam como barreira física para novas partículas a serem retidas.

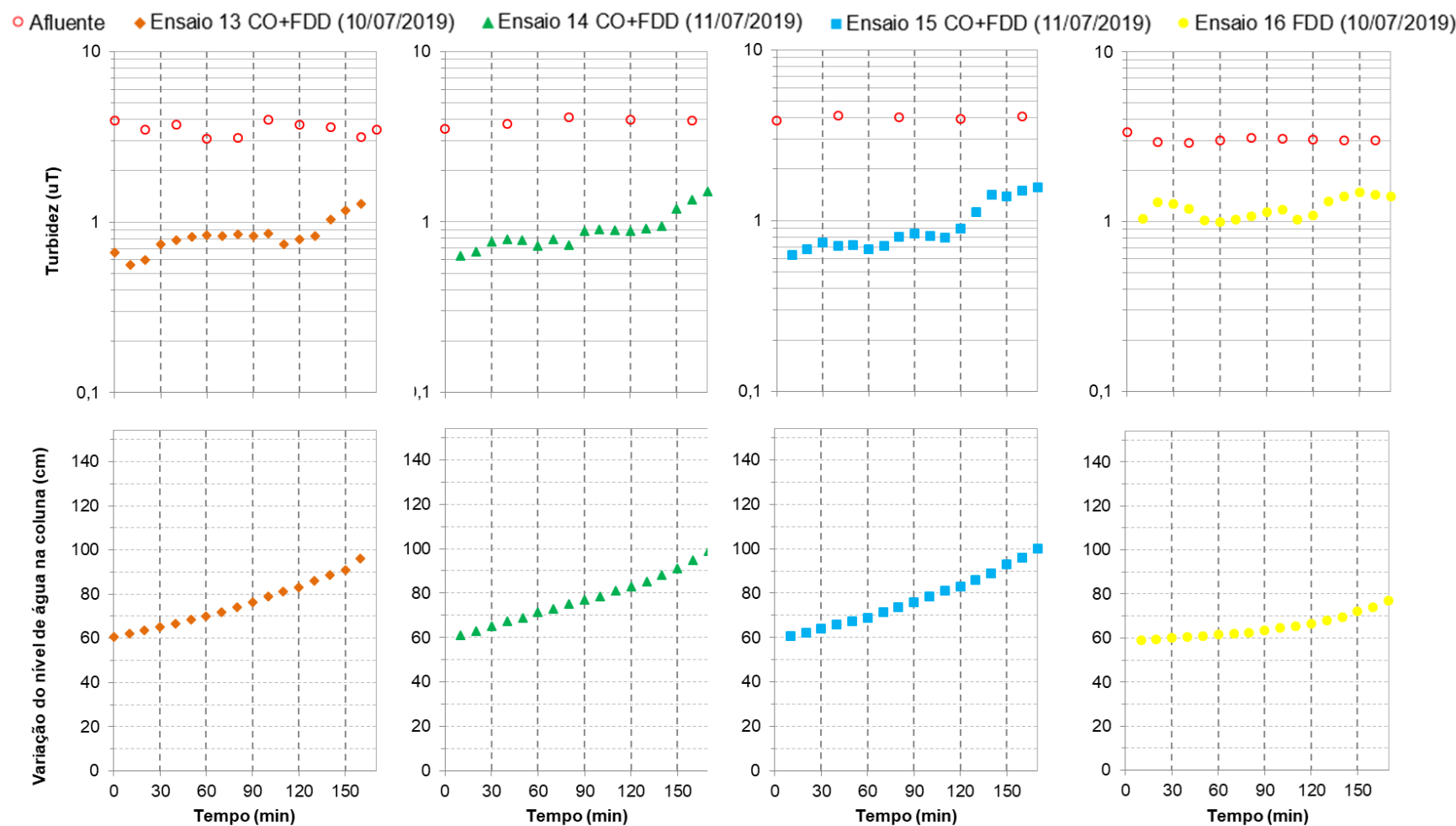
Em relação aos mecanismos de retenção de partículas na filtração, as partículas presentes no efluente ETE, afluente do sistema piloto de filtração, podem ser removidas devido ao tamanho (peneiramento), à sedimentação, à interceptação no fluxo, ao impacto com os grãos e à difusão das partículas menores que $1\text{ }\mu\text{m}$ no interior dos poros dos grãos de areia. A coagulação química auxiliou na remoção das impurezas, pois como o coagulante promove a neutralização das cargas superficiais das partículas, aumentou-se a adesão entre as partículas e os grãos do meio por forças superficiais. Assim, os resultados mostraram que a filtração na ausência desse processo químico ocorreu com menor eficiência, sugerindo que através foram retidas partículas pelos mecanismos de peneiramento, baseados na diferença de tamanho, e não por meio dos mecanismos de aderência superficial.

Pode-se observar também que, nas taxas de 360 e $500\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, os ensaios, cujas etapas operacionais foram a coagulação e seguida da filtração direta descendente, tiveram utilização melhor da carga hidráulica disponível. Na taxa de $120\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ foi utilizado cerca de 50% da carga hidráulica disponível, indicando que, em situações reais, a carga hidráulica poderia ser reduzida ou então, a altura do leito poderia ser aumentada.

Nas Figuras 26 a 28 estão apresentados os resultados dos ensaios com o meio granular 2. Os grãos que o compõem apresentam partículas de $1,09$ a $1,29\text{ mm}$, cujo diâmetro médio calculado é de $1,09\text{ mm}$ e porosidade de 47%. O objetivo foi investigar o comportamento de um meio granular com partículas maiores, avaliando as relações entre a granulometria, a retenção de partículas e a perda de carga.

Os ensaios apresentados na Figura 26 são referentes à taxa de $120\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, em que, 13, 14 e 15 foram coagulados e posteriormente submetidos à filtração direta descendente (CO+FDD), e o ensaio 16 o afluente do sistema foi submetido à filtração apenas (FDD).

Figura 26 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração dos ensaio 13 a 16, na taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, meio granular 2



Fonte: Autora, 2020

Nessa condição experimental sem uso de coagulante (ensaio 16), a remoção da turbidez não ocorreu dentro do valor adotado como transpasse neste trabalho. Os ensaios 13, 14 e 15, apresentaram tempos de carreira iguais à 150, 150 e 130 minutos, respectivamente (Tabela 15).

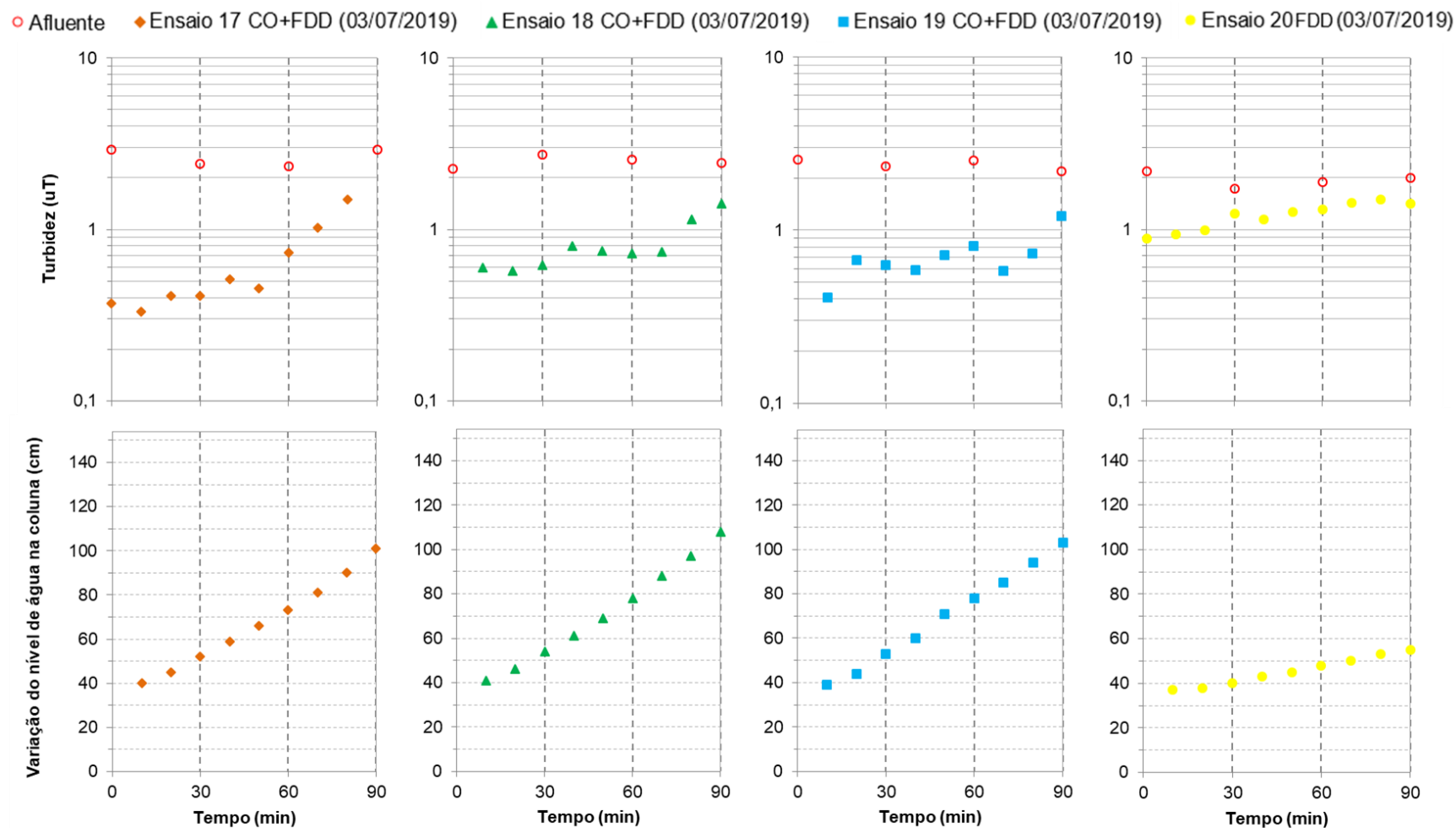
A evolução da perda de carga, medida através da variação do nível da água na coluna, foram semelhantes nas condições operacionais em que o efluente da ETE foi coagulado e filtrado, enquanto que, no ensaio 16, sem a coagulação química, a inclinação da curva, apresentada no gráfico da Figura 26, foi menor. As curvas de perda de carga indicam uma menor resistência à passagem do filtrado no meio granular, devido à menor quantidade de partículas retidas na situação em que não foi coagulado.

Na Figura 27 estão apresentados os ensaios realizados na taxa de $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ para o meio granular 2 (1,09 mm). Notou-se comportamento semelhante em relação à perda de carga nos ensaios 17, 18 e 19, em que o afluente do sistema foi submetido à coagulação e filtração direta descendente, apresentando carreiras de filtração de 80, 80 e 90 minutos, respectivamente. No ensaio 20, realizado na mesma taxa, no entanto, sem adição de coagulante, até os 30 minutos iniciais houve remoção de turbidez abaixo de $1,0 \text{ uT}$, limite adotado por este trabalho, e a curva da perda de carga apresentou menor inclinação que nos demais ensaios.

Os ensaios apresentados na Figura 28, realizados no meio granular 2 e taxa de $500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, nos quais o afluente foi submetido à coagulação e à filtração, apresentaram transpasse por turbidez, com tempos de duração de carreira de 50 minutos (ensaios 21, 22 e 23). Na condição sem uso de coagulante, ensaio 24, os valores de turbidez foram bem próximos a $1,0 \text{ uT}$.

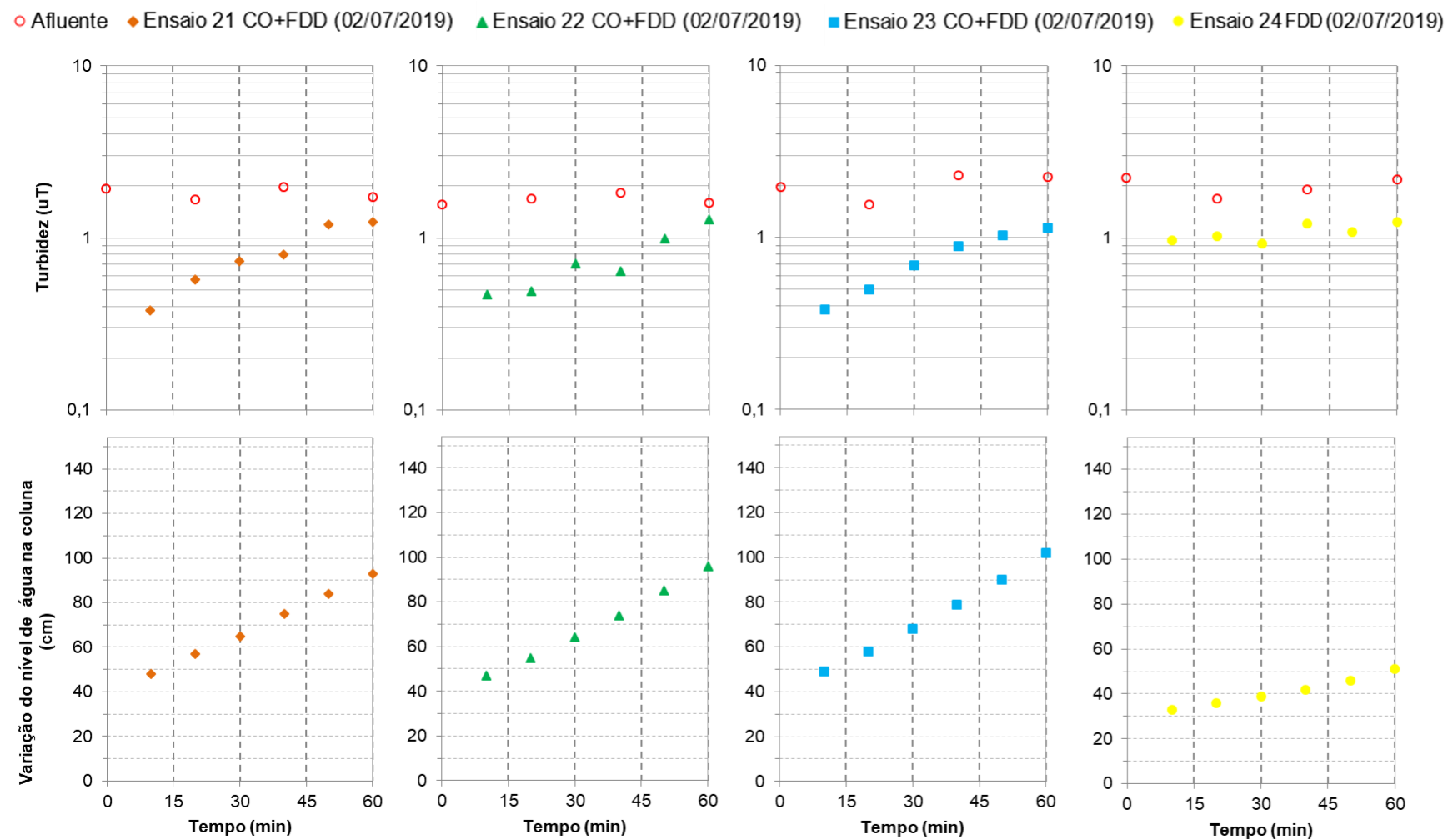
De maneira análoga aos ensaios anteriores, o comportamento da perda de carga na condição experimental em que o afluente não foi submetido à coagulação foi diferente das condições em que houve coagulação. As curvas de variação de nível de água na coluna de filtração, apresentadas na Figura 28, mostram comportamentos semelhantes, nos ensaios 21, 22 e 23 e uma inclinação bem menos acentuada no ensaio 24. Tal fato reproduziu os mesmos resultados observados nas demais taxas.

Figura 27 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração dos ensaio 17 a 20, na taxa de $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, meio granular 2



Fonte: Autora, 2020

Figura 28 – Resultados de turbidez e variação do nível de água na coluna de filtração dos ensaio 21 a 24, na taxa de $500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, meio granular 2



Fonte: Autora, 2020

Notou-se que as variações nos valores de turbidez da solução de entrada do sistema piloto não refletiram em diferenças significativas nos resultados dos ensaios, quando comparados à mesma taxa e ao mesmo meio granular.

O enfoque do trabalho foi a investigação de parâmetros hidráulicos dos efluentes secundários de ETE, submetidos à filtração direta descendente para produção de água de reúso. A análise geral dos ensaios experimentais, que variavam a taxa de filtração e a granulometria do meio filtrante permitiu algumas observações importantes. O aumento da taxa de filtração levou à diminuição das carreiras de filtração, pois as velocidades intersticiais crescem com a taxa, e assim, as partículas retidas nos vazios intergranulares ou nas superfícies dos grãos, são carregadas para a saída do filtro mais facilmente.

Em relação à granulometria do meio filtrante, o aumento do tamanho dos grãos de 0,93 mm (meio 1) para 1,09 mm (meio 2) gerou resultados distintos. Foram observadas reduções no tempo das carreiras de filtração de 4 vezes na taxa de 120 m³/m².dia, cerca de 3,4 vezes em relação à taxa de 360 m³/m².dia e na taxa maior, de 500 m³/m².dia, as reduções foram três vezes menores, quando comparam-se os meios granulares 1 e 2. O tempo de carreira está associado ao encerramento da carreira de filtração, que neste trabalho, foi obtido transpasse por turbidez. Portanto, evidencia-se a influência da granulometria na retenção das partículas.

A diversificação da granulometria do leito filtrante também influenciou na perda de carga, pois no meio granular 2, onde os grãos eram maiores, observou-se menores variações de água na coluna, indicando que resistência à passagem de fluido no leito de filtração foi menor. O aumento da granulometria, promove maior volume de espaços vazios no interior do meio, facilitando assim, o escoamento da solução em tratamento. Resultados semelhantes foram obtidos por Brinck (2009), que em filtros de antracito, com dois diferentes tamanhos efetivos (1,3 mm e 0,76 mm), as perdas de carga foram mais acentuadas no meio composto de grãos menores.

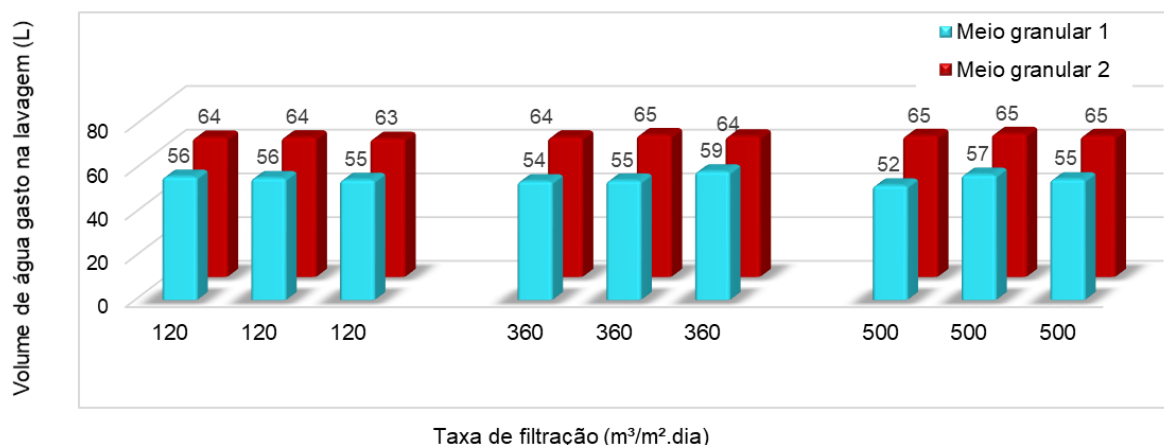
Em relação à evolução da perda de carga, apesar dos ensaios não terem sido interrompidos por carga hidráulica máxima (perda de carga), as taxas de 360 e 500 m³/m².dia, apresentaram maior aproveitamento da carga disponível. Na taxa de 120 m³/m².dia, em ambos os meios granulares, a perda de carga foi inferior à altura

máxima permitida pelo sistema. Isso implicaria no dimensionamento de um sistema de filtração direta descendente, nessa taxa mínima estudada, pois a carga hidráulica disponível poderia ser menor.

5.2.2 Lavagem dos filtros

Um parâmetro importante a ser analisado é a lavagem dos filtros de areia, através da fluidização do leito com água no sentido ascensional. Na Figura 29, estão apresentados os volumes de água consumidos na lavagem do leito de filtração até que a turbidez da água efluente do processo fosse menor que 0,5, uT. Os dados foram gerados a partir da vazão e do tempo de lavagem, apresentados na Tabela 15.

Figura 29 – Volume de água utilizado na lavagem durante a fluidização do leito nas taxas nos dois meios granulares avaliados



Fonte: Autora, 2020

Os resultados indicam que o aumento do tamanho médio dos grãos gerou maior consumo de água nas lavagens. O fato pode ser explicado porque, o meio granular 2, que era composto de grãos maiores (1,09 mm), requer velocidade mais elevada para suspender as partículas, resultando em maior volume de água. O mesmo comportamento já havia sido observado nos ensaios preliminares de fluidização, apresentados nas Figuras 21 e 22. Partículas maiores apresentam maior densidade, assim, a força exercida pelo meio para expandir o leito deve ser maior, resultando nessas diferenças de velocidade que refletem no volume de água utilizado.

Brinck (2009), em ensaios de filtração rápida, visando tratamento de água de abastecimento, em escala piloto, com leitos de camada profunda e diferentes composições, concluiu que, para o mesmo tempo de duração de lavagem e a mesma expansão do leito, o filtro contendo antracito possibilitou a menor velocidade ascensional na fluidização do leito, utilizando menor quantidade de água, quando comparado ao leito composto de areia. Fato explicado pela diferença na massa específica dos meios granulares, como ocorreu neste trabalho.

No Apêndice E estão apresentados os dados obtidos e condições operacionais da lavagem dos filtros.

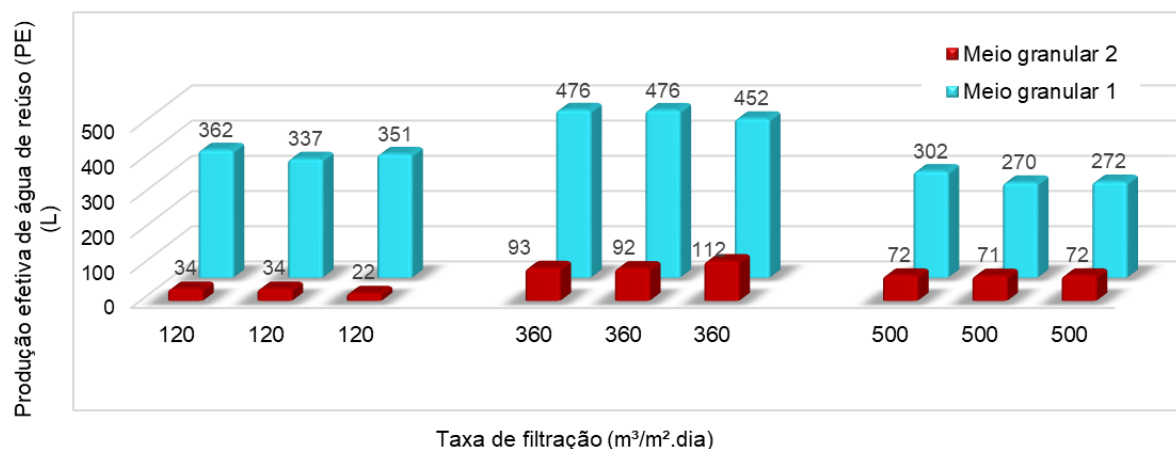
5.2.3 Produção efetiva de água de reúso

Somado às observações apresentadas nos itens anteriores, em relação à granulometria e taxa de filtração e à lavagem dos leitos, os dados apresentados nas Figuras 30 e 31 permitiram importantes conclusões quanto à produção efetiva de água de reúso.

Para o cálculo da produção efetiva de água, de acordo com a equação 15, foram quantificados os volumes de água produzido em cada ensaio, através da taxa e do tempo de carreira da filtração (equação 14). Através das vazões de expansão do leito, em 50%, e do tempo gasto na lavagem (equação 13), apresentados na Tabela 15, foram calculados o volume de água consumido durante a retrolavagem. Os resultados completos estão apresentados no Apêndice E.

A maior produção efetiva de água de reúso, conforme Figura 30, foi na taxa de $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, no meio granular 1, cujo diâmetro médio foi de $0,93 \text{ mm}$. Os resultados chamam atenção para o fato que os maiores tempos de carreira de filtração, de acordo com a Tabela 15, os quais foram observados na taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e meio granular mais fino ($0,93 \text{ mm}$), não apresentaram maior geração de água. O tempo da carreira na taxa de $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e no meio granular 1, não foi o de maior duração, com cerca de $4,5 \text{ h}$, frente à aproximadamente 10 h da taxa mínima, de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ no mesmo meio. Era esperado que carreiras de filtração mais longas produzissem volumes maiores de água. Mas, as análises mostraram que a maior produção efetiva de água de reúso, na taxa média e meio 1, foi superior às demais condições de operação investigadas.

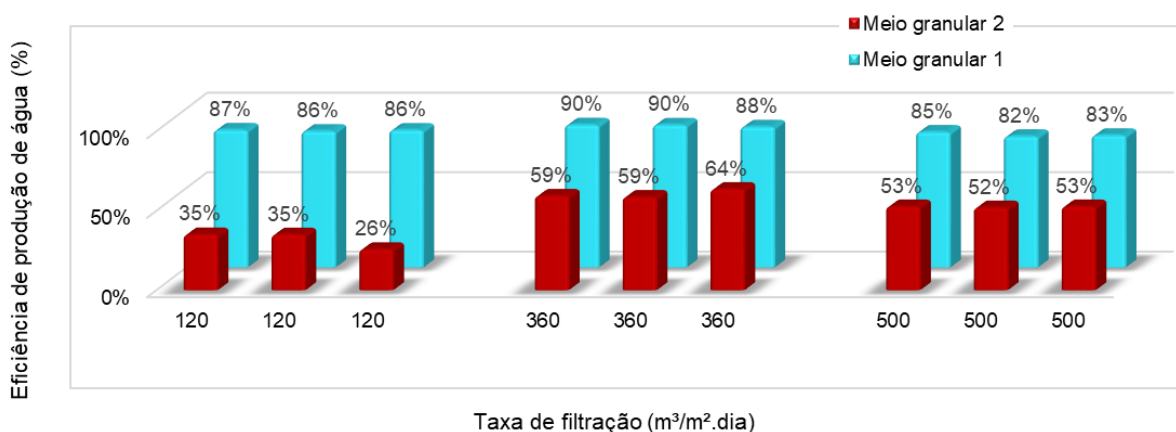
Figura 30 – Produção efetiva de água de reúso calculada para os ensaios de coagulação seguida de filtração direta descendente na unidade piloto



Fonte: Autora, 2020

Apesar dos dados apresentados na Figura 30 apontarem a taxa de 360 m³/m².dia e o meio granular 1, como a condição operacional que resultou nos maiores volumes gerados, as demais taxas nesse mesmo leito também foram eficientes na produção de água, apresentando altos valores de eficiência na produção de água, superiores a 80%, de acordo com a Figura 31.

Figura 31 – Eficiência de produção de água durante a filtração, na condições experimentais investigadas



Fonte: Autora, 2020

Na análise do gráfico da Figura 31, ficou evidente o ganho de eficiência no uso do meio granular com partículas médias de 0,93 mm frente às condições operacionais investigadas nesse trabalho. Os percentuais calculados relacionam a quantidade de água gerada e a quantidade efetivamente utilizada, ou seja, já

desconsiderando o volume gasto na lavagem. Esse é um fator muito importante na proposta de uma tecnologia para tratamento e produção de água de reúso, pois a cada encerramento de carreira é necessário a lavagem do filtro, e o volume de água utilizado representa perda de produção.

A água descartada durante a limpeza dos filtros, implica, também, em um custo maior na produção final da água de reúso. Outro fator relevante, é que um dos objetivos da produção da água de reúso é a contribuição para o balanço hídrico, gerando economia de água limpa. Dessa forma, não faria sentido produzir a água de reúso e gastar elevadas quantidades de água limpa para a limpeza do sistema de filtração. Assim, quanto maiores os percentuais, melhor a eficiência da quantidade de água gerada e utilizada.

As porcentagens expressas na Figura 31, indicam também os percentuais de água utilizado na lavagem, pois é a diferença entre o total produzido (100%) e as porcentagens apresentadas. Logo, no meio granular 1, composto de grãos menores (0,93 mm), foram utilizados menor volume de água.

Nota-se uma diferença significativa nos percentuais de eficiência entre os meios granulares investigados. O meio granular 1, %, partículas médias de 0,93 mm, apresentou percentuais que variam de 10 a 18, e o meio composto de grãos maiores, 1,09 mm, as porcentagens variaram de 36 a 74%. A disparidade obtida pode ser justificada, principalmente, pelas quantidades de água gerada, mostradas na Figura 30, nas quais as produções efetivas de água de reúso foram inferiores no meio granular 2.

Altos índices de água de retrolavagem em relação à água produzida, no meio granular 2, indicam baixa eficácia da tecnologia nas condições operacionais aplicadas, portanto o sistema deve ser otimizado, a fim de reduzir o volume de água na lavagem ou aumentar a produção de água.

Casari (2011), na produção de água de reúso a partir do tratamento com floculação em pedregulho seguida de filtração descendente em meio granular misto, de areia, cujo tamanho efetivo era de 0,45 mm e coeficiente de uniformidade 1,61, e antracito, tamanho efetivo era de 0,95 mm e coeficiente de uniformidade 1,4, obteve percentuais de água de retrolavagem em relação à água produzida iguais a 26%.

5.2.4 Caracterização da água de reúso após filtração direta descendente

Para o estudo experimental das características hidráulicas do sistema de filtração, além de se considerar, a evolução da perda de carga, a turbidez do afluente e do filtrado, a produção efetiva de água de reúso e a lavagem do filtro, foi investigada, também, a qualidade da água filtrada gerada após a tecnologia aplicada. Após a seleção da condição otimizada do item anterior, foram coletadas amostras de água dos ensaios na taxa de $360 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ para análise de alguns parâmetros importantes em relação à qualidade da água. Com o intuito de comparar a influência da granulometria na remoção, foram realizados ensaios e avaliações para os dois meios granulares.

Os dados mostrados nas Figuras 32 a 36, referentes à remoção dos parâmetros avaliados, podem ser consultados na íntegra no Apêndice F.

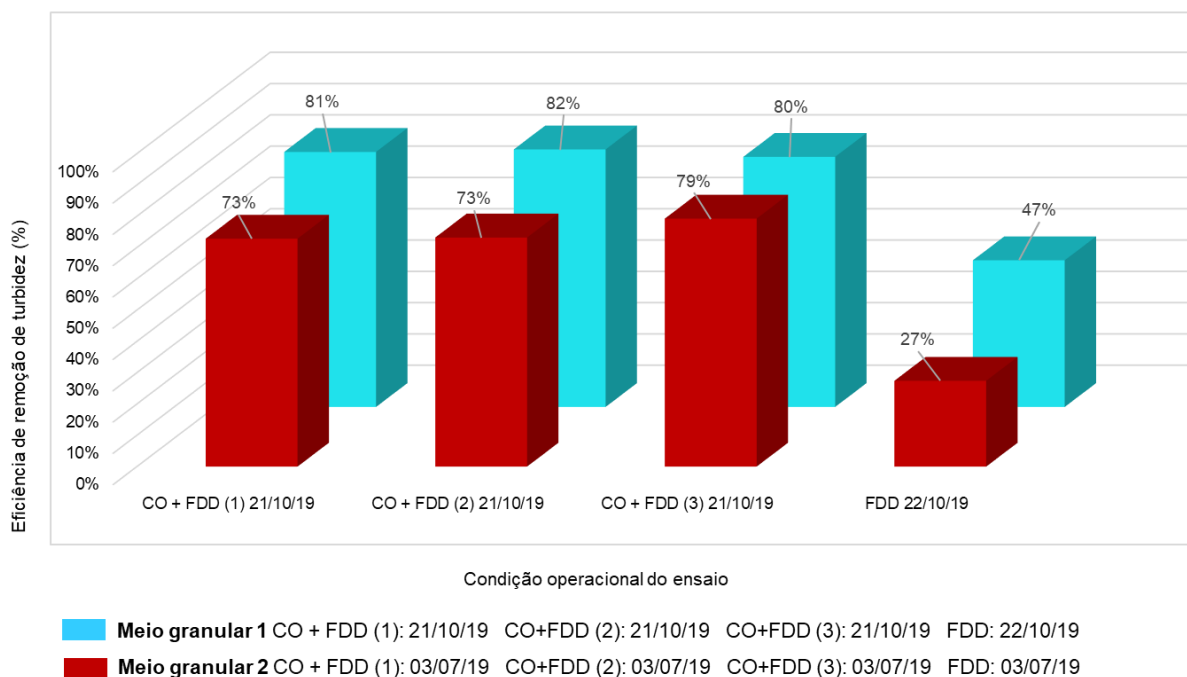
Na Figura 32, os gráficos representam a eficiência da remoção de turbidez após 1h de filtração. O principal parâmetro de controle da qualidade da água filtrada foi a turbidez, que era monitorada a cada intervalo de tempo durante a realização dos ensaios. Como a unidade piloto estava instalada nas dependências da ETE Caiçara, esse foi o parâmetro mais fácil de ser medido, pela facilidade da leitura e do manuseio do equipamento turbidímetro.

A turbidez, parâmetro que representa a presença de partículas em suspensão e em estado coloidal, teve maior porcentual de remoção nas amostras referentes ao meio granular 1 (diâmetro médio de 0,93 mm). A diferença no tamanho dos materiais granulares justificam a maior eficiência de retenção no leito composto de grãos menores e com menos vazios intergranulares. Fato esse, que, aumenta a resistência à filtração, por isso, nessa condição experimental, os ensaios apresentados na Figura 24, referentes ao meio granular 1, resultaram em perdas de carga do que nos ensaios realizados no meio 2 (Figura 27), composto de grãos médios de 1,09 mm.

Ainda em relação a esse parâmetro, foi possível observar a influência da coagulação, claramente, na eficiência de remoção de turbidez. A retenção de partículas que causam turbidez na água foi menor nas condições experimentais em que a solução não foi submetida à coagulação. Esse é um processo que desestabiliza e neutraliza as impurezas, facilitando que ocorra outros mecanismos de filtração, que não só o de retenção por diferença de tamanho, mas também

relacionados à aderência ao meio granular. No processo de coagulação as impurezas são neutralizadas, permitindo a formação de aglomerados, que ficam retidos nos poros dos filtros. Na ausência do coagulante, as partículas apresentam cargas superficiais, que dificultam o contato, devido a forças eletrostáticas.

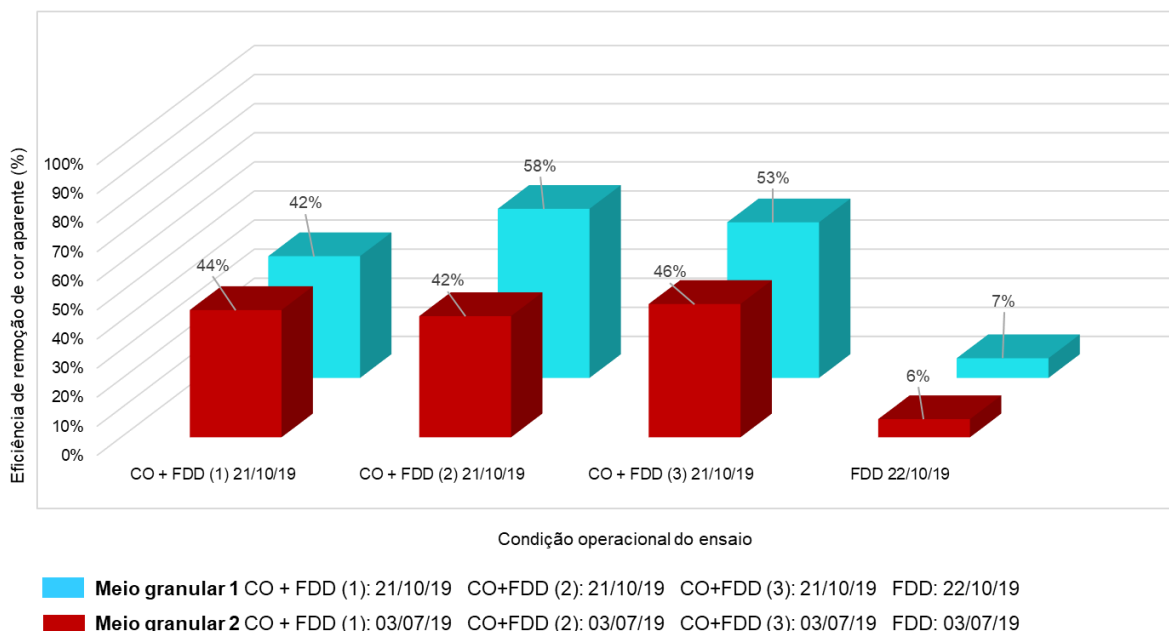
Figura 32 – Remoção de turbidez da água filtrada após filtração direta descendente, nos meios granulares 1 e 2



Em relação à cor aparente, que se refere à determinação de cor da solução em amostras com matéria orgânica em suspensão, os resultados de remoção estão apresentados na Figura 33. Nas condições experimentais que envolveram coagulação e filtração direta descendente as remoções foram superiores à 40%, frente a percentuais menores que 7% nas condições sem coagulação.

A análise da cor aparente em associação com a turbidez, é importante para avaliação da remoção de impurezas suspensas da água filtrada produzida, comprovando a eficácia na filtração de partículas dessa dimensão pela tecnologia da filtração direta descendente.

Figura 33 - Remoção de cor aparente da água filtrada após filtração direta descendente, nos meios granulares 1 e 2

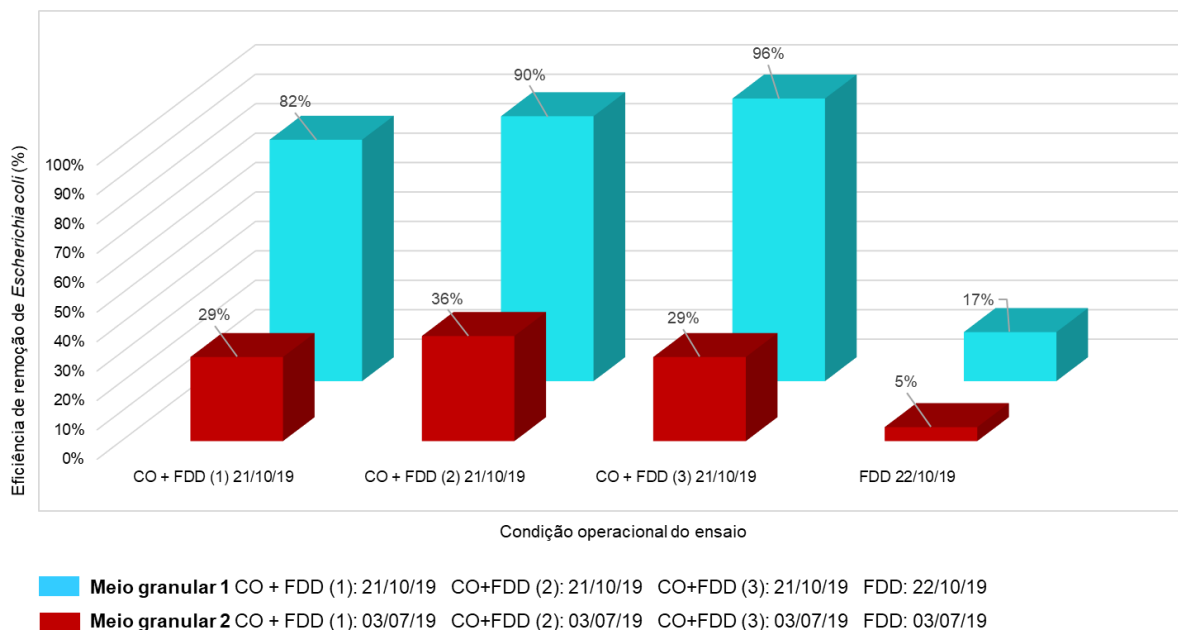


Fonte: Autora, 2020

Na Figura 34 foram apresentadas as eficiências de remoção de *Escherichia Coli*, importante para avaliação microbiológica da água de reúso produzida. Nesse parâmetro foi, nitidamente, maior a remoção nos ensaios de filtração realizados no meio mais fino (0,93 mm – meio 1). Os percentuais, que variaram de 82 a 96%, indicam a eficiência operacional para retenção de microrganismos, quando comparados aos percentuais de 29 a 36% dos ensaios realizados no meio granular 2. Foi possível também, em relação à esse parâmetro, ressaltar a relevância da coagulação, como auxiliar na retenção de partículas, na filtração, pois em ambos os leitos filtrantes investigados, os percentuais foram muito inferiores, cerca de 5 vezes menores, em média. Fato que pode ser explicado pela formação dos aglomerados, durante a coagulação química, que podem envolver também os microrganismos.

Dos resultados de *Escherichia coli*, apresentados na Figura 34, vale ressaltar que além das elevadas porcentagens de remoção, a água de reúso produzida ainda deve passar pela etapa de desinfecção, que não faz parte dos objetivos deste trabalho. No entanto, a quantidade de microrganismos remanescentes da filtração influencia diretamente no processo de desinfecção, refletindo assim, no custo final da água produzida.

Figura 34 - Remoção de *Escherichia coli* da água filtrada após filtração direta descendente, nos meios granulares 1 e 2



Fonte: Autora, 2020

Casaril (2011) verificou a contribuição positiva da remoção de coliformes nos processos de floculação e filtração direta descendente em meio granular para que na etapa de desinfecção não tivesse tantos microrganismos, impactando diretamente nos custos do processo. A remoção de coliformes, segundo o autor, foi da ordem de 1000 NMP/100 mL, na etapa de filtração. Outros autores apontam remoções de *E. coli* de 62,2% na filtração direta de esgoto com pré-floculação (TOSETTO, 2005) e de 51,5% em filtros com leito de antracito e areia (ZANETTI, 2006).

As análises de carbono orgânico total (COT), apresentadas na Figura 35, mostram que os percentuais de compostos orgânicos foram menores que os demais parâmetros apresentados. Pode-se associar a baixa eficiência ao fato que, muitos carbonos orgânicos, presentes na solução, estão na forma dissolvida, e estes não são capazes de serem removidos na filtração em areia.

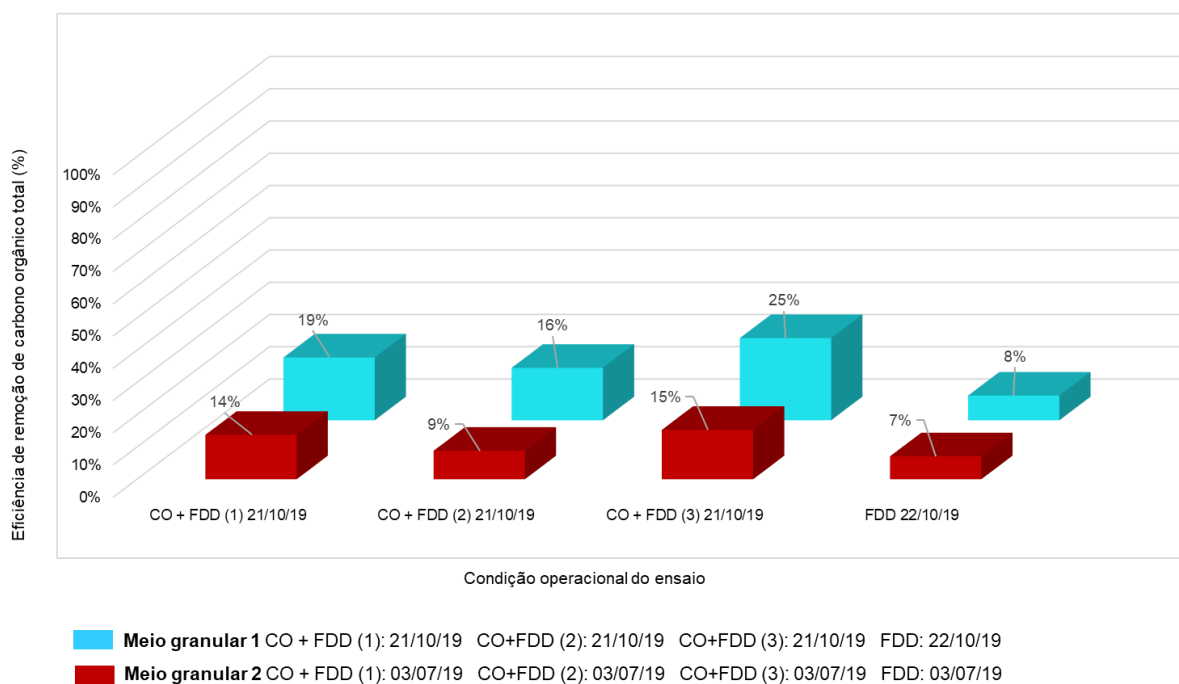
De forma geral, houve maior remoção de COT no leito com grãos menores e no processo envolvendo coagulação, indicando maiores eficiências nessas condições.

A quantificação de carbono orgânico total é considerada a forma mais conveniente para medir a presença de carbono orgânico em águas, pois independe

do estado de oxidação da matéria orgânica e não mede outros elementos ligados à cadeia dos compostos orgânicos tais como nitrogênio e hidrogênio. Ressalta-se que a remoção de COT indica indiretamente a remoção de possíveis microcontaminantes orgânicos, como por exemplo agrotóxicos, hormônios, fármacos e microrganismos, como microalgas e cianobactérias, cianotoxinas, vírus, bactérias, protozoários.

Não existem recomendações legais sobre a remoção desse parâmetro, no entanto, Dias (2018) e Marrengula (2016) mostraram a relação entre altas concentrações de carbono orgânico e a formação de subprodutos organoclorados durante a desinfecção com cloro, relacionado ao tratamento de efluente de ETE, e Romero Esquivel (2012) e Paschoalato et al. (2013) tiveram os mesmos resultados em relação à água de abastecimento. Dessa forma, ressalta-se a importância da remoção de partículas orgânicas que são quantificadas por esse parâmetro.

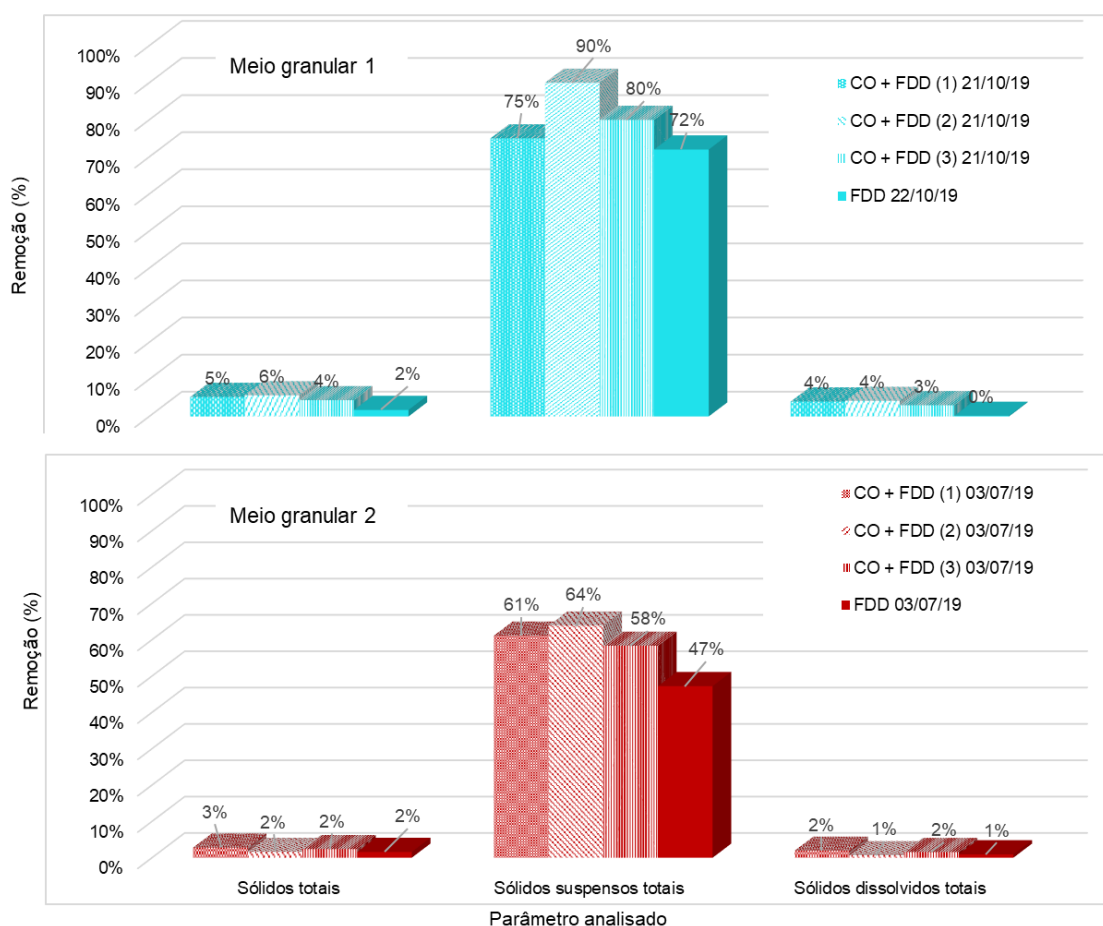
Figura 35 – Remoção de carbono orgânico total da água filtrada após filtração direta descendente, nos meios granulares 1 e 2



Os sólidos totais, cujos percentuais de remoção estão apresentados na Figura 36, representam a composição de sólidos dissolvidos e suspensos totais. Esses, como correspondem à parcela retida em filtro menor que 0,45 μm , apresentaram

maior remoção após a filtração direta descendente. Os dissolvidos, por sua vez, são as partículas que passam pelo filtro, portanto, são muito de dimensões muito pequenas, e ocorrem devido à presença de sais inorgânicos, oriundos de descargas de água residuais, e à matéria orgânica. Dessa forma, a tecnologia aplicada não apresenta remoção de sólidos dessa dimensão, e os resultados, apresentados na Figura 36, comprovam esse fato. Portanto, os percentuais de remoção de sólidos totais referem-se, em quase a totalidade, à remoção dos sólidos suspensos, mostrando à eficiência da filtração direta descendente.

Figura 36 – Remoção de sólidos totais, suspensos e dissolvidos da água filtrada após filtração direta descendente, nos meios granulares 1 e 2



Fonte: Autora, 2020

Em relação à comparação entre os meios granulares, a diminuição da granulometria, no meio granular 1 com partículas média de 0,93 mm, favoreceu a retenção dos sólidos suspensos, pois esses ficaram retidos no interior dos poros do

leito de filtração. O uso do coagulante químico também favoreceu à remoção dos sólidos suspensos, reforçando a importância do processo para desestabilização das partículas na eficiência de remoção de sólidos suspensos.

Os resultados de caracterização reforçam a seleção da condição experimental que produziu maior eficiência de água: taxa de filtração de 360 m³/m².dia, coagulante PAC na concentração de 15 mg/L e leito de filtração com grãos médios de 0,93 mm.

Na Tabela 16 estão apresentados, em valores absolutos, os parâmetros de caracterização da água de reúso produzida, após o processo de coagulação seguida da filtração direta descendente.

Tabela 16 – Caracterização da água filtrada, após coagulação química e filtração direta descendente, na taxa de 360m³/m².dia e no meio granular 1

Parâmetro	Unidade	Ensaio 1 21/10/19	Ensaio 2 21/10/19	Ensaio 3 21/10/19	Reúso restrito não potável (SÃO PAULO, 2020)
Carbono orgânico total	mg C/L	3,86	4,01	3,57	-
Cor aparente	uH	25	18	20	-
DBO₅ dias a 20 °C	mg O ₂ /L	12	11	11	≤ 30
E. Coli	NMP/100mL	90	50	20	≤ 120
pH	-	7,55	7,28	7,44	6 a 9
Sólidos totais	mg/L	216	215	218	-
Sólidos suspensos totais	mg/L	1	0,4	0,8	≤ 30
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	215	214,6	217,2	-
Turbidez	uT	0,47	0,45	0,51	-

Fonte: Autora, 2020

De acordo com os limites estabelecidos pela USEPA (2012) para água de reúso, os coliformes fecais, para uso industrial devem ser menores que 1000 NMP/100mL, portanto, nas condições experimentais estudadas, a água de reúso gerada atende ao critério estabelecido. Em relação à resolução conjunta da Secretaria de Estado da Saúde e de Infraestrutura e Meio Ambiente número de 13 de fevereiro de 2020 do estado de São Paulo, em que o parâmetro *E. coli*, com o limite para o uso restrito não potável de 120 NMP/100mL também foi atendido.

Ressalta-se ainda que, em uma situação real, a estação produtora de água de reúso, após a filtração, deve submeter à etapa de desinfecção, para eliminação dos microrganismos patogênicos. A recomendação da NBR 13969 também foi atendida, pois as classes que envolvem lavagens de pátios ou contato com usuário, o que pode ser encaixado no perfil de objetivo desse trabalho, que é o reúso industrial, pois apresentou coliformes menores que 200 NMP.

A legislação americana (USEPA, 2012) e decreto estadual (SÃO PAULO, 2020) também citam que os sólidos suspensos totais devem ser menores que 30 mg/L, o que nesse trabalho também atendeu ao requisito. Em relação à demanda bioquímica de oxigênio (DBO), o decreto estadual determina que em usos de não potáveis deve ser menor que 30 mg O₂/L, os resultados da água gerada indicam que o padrão exigido foi cumprido.

5.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO EM ESCALA REAL

Após a análise dos resultados mostrados no item 5.2, referentes aos parâmetros hidráulicos e à caracterização da água de reúso gerada, foi selecionada uma condição otimizada para a projeção de um sistema de filtração em escala real.

Os cálculos foram realizados utilizando uma vazão média de 10.000 m³/dia, adotado como base de cálculo. Na Tabela 17 está apresentado um resumo das condições operacionais utilizadas nos ensaios na taxa de 360 m³/m².dia, no meio granular 1, o efluente foi submetido à coagulação química e à filtração direta descendente em meio granular. As informações completas do pré-dimensionamento podem ser consultados no Apêndice G.

Na projeção da filtração direta em escala real foram mantidos: a altura do leito de filtração de 0,40 m, o tempo de duração de carreira, em média de 270 minutos, o tempo da lavagem e a velocidade de fluidização na retrolavagem. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 18.

Os resultados calculados nesta projeção podem ser alterados em função da vazão de efluente a ser tratado, por isso foi utilizado 10.000 m³/dia como referência. A área total de filtração calculada foi de 27,8 m².

Tabela 17 – Resumo das condições operacionais do ensaio que apresentou melhor desempenho nos ensaios da unidade piloto

Parâmetro	Condição utilizada no ensaio	
Taxa de filtração	360	m ³ /m ² .dia
Área de filtração	0,00785	m ²
Altura do leito	0,4	m
Diâmetro médio dos grãos	0,93	mm
Porosidade do leito	46	%
Densidade aparente do leito	1389	kg/m ³
Coeficiente de uniformidade	1	
Tempo médio de carreira de filtração	270	minutos
Carga hidráulica média utilizada	123	cm
Vazão na retrolavagem	11,18	L/min
Tempo da retrolagem	5	minutos
Expansão do leito na retrolavagem	50	%

Fonte: Autora, 2020

Na estimativa do número de filtros, através de simulações e de cálculos, notou-se que, quanto mais filtros fossem utilizados, durante a interrupção de um deles para a lavagem, mais próxima seria a taxa de filtração do valor operacional de 360 m³/m².dia. No entanto, um alto número de filtros requer maior manutenção e operação, principalmente dado pelo número de carreiras de filtração em um dia, superior a 5. Assim, adotou-se, então, 6 filtros, com dimensões de 1,5 m por 3,1 m, e quando um filtro tiver inoperante, durante os 5 minutos da lavagem, a taxa de filtração nos outros 5 filtros em operação será de 432 m³/m².dia.

O volume efetivo produzido, por dia, calculado foi de 8782,4 m³, sendo mantida a eficiência da produção de água de reúso de, aproximadamente, 90%, ou seja, 10% do volume total é utilizado na lavagem.

A massa de areia necessária para composição dos leitos de filtração será de 15,65 toneladas. É importante ressaltar que, um bom controle na operação de retrolavagem, não ocorre perda de sólidos por arraste, portanto, essa massa não precisaria ser repostada. Em relação ao coagulante, diariamente serão utilizados 125 L de PAC, por isso a importância da seleção de um coagulante com bom custo benefício.

Tabela 18 – Projeção do sistema de filtração em escala real para a produção de água de reúso na ETE Caiçara

Parâmetro operacional	Valor calculado na projeção	
Área de filtração	27,8	m ²
Número de filtros	6	
Área de cada filtro	4,6	m ²
Largura do filtro	1,5	m
Comprimento do filtro	3,1	m
Número de carreiras por dia	5,24	
Volume produzido por carreira	1875	m ³
Volume produzido diariamente	9818,18	m ³
Vazão da lavagem	6,59	m ³ /min
Volume utilizado na lavagem por carreira	32,97	m ³
Volume utilizado na lavagem dos filtros por dia	1035,78	m ³
Produção efetiva diária	8782,4	m ³
Massa de areia para leito	15,43	toneladas
Volume de coagulante por dia	125	L

Fonte: Autora, 2020

Alguns parâmetros operacionais poderiam ser alterados para otimização do sistema em escala real:

- Otimização da lavagem dos filtros, para diminuição do volume de água utilizada;
- Aumento da altura do leito de filtração para carreiras de filtração mais longas;
- Aumento da carga hidráulica disponível.

Durante a retrolavagem foi utilizada expansão do leito de 50%, seguindo recomendações de Di Bernardo et al. (2011), que em lavagens de filtros de areia no sentido ascensional com água, os leitos deveriam ser expandidos de 30 a 50%. Portanto, poderiam ser utilizadas menores expansões a fim de investigar se o volume de água utilizado seria menor, contribuindo para um melhor equilíbrio entre produção de água e água descartada nas lavagens. A comportamento da curva apresentada da Figura 22, que relaciona expansão do leito com a velocidade de fluidização, evidencia que maiores expansões requerem maiores velocidades de fluidização do leito. No entanto, vale ressaltar que, menor expansão pode ser necessário maiores tempos de lavagem, pois, a expansão do leito está associada ao

aumento da porosidade do mesmo (Figura 23) o que facilita na remoção das partículas aderidas nos grãos de areia.

Outra questão a ser investigada para otimização da lavagem, seria quanto à lavagem com insuflação de ar, junto com a água em sentido ascendente. Brinck (2009) utilizando insuflação de ar e posterior lavagem com água, utilizou expansão de leito de 10 a 20% em ensaios em filtros rápidos de areia e antracito de camadas profundas. Dessa forma, com expansão menor do leito, vazão menor será necessária, podendo assim, diminuir o volume utilizado.

O aumento do altura do leito de filtração, em teoria, aumentaria o espaço intergranular responsável pela retenção de partículas, para uma filtração em profundidade. Dessa forma, seria esperado carreiras de filtração mais longas. No entanto, esse mesmo aumento de altura de leito, causaria maiores perdas de carga, sendo necessário aumentar a carga hidráulica disponível, para não reduzir o tempo da carreira de filtração. Dessa forma, aumentando, por exemplo, a altura do leito para 1,0 m, duas vezes e meia maior que nas condições experimentais, a carga hidráulica disponível, considerando a perda de carga utilizada no ensaio, seria de 3,0 m, aproximadamente.

A partir dos resultados da projeção é possível fazer uma análise de custos e viabilidade para a implementação do sistema de filtração direta descendente. Vale ressaltar que, na produção de água de reúso, a grande vantagem econômica é que os custos envolvidos na captação não são adicionados ao valor final da água produzida. No entanto, inicialmente tem-se altos custos com adaptações do sistema existente e da rede de instalação.

6 CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado e nos objetivos propostos, as seguintes conclusões específicas foram observadas:

- O resultado do monitoramento do efluente secundário da estação de tratamento de esgoto Caiçara apontou para a possibilidade de aplicação da filtração direta descendente, pois os valores obtidos, de turbidez, de sólidos suspensos e de cor aparente, foram, respectivamente, $3,0 \pm 1,9$ uT, 27 ± 2 mg/L e 48 ± 16 uH;

- Nos ensaios em bancada, através da construção do diagrama de coagulação com coagulação em jarreste e filtração em filtros de areia de laboratório, foi possível estabelecer a condição ótima de coagulação, cuja concentração do coagulante policloreto de alumínio (PAC) foi de 15 mg/L, com pH de coagulação 7,35, condições estas que resultaram em turbidez remanescente de 0,8 uT e cor remanescente de 20 uH, sem utilização de produtos químicos auxiliares de coagulação;

- Ensaios preliminares na unidade piloto, nos meios filtrantes 1 e 2 permitiram a verificação dos parâmetros de perda de carga, de velocidade de fluidização, da expansão do leito e do aumento da porosidade durante a retrolavagem do filtro, e, foi possível prever que, o aumento na granulometria do leito de filtração requer maiores velocidades de fluidização, gerando maior vazão de água na lavagem, o que promove o aumento na perda de carga do sistema;

- Em relação aos ensaios realizados para um mesmo meio granular, a taxa de filtração de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, condição mínima estudada, gerou maior tempo de carreira de filtração;

- Em relação à mesma taxa de filtração, quando comparadas, o meio granular composto de partículas menores, onde verificou-se maior retenção das impurezas, apresentou maior tempo de carreira;

- Quanto à perda de carga, os maiores valores foram obtidos no meio granular composto de grãos menores e na taxa de filtração maior, $500 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, pois a resistência ao escoamento no leito com grãos menores foi maior e a taxa maior provoca entupimento mais rápido dos filtros;

- De forma geral, os ensaios submetidos à filtração direta descendente sem a etapa da coagulação química apresentaram menor remoção de partículas, fato verificado tanto pelo transpasse por turbidez, quanto na perda de carga, que foi menor, indicando que menos partículas foram retidas e por isso não aumentou a resistência ao escoamento do filtrado;

- Durante a retrolavagem, os ensaios realizados com meio granular 2, grãos médios de 1,09 mm, resultaram em maior consumo de água de lavagem em relação à água produzida no ensaio, pois as partículas granulares maiores e mais densas requerem maiores velocidades ascensionais, causando maior volume de água consumido;

- Nas análises da qualidade do efluente da filtração direta descendente, o meio granular 1, composto de grãos menores, apresentou maior eficiência de remoção em todos os parâmetros analisados e foi, também observada a importância da coagulação na eficiência da retenção de impurezas;

- A caracterização da água filtrada na condição selecionada como otimizada, ou seja, a que resultou na maior produção efetiva de água de reúso apresentou parâmetros que indicam a possibilidade de reúso não potável para menos usos nobres, como lavagem de pátios, irrigação, alguns fins industriais;

- A partir de parte da vazão de efluente da ETE Caiçara, foi calculada a área de filtração para projeção em escala real de um sistema de filtração direta descendente, correspondendo à 27,8 m², podendo ser divididos em 6 filtros retangulares, considerando as interrupções para a lavagem;

- No sistema pré-dimensionado, estimou-se a produção efetiva de água de reúso em cerca de 8800 m³ por dia, com porcentual de água de lavagem equivalente a 10% da produção diária.

De forma geral, com os resultados apresentados e de acordo com os objetivos propostos por este trabalho, o sistema piloto de filtração direta, instalado na ETE Caiçara, com uso contínuo do efluente possibilitou a avaliação de parâmetros operacionais e obtenção de condições otimizadas. A partir desses dados, concluiu-se que, a tecnologia de filtração direta descendente foi eficiente para a produção de água de reúso. E assim, a projeção em escala real da filtração direta descendente

indica a possibilidade da implementação de uma unidade geradora da água de reúso em estações de tratamento de esgoto doméstico.

A proposta apresentada, apesar de ter sido aplicada para a ETE Caiçara, pode ser estudada em outras estações, desde que sejam verificados os parâmetros de qualidade do efluente gerado na ETE e ajustadas as condições de coagulação, pois a característica do esgoto tratado é inerente à cada região e estação.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar o uso de dosagem menor de coagulante, mesmo com o uso de auxiliar para correção de pH, para avaliação dos custos finais da água gerada.
- Fazer a análise de custos para a implantação de unidade produtora de água de reúso com a tecnologia de filtração direta descendente.

REFERÊNCIAS

ANA, Agência Nacional de Águas (Brasil). Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil / Agência Nacional de Águas. - Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/acesso-a-informacao/institucional/publicacoes> Acesso em julho de 2020.

ANA, Agência Nacional de Águas (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.bb39ac07.pdf> Acesso em julho de 2020.

ANDERSON, J. The environmental benefits of water recycling and reuse. Water Science and Technology: water supply, London, vol.3, no. 4, 2003.

AQUAPOLO AMBIENTAL S.A.; Tecnologia e Água de Reúso. Disponível em: <http://www.aquapolo.com.br/agua-de-reuso>. Acesso em fevereiro de 2019.

ASANO, Takashi; LEVINE, Audrey. Wastewater reclamation, recycling and reuse: An Introduction. In: ASANO, Takashi (Ed.). Wastewater reclamation and reuse. Lancaster: CRC Press, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES). Reúso da Água. Revista DAE, SABESP, São Paulo, n.167, set/out 1992, p. 24-32.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR nº 13.969: Água de chuva - Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis - requisitos. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR nº 15.527: Tanques sépticos – Unidade de tratamentos complementar e disposição final dos efluentes líquidos. Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

AWWA, American Water Work Association. Water quality and treatment. 5ªed. New York: McGraw Hill, 1999.

AWWA, American Water Work Association. Water quality and treatment: a handbook on drinking water. 6ªed. New York: McGraw Hill, 2011.

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº XX, de 29 de janeiro de 2000. Define os critérios de balneabilidade em águas brasileiras. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 25 de janeiro de 2001. Seção 1.

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 de março de 2005. Seção 1.

BRASIL. CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrão de lançamento de efluentes complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.

BRASIL. Portaria MS nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, 12 dez. 2011.

BRASIL. Portaria de Consolidação nº 5 DE 28/09/2017, anexo XX. Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (origem: prt ms/gm 2914/2011). Diário Oficial da União, 03 out. 2017.

BRASIL. Resolução Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 54, de 28 de novembro de 2005 - Estabelece critérios gerais para reúso de água potável. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direito não potável de água, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília – DF, novembro de 2005.

BRINCK, Nádia Cristina Pires. Avaliação do tipo de material filtrante no comportamento hidráulico de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

BRK Ambiental; Caso Aquapolo. Disponível em: <https://www.brkambiental.com.br/aquapolo> Acesso em fevereiro de 2019.

CASARIL, Leonardo. Estudo da floculação em meio granular seguida por filtração descendente em esgoto doméstico tratado para fins de reúso. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

CROOK, J. Critérios da qualidade da água para reúso. Revista DAE – SABESP. Número 174. 1993

DIAS, Talita Rafaella da Silva Boldrin, Avaliação da formação de subprodutos orgânicos halogenados em água de reúso não potável com o uso de desinfetantes clorados. Dissertação (mestrado) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2018.

DI BERNARDO, Angela S. Desempenho de sistemas de dupla filtração no tratamento de água com turbidez elevada. Tese (doutorado) -- São Carlos, 2004.

DI BERNARDO, L. Coagulação e floculação. In: Métodos e técnicas de tratamento de água. v. I. Rio de Janeiro: ABES, 1993.

DI BERNARDO, L. (Coordenador). Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. Rio de Janeiro: ABES, Rima 2003, 498 p. Projeto PROSAB. 2003

DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2ª edição. São Carlos: Rima Editora, 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P.E.N. Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos: LDiBe, 2011.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P.E.N. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 3ª edição. São Carlos: LDiBe, 2017.

DI BERNARDO, L.; HENRIQUEZ, J. M. M. Filtração direta descendente em meio filtrante constituído de areia. In: SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 8, 1998, João Pessoa. Anais. Rio de Janeiro: ABES, 1998.

DI BERNARDO, L.; MATSUMOTO, T. Estudos comparativos entre filtros de fluxo ascendente e descendente com meio filtrante de areia utilizando água decantada como afluente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 14, 1987, São Paulo. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 1987.

DI BERNARDO, L.; PAZ, Lyda Patricia Sabogal. Seleção de tecnologias de tratamento de água. Volume I. São Carlos: LDiBe, 2008.

HESPANHOL, Ivanildo. Potencial de Reuso de Água no Brasil Agricultura, Indústria, Municípios, Recarga de Aquíferos. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 7 n.4 Out/Dez 2002.

HESPANHOL, Ivanildo. A Inexorabilidade do reúso potável direto. Revista DAE Sabesp, 2015.

HESPANHOL, Ivanildo; RODRIGUES, Raphael; MIERZWA, José Carlos. Reúso potável direto - estudo de viabilidade técnica em unidade piloto. Revista DAE, n. 217, v. 67, 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Panorama das cidades brasileiras. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/ribeirao-preto/panorama> Acesso em julho 2020.

IVES, K.J. Deep filters. Filtration and Separation, 1967.

IVES, K.J. Advances in deep-bed filtration. Transactions of the Institution of Chemical Engineers. V.48, n.3, 1970.

IVES, K.J. Capture mechanisms in filtration: the scientific basis of filtration. The Netherlands: Nato Advanced Study Institute. Applied Sciences, Series E. 1975.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. Tratamento de Esgotos Domésticos. 8ª Edição. Rio de Janeiro, 2017.

JUNIOR, Armando Borges de Castilhos; DALSSASSO, Ramon Lucas; ROHERS, Fabio. Pré-tratamento de lixiviados de aterros sanitários por filtração direta ascendente e coluna de carvão ativado. Eng. Sanit Ambient, v.15, n.4. 2010.

LANG, J.S., GIRON, J. J., HANSEN, A. T. - Investigating filter performance as a function of the ratio of filter size to media size. Journal of American Water Works Association, p.122-130, v. 85, n. 10, October 1993.

MANCUSO, Pedro Caetano Sanches; SANTOS, Hilton Felício dos. Reúso de Água. Barueri, S: Manole, 2003.

MARRENGULA, Fernando Alonso. Avaliação da filtração direta descendente no tratamento de efluente de estação de tratamento de esgoto para reúso não potável Dissertação (mestrado) - Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2016.

METCALF & EDDY. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5ª Edição. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MIERZWA, José C.; HESPANHOL, Ivanildo. Água na Indústria: uso racional e reuso. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MORUZZI, Rodrigo Braga. Reúso de água no contexto da gestão de recursos hídricos: impacto, tecnologias e desafios. OLAM – Ciência & Tecnologia – Rio Claro / SP, Brasil – Ano VIII, Vol. 8, N.3, 2008.

MOTA FILHO, C. R.; FREITAS, J. W.; PÁDUA, V. L. Desempenho da filtração direta descendente em função da granulometria do meio filtrante, da dosagem de coagulante e da dosagem de pré-oxidante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2003, Joinville. Anais. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

NASEER, Rusul; ALHAIL, Saad Abu; XI-WU, Lu. Fluidization and Optimum Backwashing Conditions in Multimedia Filter. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 3(11): 1302-1307, 2011.

PASCHOALATO, C.F.P.R; DANTAS, A.D B; Rosário, G; SILVA, B. M; DIAS, T. R.S.B. Potencial de Formação de subprodutos do cloro em mananciais de abastecimento. *Hydro* (São Paulo), v. VII, p. 30- 35, 2013.

PAYMENT, P.; BERTE, A.; PRÉVOST, M.; MÉNARD, B.; BARBEU, B. Occurrence of pathogenic microorganisms in the Saint Lawrence River (Canada) and comparison of health risks for populations using it as their source of drinking water. *Canada Journal of Microbiology*, 2000.

POHLMANN, Marcelo. Tratamento de esgotos sanitários visando reúso. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP, 2010.

ROMERO ESQUIVEL, Luis Guillermo. Remoção de matéria orgânica natural e precursores de trihalometanos por filtração em margem na lagoa do Peri, Santa Catarina, Brasil. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2012.

SÃO PAULO (Estado). Resolução conjunta entre a Secretaria de Estado da Saúde, do Meio Ambiente e de Saneamento e Recursos Hídricos (SES/SMA/SSRH) número 1 de 28 de junho de 2017. Disponível em: http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/legislacao/leg_estadual/leg_est_resolucoes/Resol-Conjunta-SES-SMA-SSRH_01_21-fev-2014_Comite_Gestao_Qualidade_Agua.pdf Acesso em janeiro de 2020.

SÃO PAULO (Estado). Resolução conjunta entre a Secretaria de Estado da Saúde e de Infraestrutura e Meio Ambiente número de 13 de fevereiro de 2020. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/legislacao/2020/02/resolucao-conjunta-ses-sima-processo-ssrh-90-2016-reuso-de-agua-nao-potavel.pdf> Acesso em novembro de 2020.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTUYA, M.T. Membranas Filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso. 1ª ed, ABES, São Paulo, 2001.

SILVA, Giuliano Guimarães Silva; NAVAL, Liliana Pena; DI BERNARDO, Luiz; DANTAS, Angela Di Bernardo. Tratamento de água de reservatório por dupla filtração, oxidação e adsorção em carvão ativado granular. *Eng Sanit Ambient*, v.17,n.1. 2012.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018. Brasília: SNS/MDR, 2019. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2018/Diagnostico_AE2018.pdf Acesso em julho de 2020.

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Painel de Informações Sobre Saneamento. Disponível em:

http://appsniis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua_esgoto/mapa-agua Acesso em agosto de 2020.

TELLES, Dirceu D'Alkmin; COSTA, Regina Helena Pacca Guimarães. Reúso da água: conceitos, teorias e práticas. 1^a edição – São Paulo: Editora Blucher, 2007.

TOSETTO, M. S – Tratamento terciário de esgoto sanitário para fins de reuso urbano. 2005. 250f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Campinas, Campinas, 2005.

UNESCO, Portal da Qualidade da Água Mundial. Disponível em: <http://www.worldwaterquality.org/> Acesso em Julho de 2019.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). Guidelines for Water Reuse. 2012. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf> Acesso em janeiro de 2020.

WAGNER, E.G.; HUDSON, JR.H.E. Low dosage high- rate direct filtration. Journal of the American Water Works Association, v.76, n.5, p.256-261, May, 1982.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. n. ISBN 92 4 154685 9 (v. 4), France, 2006.

WHO. Reuse of effluents: methods of wastewater treatment and health safeguards. Report of a WHO Meeting of Experts. Geneva, World Health Organization (Technical Report Series No. 517), 1973.

ZANETTI, F.; DE LUCA, G.; SACCHETTI, R. Microbe removal in secondary effluent by filtration. Annals of Microbiology, 56, October 2006.

APÊNDICE A

CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DA ETE CAIÇARA – MONITORAMENTO

Tabela A1 – Parâmetros de qualidade do efluente secundário da ETE Caiçara

Parâmetros	Unidades	22/08/18	31/10/18	28/11/18	14/02/19	28/03/19	11/04/19	01/05/19	03/05/19	09/05/19	10/05/19
COT	mg/L C	6,696	5,053	4,742	4,583	3,129	4,636	3,209	5,229	3,930	-
<i>E. coli</i>	NMP/100mL	1090	-	-	800	1100	1600	1100	1500	2100	1900
Cor aparente	uH	-	-	-	-	69	30	31	69	38	26
DBO	mg/L O ₂	8	2	5	3	3	4	13	3	2	-
DQO	mg/L O ₂	<10	8	<10	24	32	27	37	54	27	14
pH	-	7,42	7,71	7,51	7,67	7,21	7,38	7,04	7,00	7,27	7,42
ST	mg/L	250	236	195	257	254	235	214	186	236	193
SDT	mg/L	242	228	192	255	250	233	207	184	233	191
SST	mg/L	8	8	3	2	4	2	7	2	3	2
Turbidez	uT	7,11	7,12	4,21	4,55	3,21	1,32	1,21	1,23	1,79	1,52

Fonte: Autora, 2020

Tabela A2 – Continuação dos parâmetros de qualidade do efluente secundário da ETE Caiçara

Parâmetros	Unidades	28/05/19	29/05/19	01/07/19	02/07/19	03/07/19	10/07/19	11/07/19	22/10/19	23/10/19
COT	mg/L C	-	-	4,183	9,912	6,450	4,767	4,100	4,793	4,95
E. coli	NMP/100mL	930	1800	400	200	180	900	750	500	600
Cor aparente	uH	59	69	40	31	48	53	60	43	59
DBO	mg/L O2	-	-	5	6	10	2	4	16	17
DQO	mg/L O2	28	29	30	51	53	48	35	46	55
pH	-	7,21	7,15	7,26	7,69	7,50	7,46	7,58	7,60	7,65
ST	mg/L	242	221	262	271	253	251	232	228	228
SDT	mg/L	239	215	259	270	249	247	228	4	5
SST	mg/L	3	6	3	1	4	4	4	224	223
Turbidez	uT	2,99	3,17	1,33	1,81	2,24	3,45	3,35	2,54	2,71

Fonte: Autora, 2020

APÊNDICE B

ENSAIOS EM BANCADA PARA OBTENÇÃO DAS CONDIÇÕES DE COAGULAÇÃO QUÍMICA

Condições operacionais dos ensaios em jarteste e filtros de areia de laboratório:

Gradiente de mistura rápida: 1000 s^{-1}

Tempo de mistura rápida: 30 s

Filtração: coleta 30 min

Características da água bruta nos ensaios realizados dia 07/11/2019:

Turbidez: 7,67 uT

pH: 7,2

Tabela B1 – Resultados dos ensaios em jarteste para construção do diagrama de coagulação, realizados no dia 07/11/2018

Jarros	Dosagem de coagulante (20 g/L)		Dosagem de alcalinizante		pH de coagulação	Água Filtrada	
	(mg/L)	(mL)	(mg/L)	(mL)		Turbidez (uT)	Cor (uH)
1	10	1,0	0,0	0,00	7,35	1,03	15
2	10	1,0	1,3	0,50	7,66	1,24	17
3	10	1,0	2,5	1,00	7,89	0,91	15
4	10	1,0	3,8	1,50	8,2	0,97	15
5	10	1,0	5,0	2,00	8,37	0,92	16
6	10	1,0	6,3	2,50	8,55	0,95	16

Fonte: Autora, 2020

Tabela B2 – Resultados dos ensaios em jarteste para construção do diagrama de coagulação, realizados no dia 07/11/2018

Jarros	Dosagem de coagulante (20 g/L)		Dosagem de alcalinizante		pH de coagulação	Água Filtrada	
	(mg/L)	(mL)	(mg/L)	(mL)		Turbidez (uT)	Cor (uH)
1	10	1,0	0,6	0,25	7,47	0,74	24
2	10	1,0	3,1	1,25	8,03	0,79	16
3	10	1,0	6,9	2,75	8,76	0,79	17
4	10	1,0	7,5	3,00	8,95	0,73	17
5	15	1,5	0,0	0,00	7,35	0,80	20
6	15	1,5	1,3	0,50	7,51	0,81	19
1	15	1,5	2,5	1,00	7,65	0,79	13
2	15	1,5	3,5	1,40	7,84	0,74	14
3	15	1,5	4,5	1,80	8,07	0,70	15
4	15	1,5	6,5	2,60	8,49	0,69	13
5	15	1,5	8,8	3,50	9,16	2,02	33
6	15	1,5	10,0	4,00	9,21	1,68	33

Fonte: Autora, 2020

Características da água bruta nos ensaios realizados dia 09/11/2019:

Turbidez: 6,90 uT

pH: 7,45

Tabela B3 – Resultados dos ensaios em jarreste para construção do diagrama de coagulação, realizados no dia 09/11/2018

Jarros	Dosagem de coagulante (20 g/L)		Dosagem de alcalinizante		pH de coagulação	Água Filtrada	
	(mg/L)	(mL)	(mg/L)	(mL)		Turbidez (uT)	Cor (uH)
1	20	2,0	0,0	0,00	8,36	1,66	34
2	20	2,0	3,8	1,50	9,02	1,80	31
3	20	2,0	5,0	2,00	8,5	0,85	16
4	20	2,0	6,3	2,50	8,7	0,86	17
5	20	2,0	8,8	3,50	8,86	0,76	22
6	25	2,5	0,0	0,00	7,71	0,86	17
1	25	2,5	1,3	0,50	7,84	1,44	21
2	15	1,5	6,0	2,40	8,3	0,75	22
3	20	2,0	0,0	0,00	7,51	0,92	14
4	20	2,0	0,0	0,00	7,67	1,01	15
5	20	2,0	2,5	1,00	7,82	0,71	15
6	15	1,5	7,5	3,00	8,6	0,76	12
1	15	1,5	8,5	3,40	8,8	0,78	14
2	15	1,5	9,5	3,80	8,92	0,86	13
3	25	2,5	10,0	4,00	8,89	0,91	13
4	25	2,5	11,3	4,50	8,96	0,78	12
5	5	0,5	0,0	0,00	7,85	1,02	9
6	5	0,5	1,3	0,50	8,08	0,81	7

Fonte: Autora, 2020

Tabela B4 – Resultados dos ensaios em jarreste para construção do diagrama de coagulação, realizados no dia 09/11/2018

Jarros	Dosagem de coagulante (20 g/L)		Dosagem de alcalinizante		pH de coagulação	Água Filtrada	
	(mg/L)	(mL)	(mg/L)	(mL)		Turbidez (uT)	Cor (uH)
1	5	0,5	2,5	1,00	8,24	0,90	10
2	5	0,5	3,8	1,50	8,42	0,80	6
3	5	0,5	5,0	2,00	8,56	0,81	7
4	5	0,5	6,3	2,50	8,78	0,91	9
5	5	0,5	7,5	3,00	8,89	0,86	13
6	25	2,5	2,5	1,00	8,23	0,74	8

Fonte: Autora, 2020

Características da água bruta nos ensaios realizados dia 10/11/2019:

Turbidez: 7,24 uT

pH: 7,88

Tabela B5 – Resultados dos ensaios em jarteste para construção do diagrama de coagulação, realizados no dia 10/11/2018

Jarros	Dosagem de coagulante (20 g/L)		Dosagem de alcalinizante		pH de coagulação	Água Filtrada	
	(mg/L)	(mL)	(mg/L)	(mL)		Turbidez (uT)	Cor (uH)
1	25	2,5	3,8	1,50	8,33	0,76	9
2	25	2,5	5,0	2,00	8,45	0,74	12
3	20	2,0	2,0	0,80	7,98	0,86	18
4	20	2,0	3,0	1,20	8,19	0,96	20
5	25	2,5	1,0	0,40	7,93	0,84	19
6	25	2,5	1,5	0,60	8,07	0,89	18
1	25	2,5	5,5	2,20	8,6	0,93	19
2	25	2,5	6,3	2,50	8,7	0,89	18
3	30	3,0	1,3	0,50	7,86	0,98	16
4	30	3,0	2,5	1,00	8	0,99	16
5	30	3,0	3,8	1,50	8,26	0,79	15
6	30	3,0	5,0	2,00	8,42	0,90	16
1	30	3,0	6,3	2,50	8,6	0,95	23
2	5	0,5	0,0	0,00	7,6	1,51	23
3	25	2,5	0,0	0,00	7,62	0,95	14
4	30	3,0	0,0	0,00	7,64	0,94	13
5	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autora, 2020

APÊNDICE C

PRÉ-OPERAÇÃO DA UNIDADE PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE

Parte 1: Ensaios preliminares para a verificação da perda de carga nos meios granulares

Tabela C1 – Condições operacionais da coluna de filtração, meio granular e da água

Leito (cm)	40
Diâmetro coluna (cm)	10
Área (m²)	0,007854
Temperatura da água (°C)	25
ρ água (kg/m³)	997,1121
μ água (Pa.s)	0,000894
Dvs (areia 1) (mm)	0,925
Dvs (areia 2) (mm)	1,09
ε (areia 1)	0,46
ε (areia 2)	0,47
Esfericidade da areia (ϕ)	0,75

Fonte: Autora, 2020

Tabela C2 – Resultados dos ensaios de perda de carga em função da velocidade de escoamento e valores teóricos calculados por Ergun, para o meio granular 1

Q (L/h)	Velocidade de escoamento (m/s)	H (cm)	ΔH (cm)	ΔP exp (Pa)	ΔP calc (Pa)	Erro (%)
0	0	56	0	0	0	0
20	0,00071	61	5	489,08	597,10	18,09
40	0,00141	66	10	978,17	1208,17	19,04
60	0,00212	71	15	1467,25	1833,20	19,96
80	0,00283	76	20	1956,33	2472,20	20,87
100	0,00354	83	27	2641,05	3125,16	15,49
120	0,00424	90	34	3325,77	3792,08	12,30
140	0,00495	98	42	4108,30	4472,97	8,15
160	0,00566	105	49	4793,02	5167,82	7,25
180	0,00637	111	55	5379,92	5876,63	8,45
200	0,00707	120	64	6260,27	6599,41	5,14

Fonte: Autora, 2020

Tabela C3 – Resultados dos ensaios de perda de carga em função da velocidade de escoamento e valores teóricos calculados por Ergun, para o meio granular 2

Q (L/h)	Velocidade de escoamento (m/s)	H (cm)	ΔH (cm)	ΔP exp (Pa)	ΔP calc (Pa)	Erro (%)
0	0	56	0	0	0	0
20	0,00071	57	1	97,82	389,26	74,87
40	0,00141	61	5	489,08	789,43	38,05
60	0,00212	65	9	880,35	1200,50	26,67
80	0,00283	70	14	1369,43	1622,47	15,60
100	0,00354	74	18	1760,70	2055,35	14,34
120	0,00424	79	23	2249,78	2499,13	9,98
140	0,00495	84	28	2738,87	2953,82	7,28
160	0,00566	89	33	3227,95	3419,41	5,60
180	0,00637	94	38	3717,03	3895,90	4,59
200	0,00707	100	44	4303,93	4383,30	1,81

Fonte: Autora, 2020

Parte 2: Ensaios preliminares para a verificação da expansão do leito em função da velocidade ascensional e da respectiva porosidade do leito

Tabela C3 – Resultados dos ensaios de expansão e porosidade em função da velocidade ascensional do leito, para o meio granular 1

Expansão (%)	H (cm)	Vazão medida (mL/s)	Velocidade ascensional (m/s)	ϵ (%)
0	0	-	0	46
10	50	-	0,004	56,80
20	54	75,00	0,010	60,00
30	58	113,20	0,014	62,76
40	62	138,72	0,018	65,16
50	66	172,62	0,022	67,27
60	70	195,01	0,025	69,14
70	74	227,27	0,029	70,81
80	78	261,00	0,033	72,31
90	82	297,54	0,038	73,66
100	86	324,00	0,041	74,88

Fonte: Autora, 2020

Tabela C3 – Resultados dos ensaios de expansão e porosidade em função da velocidade ascensional do leito, para o meio granular 1

Expansão (%)	H (cm)	Vazão medida (mL/s)	Velocidade ascensional (m/s)	ε (%)
0	0	-	0	47
10	50	-	0,006	57,60
20	54	-	0,012	60,74
30	58	139,20	0,018	63,45
40	62	173,91	0,022	65,81
50	66	215,30	0,027	67,88
60	70	245,00	0,031	69,71
70	74	288,27	0,037	71,35
80	78	322,95	0,041	72,82
90	82	353,15	0,045	74,15
100	86	398,70	0,051	75,35

Fonte: Autora, 2020

APÊNDICE D

RESULTADOS DOS ENSAIOS NA UNIDADE PILOTO DE FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE VARIANDO TAXA DE FILTRAÇÃO E MEIO GRANULAR

Tabela D1 – Resultados do ensaio 1, taxa 120 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Tubidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Tubidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,16	1,16	56	-	310	1,37	0,51	89,5	33,5
10	1,18	0,36	71	15	320		0,61	90	34
20		0,32	72	16	330	1,29	0,59	91	35
30	1,22	0,32	74	18	340		0,55	92	36
40		0,41	75,5	19,5	350	1,25	0,6	92,5	36,5
50	1,21	0,38	76	20	360		0,5	93	37
60		0,4	76,5	20,5	370	1,19	0,44	93,5	37,5
70	1,17	0,33	77	21	380		0,47	94	38
80		0,41	77,5	21,5	390	1,15	0,61	94,5	38,5
90	1,25	0,41	78	22	400		0,67	95	39
100		0,43	79	23	410	1,23	0,63	97	41
110	1,23	0,4	79,5	23,5	420		0,57	98	42
120		0,37	80	24	430	1,25	0,59	99	43
130	1,24	0,39	80,5	24,5	440		0,56	99,5	43,5
140		0,38	81	25	450	1,25	0,55	100	44
150	1,21	0,37	81,5	25,5	460		0,62	100,5	44,5
160		0,3	82	26	470	1,3	0,68	101	45
170	1,22	0,33	82,5	26,5	480		0,61	101,5	45,5
180		0,34	83	27	490	1,29	0,68	102	46
190	1,24	0,45	83,5	27,5	500		0,7	102,5	46,5
200		0,39	84	28	510	1,26	0,64	103	47
210	1,28	0,43	84,5	28,5	520	1,24	0,63	103,5	47,5
220		0,37	85	29	530		0,7	104	48
230	1,31	0,4	85,5	29,5	540	1,23	0,62	104,5	48,5
240		0,48	86	30	550		0,66	105	49
250	1,45	0,54	86,5	30,5	560	1,23	0,61	105,5	49,5
260		0,58	87	31	570		0,66	106	50
270	1,34	0,57	87,5	31,5	580	1,28	0,67	108	52
280		0,63	88	32	590		0,69	108,5	52,5
290	1,31	0,54	88,5	32,5	600	1,24	0,64	109	53
300		0,55	89	33	610		0,66	109,5	53,5

Fonte: Autora, 2020

Tabela D1 – Resultados do ensaio 1, taxa 120 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1 (continuação)

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
610		0,66	109,5	53,5	640	1,21	1,16	111	55
620	1,19	0,67	110	54	650		1,23	112	56
630		0,68	110,5	54,5	660	1,3	1,22	113	57

Fonte: Autora, 2020

Tabela D2 – Resultados do ensaio 2, taxa 120 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	2,24	2,24	56		280		0,63	91	35
10		0,78	71	15	290		0,61	91,5	35,5
20		0,67	72	16	300	2,87	0,55	92	36
30	1,91	0,52	73	17	310		0,61	92,5	36,5
40		0,41	74	18	320		0,71	93	37
50		0,58	75	19	330	2,68	0,59	94	38
60	2,24	0,6	76	20	340		0,55	95	39
70		0,53	77	21	350		0,67	96	40
80		0,61	78	22	360	2,18	0,54	97	41
90	2,73	0,71	79	23	370		0,59	98	42
100		0,63	80	24	380		0,57	99	43
110		0,8	81	25	390	2,08	0,61	100	44
120	3,32	0,78	81,5	25,5	400		0,53	101	45
130		0,64	82	26	410		0,49	102	46
140		0,68	82,5	26,5	420	2,44	0,57	103	47
150	2,91	0,67	83	27	430		0,59	104	48
160		0,6	83,5	27,5	440		0,66	105	49
170		0,63	84	28	450	2,08	0,51	106	50
180	2,43	0,54	85,5	29,5	460		0,59	107	51
190		0,55	86	30	470		0,62	108	52
200		0,59	86,5	30,5	480	2,24	0,67	109	53
210	2,78	0,63	87	31	490		0,73	110	54
220		0,67	87,5	31,5	500		0,71	111	55
230		0,61	88	32	510	2,82	0,74	112	56
240	2,72	0,68	88,5	32,5	520		0,79	113	57
250		0,54	89	33	530		0,77	114	58
260		0,58	90	34	540	2,68	0,75	115	59
270	2,48	0,57	90,5	34,5	550		0,69	116	60

Fonte: Autora, 2020

Tabela D2 – Resultados do ensaio 2, taxa 120 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1 (continuação)

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
560		0,78	117	61	620	3,05	1,24	123	67
570	2,91	0,85	118	62	630		1,34	124	68
580		0,88	119	63	640	3,21	1,41	125	69
590		0,91	120	64	650		1,45	126	70
600	3,01	1,01	121	65	660	3,3	1,52	130	74
610		0,99	122	66					

Fonte: Autora, 2020

Tabela D3 – Resultados do ensaio 3, taxa 120 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	3,04	3,04	56		260		0,58	84,5	28,5
10		0,79	71	15	270	2,66	0,57	85,5	29,5
20		0,68	71,5	15,5	280		0,63	86	30
30	2,91	0,65	72	16	290		0,64	87	31
40		0,61	72,5	16,5	300	2,87	0,58	88	32
50		0,68	73	17	310		0,53	88,5	32,5
60	3,34	0,6	73,5	17,5	320		0,49	89	33
70		0,53	74	18	330	2,58	0,56	90	34
80		0,51	74,5	18,5	340		0,61	91	35
90	2,73	0,51	75	19	350		0,64	92	36
100		0,53	75,5	19,5	360	2,54	0,66	93	37
110		0,6	76	20	370		0,64	94	38
120	2,99	0,67	76,5	20,5	380		0,67	95	39
130		0,69	77	21	390	2,39	0,61	96	40
140		0,68	77,5	21,5	400		0,67	97	41
150	2,91	0,67	78	22	410		0,63	98	42
160		0,6	78,5	22,5	420	2,44	0,68	99	43
170		0,53	79	23	430		0,71	99	43
180	2,67	0,54	80	24	440		0,64	100	44
190		0,55	80,5	24,5	450	2,38	0,57	101	45
200		0,59	81	25	460		0,62	102	46
210	2,88	0,63	81,5	25,5	470		0,68	103	47
220		0,57	82	26	480	2,26	0,53	104	48
230		0,5	83	27	490		0,59	105	49
240	2,72	0,58	83,5	27,5	500		0,57	106	50
250		0,54	84	28	510	2,46	0,61	107	51

Fonte: Autora, 2020

Tabela D3 – Resultados do ensaio 3, taxa 120 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1 (continuação)

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
520		0,63	108	52	600	3,01	0,79	117	61
530		0,72	109	53	610		0,87	119	63
540	2,68	0,69	110	54	620	2,98	1,12	120,5	64,5
550		0,68	111	55	630		1,15	122	66
560		0,71	112	56	640	3,22	1,24	123,5	67,5
570	2,9	0,73	113	57	650		1,33	125	69
580		0,75	114	58	660	3,12	1,37	127	71
590		0,71	115,5	59,5					

Fonte: Autora, 2020

Tabela D4 – Resultados do ensaio 4, taxa 120 m³/m².dia, sem coagulação química, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	2,9	2,9	56		300		1,15	83,5	27,5
20		1,16	70	14	320	2,75	0,98	84	28
40	2,85	1,09	71	15	340		1,07	86	30
60		1,08	72	16	360	2,64	0,84	89	33
80	2,91	1,08	73	17	380		0,87	90	34
100		1,06	73	17	400	2,53	0,73	91	35
120	3,03	1,06	74	18	420		0,71	93	37
140		1,14	74	18	450	2,55	0,78	101	45
160	2,99	1,04	75	19	480		0,73	103,5	47,5
180		1,1	76	20	510	2,61	0,74	108	52
200	3,07	1,01	78	22	540		0,75	112	56
220		1,03	79	23	570	2,68	0,77	117	61
240	3,12	1,01	80	24	600		0,74	122	66
260		1,01	82	26	630	2,66	0,76	125	69
280	2,86	0,98	83	27	660	2,7	0,78	129	73

Fonte: Autora, 2020

Tabela D5 – Resultados do ensaio 5, taxa 360 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,15	1,15	56		40	1,54	0,57	99,5	43,5
10	1,23	0,55	95	39	50	1,43	0,58	103	47
20	1,31	0,54	96,5	40,5	60	1,12	0,62	104	48
30	1,34	0,54	97,5	41,5	70	1,32	0,63	105,5	49,5

Fonte: Autora, 2020

Tabela D5 – Resultados do ensaio 5, taxa 360 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1 (continuação)

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
80	1,24	0,63	107,5	51,5	190	1,29	0,69	148	92
90	1,31	0,64	112	56	200	1,35	0,7	152	96
100	1,46	0,68	115	59	210	1,59	0,68	157,5	101,5
110	1,57	0,69	120,5	64,5	220	1,73	0,67	161	105
120	1,33	0,67	123,5	67,5	230	1,88	0,68	164	108
130	1,22	0,67	127,5	71,5	240	1,81	0,71	167	111
140	1,12	0,66	131	75	250	1,92	0,72	172	116
150	1,01	0,68	134	78	260	1,89	0,7	175,5	119,5
160	1,08	0,72	139	83	270	1,95	1,08	179	123
170	1,15	0,69	142	86	280	1,99	1,06	181	125
180	1,09	0,71	145	89					

Fonte: Autora, 2020

Tabela D6 – Resultados do ensaio 6, taxa 360 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,65	1,65	56		150		0,62	135	79
10		0,47	96	40	160	1,39	0,65	139	83
20	1,54	0,49	97	41	170		0,68	143	87
30		0,4	98	42	180	1,49	0,64	148	92
40	1,51	0,39	100	44	190		0,65	152	96
50		0,29	103	47	200	1,58	0,66	156	100
60	1,35	0,26	105	49	210		0,69	159	103
70		0,27	106	50	220	1,44	0,62	162	106
80	1,37	0,31	108	52	230		0,7	165	109
90		0,39	112	56	240	1,43	0,68	168	112
100	1,45	0,4	115	59	250		0,73	171	115
110		0,44	119	63	260	1,67	0,96	176	120
120	1,51	0,5	123	67	270		1,03	181	125
130		0,49	128	72	280	1,56	1,15	187	131
140	1,35	0,7	131	75					

Fonte: Autora, 2020

Tabela D7 – Resultados do ensaio 7, taxa 360 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,21	1,21	56		150		0,66	137	81
10		0,3	95	39	160	1,49	0,7	140	84
20	1,19	0,33	96	40	170		0,71	144	88
30		0,32	97	41	180	1,41	0,8	148	92
40	1,25	0,34	99	43	190		0,75	151	95
50		0,42	102	46	200	1,56	0,79	155	99
60	1,35	0,45	104	48	210		0,74	159	103
70		0,5	107	51	220	1,47	0,79	162	106
80	1,44	0,49	109	53	230		0,81	166	110
90		0,55	112	56	240	1,63	0,87	170	114
100	1,31	0,59	116	60	250		0,95	174	118
110		0,53	120	64	260	1,59	1	178	122
120	1,35	0,61	124	68	270		1,05	181	125
130		0,65	128	72	280	1,61	1,14	185	129
140	1,45	0,62	132	76					

Fonte: Autora, 2020

Tabela D8 – Resultados do ensaio 8, taxa 360 m³/m².dia, sem coagulação química, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	2,75	2,75	56		150		1,09	109	53
10		1,45	95	39	160	2,96	1,08	110	54
20	2,86	1,27	95	39	170		1,1	111	55
30		1,47	95,5	39,5	180	2,85	1,01	112	56
40	2,94	1,12	96	40	190		1,05	113	57
50		1,06	97	41	200	2,79	1,04	116	60
60	3,01	0,98	98	42	210		1,12	118	62
70		1,02	100	44	220	2,88	1,17	120	64
80	2,84	1,07	102	46	230		1,15	123	67
90		1,06	103	47	240	2,93	1,2	126	70
100	2,68	1,01	104	48	250		1,23	129	73
110		1,04	105	49	260	3,04	1,15	132	76
120	2,76	1,2	106	50	270		1,19	134	78
130		1,8	107	51	280	3,32	1,24	138	82
140	3,12	1,14	108	52					

Fonte: Autora, 2020

Tabela D9 – Resultados do ensaio 9, taxa 500 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,4	1,4	56		80		0,78	154	98
10		0,37	113	57	90	1,78	0,91	160	104
20	1,91	0,52	121	65	100		0,92	166	110
30		0,59	126	70	110	1,78	0,88	174	118
40		0,68	131	75	120		0,9	180	124
50	2,01	0,74	136	80	130	1,63	1,36	185	129
60		0,79	143	87	140		1,41	192	136
70	1,81	0,78	147	91	150	1,68	1,43	201	145

Fonte: Autora, 2020

Tabela D10 – Resultados do ensaio 10, taxa 500 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,87	1,78	56		80		0,75	153	97
10		0,34	112	56	90	1,63	0,84	157	101
20		0,56	119	63	100		0,87	163	107
30	1,81	0,58	124	68	110	1,57	0,91	170	114
40		0,65	130	74	120		1,05	175	119
50		0,7	135	79	130	1,76	1,17	179	123
60	1,7	0,71	140	84	140		1,2	187	131
70		0,75	146	90	150	1,59	1,24	196	140

Fonte: Autora, 2020

Tabela D11 – Resultados do ensaio 11, taxa 500 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,59	1,81	56		80	1,63	0,79	168	112
10		0,44	112	56	90		0,78	172	116
20	1,49	0,68	121	65	100	1,45	0,75	179	123
30		0,63	130	74	110		0,74	186	130
40	1,69	0,72	137	81	120	1,51	1,2	191	135
50		0,75	147	91	130		1,28	200	144
60	1,59	0,75	155	99	140	1,64	1,31	210	154
70	1,55	0,78	160	104					

Fonte: Autora, 2020

Tabela D12 – Resultados do ensaio 12, taxa 500 m³/m².dia, sem coagulação química, no meio granular 1

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,4	1,4	56		80		0,87	106	50
10	1,6	0,77	98	42	90	1,39	0,87	107	51
20		0,78	100	44	100		0,89	109	53
30	1,62	0,79	101	45	110	1,25	0,96	110	54
40		0,8	102	46	120		0,99	111	55
50	1,43	0,81	103	47	130	1,22	1,02	112	56
60		0,83	104	48	140		1,01	113	57
70	1,41	0,85	105	49	150	1,29	1,05	114	58

Fonte: Autora, 2020

Tabela D13 – Resultados do ensaio 13, taxa 120 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	3,94	-	56		90		0,85	74	18
10		0,66	60,5	4,5	100	3,98	0,83	76,5	20,5
20	3,47	0,56	62	6	110		0,86	79	23
30		0,6	63,5	7,5	120	3,72	0,74	81	25
40	3,71	0,74	65	9	130		0,79	83	27
50		0,78	66,5	10,5	140	3,6	0,83	86	30
60	3,07	0,82	68,5	12,5	150		1,04	88,5	32,5
70		0,84	70	14	160	3,14	1,17	91	35
80	3,12	0,83	72	16	170	3,5	1,28	96	40

Fonte: Autora, 2020

Tabela D14 – Resultados do ensaio 14, taxa 120 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	3,87	3,5	56		90		0,88	77	21
10		0,63	61	5	100		0,9	78,5	22,5
20		0,67	63	7	110		0,89	81	25
30		0,76	65	9	120	3,92	0,88	83	27
40	4,13	0,79	67,5	11,5	130		0,91	85	29
50		0,78	69	13	140		0,94	88	32
60		0,72	71,5	15,5	150		1,19	91	35
70		0,79	73	17	160	4,05	1,35	95	39
80	4,01	0,73	75	19	170		1,51	99	43

Fonte: Autora, 2020

Tabela D15 – Resultados do ensaio 15, taxa 120 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	3,5	3,87	56		90	3,87	0,84	76	20
10		0,63	60,5	4,5	100		0,81	78,5	22,5
20	3,76	0,68	62	6	110	4,13	0,79	81	25
30		0,74	64	8	120		0,9	83	27
40	4,09	0,71	66	10	130	4,01	1,12	86	30
50		0,72	67,5	11,5	140		1,41	89	33
60	3,99	0,68	69	13	150	3,92	1,39	93	37
70		0,71	71,5	15,5	160		1,49	96	40
80	3,91	0,8	73,5	17,5	170	4,05	1,56	100	44

Fonte: Autora, 2020

Tabela D16 – Resultados do ensaio 16, taxa 120 m³/m².dia, sem coagulação química, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	3,36	-	56		90		1,13	63,5	7,5
10		1,04	59	3	100	3,08	1,18	64,5	8,5
20	2,93	1,3	59,5	3,5	110		1,03	65,5	9,5
30		1,27	60	4	120	3,04	1,08	66,5	10,5
40	2,92	1,19	60,5	4,5	130		1,31	68	12
50		1,01	61	5	140	3,01	1,4	69,5	13,5
60	3,01	0,99	61,5	5,5	150		1,48	72	16
70		1,03	62	6	160	3,00	1,44	74	18
80	3,12	1,07	62,5	6,5	170		1,41	77	21

Fonte: Autora, 2020

Tabela D17 – Resultados do ensaio 17, taxa 360 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	2,93	-	56	-	50		0,51	122	66
10		0,37	96	40	60	2,34	0,45	129	73
20		0,33	101	45	70		0,73	137	81
30	2,42	0,41	108	52	80		1,02	146	90
40		0,41	115	59	90	2,91	1,5	157	101

Fonte: Autora, 2020

Tabela D18 – Resultados do ensaio 18, taxa 360 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	2,27	-	56		50		0,75	125	69
10		0,6	97	41	60	2,55	0,72	134	78
20		0,57	102	46	70		0,74	144	88
30	2,74	0,62	110	54	80		1,14	153	97
40		0,8	117	61	90	2,44	1,41	164	108

Fonte: Autora, 2020

Tabela D19 – Resultados do ensaio 19, taxa 360 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	2,57		56		50		0,72	127	71
10		0,41	95	39	60	2,54	0,81	134	78
20		0,67	100	44	70		0,58	141	85
30	2,33	0,63	109	53	80		0,73	150	94
40		0,59	116	60	90	2,19	1,2	159	103

Fonte: Autora, 2020

Tabela D20 – Resultados do ensaio 20, taxa 360 m³/m².dia, sem coagulação química, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	2,19		56		50		1,14	101	45
10		0,88	93	37	60	1,89	1,27	104	48
20		0,94	94	38	70		1,31	106	50
30	1,73	0,99	96	40	80		1,43	109	53
40		1,24	99	43	90	2,01	1,49	111	55

Fonte: Autora, 2020

Tabela D21 – Resultados do ensaio 21, taxa 500 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,93	1,93	56		40	1,97	0,8	131	75
10		0,38	104	48	50		1,2	140	84
20	1,68	0,57	113	57	60	1,72	1,24	149	93
30		0,73	121	65					

Fonte: Autora, 2020

Tabela D22 – Resultados do ensaio 22, taxa 500 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,57	1,57	56		40	1,82	0,64	130	74
10		0,47	103	47	50		0,99	141	85
20	1,7	0,49	111	55	60	1,6	1,28	152	96
30		0,71	120	64					

Fonte: Autora, 2020

Tabela D23 – Resultados do ensaio 23, taxa 500 m³/m².dia, com coagulação química seguida de filtração direta descendente, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	1,97	2,07	56		40	2,3	0,89	135	79
10		0,38	105	49	50		1,03	146	90
20	1,55	0,5	114	58	60	2,24	1,14	158	102
30		0,69	124	68					

Fonte: Autora, 2020

Tabela D24 – Resultados do ensaio 24, taxa 500 m³/m².dia, sem coagulação química, no meio granular 2

Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)	Tempo (min)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente - filtrada (uT)	H (cm)	ΔH (cm)
0	2,24	3,66	56		40	1,92	1,21	98	42
10		0,97	89	33	50		1,08	102	46
20	1,7	1,02	92	36	60	2,18	1,23	107	51
30		0,93	95	39					

Fonte: Autora, 2020

APÊNDICE E

Tabela E – Resultados dos cálculos do volume de água produzida e volume utilizado na lavagem dos filtros

Taxa (m ³ .m ⁻² .dia ⁻¹)	t ensaio (min)	t ensaio (dias)	Q lavagem (L/min)	t lavagem (min)	V lavagem (L)	V produzido (m ³)	V prod (L)	Produção efetiva PE (L)	Eficiência na geração de água
120	640	0,44	11,28	5	56,39	0,42	418,88	362,49	87%
120	600	0,42	11,15	5	55,75	0,39	392,70	336,95	86%
120	620	0,43	10,99	5	54,94	0,41	405,79	350,85	86%
360	270	0,19	10,86	5	54,30	0,53	530,14	475,85	90%
360	270	0,19	10,92	5	54,61	0,53	530,14	475,54	90%
360	260	0,18	11,76	5	58,79	0,51	510,51	451,71	88%
500	130	0,09	10,47	5	52,37	0,35	354,52	302,15	85%
500	120	0,08	11,45	5	57,27	0,33	327,25	269,98	82%
500	120	0,08	11,04	5	55,18	0,33	327,25	272,07	83%
120	150	0,10	12,75	5	63,75	0,10	98,17	34,42	35%
120	150	0,10	12,77	5	63,83	0,10	98,17	34,34	35%
120	130	0,09	12,63	5	63,16	0,09	85,08	21,93	26%
360	80	0,06	12,77	5	63,83	0,16	157,08	93,25	59%
360	80	0,06	12,98	5	64,90	0,16	157,08	92,18	59%
360	90	0,06	12,86	5	64,29	0,18	176,71	112,43	64%
500	50	0,03	12,90	5	64,52	0,14	136,35	71,84	53%
500	50	0,03	13,09	5	65,43	0,14	136,35	70,93	52%
500	50	0,03	12,90	5	64,50	0,14	136,35	71,85	53%

Fonte: Autora, 2020

APÊNDICE F

Tabela F1 – Caracterização da água filtrada para a areia 1, na taxa de filtração 360 m³/m².dia

Parâmetro	Unidade	Areia 1									
		Afluente	CO + FDD (1)	%	CO + FDD (2)	%	CO + FDD (3)	%	Afluente	FDD	%
Carbono Orgânico Total	mg C/L	4,793	3,86	19%	4,014	16%	3,571	25%	4,95	4,57	8%
Cor aparente	uH	43	25	42%	18	58%	20	53%	59	55	7%
E. Coli	NMP/100mL	500	90	82%	50	90%	20	96%	600	500	17%
Sólidos totais	mg/L	228	216	5%	215	6%	218	4%	228	224	2%
Sólidos suspensos totais	mg/L	4	1	75%	0,4	90%	0,8	80%	5	1,4	72%
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	224	215	4%	214,6	4%	217,2	3%	223	223	0%
Turbidez	uT	2,54	0,47	81%	0,45	82%	0,51	80%	2,71	1,44	47%

Fonte: Autora, 2020

Tabela F2 – Caracterização da água filtrada para a areia 2, na taxa de filtração 360 m³/m².dia

Parâmetro	Unidade	Areia 2									
		Afluente	CO + FDD (1)	%	CO + FDD (2)	%	CO + FDD (3)	%	Afluente	FDD	%
Carbono Orgânico Total	mg C/L	6,45	5,562	14%	5,88	9%	5,462	15%	6,45	5,99	7%
Cor aparente	uH	48	27	44%	28	42%	26	46%	48	45	6%
E. Coli	NMP/100mL	280	200	29%	180	36%	200	29%	210	200	5%
Sólidos totais	mg/L	253	246	3%	249	2%	247	2%	253	249	2%
Sólidos suspensos totais	mg/L	3,6	1,4	61%	1,3	64%	1,5	58%	3,6	1,9	47%
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	249,4	244,6	2%	247,7	1%	245,5	2%	249,4	247,1	1%
Turbidez	uT (NTU)	2,65	0,72	73%	0,71	73%	0,55	79%	1,75	1,27	27%

Fonte: Autora, 2020

APÊNDICE G

Dados utilizados no aumento de escala de um sistema de filtração direta descendente

Tabela G1 – Dados operacionais da escala piloto na condição otimizada

Parâmetro	Condição utilizada no ensaio
Taxa de filtração	360 m ³ /m ² .dia
Área de filtração	0,00785 m ²
Altura do leito	0,4 m
Diâmetro médio dos grãos	0,93 mm
Porosidade do leito	46 %
Densidade aparente do leito	1389 kg/m ³
Coeficiente de uniformidade	1
Tempo médio de carreira de filtração	270 minutos
Carga hidráulica média utilizada	123 cm
Vazão na retrolavagem	11,18 L/min
Tempo da retrolagem	5 minutos
Expansão do leito na retrolavagem	50 %
Volume gerado na piloto por carreira	0,53 m ³
Volume utilizado na lavagem por carreira	0,056 m ³
Velocidade ascensional na lavagem	1,42 m/min

Fonte: Autora, 2020

Tabela G2 – Dados calculados na projeção da filtração direta em escala real

Parâmetro	Valor calculado
Vazão considerada	10000 m ³ /dia
Taxa de filtração	360 m ³ /m ² .dia
Área de filtração	27,8 m ²
Número de filtros considerado	6
Área de cada filtro	4,6 m ²
Na lavagem de um filtro - área de filtração recalculada	23,15 m ²
Na lavagem de um filtro - taxa recalculada	432 m ³ /m ² .dia
Largura do filtro	1,5 m
Comprimento do filtro	3,09 m
Número de carreiras	5,24
Volume produzido por carreira	1875 m ³
Volume produzido diariamente	9818,18 m ³
Vazão da lavagem	6,59 m ³ /min
Volume utilizado na lavagem por carreira	32,97 m ³
Volume utilizado na lavagem por dia	1035,78 m ³
Produção efetiva diária	8782,40 m ³
Volume leito	11,1 m ³
Massa de areia	15433,33 kg
Concentração coagulante	15 mg/L
Massa coagulante diário	150 kg
Densidade do coagulante PAC	1200 kg/m ³
Volume de coagulante	0,125 m ³
	125 L

Fonte: Autora, 2020