



**ESTUDO COMPARATIVO DE DOIS LEITOS FILTRANTES COM
POROSIDADES DISTINTAS EM SISTEMAS DE DUPLA
FILTRAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA**

Flávio José Vacari de Alcantara

Maceió
2010

FLÁVIO JOSÉ VACARI DE ALCANTARA

**ESTUDO COMPARATIVO DE DOIS LEITOS FILTRANTES COM
POROSIDADES DISTINTAS EM SISTEMAS DE DUPLA
FILTRAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas em cumprimento à parte dos requisitos para titulação de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientadora: Prof^a. Dra. Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira

Co-orientadora: Prof^a. Dra. Nélia Henriques Callado

Maceió
2010

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto

A347e Alcantara, Flávio José Vacari de.
Estudo comparativo de dois leitos filtrantes com porosidades distintas em sistemas de dupla filtração para tratamento de água / Flávio José Vacari de Alcantara. – 2010.
115 f. : il., grafs, tabs.

Orientador: Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira.
Co-Orientador: Nélia Henriques Callado.
Dissertação (mestrado em Engenharia : Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2010.

Bibliografia: f. 95-98.
Apêndices: f. 100-115.

1. Tratamento de água. 2. Dupla filtração. 3. Filtração direta ascendente. 4. Filtração ascendente – Pedregulho. 5. Filtração ascendente – Meio poroso.
I. Título.

CDU: 628.16.08



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamentos – PPGRHS
Campus A. C. Simões, Av. Lourival de Melo Mota, S/N
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas
Tel/Fax: (82) 3214-1279
E-mail: ppgrhs@yahoo.com
Homepage://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgrhs



ESTUDO COMPARATIVO DE DOIS LEITOS FILTRANTES COM POROSIDADES DISTINTAS EM SISTEMAS DE DUPLA FILTRAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA

FLÁVIO JOSÉ VACARI DE ALCANTARA

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 20 de dezembro do ano de 2010.

Banca Examinadora:

Profª Drª Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira

Orientadora – PPGRHS/CTEC/UFAL

Profª Drª Nélia Henriques Callado

Co-orientadora – PPGRHS/CTEC/UFAL

Profª Drª Selêude Wanderley da Nóbrega

PPGRHS/CTEC/UFAL

Profª Drª Elizabeth Regina Halfeld da Costa

CEFET/MG

AGRADECIMENTOS

Agradeço à *Hidro Solo Indústria e Comércio Ltda.* por todo o suporte financeiro, logístico e material que proporcionou a este trabalho.

Às minhas orientadoras Prof^a. Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira e Prof^a. Nélia Henriques Callado, pela sábia orientação, pela presteza e pela decisiva dedicação a este trabalho.

Aos professores do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, que foram importantíssimos na minha formação.

Aos colegas de turma, Irene, Fernando, Claudionor, Daniel, Josiane, Leonardo, Valeska, Joceline, Thais, pelos momentos de aprendizado.

Aos meus maravilhosos pais, Maria Lúcia e José Alcantara e aos meus irmãos Roberta e Marcos, pelo imenso apoio, amor, carinho e companheirismo.

À minha linda esposa Débora, pelo amor, apoio e pelo incentivo durante todo o período de execução deste trabalho.

*“O que sabemos, saber que o sabemos.
Aquilo que não sabemos, saber que não o sabemos.
Eis o verdadeiro saber.”*

***Kung-Fu-Tse
(Confúcio)***

RESUMO

ALCANTARA, F. J. V. (2010). *Estudo comparativo de dois leitos filtrantes com porosidades distintas em sistemas de dupla filtração para tratamento de água*. Maceió, 2010. 115 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas.

Este trabalho avalia a eficiência de dois sistemas de dupla filtração na remoção de turbidez de água para abastecimento trabalhando sob condição limite, ou seja, água bruta com pico de turbidez de 200 uT (máxima recomendada para essa tecnologia) e sem a aplicação de descarga de fundo intermediária nos filtros ascendentes. O filtro ascendente de um dos sistemas de dupla filtração era constituído por 5 camadas de pedregulho, cuja granulometria variava de 2 a 38 mm e com porosidade igual a 38%. O filtro ascendente do segundo sistema de dupla filtração possuía como meio filtrante um material de alta porosidade, constituído de PVC (eletroduto corrugado), com diâmetro único de 12,7 mm e que proporciona uma porosidade ao meio filtrante de 91%. A altura total de ambos os leitos filtrantes era de 1,8 m. O filtro descendente em areia era o mesmo em ambos os sistemas de filtração. Foram realizadas 2 carreiras de filtração variando-se a taxa de filtração (120, 180 e 240 m³/m².dia). A água bruta era proveniente de um poço com 60 metros de profundidade, à qual foi adicionada caulim para conferir a turbidez desejada (200 uT). O pH da água variou entre 6,7 e 7,2 e a alcalinidade da mesma variou entre 99,5 e 107,25 mg CaCO₃/L. Foram realizados também ensaios preliminares em *Jar-Test*, para determinação da concentração do coagulante, sendo o valor encontrado igual a 15 mg/L de Al₂O₃ livre e pH de 6,9. O coagulante utilizado foi o PAC (cloreto de polialumínio). Os resultados mostraram que a duração da carreira de filtração foi maior, nos experimentos com taxas de filtração de 120 e 180 m³/m².dia, no sistema de dupla filtração cujo filtro ascendente era constituído por eletroduto. Para a taxa de 240 m³/m².dia a maior carreira de filtração foi proporcionada pelo meio filtrante em pedregulho. O meio filtrante em pedregulho possibilitou menor gasto percentual na lavagem dos filtros ascendentes nas taxas de filtração de 180 e 240 m³/m².dia, e, para a taxa de 120 m³/m².dia o meio filtrante em eletroduto foi o que propiciou menor gasto percentual com a lavagem. Concluiu-se que a maior porosidade pode promover o tratamento de maior volume de água, em uma mesma área de filtração, visando reduzir custos de uma tecnologia de tratamento de água eficiente, favorecendo regiões de menor poder aquisitivo.

Palavras-Chave: Dupla filtração. Filtração direta ascendente. Filtração ascendente em pedregulho. Filtração ascendente em meio poroso.

ABSTRACT

ALCANTARA, F. J. V. (2010). *Comparative study of two filtering media with different porosity in double filtration systems for water treatment*. Maceió, 2010. 115 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas.

This work evaluates the efficiency of two double filtration systems concerning the turbidity removal from supplying water working under limit situation, this is, raw water with 200 uT of turbidity peaks (maximum recommended for this technology) and without intermediate downflushing on the upflow filters. The upflow filter of one of the double filtration systems had 5 layers of gravel, which granularity varied from 2 to 38 mm and had 38% of porosity. The upflow filter of the second double filtration system had a porous material as media, made in PVC (flexible electrical conduit), with only one diameter, 1/2" and with 91% of porosity. The total height of both medias were 1,8 m. The downflow sand filter was the same one in both double filtration systems. Two experiments took place for each media, varying the filtration rate (120, 180 e 240 m³/m².day). The raw water was proceeding from a 60 meters deep well, to which was added a powder of kaolin to promote the desired water turbidity (200 uT). The pH varied between 6,7 and 7,2 and the alkalinity varied from 99,5 to 107,25 mg CaCO₃/L. Preliminary jar tests were also made in order to determinate the dosage of chemicals for the coagulation, and the optimum value encountered was 15 mg/L of free Al₂O₃ and pH of 6,9. The Polyaluminium Chloride was chosen as chemical coagulant. In the experiments with 120 and 180 m³/m².day of filtration rates, the bigger filtration career was provided by the conduit media. On the other hand, for the 240 m³/m².day filtration rate, the bigger filtration career was provided by the gravel media. The gravel media spent less water to be cleaned in the filtration rates of 180 and 240 m³/m².day, and, for the 120 m³/m².day, the conduit media was the one that spent less water when washed. Therefore, one can conclude that the higher porosity can promote the treatment of higher volume of water, in the same filtration area, aiming at reducing the costs of an efficient water treatment technology, benefiting areas with lower financial means.

Keywords: Double filtration. Upflow direct filtration. Upflow filtration in gravel. Upflow filtration in a porous media.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio proposto por Amirtharajah e Mills (1982).....	20
Figura 2 – Sistema de Dupla Filtração utilizado nos experimentos.	37
Figura 3 – Filtros ascendentes (a) e descendente (b).	38
Figura 4 – Bomba utilizada na alimentação do sistema.	38
Figura 5 – Rotômetros utilizados para controle inicial de vazão.....	39
Figura 6 – Bomba dosadora utilizada nos experimentos.....	40
Figura 7 – Dispositivo de mistura rápida utilizado.	40
Figura 8 – Eletroduto corrugado.	42
Figura 9 – Curva granulométrica da areia do FRD.....	43
Figura 10 – Perda de carga no dispositivo de mistura rápida em função da vazão.	44
Figura 11 – Volume de controle influenciado pela agitação do injetor.....	45
Figura 12 – Gradiente de velocidade versus a vazão do sistema.	46
Figura 13 – Dispositivo de agitação da água bruta, instalado no fundo do reservatório.	48
Figura 14 – Reservatório de armazenamento e preparação da água bruta.....	48
Figura 15 – Turbidez remanescente x massa de caulim em uma amostra de 50 mL de água destilada.	49
Figura 16 – Equipamento de <i>Jar-Test</i> utilizado nos ensaios preliminares.	51
Figura 17 – Curva de Calibração do <i>Jar-Test</i> (Gradiente de Velocidade <i>versus</i> Rotação da Paleta).....	53
Figura 18 – Ensaio de <i>Jar-Test</i> inicial, para determinação da tendência da concentração de coagulante necessária.....	54
Figura 19 – Ensaio de <i>Jar-Test</i> com dosagem de 5 mg/L.	56
Figura 20 – Ensaio de <i>Jar-Test</i> com dosagem de 10 mg/L.....	56
Figura 21 – Ensaio de <i>Jar-Test</i> com dosagem de 15 mg/L.	57
Figura 22 – Tubulação e hidrômetro utilizados na lavagem dos filtros ascendentes. ...	60
Figura 23 – Turbidez remanescente versus dosagem de coagulante nos ensaios de <i>Jar-Test</i>	62
Figura 24 – Evolução da turbidez da água bruta nos experimentos com taxa de filtração de 240 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	65
Figura 25 – Evolução da turbidez da água bruta nos experimentos com taxa de filtração de 180 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	65
Figura 26 – Evolução da turbidez da água bruta nos experimentos com taxa de filtração de 120 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	65

Figura 27 – Variação da alcalinidade entre os experimentos.	67
Figura 28 – Variação do pH entre os experimentos.	67
Figura 29 – Evolução da temperatura da água bruta, nos experimentos com taxa de filtração de 240 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	69
Figura 30 – Evolução da temperatura da água bruta, nos experimentos com taxa de filtração de 180 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	69
Figura 31 – Evolução da temperatura da água bruta, nos experimentos com taxa de filtração de 120 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	69
Figura 32 – Primeira carreira com taxa de filtração de 120 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	71
Figura 33 – Segunda carreira com taxa de filtração de 120 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	72
Figura 34 – Primeira carreira com taxa de filtração de 180 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	75
Figura 35 – Segunda carreira com taxa de filtração de 180 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	76
Figura 36 – Primeira carreira com taxa de filtração de 240 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	79
Figura 37 – Segunda carreira com taxa de filtração de 240 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	80
Figura 38 – Eficiência da remoção de turbidez, em categorias, no filtro descendente, para os experimentos com taxa de filtração de 240 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	81
Figura 39 – Eficiência da remoção de turbidez, em categorias, no filtro descendente, para os experimentos com taxa de filtração de 180 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	82
Figura 40 – Eficiência da remoção de turbidez, em categorias, no filtro descendente, para os experimentos com taxa de filtração de 120 m ³ /m ² .dia, em ambos os meios filtrantes.	83
Figura 41 - Leito filtrante de Eletroduto saturado com os flocos do caulim coagulado, ao final de um dos experimentos.	88
Figura 42 - Exemplos do leito filtrante de Pedregulho saturado com os flocos do caulim coagulado, ao final de um dos experimentos.	89
Figura 43 - Exemplos do topo leito filtrante (areia) do filtro descendente ao final de um dos experimentos.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade da água para o uso da filtração direta.....	23
Tabela 2 – Comparação da eficiência na remoção de turbidez entre um floculador mecânico e um floculador de pedregulho.	27
Tabela 3 – Granulometria do meio filtrante em pedregulho.....	41
Tabela 4 – Granulometria do meio filtrante de areia.	42
Tabela 5 – Gradientes de velocidade provocados pelo dispositivo de mistura rápida para as vazões do estudo.....	46
Tabela 6 – Especificação técnica do Caulim utilizado para proporcionar turbidez à água de estudo.....	47
Tabela 7 – Características do coagulante utilizado (Fonte: Produquímica).....	50
Tabela 8 – Relação das concentrações utilizadas nos ensaios de <i>Jar-Test</i>	52
Tabela 9 – Resumo dos valores de duração e rotação utilizados nos ensaios de <i>Jar-Test</i>	54
Tabela 10 – Taxas de filtração utilizadas em cada ensaio.	58
Tabela 11 – Frequência de realização dos ensaios das variáveis de interesse.	59
Tabela 12 – Métodos utilizados nas análises físico-químicas.	59
Tabela 13 – Média e Desvio-Padrão da Vazão afluyente de todos os experimentos. ...	63
Tabela 14 – Média e Desvio-Padrão da turbidez da água bruta obtida nos experimentos.	66
Tabela 15 – Análise da água de lavagem dos filtros ascendentes. Experimento: Pedregulho – Taxa = 240 m ³ /m ² .dia	84
Tabela 16 – Análise da água de lavagem dos filtros ascendentes. Experimento: Eletroduto – Taxa = 180 m ³ /m ² .dia	85
Tabela 17 – Parâmetros de lavagem dos filtros ascendentes.....	86
Tabela 18 – Resumo do desempenho de cada experimento.	87
Tabela 19 – Dados dos ensaios preliminares realizados em <i>Jar-Test</i> para obtenção da dosagem ideal de coagulante.....	102
Tabela 20 – Dados do experimento com taxa de filtração de 240 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 7,0. Alcalinidade = 105,75 mg CaCO ₃ /L..	102
Tabela 21 – Dados do experimento com taxa de filtração de 240 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 6,8. Alcalinidade = 102,40 mg CaCO ₃ /L. ...	103
Tabela 22 – Dados do experimento com taxa de filtração de 180 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 6,9. Alcalinidade = 101,75 mg CaCO ₃ /L..	103
Tabela 23 – Dados do experimento com taxa de filtração de 180 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 7,2. Alcalinidade = 107,25 mg CaCO ₃ /L. ...	104

Tabela 24 – Dados do experimento com taxa de filtração de 120 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 7,1. Alcalinidade = 99,50 mg CaCO ₃ /L. ...	105
Tabela 25 – Dados do experimento com taxa de filtração de 120 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 7,2. Alcalinidade = 103,25 mg CaCO ₃ /L. ...	106
Tabela 26 – Réplica. Dados dos ensaios preliminares realizados em <i>Jar-Test</i> para obtenção da dosagem ideal de coagulante.....	108
Tabela 27 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 240 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 7,2. Alcalinidade = 102,5 mg CaCO ₃ /L.....	108
Tabela 28 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 240 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 6,9. Alcalinidade = 104,40 mg CaCO ₃ /L.....	109
Tabela 29 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 180 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 7,3. Alcalinidade = 99,5 mg CaCO ₃ /L.....	109
Tabela 30 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 180 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 7,1. Alcalinidade = 106,55 mg CaCO ₃ /L.....	110
Tabela 31 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 120 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 7,2. Alcalinidade = 98,25 mg CaCO ₃ /L.....	111
Tabela 32 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 120 m ³ /m ² .dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 7,2. Alcalinidade = 102,25 mg CaCO ₃ /L.....	112
Tabela 33 – Dados detalhados da operação de lavagem dos filtros ascendentes para análise de eficiência de cada meio filtrante com relação ao gasto de água limpa para este fim.	114
Tabela 34 – Réplica. Dados detalhados da operação de lavagem dos filtros ascendentes para análise de eficiência de cada meio filtrante com relação ao gasto de água limpa para este fim.....	115

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DF	Dupla Filtração
DFE	Descarga de Fundo Final
DFI	Descarga de Fundo Intermediária
DFIs	Descargas de Fundo Intermediárias
ETAs	Estações de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FAAG	Filtração Ascendente em Areia Grossa
FAAP	Filtro Ascendente de Alta Porosidade
FA	Filtro Ascendente
FAP	Filtro Ascendente de Pedregulho
FDA	Filtração Direta Ascendente
FDAAG	Filtração Direta Ascendente em Areia Grossa
FDAP	Filtração Direta Ascendente em Pedregulho
FDD	Filtração Direta Descendente
FLA	Filtro de Laboratório de Areia
FLP	Filtro de Laboratório de Papel
FLAs	Filtros de Laboratório de Areia
FRD	Filtração Rápida Descendente
mca	Metro de coluna d'água
PAC	Cloreto de Polialumínio
PVC	Policloreto de Vinila
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	Coagulação Química	17
3.1.1	Mecanismos de Coagulação	18
3.1.1.1	Compressão da Camada Difusa	18
3.1.1.2	Adsorção e Neutralização de Cargas	19
3.1.1.3	Varredura	19
3.1.1.4	Formação de Pontes	19
3.2	Diagrama de Coagulação	20
3.3	Filtração	21
3.4	Filtração Direta e Dupla Filtração	22
3.4.1	Filtração Direta Ascendente	23
3.4.2	Filtração Direta Descendente	25
3.4.3	Dupla Filtração	26
3.5	Lavagem dos Filtros	28
3.6	Pesquisas com Dupla Filtração	29
4	MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1	Descrição da Instalação Experimental	35
4.2	Leitos Filtrantes	41
4.2.1	Leito Filtrante do Filtro Ascendente em Pedregulho	41
4.2.2	Leito Filtrante do Filtro Ascendente em Meio Poroso de PVC	42
4.2.3	Leito Filtrante do Filtro Descendente	42
4.3	Controle do Gradiente de Mistura Rápida	43
4.4	Preparação da Água Bruta	47
4.5	Dosagens de Coagulante	49
4.5.1	Características do Cloreto de Polialumínio (PAC) Utilizado	50
4.5.2	Ensaio de <i>Jar-Test</i>	50
4.6	Procedimento Experimental	57
4.7	Pontos de Coleta e Parâmetros de Análises	58
4.8	Volume Gasto na Lavagem dos Filtros Ascendentes	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1	Determinação da Dosagem de Coagulação	62

5.2	Aferição das Taxas de Filtração	63
5.3	Caracterização da Água Bruta	64
5.3.1	Turbidez.....	64
5.3.2	Alcalinidade e pH da Água de Estudo.....	67
5.3.3	Temperatura.....	68
5.4	Avaliação das Carreiras de Filtração	70
5.4.1	Taxa de Filtração: 120 m ³ /m ² .dia.....	70
5.4.2	Taxa de Filtração: 180 m ³ /m ² .dia.....	74
5.4.3	Taxa de Filtração: 240 m ³ /m ² .dia.....	78
5.5	Eficiência de Remoção de Turbidez	81
5.6	Volume de Água Gasto na Lavagem	84
6	CONCLUSÕES	91
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
8	REFERÊNCIAS	95
	Apêndice 1.....	100
	Apêndice 2.....	102
	Apêndice 3.....	108
	Apêndice 4.....	114

1 INTRODUÇÃO

É notória a escassez de água de qualidade em diversas regiões do país. Grande parte destas regiões não possui capacidade econômica para desenvolver e sustentar tecnologias de tratamento de água que demandem altos investimentos iniciais e, menos ainda, que possuam gastos com manutenção e insumos elevados, como é o caso das estações de tratamento de água por ciclo completo. Este tipo de tecnologia deve ficar restrito a regiões mais populosas e economicamente mais abastadas. Por este motivo a tecnologia de Dupla Filtração (DF) vem sendo amplamente estudada no Brasil, especialmente na Escola de Engenharia de São Carlos-SP, USP, desde a década de 70 (WIECHETECK; BENINI; DI BERNARDO, 2003).

A DF tem apresentado resultados satisfatórios em diversas situações já analisadas, mostrando-se, dependendo da qualidade da água bruta, ser suficiente para atender aos padrões de potabilidade da grande maioria das necessidades de abastecimento público. A tecnologia traz como grande vantagem, em relação à de ciclo completo, seu baixo custo de implantação e de manutenção, além de demandar uma área muito inferior para sua implantação.

O pré-tratamento na DF é realizado pelos filtros ascendentes. Estes, comumente, possuem como meio filtrante cinco camadas de diferentes granulometrias de pedregulho, variando desde 2 até 38 mm de tamanho de grão. Este pedregulho possui como característica uma porosidade relativamente baixa, na qual todo o interior de cada pedra se torna sem efeito em termos de contato superficial do efluente coagulado com o mesmo. Portanto, a maior parcela, cerca de 70%, do volume interno de um filtro ascendente é ocupada pelo leito filtrante.

A proposta deste trabalho foi estudar um meio filtrante alternativo e mais barato para o pré-tratamento do sistema de Dupla Filtração, visando a redução de custos desses sistemas de tratamento. Para tanto, os filtros ascendentes foram focados, para poder-se verificar se um incremento na porosidade do seu leito filtrante, sem a utilização de descargas de fundo intermediárias, poderia proporcionar ganho quantitativo e qualitativo no tratamento da água de abastecimento, assim como também ganho econômico na implantação do sistema.

O material proposto como leito filtrante poroso é o eletroduto corrugado, o qual já vem sendo estudado como meio suporte para crescimento bacteriano em sistemas de tratamento biológico de águas residuárias, em alguns casos, até visando o reuso das mesmas. Brito *et al.* (2005) utilizam este material como preenchimento dos filtros anaeróbios como pós-tratamento em uma ETE. Segundo esses autores o eletroduto

corrugado possui um índice de vazios da ordem de 89%. Santos, Lucas Filho e Araújo (2005) e Costa, Araújo e Nobre (2006) citam que, no tratamento de esgotos, os anéis de eletroduto corrugado são preenchimentos de filtros anaeróbios mais eficientes do que as britas.

Segundo Cirne *et al.* (2007) os filtros anaeróbios com enchimento de eletroduto corrugado de plástico apresentaram melhor desempenho na remoção média de DBO (84%) e de Sólidos Suspensos Totais (80%) em comparação com os tijolos cerâmicos vazados e de britas n.º 4. Afirmam ainda que os melhores resultados de desempenho, provavelmente, têm relação com o seu alto índice de vazios (maior porosidade).

No entanto, para o tratamento de água de abastecimento, esse material tem sido pouco utilizado, sendo restrita a literatura sobre o uso do mesmo, o que motivou a realização desta pesquisa. Este estudo inova ao analisar um novo meio filtrante, objetivando uma maior produtividade e eficiência das estações de tratamento de água em Dupla Filtração, tão largamente utilizadas para abastecimento de pequenas comunidades.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência de dois sistemas de dupla filtração para tratamento de água de abastecimento, trabalhando sob condição limite, ou seja, água bruta com picos de turbidez de 200 uT (máxima recomendada para essa tecnologia) e sem aplicação de descarga de fundo intermediária nos filtros ascendentes; sendo um sistema constituído de filtro ascendente em pedregulho e outro constituído de filtro ascendente com meio de alta porosidade em PVC, ambos seguidos de filtração rápida descendente.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar as condições de coagulação, utilizando equipamento de *Jar-Test*, para água em estudo;
- Comparar a eficiência de remoção da turbidez no filtro ascendente em pedregulho com o filtro ascendente de alta porosidade (meio poroso de PVC), para diferentes taxas de filtração;
- Verificar se a capacidade de retenção de turbidez do filtro ascendente de alta porosidade é maior que a do pedregulho convencional, e se assemelha-se a de um decantador de alta taxa;
- Avaliar a duração da carreira de filtração do filtro descendente levando em consideração o pré-tratamento em filtro ascendente em pedregulho e em meio poroso de PVC para diferentes taxas de filtração;
- Identificar a maior taxa de filtração que pode ser aplicada para ambos os leitos filtrantes, para uma água de mesma qualidade;
- Comparar ambos os sistemas quanto à vazão total de água produzida e ao volume de água gasto com a lavagem dos leitos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Coagulação Química

As diversas impurezas que estão presentes nos corpos d'água, como substâncias húmicas, colóides e outros, possuem carga superficial negativa. Isto dificulta a sedimentação natural das mesmas, pois impede a aproximação umas das outras, fazendo com que estas substâncias tendam a ficar suspensas na água, promovendo os efeitos indesejáveis conhecidos como turbidez, cor etc.

Assim sendo, faz-se necessária a mudança de algumas características da água, bem como das partículas nela suspensas. Esta mudança se dá, geralmente, com a aplicação de sais de alumínio e de ferro, que desestabilizam as cargas das partículas ao formarem espécies hidrolisadas com carga positiva, que, em um processo muito rápido, da ordem de alguns segundos, proporcionam a aglutinação entre as substâncias presentes.

Amirtharajah (1989) descreve o principal objetivo da coagulação como sendo a desestabilização (neutralização das cargas superficiais) do material suspenso por meio da cobertura das partículas coloidais com espécies carregadas positivamente que se agarram às mesmas.

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005a), a coagulação resulta de dois fenômenos: o primeiro, essencialmente químico, consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva e depende da concentração do metal e pH final da mistura; o segundo, fundamentalmente físico, consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja contato entre as impurezas presentes na água.

Os parâmetros que influem diretamente no desempenho do processo de coagulação química são o pH, a alcalinidade, a turbidez, a cor verdadeira, a temperatura, a condutividade e o potencial zeta. Todos estes devem ser monitorados para um bom desempenho desta etapa de tratamento de água. Como se nota, a dosagem do coagulante depende enormemente da qualidade da água, portanto, para cada afluyente é necessário que se faça um novo estudo para a determinação deste parâmetro. Esta análise é realizada utilizando-se a própria água a ser tratada, em um equipamento denominado *Jar-Test*. Neste teste, a água é submetida, simultaneamente, a diferentes condições de dosagem e de agitação, em jarros dispostos lado a lado. Passados alguns segundos, coleta-se de cada jarro uma amostra de água para análise e, daquela amostra que apresentar as melhores

características físico-químicas, reproduz-se as mesmas condições de dosagem e agitação (gradiente de velocidade) em escala real.

Segundo Amirtharajah (1989) este pré-tratamento químico cujo objetivo é a desestabilização das partículas presentes na água, individualmente, é o parâmetro de controle mais importante da eficácia da filtração direta.

3.1.1 Mecanismos de Coagulação

A coagulação química está subdividida em quatro diferentes mecanismos de coagulação, são eles: compressão da camada difusa, adsorção e neutralização de cargas, varredura e formação de pontes.

De acordo com Di Bernardo *et al.* (2003), a definição do mecanismo predominante depende de fatores como pH de coagulação, da dosagem do coagulante e de características químicas da água bruta.

Para Amirtharajah e Mills (1982) a coagulação realizada com sais de alumínio é predominante em dois mecanismos de coagulação, a adsorção e neutralização de cargas e a varredura.

3.1.1.1 Compressão da Camada Difusa

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005a), sais simples, como o cloreto de sódio são considerados eletrólitos indiferentes e não têm características de hidrólise ou de adsorção, como ocorre com sais de alumínio ou de ferro. A desestabilização de um sistema coloidal com a adição de eletrólitos indiferentes ocorre em decorrência de interações eletrostáticas, ou seja, íons de mesma carga são repelidos e íons de carga contrária são atraídos pelos colóides; quanto maior a carga do íon positivo, menor a quantidade requerida para a coagulação.

A introdução de um colóide num sistema coloidal causará aumento na densidade de cargas na camada difusa e diminuirá a esfera de influência das partículas, ocorrendo a coagulação por compressão da camada difusa. Concentrações elevadas de íons positivos e negativos (força iônica grande) na água acarretam acréscimo do número de íons na camada difusa, que, para se manter eletricamente neutra, necessariamente tem seu volume reduzido (diminuição da espessura), de tal modo que as forças de van der Waals sejam dominantes, eliminando a estabilização eletrostática. Exemplo típico ocorre quando águas doces com força iônica pequena misturam-se à água do mar, promovendo a formação de depósitos nas desembocaduras (DI BERNARDO; DANTAS, 2005a).

3.1.1.2 Adsorção e Neutralização de Cargas

O mecanismo de adsorção-neutralização de carga é muito importante quando o tratamento é realizado por meio de uma das tecnologias da filtração direta, pois não há necessidade da produção de flocos para posterior sedimentação ou flotação, mas de partículas desestabilizadas que serão retidas no meio granular dos filtros (DI BERNARDO; DANTAS, 2005a). Neste mecanismo não são formados flocos grandes e a dosagem de coagulante geralmente é inferior à necessária quando é empregado o mecanismo de varredura (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

Para Amirtharajah e Mills (1982) as reações que precedem a coagulação por adsorção e neutralização de cargas são extremamente rápidas e ocorrem em microssegundos caso não haja a formação de polímeros na hidrólise do Al(III) ou em até um segundo caso haja esta formação.

3.1.1.3 Varredura

Segundo Di Bernardo *et al.* (2003) o mecanismo de varredura é caracterizado por altas dosagens de coagulante, suficientes para formação de precipitado de hidróxido de alumínio ou de ferro. Este mecanismo é adequado para ETAs com unidades de decantação ou de flotação, pois possibilita a formação de flocos maiores, facilitando sua sedimentação ou flotação.

Dependendo da quantidade adicionada de coagulante, do pH da mistura e da concentração de alguns tipos de íons na água, poderá ocorrer a formação de precipitados do tipo Al(OH)₃ ou Fe(OH)₃. O mecanismo de varredura é intensivamente utilizado nas estações de tratamento de água em que se tem a floculação e a sedimentação antecedendo a filtração rápida (DI BERNARDO; DANTAS, 2005a).

A formação do precipitado de hidróxido de alumínio antes da coagulação por varredura é mais lenta do que na coagulação por adsorção e neutralização de cargas e ocorre entre 1 e 7 segundos. Portanto, no mecanismo de varredura, é evidente que o tempo de dispersão do coagulante ser extremamente baixo e que haja uma mistura rápida intensa não são tão decisivos quanto no mecanismo de adsorção e neutralização de cargas (AMIRTHARAJAH; MILLS, 1982).

3.1.1.4 Formação de Pontes

O mecanismo de coagulação com formação de pontes caracteriza-se por envolver o uso de polímeros de grandes cadeias moleculares (massa molar > 10⁶), os quais servem de ponte entre a superfície à qual estão aderidos e outras partículas (DI BERNARDO; DANTAS, 2005a).

3.2 Diagrama de Coagulação

Trata-se de um diagrama no qual são delimitadas regiões de coagulação quando é utilizado o sulfato de alumínio. A influência do pH e da dosagem de coagulante na formação das espécies hidrolisadas de alumínio e na determinação do mecanismo de coagulação podem ser observadas (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

A Figura 1 corresponde a uma situação genérica que ilustra o uso do diagrama de solubilidade do alumínio, as linhas que delimitam as diferentes regiões se alteram com as características da água. Também é possível observar as regiões e dosagens em que predominam os diferentes mecanismos de coagulação.

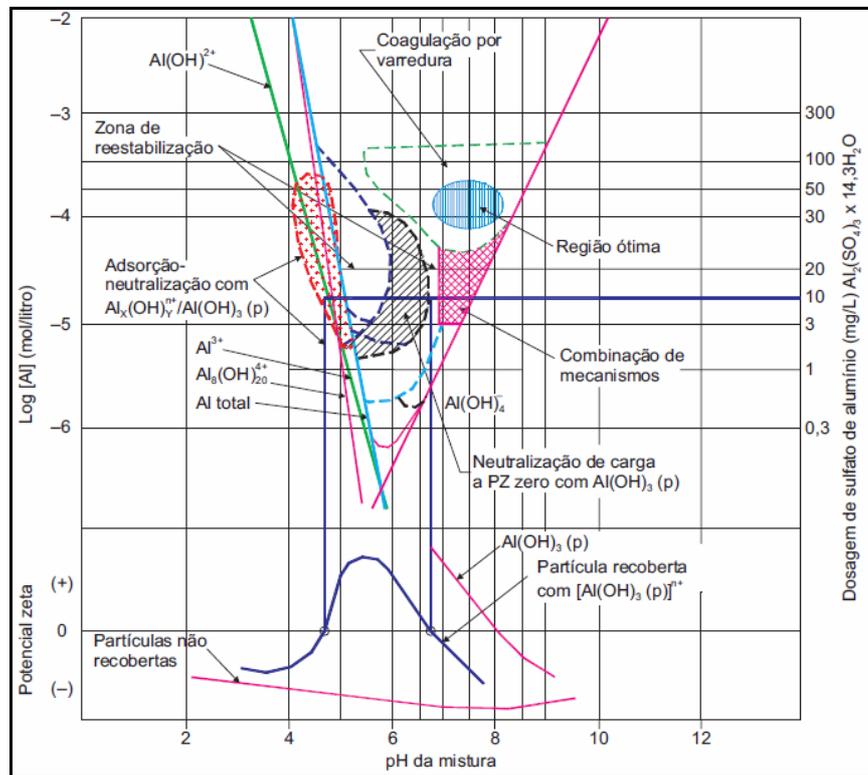


Figura 1 – Diagrama de coagulação com sulfato de alumínio proposto por Amirtharajah e Mills (1982)

3.3 Filtração

A filtração é uma das etapas mais importantes do processo de tratamento de água e tem como função a remoção de sólidos suspensos e coloidais, bem como a remoção de microrganismos presentes no efluente. Na maioria dos casos, é ela que precede o processo de desinfecção, tornando-se a última barreira, que irá influir decisivamente na eficácia de remoção dos patógenos (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

Quando o sentido do fluxo durante a filtração se dá de baixo para cima, dá-se o nome de filtração direta ascendente, e, no sentido oposto, filtração direta descendente.

Ainda segundo Di Bernardo *et al.* (2003) os mecanismos responsáveis pela remoção de partículas durante a filtração com ação de profundidade são complexos e influenciados principalmente pelas características físicas e químicas das partículas, da água e do meio filtrante, da taxa de filtração e do método de operação dos filtros. Considera-se a filtração o resultado da ação de três mecanismos distintos: transporte, aderência e desprendimento.

A constituição do meio granular indicará se o filtro trabalhará pela ação da profundidade ou pela ação superficial. Na filtração sob efeito da ação de profundidade, a retenção das partículas ocorrerá ao longo do leito filtrante, aproveitando-se de toda a sua extensão. Este tipo de ação se dá em meios filtrantes uniformes, ou seja, o seu coeficiente de desuniformidade (relação entre a dimensão da malha que reteve 60% da massa do material granular e a malha que reteve 10% desta massa) deve ser próximo a 1. Esta filtração sob efeito da profundidade é a que ocorre nos filtros ascendentes, pois o espaço intersticial e a granulometria decrescente proporcionam o melhor aproveitamento da profundidade do leito filtrante.

Já a filtração sob ação superficial ocorre em meios granulares pouco uniformes. Segundo Di Bernardo *et al.* (2003), a ação física de coar é o mecanismo predominante durante a filtração sob ação superficial. Neste caso, a filtração ocorre preferencialmente na primeira camada do leito filtrante, aproximadamente, nos primeiros 15 cm (DI BERNARDO *et al.*, 2003). Isto traz como desvantagem à filtração por ação superficial uma menor carreira de filtração, já que a perda de carga promovida pelo meio granular aumenta mais rapidamente que na filtração por ação de profundidade, atingindo o limite de carga hidráulica previsto para o filtro em um menor tempo. Este é o mecanismo de filtração que predomina nos filtros descendentes.

Maiores carreiras de filtração são desejadas, pois promovem menos desperdício de água na lavagem dos filtros e exigem manutenção menos frequente dos mesmos.

Dependendo da taxa de filtração aplicada, os filtros podem ser classificados como filtros lentos ou filtros rápidos. Taxa de filtração é o termo utilizado para designar

a velocidade de aproximação do efluente ao leito filtrante. É definida pela razão entre a vazão e a área efetiva de filtração.

3.4 Filtração Direta e Dupla Filtração

A filtração direta é um tratamento alternativo à estação de tratamento de água de ciclo completo. É um processo no qual se utiliza da coagulação química, porém que não contempla uma unidade específica para sedimentação. Contem ainda, a mistura rápida, que pode ou não contemplar uma unidade específica de floculação e, dependendo da qualidade da água bruta, pode-se utilizar a dupla filtração (filtração ascendente em areia ou em pedregulho seguida da filtração descendente) ou utiliza-se diretamente o filtro descendente.

Segundo Di Bernardo *et al.* (2003), as ETAs de filtração direta possibilitam reduzir os custos operacionais por meio da diminuição do consumo de coagulante, pela redução do volume do lodo gerado no tratamento e pelo aumento da duração das carreiras de filtração. Contudo, é a qualidade da água bruta que vai definir a tecnologia de tratamento adequada.

Como exposto acima, a qualidade da água bruta a ser tratada é que vai determinar a viabilidade ou não da utilização da filtração direta. Nos casos em que a água possui elevada turbidez e cor, a estação de ciclo completo torna-se indispensável. Porém, segundo Di Bernardo *et al.* (2003), não há consenso quanto aos limites dos parâmetros que limitam a possibilidade do emprego da filtração direta.

A Tabela 1 sugere os limites dos parâmetros turbidez, cor verdadeira e sólidos em suspensão para poder-se utilizar a tecnologia de filtração direta. Por exemplo, uma água que apresente, em 90% das amostras, turbidez menor ou igual a 50 uT e cor verdadeira menor ou igual a 50 uC ou, em 95% das amostras, turbidez menor ou igual a 100 uT, cor verdadeira menor ou igual a 75 uC e sólidos em suspensão menor ou igual a 100 mg/L ou ainda, em 100% das amostras, turbidez menor ou igual a 150 uT, cor verdadeira menor ou igual a 100 uC e sólidos em suspensão menor ou igual a 150 mg/L, deve, de acordo com a Tabela 1, utilizar a tecnologia de tratamento de Dupla Filtração com filtração ascendente (↑) em areia grossa e filtração descendente (↓) em areia.

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade da água para o uso da filtração direta.

Características da Água Bruta	Tecnologia de Tratamento			
	Filtração Direta Descendente	Filtração Direta Ascendente	Dupla Filtração	
			↑ Pedregulho ↓ Areia	↑ Areia Grossa ↓ Areia
Turbidez (uT)	90% ≤ 10	90% ≤ 10	90% ≤ 100	90% ≤ 50
	95% ≤ 25	95% ≤ 25	95% ≤ 150	95% ≤ 100
	100% ≤ 100	100% ≤ 100	100% ≤ 200	100% ≤ 150
Cor verdadeira (uC)	90% ≤ 20	90% ≤ 20	90% ≤ 50	90% ≤ 50
	95% ≤ 25	95% ≤ 25	95% ≤ 75	95% ≤ 75
	100% ≤ 50	100% ≤ 50	100% ≤ 100	100% ≤ 100
Sólidos em Suspensão (mg/L)	95% ≤ 25	95% ≤ 25	95% ≤ 150	95% ≤ 100
	100% ≤ 100	100% ≤ 100	100% ≤ 200	100% ≤ 150

Fonte: Adaptada de Di Bernardo *et al.* (2003). Legenda: ↑=Ascendente e ↓=Descendente

3.4.1 Filtração Direta Ascendente

A filtração direta ascendente (FDA) é uma tecnologia relativamente recente no Brasil. Os filtros ascendentes, também conhecidos como “filtros russos”, ganharam este nome devido ao fato da ex-União Soviética ter sido o país no qual esta tecnologia mais se difundiu.

Trata-se de uma técnica que foi amplamente estudada por Di Bernardo e seus colaboradores nas décadas de 1980 e 1990, os quais investigaram a implantação das descargas de fundo intermediárias nos filtros, fato que possibilitou a ampliação da gama de qualidades da água bruta possíveis de serem utilizadas, já que até então era utilizado em águas de turbidez e cor menos acentuadas. Isto permitiu também o aumento das carreiras de filtração, viabilizando a sua aplicação em pequenas comunidades (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

Uma grande vantagem da filtração direta ascendente se deve ao fato de o fluxo da água se dar no sentido da maior para a menor granulometria do leito filtrante, proporcionando o filtro ideal, no qual uma maior parcela da extensão do meio granular é efetivamente utilizada na filtração, reduzindo a necessidade de carga hidráulica e ampliando a carreira de filtração (KURODA, 2002).

Geralmente, os filtros ascendentes são constituídos de um fundo falso, acima do qual se encontra a camada suporte de pedregulho seguido pela camada de areia. Como se sabe, a tecnologia de filtração direta caracteriza-se pela aplicação do coagulante químico imediatamente antes dos filtros, sendo os decantadores inexistentes, podendo também os floculadores serem dispensáveis (a qualidade da água bruta pode exigir um), a água coagulada entra em contato primeiramente com a camada suporte de pedregulho. Por este motivo, o pedregulho não tem somente a

função de sustentação do leito filtrante de areia, mas também age como um floculador de contato, proporcionando o choque entre os flocos e seu conseqüente aumento de tamanho, melhorando a eficiência do processo de filtração como um todo.

A depender da qualidade do efluente, que pode apresentar variações acentuadas ao longo do período de uso, a filtração direta ascendente pode requerer um pós-tratamento com filtração descendente, para assegurar a qualidade da água tratada. Neste caso, o sistema passa a ser denominado dupla filtração.

Quando da utilização de dupla filtração, no filtro ascendente não se torna mais imprescindível a utilização de areia de pequena granulometria, podendo-se recorrer à areia grossa ou também ao pedregulho em granulometrias decrescentes.

A filtração direta ascendente apresenta diversas vantagens, dentre elas pode-se citar o baixo custo de sua implantação (comparando-se com uma estação de ciclo completo), devido ao fato de dispensar as unidades exclusivas para floculação e decantação; ressalta-se também a menor produção de lodo, proporcionada pela menor dosagem de coagulantes, que, por si só, também é outra vantagem da tecnologia.

Como desvantagens têm-se a limitação quanto à qualidade de água bruta que se pretende tratar; a necessidade de um controle mais eficiente de dosagem dos coagulantes químicos, pois exige uma flexibilidade maior neste processo de coagulação, já que variando-se a qualidade do efluente, deve-se variar também esta dosagem; como a água clarificada sai do filtro pelo lado superior, esta fica exposta ao ar livre e aos contaminantes dele advindos, devendo-se cobrir o filtro.

Senz, Melo Filho e Dalsasso (2003) investigaram o desempenho de um sistema hidráulico alternativo de DFIs (descargas de fundo intermediárias) com injeção de água na interface pedregulho/areia na filtração direta ascendente. A água bruta era proveniente de uma lagoa com elevadas concentrações de algas. Segundo o autor, grande parte das impurezas é retida na camada suporte de pedregulho, isto posto, observou-se que a realização de DFIs concomitantemente com a injeção de água recém tratada na interface pedregulho e areia não trouxe prejuízo à qualidade da água filtrada e proporcionou carreiras de filtração mais longas, com prolongamento médio de 5 horas. Por outro lado, este sistema hidráulico envolve outros acessórios, como válvulas, conexões e bombas, que possuem um custo bastante elevado.

Silva *et al.* (2005) estudaram a tecnologia de filtração ascendente utilizando dois filtros em série, o primeiro constituído de pedregulho e o segundo de areia. O objetivo da instalação piloto utilizada era a remoção de algas em águas de abastecimento. As taxas médias de filtração aplicadas foram de 119,85 m³/m².dia no filtro ascendente em

pedregulho e de 233,8 m³/m².dia no filtro subsequente. Os autores concluíram que utilizando esta tecnologia a ETA poderá produzir 56,78% mais água tratada.

Segundo Di Bernardo *et al.* (2003) o tempo de lavagem de um filtro ascendente pode variar de 7 a 10 minutos, utilizando uma taxa de lavagem entre 1440 e 1730 m³/m².dia e o consumo de água de lavagem varia entre 3% e 5%, podendo atingir 10% em alguns casos. As descargas de fundo (DF) podem ser realizadas pelo método do esvaziamento total do filtro ou pelo esvaziamento parcial, quando reduz-se o nível da água até acima do topo do meio granular.

3.4.2 Filtração Direta Descendente

A filtração direta descendente (FDD) surgiu da necessidade de os operadores das estações de tratamento de ciclo completo terem outra opção nas épocas do ano em que a água bruta atingia valores de cor e turbidez baixos (DI BERNARDO; DANTAS, 2005a). Como em estações convencionais comumente se coagula a água pelo mecanismo de varredura, a baixa concentração de sólidos suspensos dificultava a formação de flocos suficientemente grandes e densos para que sedimentassem nos decantadores, causando problemas na filtração, além de desperdiçar coagulante. Na tentativa de desviar destes problemas, passou-se então a realizar a coagulação pelo mecanismo de neutralização de cargas, e desviou-se a água coagulada diretamente da mistura rápida (ou após os flocculadores, dependendo da qualidade da mesma) para os filtros descendentes de areia, criando-se assim o conceito de filtração direta descendente, o qual dispensa o uso dos decantadores e, em alguns casos, dispensa também o uso dos flocculadores.

Desde então, muitas ETAs passaram a ser construídas já com este desvio previsto no projeto, oferecendo ambas as opções aos usuários, o tratamento por ciclo completo, para épocas de efluentes com alta turbidez, e tratamento por filtração direta descendente, para a época do ano com águas mais límpidas.

A FDD traz diversas vantagens quando comparada ao tratamento convencional, dentre elas tem-se a diminuição de consumo de coagulantes, devido ao fato de passar a coagular pelo mecanismo de neutralização de cargas, que também influi no consumo de alcalinizantes, já que neste mecanismo, em alguns casos, pode-se trabalhar com pH mais baixo; menos coagulante proporciona menos formação de lodo, que é uma outra grande vantagem, pois diminui-se os gastos com manutenção, limpezas e energia elétrica; o investimento inicial na construção de decantadores e de flocculadores (em alguns casos) deixam de existir.

Porém, traz também algumas desvantagens, a saber: exige mais rapidez dos operadores quanto à dosagem de coagulante, quando há uma variação mais acentuada na qualidade da água bruta, obrigando a um monitoramento mais rigoroso da qualidade da água; é uma tecnologia limitada quanto ao nível de turbidez e cor que se pode tratar.

3.4.3 Dupla Filtração

Conforme visto anteriormente, tanto a tecnologia de FDA quanto a de FDD são limitadas quanto à qualidade da água bruta a ser tratada. Nestes processos, quando há acréscimos acentuados de turbidez e cor o operador deve agir rapidamente para re-analisar a dosagem de coagulante, correndo-se o risco de que a qualidade da água filtrada fique aquém da desejada e exigida. Ambos os processos não suportam variações bruscas de qualidade da água bruta.

Para suplantar estes problemas, ambas as tecnologias se fundiram em uma única, denominada dupla filtração (DF) que contempla a filtração direta ascendente seguida pela filtração rápida descendente.

A DF consegue amortecer variações de qualidade do afluente, impedindo que as partículas passem adiante na estação. Com isto, a tecnologia de dupla filtração - por manter todas as vantagens da FDA e da FDD, como baixo consumo de coagulante e alcalinizante, consumo menor de energia elétrica, menor formação de lodo, quando comparado ao processo convencional etc. - associada à maior capacidade de amortecimento das variações da qualidade da água bruta, passou a ser amplamente utilizada em substituição às ETAs de ciclo completo, que são mais dispendiosas tanto na implantação quanto na operação.

Outras situações adversas nas quais o emprego da DF pode ser realizado são quando o manancial possui elevadas concentrações de algas, de cor verdadeira, de turbidez ou de coliformes; ou ainda quando se há suspeita de presença de vírus e protozoários (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

Quando se adiciona o filtro descendente ao processo de filtração direta ascendente, traz-se também como vantagem a possibilidade de aumento da granulometria do meio filtrante do filtro ascendente, bem como da diminuição da altura do mesmo, resultando em menor carga hidráulica necessária. Além disto, as taxas de filtração em ambos os filtros (ascendente e descendente) podem ser aumentadas, proporcionando uma menor área efetiva de filtração necessária, o que influi diretamente no custo de implantação do sistema.

A junção entre estas tecnologias proporciona também que o filtro ascendente contenha apenas pedregulho. Isto traz como vantagem a maior capacidade do mesmo reter impurezas, por ter um maior volume de vazios, e permite que o filtro ascendente funcione como uma unidade de floculação em meio granular (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

Richter e Azevedo Netto (2002) afirmam que a floculação em meio poroso possui elevada eficiência e baixo custo. Esta técnica consiste em passar a água através de um meio granular contido em um tanque logo após ter recebido o coagulante. Ainda segundo estes autores, um floculador em meio poroso pode ser considerado um floculador hidráulico com um número muito grande de câmaras e que o tempo requerido para floculação é muito inferior ao tempo nos floculadores hidráulicos convencionais.

Estes autores realizaram um experimento no qual fizeram uma tomada de água bruta a partir da câmara de mistura rápida de uma estação convencional de tratamento de água. O objetivo deles era comparar a eficiência de um floculador em pedregulho, em escala piloto, com o floculador mecânico oscilatório da ETA, que possuía um tempo de floculação de 20 a 30 minutos. Como resultados ressaltaram que, apesar do tempo médio de floculação muito inferior no floculador de pedregulho (2 minutos e 50 segundos), a eficiência na remoção de turbidez foi superior ao floculador da ETA, conforme pode ser visto na Tabela 2. A coagulação deste experimento foi realizada pelo mecanismo de varredura.

Tabela 2 – Comparação da eficiência na remoção de turbidez entre um floculador mecânico e um floculador de pedregulho.

Turbidez da Água Bruta (uT)	Remoção de Turbidez	
	Floculador de Pedregulho	Floculador Mecânico da ETA
20	88%	70%
50	93%	72%
100	96%	93%
200	97%	96%

Fonte: Adaptada de Richter e Azevedo Netto (2002).

3.5 Lavagem dos Filtros

O método e a frequência de lavagem, tanto dos filtros ascendentes quanto dos filtros descendentes, são elementos importantes para o desempenho de sistemas de filtração direta.

Os filtros descendentes normalmente são lavados aplicando-se um escoamento ascendente, com velocidade capaz de assegurar a expansão adequada do meio filtrante. Pode ser lavado somente com água ou com ar e água. Para uma lavagem eficiente recomenda-se que a expansão do leito atinja cerca de 40% de sua altura. Dependendo da granulometria, a lavagem pode ser feita com velocidades ascensionais entre 0,7 e 10,5 m/min, com tempo de lavagem variando entre 7 e 10 minutos (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

Na filtração ascendente recomenda-se a realização das descargas de fundo intermediárias (DFIs), que removem parte das impurezas retidas no meio filtrante, e têm o objetivo de prolongar a carreira de filtração, promovendo um decréscimo da perda de carga do filtro. O número de DFIs depende das características da água bruta e da evolução da perda de carga no meio granular. É possível calcular o número de DFIs baseando-se na perda de carga total no meio granular. Durante as DFIs recomenda-se a introdução de água na interface pedregulho/areia, na filtração direta ascendente, pois sem a mesma existe a possibilidade da formação de vácuo no interior do meio granular e, após o reinício da operação, pode ocorrer de o ar retido sair, causando prejuízo na qualidade da água filtrada (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008).

As descargas de fundo podem ser executadas durante as carreiras de filtração, que são as DFIs, ou ao final da carreira (DFF), iniciando o processo de limpeza do filtro ascendente. As descargas de fundo podem ser realizadas com o esvaziamento total do filtro ou com o esvaziamento até o topo do meio filtrante.

Para a filtração direta ascendente recomenda-se que a vazão para lavagem seja determinada a partir da velocidade ascensional necessária para causar a expansão adequada do meio filtrante, enquanto que a taxa de aplicação na interface pode ser fixada entre 600 e 1000 m³/m².dia (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008). Ainda segundo esses autores, em um sistema de dupla filtração, a lavagem do filtro ascendente em pedregulho pode ser realizada por meio de sucessivas descargas de fundo, com posterior recarga de água limpa, repetidas vezes, até que seja observado que a água descarregada esteja visivelmente limpa.

Segundo Di Bernardo *et al.* (2003), o consumo de água de lavagem varia de 3% a 5%, podendo atingir 10% em alguns casos.

3.6 Pesquisas com Dupla Filtração

Di Bernardo, Botari e Di Bernardo (2005) estudaram uma instalação piloto de DF constituída por uma unidade de FDAAG e uma FRD em areia. A água bruta possuía turbidez elevada, 100 e 300 uT. O coagulante utilizado foi o sulfato de alumínio e a taxa de filtração média utilizada foi de 235 m³/m².dia. Concluíram que: i) a FDAAG, com turbidez de 100 uT, apresentou eficiência satisfatória, tendo o efluente final apresentado turbidez menor do que 0,1 uT durante a maior parte do tempo, independentemente das taxas de filtração empregadas; ii) conclui-se também que a taxa de filtração de 240 m³/m².dia é elevada, pois a carreira de filtração foi de cerca de 20 horas apenas; iii) há indicativo de floculação em meio poroso, já que observou-se a diminuição acentuada do número de partículas de dado tamanho e o aumento do número de partículas de outros tamanhos, sendo, na maioria dos casos, dos menores para os maiores tamanhos.

Gusmão (2001) estudou o desempenho de dois sistemas de filtração ascendente, um composto por leito de areia grossa e o outro com leito em pedregulho. Em ambos os casos o tratamento final consistiu em FRD em areia. Analisou ainda o desempenho de filtros de laboratório com papel (Whatman 40) e com areia (FLP e FLA) e os diferentes métodos de lavagem do meio granular da unidade de filtração direta ascendente em pedregulho (FDAP). A água bruta estudada era proveniente de um manancial superficial. Suas conclusões ressaltam que: i) os ensaios de filtração direta utilizando-se o FLA mostraram-se mais apropriados para a determinação das dosagens do coagulante, já que seu meio filtrante apresentou maior sensibilidade à variação destas do que o FLP, permitindo uma indicação mais precisa a ser utilizada; ii) quando a turbidez da água bruta variou entre 8 e 12 uT e foi aplicada uma taxa de filtração de 350 m³/m².dia na unidade de filtração direta ascendente em areia grossa (FDAAG), a filtração rápida descendente (FRD) mostrou-se desnecessária, já que a remoção de impurezas na unidade de pré-filtração foi suficiente para que a qualidade de seu efluente atendesse às normas relativas à produção de água potável; iii) a carreira de filtração atingiu 3,7 dias quando a água bruta apresentou turbidez entre 8 e 12 uT e utilizou-se a unidade de FDAAG e executou-se DFIs; iv) o crescimento da perda de carga no meio granular foi maior na unidade de FDAAG do que na unidade de FRD, por este motivo as carreiras de filtração encerraram-se quando toda carga hidráulica disponível na unidade de FDAAG era utilizada, tendo durações entre 27 e 88 horas; v) em todos os ensaios a FRD mostrou-se necessária quando estudou-se a unidade de FDAP, já que esta não foi suficiente para que seus efluentes atendessem às normas referentes aos padrões de potabilidade da água; vi) nos ensaios cuja água

bruta variou entre 9 e 12 uT, o sistema de FDAP mostrou-se mais vantajoso do que o sistema com FDAAG, pois além de produzir efluente final com a mesma qualidade, apresentou maior eficiência na produção de água tratada; vii) ambos os sistemas de DF mostraram-se alternativas viáveis ao tratamento utilizado nas estações de tratamento de água de ciclo completo.

Wiecheteck, Benini e Di Bernardo *et al.* (2003) compararam o desempenho de dois sistemas de dupla filtração, um utilizando filtro ascendente em areia grossa e o outro com filtro ascendente em pedregulho, ambos com taxa de filtração de 120 m³/m².dia e os filtros descendentes com taxa de 240 m³/m².dia. O filtro ascendente em pedregulho possuía 6 camadas, sendo a primeira (de baixo para cima) com espessura de 10 cm e granulometria de 25,4 a 19 mm, a segunda com espessura de 10 cm e granulometria 12,7 a 19 mm, a terceira com espessura de 10 cm e granulometria 6,4 a 12,7 mm, a quarta camada com espessura de 15 cm e granulometria 3,2 a 6,4 mm, a quinta camada espessura de 7,5 cm e granulometria de 6,4 a 12,7 mm e a sexta camada espessura de 7,5 cm e granulometria de 12,7 a 19 mm. O objetivo do estudo foi a remoção das substâncias húmicas de água com cor verdadeira entre 90 e 110 uH e avaliar os dois sistemas quanto à eficiência na produção de água filtrada. Foram executadas descargas de fundo intermediárias nos filtros ascendentes. Os autores concluíram que o sistema composto pela FAAG apresentou melhor eficiência na produção efetiva de água filtrada, com taxas de 120 e 160 m³/m².dia, enquanto que o sistema composto pela FAP a melhor eficiência se deu com as taxas de 80 e 150 m³/m².dia. Para a mesma combinação de taxas a unidade de FAAG foi mais eficiente do que a unidade de FAP, com 93,1 e 91,7%, respectivamente, devido à quantidade de descargas de fundo intermediárias executadas durante os ensaios.

Kuroda, Di Bernardo e De Paula (2003) estudaram duas unidades de dupla filtração, uma composta por um filtro ascendente em pedregulho (FAP) e a outra por um filtro ascendente em areia grossa (FAAG), ambas seguidas por filtros rápidos descendentes em areia. O FAP possuía 4 camadas, cada uma com 30 cm de espessura, sendo a primeira (de baixo para cima) com granulometria de 25,4 a 19 mm, a segunda com 15,9 a 9,6 mm, a terceira com 6,4 a 3,2 mm e a quarta camada com 2,4 a 1,41 mm. Utilizaram água bruta proveniente de um manancial superficial. Variou-se a taxa de filtração de 60 a 240 m³/m².dia no FAP, de 120 a 360 m³/m².dia e de 100 a 400 m³/m².dia no FRD. Foram executadas descargas de fundo intermediárias. Concluiu-se que: i) nos ensaios sem execução de DFIs foram produzidos efluentes pré-filtrados com valores de turbidez adequados ao tratamento complementar com a FRD para taxas inferiores ou iguais a 180 m³/m².dia no FAP e superiores ou iguais a 240 m³/m².dia no FAAG; ii) a partir dos resultados comparativos entre os ensaios com

e sem a execução das DFIs concluiu-se que para ambos sistemas (com FAP e com FAAG) foram obtidos efluentes com melhor qualidade, com redução significativa da ocorrência de desprendimento e carreamento de flocos no decorrer da carreira de filtração, com durações de carreira mais prolongadas e índices de produção efetiva de água mais elevados nos ensaios com execução de DFIs; iii) a distribuição das perdas de carga nas subcamadas do meio granular do FAP resultou irregular, as duas subcamadas inferiores foram responsáveis apenas por 2,6 a 7,8% da perda de carga total, enquanto que a subcamada superior por cerca de 58,9 a 76,8%, sendo recomendável a revisão da granulometria a ser utilizada no FAP, de forma que a perda de carga seja melhor distribuída.

Kuroda (2002) utilizou a DF para investigar a influência de diferentes taxas de filtração e das descargas de fundo intermediárias na eficiência do tratamento de uma água bruta proveniente de um manancial superficial cujo pH estava entre 6,5 e 7,5, a turbidez estava compreendida entre 8,5 e 21 uT e a cor verdadeira entre 19 e 50 uH. A alcalinidade da água deste manancial variava entre 7,5 e 10 mg CaCO₃/L. A pesquisadora utilizou, para o filtro ascendente, taxas de filtração compreendidas entre 60 e 240 m³/m².dia e, para o filtro descendente, entre 100 e 240 m³/m².dia. Investigou ainda o comportamento do sistema de DF em uma condição simulada de ocorrência de um pico de turbidez de 380 uT, com curta duração. Suas principais conclusões foram: i) a escolha dos parâmetros de coagulação não deve se basear somente no critério da medição do potencial zeta, pois em alguns ensaios, cuja água apresentava valores negativos de potencial zeta, ainda assim produziram ótimos resultados quanto à qualidade do efluente e duração da carreira, indicando que é fundamental a realização de ensaios de filtração em filtros de laboratório com papel (Whatman 40) ou em filtros de laboratório com areia; ii) a partir das condições de coagulação obtidas nos ensaios em *jar-test* e nos FLAs, o pico de turbidez de 380 uT foi capaz de ser absorvido pelo filtro ascendente de pedregulho (FAP) com taxa de filtração de 120 m³/m².dia, que produziu efluente pré-filtrado com valores de turbidez entre 0,3 e 5,7 uT, e o filtro rápido descendente (FRD) com taxa de filtração de 180 m³/m².dia produziu efluentes finais com turbidez menor que 1 uT, sendo na maior parte do tempo, menor do que 0,1 uT; iii) foi observada a ocorrência de desprendimento dos flocos em todas as taxas de filtração utilizadas; iv) foi constatado que o desempenho do sistema de DF, quanto à qualidade dos efluentes produzidos e durações das carreiras de filtração, é fortemente influenciado pelo comportamento observado no FAP, uma vez que o carreamento contínuo e/ou o desprendimento de flocos no mesmo é acompanhado pela crescente deterioração da qualidade dos efluentes produzidos; v) o método de DFI, com esvaziamento total do filtro, apresentou

recuperação da carga hidráulica e da qualidade dos efluentes logo em seguida à sua aplicação, superando o método de esvaziamento até o topo do meio granular.

Pinto (2006) avaliou o desempenho da unidade de filtração direta ascendente em pedregulho como alternativa de pré-filtração em sistema de DF, utilizando-se água superficial. A autora aplicou taxas de filtração no FDAP que variaram entre 45 e 195 m³/m².dia, foram executadas descargas de fundo intermediárias e o controle das dosagens de coagulante foi realizado com FLA. A água bruta apresentou turbidez de 13 a 51 uT e cor aparente de 70 a 250 uH. As principais conclusões da autora foram: i) os ensaios de coagulação e filtração realizados com o FLA permitiram indicação precisa da dosagem apropriada; ii) a DFI mostrou-se eficaz na redução da perda de carga e da turbidez do efluente da unidade de FDAP; iii) operando a taxas de 196, 156 e 111 m³/m².dia, a unidade FDAP não foi capaz de produzir continuamente efluente com turbidez inferior a 5 uT, nem mesmo quando da execução das DFIs, Com estas taxas a unidade atuou predominantemente como uma unidade de floculação em meio granular.

Di Bernardo e Megda (2000) estudaram a filtração direta ascendente em pedregulho (FDAP) como pré-tratamento à FRD. O afluente utilizado era proveniente de um manancial de superfície, cuja turbidez variava entre 6 e 71 uT, e o sulfato de alumínio foi utilizado como coagulante. Para o filtro ascendente, as taxas de filtração estudadas foram 12, 36, 60, 90 e 115 m³/m².dia, já para o filtro descendente utilizou-se 250m³/m².dia. O filtro ascendente possuía 4 subcamadas, cada uma com 30 cm de espessura, sendo a primeira (de baixo para cima) com granulometria de 31 a 19 mm, a segunda com 15,9 a 9,6 mm, a terceira com 9,6 a 4,8 mm e a quarta camada com 4,8 a 2,4 mm. Os autores concluíram que: i) a FDAP demonstrou ser capaz de absorver picos de turbidez; ii) a eficiência do sistema de DF com relação à remoção de partículas entre 1 e 40 µm foi praticamente a mesma, independente das taxas empregadas; iii) as taxas de filtração empregadas não influenciaram na eficiência de remoção de turbidez, cor aparente, coliformes fecais e totais; iv) a duração da carreira de filtração, tanto no FAP como no filtro descendente em areia, foi influenciada pela taxa de filtração aplicada ao FAP.

Souza *et al.* (2007) avaliaram o desempenho de uma ETA piloto de desferrização, composta por aerador tipo tabuleiro, leito de contato por fluxo ascendente e filtro rápido por fluxo descendente. O estudo utilizou água proveniente de manancial subterrâneo, contendo ferro em teores elevados, em torno de 2 mg/L. Segundo as conclusões dos autores, utilizando a taxa de 360 m³/m².dia com leito de contato, a eficiência de filtração em termos de remoção de ferro foi de 91 a 92%, porém, para a mesma taxa de filtração, sem o leito de contato, a eficiência variou entre

88 e 93%. Nas mesmas condições, com o leito de contato, a carreira de filtração durou 22,7 horas, enquanto que na ausência do leito de contato a duração foi de 4,7 horas. Os autores concluíram que, para a taxa de filtração estudada o leito de contato é uma unidade indispensável para águas com elevados teores de ferro total, já que uma parcela considerável do mesmo fica retida neste leito, implicando na diminuição do número de lavagens dos filtros e, conseqüentemente, no menor consumo de água e energia elétrica.

Sabogal-Paz e Di Bernardo (2007) discorrem sobre o risco de utilizar-se a tecnologia de DF visto que, segundo os autores, existe pouca informação disponível para estabelecer, de forma precisa, sua eficiência na remoção das variáveis de risco (turbidez, cor verdadeira, ferro total, manganês total, coliformes totais e *Escherichia coli*). Para esses autores, as características gerais da água bruta a ser tratada é que vão permitir a seleção da técnica adequada. Portanto recomendaram estudos relacionados ao desempenho da técnica na presença de valores máximos, analisando a duração e a frequência do evento e sua influência na duração da carreira de filtração.

Di Bernardo, Dantas e Povinelli (2005) afirmam que alguns aspectos ainda não estão devidamente esclarecidos sobre a tecnologia de DF no tratamento de água com turbidez elevada. Estudaram esta tecnologia utilizando uma unidade de filtração ascendente em pedregulho (FAP) e um FRD. O FAP possuía 4 camadas, a primeira camada (de baixo para cima) com granulometria de 15,9 a 25,4 mm, a segunda camada com granulometria de 9,6 a 15,9 mm, a terceira camada com granulometria de 4,8 a 9,6 mm e a quarta camada com granulometria de 2,4 a 4,8 mm. A espessura total do meio filtrante era de 1,40 m. Utilizaram água bruta preparada com caulinita para produzirem duas qualidades de água, uma com turbidez de 100 uT e outra com turbidez de 300 uT. Utilizaram o sulfato de alumínio como coagulante e objetivaram o alcance do potencial zeta igual a zero. Operaram o filtro ascendente com e sem DFIs e as taxas de filtração utilizadas foram de 120 a 180 m³/m².dia no FAP e de 180 a 300 m³/m².dia no filtro descendente. Os autores verificaram a ocorrência de picos de turbidez na água pré-filtrada após a execução das DFIs. Suas conclusões foram: i) o FRD foi essencial para a produção de água filtrada com valores menores que 0,5 uT; ii) a execução das DFIs mostrou-se vantajosa em termos de aumento da carreira de filtração e impedimento da formação do manto de lodo no topo do FAP; iii) a DF com FAP é indicada para o tratamento de água com turbidez de até 300 uT, porém é imprescindível que sejam realizados ensaios de bancada em instalação piloto antes da aplicação da tecnologia; iv) para o tratamento da água com 100 uT, os melhores resultados foram obtidos com taxas de filtração de 126 m³/m².dia no FAP e de 193

m³/m².dia, com a execução de DFIs a cada 6 horas; já para água com 300 uT, as taxas ideais foram de 178 m³/m².dia no FAP e de 185 m³/m².dia no FRD, com execução de DFIs a cada 4,5 horas. Recomendam ainda estudos em DF com águas preparadas com outros tipos de argila que não a caulinita.

No levantamento bibliográfico realizado não foi encontrado nenhum trabalho de tratamento de água de abastecimento que tenha tentado substituir o leito filtrante em pedregulho do filtro ascendente por outro material semelhante ao analisado aqui.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia aplicada para o desenvolvimento deste trabalho envolveu pesquisas experimentais aplicadas, quantitativa e qualitativamente. Para tanto, foi montada uma instalação experimental e elaborada uma rotina de levantamento de dados, os quais foram tabulados e analisados.

As análises de eficiência deram-se por meio da comparação entre o filtro ascendente em pedregulho com outro filtro ascendente de alta porosidade e meio filtrante em PVC, nas mesmas condições de taxas de filtração, coagulação e de qualidade da água bruta. Ambos fizeram parte de um sistema de Dupla Filtração, com coagulação, filtração ascendente e filtração rápida descendente.

4.1 Descrição da Instalação Experimental

A pesquisa foi desenvolvida utilizando-se três filtros em escala piloto, sendo dois ascendentes e um descendente, formando duas unidades de dupla filtração. Todos os filtros foram construídos em aço carbono.

Além dos filtros a instalação era composta das seguintes unidades: (i) um tanque de preparação e armazenamento de água bruta construído em fibra de vidro, com capacidade de 3 m³, (ii) uma bomba de recalque para alimentação dos filtros, (iii) dois rotâmetros – um para cada sistema de dupla filtração, (iv) um tanque de PVC para preparação e armazenamento de coagulante com volume de 20 litros, (v) uma bomba dosadora para dosagem de coagulante, (vi) injetor de coagulante, (vii) válvula reguladora de pressão associada a um orifício calibrado, para um controle mais acurado da vazão, instalada na saída do sistema e (viii) tubulações e conexões em PVC. A Figura 2 ilustra esquematicamente a instalação do sistema de Dupla Filtração utilizado para a realização do trabalho.

Os filtros ascendentes foram fabricados em tubos de aço carbono de 8” (200 mm) de diâmetro e 2 metros de comprimento. Sua superfície foi tratada interna e externamente com pintura epóxi e poliéster pó, e curados em estufa a 230 °C. Entrada e saída em rosca ¾” BSP. Ambos possuem 4 janelas de vidro cada, para que se pudesse acompanhar a evolução do armazenamento dos sólidos em seus respectivos leitos filtrantes. Estes vidros possuem 15 mm de espessura e, externamente, possuem uma tela metálica para proteger o operador em um eventual acidente. Além disto, como medida de segurança, foi instalada, antes da entrada no sistema, uma válvula reguladora de pressão da marca Fabrimar, para impedir que a pressão ultrapassasse

2,8 kgf/cm². Ao ligar o sistema, era possível escolher, através de um jogo de registros de esfera, qual filtro ascendente se desejava utilizar naquele momento.

O filtro descendente foi fabricado em tubo de aço carbono de 8" de diâmetro e 1 metro de comprimento. Sua superfície foi tratada interna e externamente com pintura epóxi e poliéster pó, e curada em estufa a 230 °C. Entrada e saída em rosca ¾" BSP.

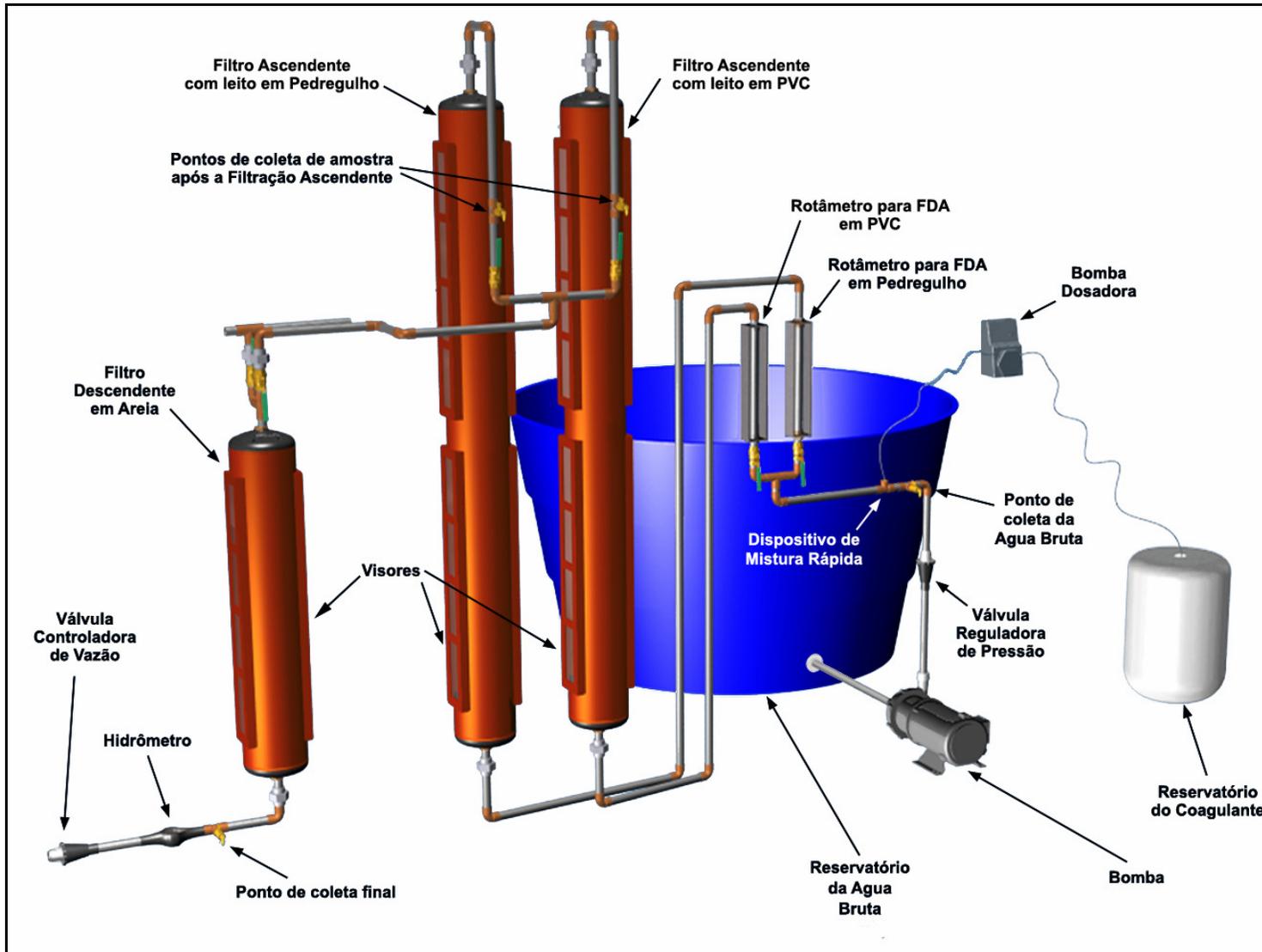


Figura 2 – Sistema de Dupla Filtração utilizado nos experimentos.

O filtro descendente dispunha de duas janelas de vidro para visualização do comportamento do leito filtrante, com as mesmas precauções de segurança dos filtros ascendentes. A Figura 2 mostra a fotografia dos filtros ascendentes e do filtro descendente.



Figura 3 – Filtros ascendentes (a) e descendente (b).

A bomba que alimentava o sistema (Figura 4) é da marca ABS Bombas, modelo Multibloc 25/3, com vazão máxima de 7 m³/h à pressão de 7,5 kgf/cm².



Figura 4 – Bomba utilizada na alimentação do sistema.

A vazão era medida por dois rotômetros (Figura 5) da marca Digiflow. Cada rotômetro era responsável pela medição da vazão inicial de um sistema de dupla filtração.

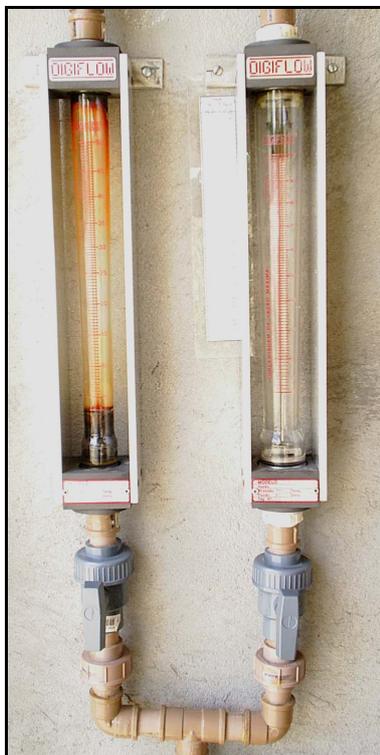


Figura 5 – Rotômetros utilizados para controle inicial de vazão

A injeção do coagulante era realizada por uma bomba dosadora de marca Etatron-DS modelo DLX-MA/AD 1-15, com vazão máxima de 4,2 L/h. Vários ensaios volumétricos foram realizados para certificar-se desta vazão máxima. A bomba dosadora possuía ainda dois fundos de escala, um até 100% da vazão máxima, que varia de 5% em 5%, e outro até 20%, que varia de 2% em 2%. A Figura 6 ilustra a bomba dosadora.



Figura 6 – Bomba dosadora utilizada nos experimentos.

A injeção do coagulante na água bruta era feita por meio de injetor acoplado à tubulação de água bruta, o qual proporcionava a mistura rápida (Figura 7).

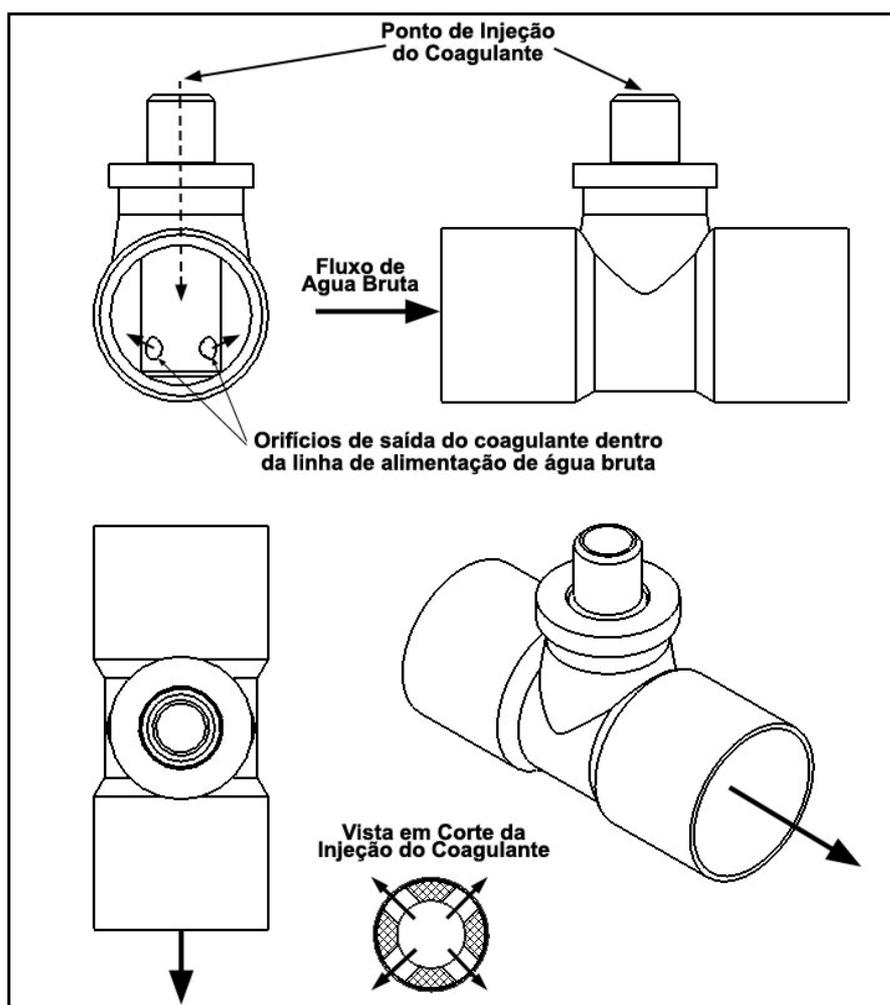


Figura 7 – Dispositivo de mistura rápida utilizado.

O dispositivo de injeção de coagulante proporcionou perda de carga suficiente para promover o gradiente de mistura rápida requerido para coagulação.

Para poder-se corroborar a vazão do sistema, foi instalado um hidrômetro na saída do mesmo. O hidrômetro era da marca LAO e possuía leitura mínima de 0,5 L/h. Os tubos e as conexões utilizadas eram de PVC, com 3/4" de diâmetro, da marca Amanco. Além disto, também na saída do sistema, foi instalada uma válvula reguladora de pressão, da marca Fabrimar, que estabilizava a pressão a jusante da mesma em 0,7 kgf/cm² e, para cada vazão (ou taxa de filtração) desejada, era trocado um orifício que ficava instalado após esta válvula. Este orifício era previamente calibrado para cada uma das vazões.

A instalação foi montada no pátio da Indústria *Hidro Solo Indústria e Comércio Ltda*, localizada no distrito industrial de Maceió/AL.

4.2 Leitos Filtrantes

4.2.1 Leito Filtrante do Filtro Ascendente em Pedregulho

O leito de pedregulho possuía granulometria apresentada na Tabela 3, com altura do leito de 1,8 m, tamanho efetivo (D₁₀) de 2,53 mm, coeficiente de esfericidade de 0,7, densidade real de 2650 kg/m³ e porosidade de 38%.

Tabela 3 – Granulometria do meio filtrante em pedregulho.

Subcamada	Espessura (cm)	Tamanho (mm)
Fundo	40	29,8 – 38,0
Primeira	40	12,7 – 19,0
Segunda	30	6,4 – 12,7
Terceira	30	3,2 – 6,4
Superior (topo)	40	2,0 - 3,2

A porosidade foi calculada preenchendo-se uma proveta de 1000 mL com o pedregulho, colocando-a sobre a balança em seguida. Anotou-se o valor da massa do conjunto. Em seguida preencheu-se a proveta com água até o valor de 800 mL (balançou-se bem a proveta para se ter certeza de que todo o ar preso entre as pedras se soltou) e anotou-se o novo valor da massa. A diferença entre a segunda e a primeira massa representa o espaço ocupado pela água, que foi de 304g. Portanto, a porosidade é dada dividindo-se este valor de 304g por 800g (considerando-se a densidade da água igual a 1 g/mL à temperatura em torno de 20 °C), chegando-se ao valor de 38%.

4.2.2 Leito Filtrante do Filtro Ascendente em Meio Poroso de PVC

O meio poroso de PVC tinha altura de 1,80 m, e era constituído de eletroduto corrugado com diâmetro ½" (12,7 mm). Sua densidade real era de 1080 kg/m³ e porosidade de 91%, esta última obtida de forma análoga à do pedregulho. Toda a altura do leito filtrante era constituída de material com o mesmo diâmetro, cortado em comprimentos que variavam de 15 a 25 mm. A Figura 8 ilustra o eletroduto utilizado na pesquisa.



Figura 8 – Eletroduto corrugado.

4.2.3 Leito Filtrante do Filtro Descendente

Foi utilizado leito filtrante composto de areia com as características apresentadas na Tabela 4. A caracterização granulométrica, apresentada na Figura 9, foi realizada com base no exposto na norma NBR 11799 (ABNT, 1990).

Tabela 4 – Granulometria do meio filtrante de areia.

Características	Filtro Descendente
Espessura da camada (m)	0,70
Tamanho efetivo, D ₁₀ (mm)	0,48
Tamanho do maior grão (mm)	1,41
Tamanho do menor grão (mm)	0,30
Coefficiente de desuniformidade	1,52
Coefficiente de esfericidade	0,8

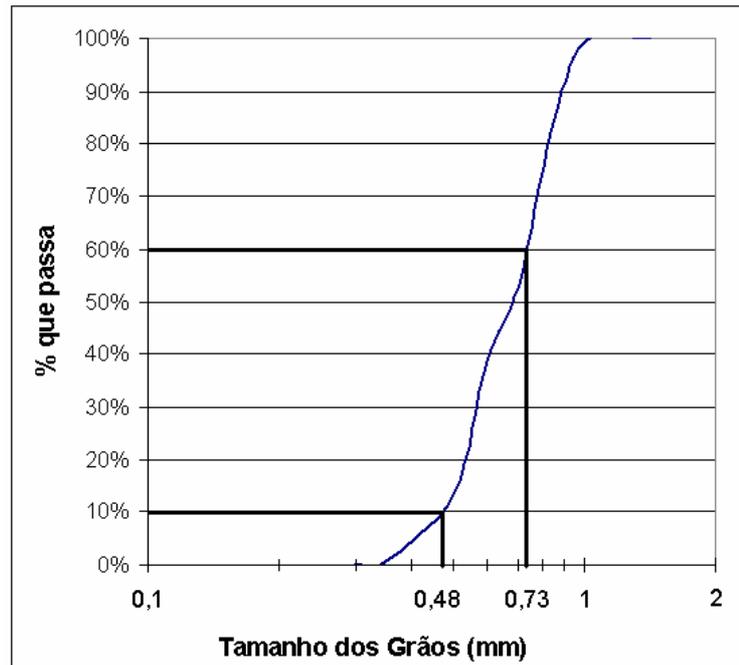


Figura 9 – Curva granulométrica da areia do FRD.

4.3 Controle do Gradiente de Mistura Rápida

Tanto a perda de carga quanto o gradiente de velocidade do dispositivo de mistura rápida utilizado variaram conforme a vazão do sistema. A Figura 10 mostra a perda de carga, medida em coluna de mercúrio (tendo os dados sido convertidos para mca), neste dispositivo em função da vazão.

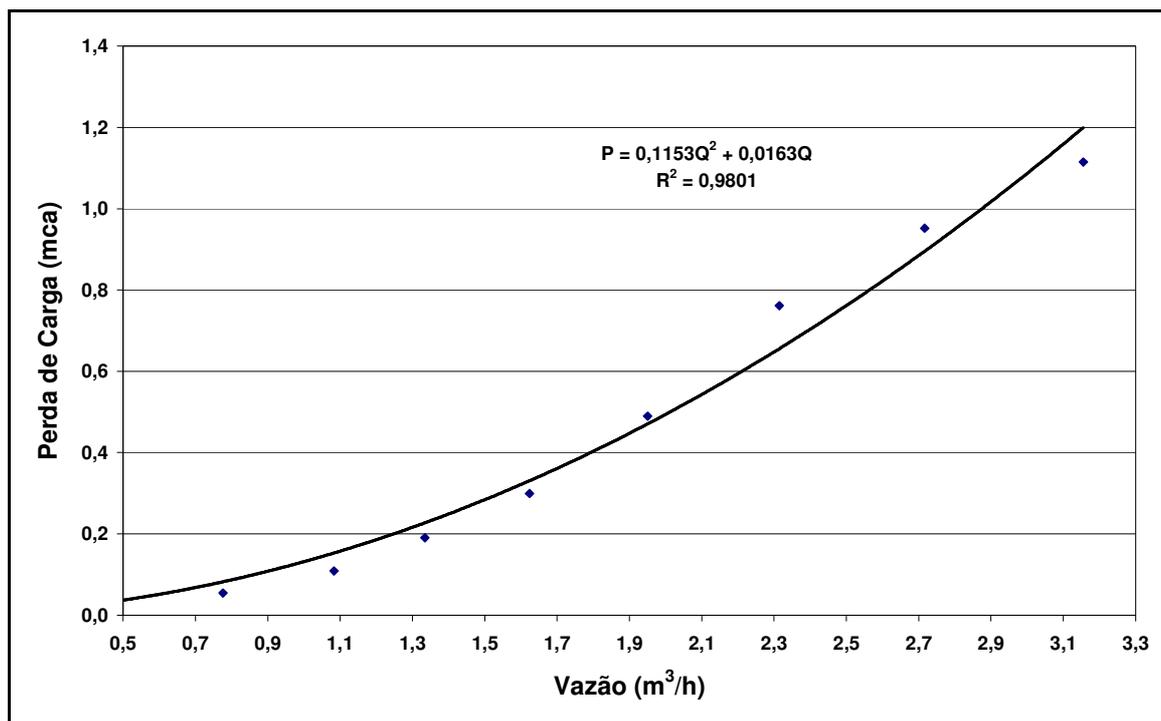


Figura 10 – Perda de carga no dispositivo de mistura rápida em função da vazão.

Conforme se pode obter do gráfico da Figura 10 a variação da perda de carga em função da vazão é dada pela equação $P = 0,1153Q^2 + 0,0163Q$, sendo o quadrado de seu coeficiente de correlação (R^2) próximo a 1 (0,9801).

Segundo a NBR12216 (ABNT, 1992), o gradiente de velocidade é dado pela Equação 1.

$$G = \sqrt{\frac{g \cdot h}{\nu \cdot t}} \quad (\text{Equação 1})$$

G: gradiente de velocidade, em s^{-1} ;

g: aceleração gravitacional, em m/s^2 ;

h: perda de carga promovida pelo dispositivo hidráulico, em mca;

ν : viscosidade cinemática, em m^2/s ;

t: tempo de detenção durante a agitação, em s.

Analogamente ao que descreve Vianna (1992) a dissipação da energia correspondente à injeção do coagulante pelos orifícios e devido à perda de carga provocada pelo dispositivo ocorrerá no volume de água situado a até 2,5 vezes a distância entre as fileiras de orifícios.

O dispositivo utilizado, ilustrado na Figura 7, contempla somente uma fileira de orifícios, os quais estão tangenciando a geratriz inferior da tubulação. Portanto, o tempo de detenção durante a agitação é dado pelo tempo percorrido pelo fluxo de água por uma distância de 2,5 vezes o diâmetro interno da tubulação.

Assim sendo, o tempo de detenção pôde ser calculado pela razão entre o volume do corpo cilíndrico (cuja base é a secção circular interna do tubo e o comprimento é 2,5 vezes o diâmetro do mesmo) e a vazão desejada, ou seja:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{L * \left(\frac{\pi * D^2}{4} \right)}{Q} \quad (\text{Equação 2})$$

t: tempo de detenção.

Q: vazão = variável, conforme taxa de filtração desejada.

D: diâmetro interno da tubulação = 20 mm = 0,02 m

L: comprimento do volume de controle = 2,5*D = 2,5*0,02 = 0,05 m

As incógnitas L, D e Q podem ser mais bem compreendidas por meio do desenho da Figura 11.

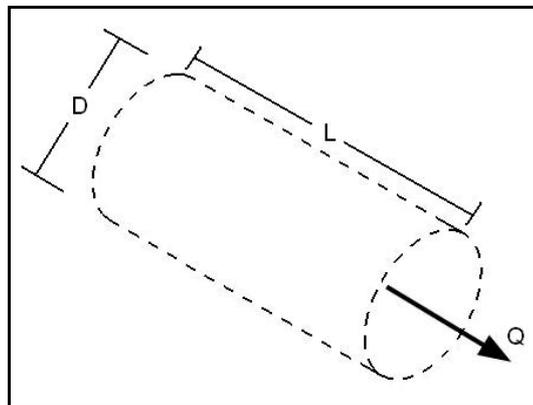


Figura 11 – Volume de controle influenciado pela agitação do injetor.

Portanto, substituindo-se todos estes valores e calculando-se os tempos de detenção em função da vazão, pôde-se calcular o gradiente de velocidade também em função da vazão. A Figura 12 a seguir ilustra esta relação.

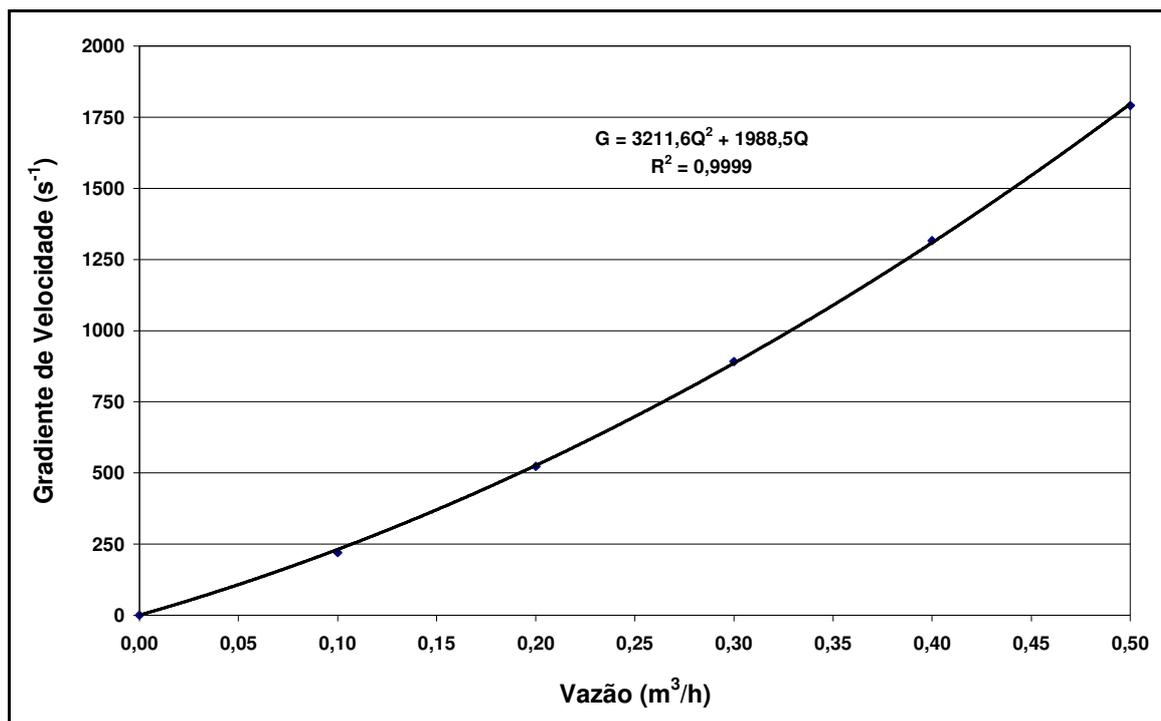


Figura 12 – Gradiente de velocidade versus a vazão do sistema.

Pelo gráfico da Figura 12, tem-se que a variação do gradiente de velocidade em função da vazão é dada pela equação $G = 3211,6Q^2 + 1988,5Q$, sendo o quadrado de seu coeficiente de correlação (R^2) muito próximo a 1 (0,9999).

Para as vazões do estudo em questão, que são calculadas pela multiplicação das taxas de filtração desejadas pela área de secção dos filtros ascendentes (igual a $0,0314 \text{ m}^2$), os gradientes de velocidade, calculados pela equação da Figura 12, são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Gradientes de velocidade provocados pelo dispositivo de mistura rápida para as vazões do estudo.

Taxa de Filtração (m³/m².dia)	Vazão (m³/h)	Gradiente de Velocidade (s⁻¹)
120	0,157	390
180	0,2355	645
240	0,314	940

4.4 Preparação da Água Bruta

A água de estudo foi proveniente de poço com 60 metros de profundidade, à qual foi adicionada caulim para conferir a turbidez desejada. Esta água do poço possuía turbidez de 0,02 uT, alcalinidade total de 14 mg CaCO₃/L e pH de 5,3.

O caulim foi escolhido por já ter sido utilizado em diversos trabalhos (DI BERNARDO *et al.*, 2003; PAVANELLI, 2001) e por necessitar de uma pequena massa para provocar turbidez elevada. A Tabela 6 detalha as propriedades técnicas do Caulim.

Tabela 6 – Especificação técnica do Caulim utilizado para proporcionar turbidez à água de estudo.

Retenção (#325)	0,02 ± 0,01%	Fe₂O₃	0,12 ± 0,07 %
Volume Aparente	30,07 ± 1,54 ml em 40g	MnO	0,01 ± 0,00 %
Densidade aparente	1,33 ± 0,06 g/ml	Perda ao Fogo	30,32 ± 3,09 %
Alvura	89,39 ± 1,14 Graus ISSO	Resíduo Insolúvel	22,47 ± 3,97 %
Umidade	0,14 ± 0,16 % em 4g	SiO₂ Livre (Quartzo alfa)	0,66 ± 0,30 %
pH	10,11 ± 0,38	CaO	27,20 ± 2,40 %
Carbono Total	69,27 ± 6,44 %	MgO	16,17 ± 4,39 %
Resíduo Insolúvel (Volume)	30,73 ± 6,44 %	Al₂O₃	0,25 ± 0,12 %

Fonte: Mela Melhoramentos de Metais Ltda.

Foi utilizada apenas um tipo de água com turbidez da ordem de 200 uT e cor natural. Desejou-se que os parâmetros de qualidade da água bruta em estudo não variassem, para tanto foi mantido um agitador no fundo do reservatório de água bruta (Figura 13) para que não houvesse sedimentação, assim como também foi feita medição de turbidez da água bruta do tanque a cada 30 minutos. O reservatório de armazenamento e preparação da água possuía 3.000 (três mil) litros e pode ser visualizado na Figura 14.

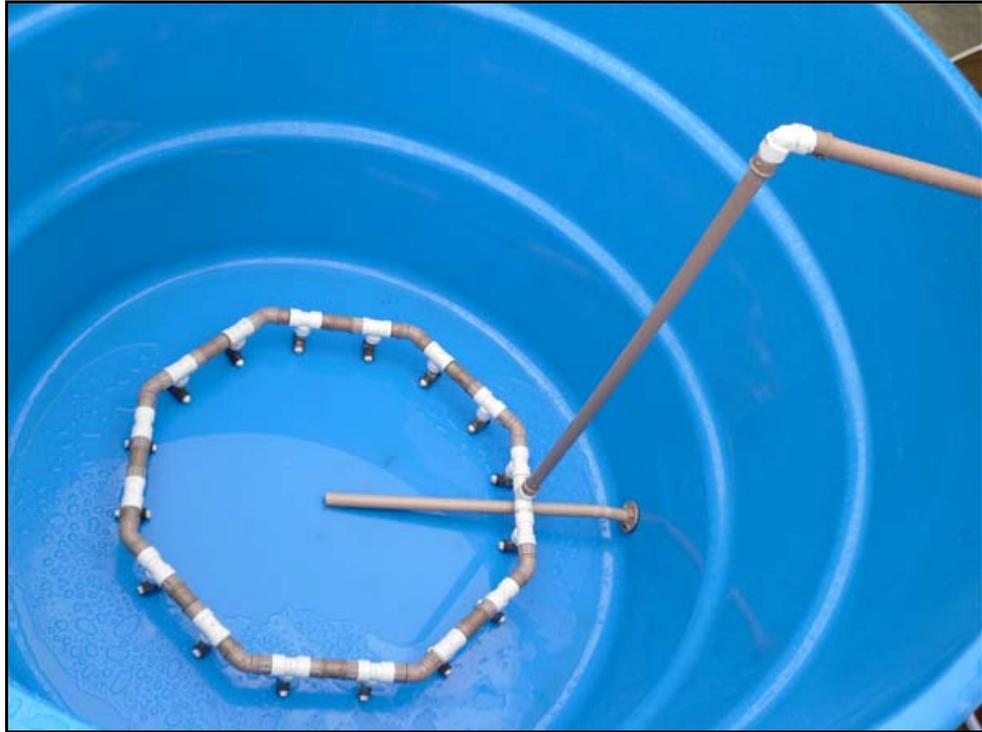


Figura 13 – Dispositivo de agitação da água bruta, instalado no fundo do reservatório.



Figura 14 – Reservatório de armazenamento e preparação da água bruta.

Para a produção da água com a turbidez desejada foi feita a correlação entre a massa de caulim em 50 mL de água destilada e a turbidez remanescente obtida, como apresentada na Figura 15.

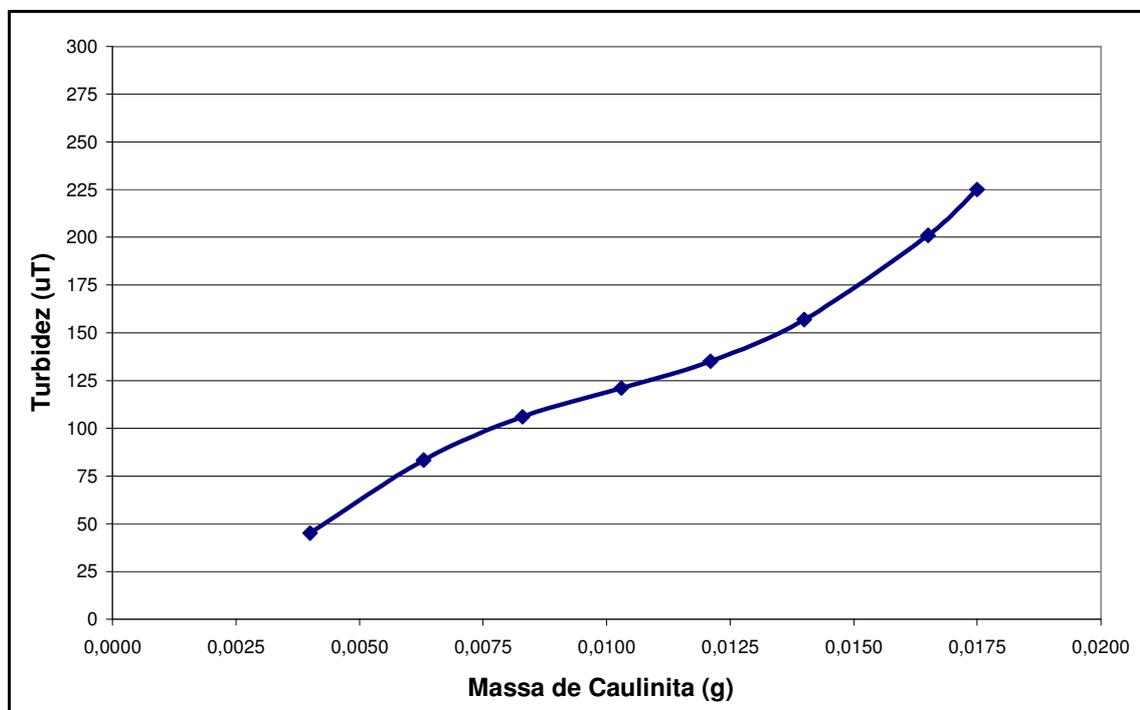


Figura 15 – Turbidez remanescente x massa de caulim em uma amostra de 50 mL de água destilada.

4.5 Dosagens de Coagulante

O coagulante escolhido para o estudo foi o PAC (cloreto de polialumínio) por já possuir polímero em sua constituição e por se tratar de um produto largamente utilizado em estações de tratamento de água. Segundo Di Bernardo *et al.* (2003) diversos autores ressaltaram a eficiência do PAC em comparação ao sulfato de alumínio e ao cloreto férrico, principalmente com relação à maior remoção de matéria orgânica, turbidez, Fe e Mn. Destacam também que o PAC apresentou mais estabilidade das espécies hidrolisadas, sendo estas mais efetivas para a desestabilização das partículas, e que precisaram de menos tempo para iniciar a agregação, fato que possibilitou a aplicação de menor dosagem do produto.

4.5.1 Características do Cloreto de Polialumínio (PAC) Utilizado

A Tabela 7 detalha as principais características do coagulante que foi utilizado nos experimentos.

Tabela 7 – Características do coagulante utilizado (Fonte: Produquímica).

Descrição	Coagulante inorgânico pré-polimerizado, de baixa salinidade e catiônico. À base de cloreto de polialumínio.
Fórmula Química	$Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$
Al₂O₃ (%m/%m)	16,0 a 18,5
Aspecto	Líquido viscoso turvo
Densidade a 25°C (g/cm³)	1,35 a 1,40
Cor	Castanha
pH a 25°C	3,5 a 4,5
Odor	Inodoro

4.5.2 Ensaio de *Jar-Test*

Como os filtros ascendentes se comportam como floculadores de meio poroso, como o meio filtrante em PVC tem elevada porosidade, e tendo como objetivo avaliar se o mesmo pode se assemelhar a um decantador de alta taxa, o mecanismo de coagulação escolhido foi o de varredura, pois o mesmo privilegiará a floculação nos meios filtrantes ascendentes (RICHTER E AZEVEDO NETTO, 2002; DI BERNARDO *et al.*, 2003), podendo proporcionar uma visão mais eficiente desta influência.

A condição ideal de dosagem de coagulante foi determinada com ensaios preliminares de coagulação em *Jar-Test*, que receberam as amostras em cada jarro, com diferentes dosagens. O equipamento de *Jar-Test* utilizado foi da marca Milan, modelo JTC/3P, com capacidade para três jarros de volume unitário de 1 (um) litro, conforme ilustrado na Figura 16.



Figura 16 – Equipamento de *Jar-Test* utilizado nos ensaios preliminares.

Como a densidade do PAC era de 1400 mg/mL e a concentração de Al₂O₃ livre é de 18% em massa, tem-se que para a dosagem igual a 1 mg/L de Al₂O₃ livre, por exemplo, divide-se este valor por 18% e obtém-se a concentração necessária para se atingir o valor desejado de dosagem do Al₂O₃ livre, que é igual a 5,55 mg/L. Ou seja, para obter-se a dosagem, durante a injeção no sistema, de 1 mg/L de Al₂O₃ livre, é necessária a injeção de 5,55 mg/L do produto comercial puro.

Nos ensaios de *Jar-Test* as adições do coagulante nos jarros foram realizadas por meio de seringas plásticas. Portanto, fez-se necessário trabalhar em concentrações baseadas em volume, para tanto, basta dividir o valor encontrado acima (5,55 mg/L) pela densidade do produto, que é de 1400 mg/mL.

Resumindo:

Dosagem desejada do Al₂O₃ livre = 1 mg/L

Concentração, em massa, do Al₂O₃ livre no PAC = 18%

Densidade do PAC = 1400 mg/mL

$$\frac{1\text{mg} / l}{18\%} = 5,55\text{mg} / l ; \text{Concentração de PAC para } 1 \text{ mg/l de Al}_2\text{O}_3.$$

$$\frac{5,55\text{mg} / L}{1400\text{mg} / \text{ml}} = 0,004\text{ml} / l ; \text{Concentração, em volume, de PAC para } 1 \text{ mg/l de Al}_2\text{O}_3.$$

A Tabela 8 abaixo relaciona as concentrações, em volume, de Al_2O_3 livre que foram utilizadas *versus* a concentração de PAC, em massa.

Tabela 8 – Relação das concentrações utilizadas nos ensaios de *Jar-Test*.

Dosagem de Al_2O_3 livre desejada (mg/L)	Concentração de PAC necessária (mg/L)	Concentração necessária, em volume, de PAC (mL/L)	Concentração necessária, em volume, da Solução Mãe à 1% (mL/L)
5	27,8	0,020	2
10	55,6	0,040	4
15	83,3	0,060	6
20	111,1	0,079	8
30	166,7	0,119	12
50	277,8	0,198	20

A metodologia de realização dos ensaios de *Jar-Test* seguiu os seguintes passos:

1º Passo: Preparo da solução mãe a 1% do PAC, diluindo-se 1 mL do produto puro em 100 mL de água destilada. Esta solução de PAC a 1% foi preparada devido aos pequenos volumes necessários (vide Tabela 8) para obtenção das dosagens desejadas com o uso do coagulante em questão.

2º Passo: Adição de 1 litro da água de estudo em cada um dos jarros de forma aleatória, garantindo a mesma qualidade de água em todos os jarros.

3º Passo: Em três seringas plásticas colocavam-se três diferentes dosagens de coagulante a partir da solução a 1%, obtida no primeiro passo. Estas três dosagens, nos ensaios iniciais, eram determinadas aleatoriamente e abrangendo uma grande faixa de concentração, para poder-se posteriormente determinar a tendência da concentração necessária. As dosagens iniciais foram 10, 30 e 50 mg/L, portanto, pela Tabela 8 os volumes necessários da solução a 1% foram, respectivamente, 4 mL, 12 mL e 20 mL.

4º Passo: Acionamento do equipamento, ajustando a sua rotação ao gradiente de velocidade desejado, obtido pela Tabela 5. O ajuste da rotação ao gradiente de velocidade pode ser encontrado na Figura 17.

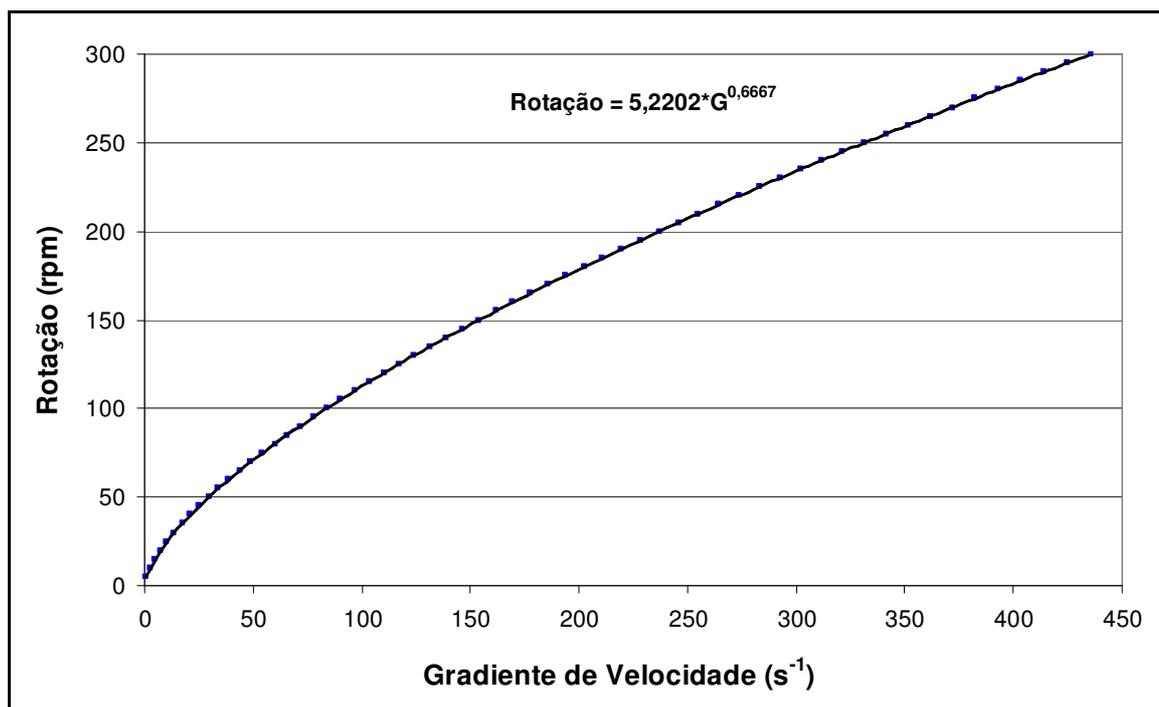


Figura 17 – Curva de Calibração do *Jar-Test* (Gradiente de Velocidade versus Rotação da Paleta).

Nota:

1. No Apêndice 1 é possível acompanhar os cálculos para elaboração deste gráfico, o qual está diretamente relacionado às dimensões do jarro e da paleta do equipamento de *Jar-Test* utilizado.
2. Para as taxas de filtração de 180 e 240 $m^3/m^2.dia$, os respectivos gradientes de velocidade provocados hidraulicamente pelo dispositivo de mistura rápida ultrapassaram o limite de rotação do equipamento de *Jar-Test* utilizado (vide Tabela 5). Foi, portanto, utilizada a máxima rotação possível, 260 rpm, para os experimentos com estas taxas.

5º Passo: Adição, simultânea, em cada jarro, do respectivo volume da solução de coagulante definido no 3º Passo. Aguardava-se então 5 (cinco) segundos, tempo correspondente à mistura rápida do processo de coagulação.

6º Passo: Após os 5 segundos iniciais, reduzia-se a rotação a 95 rpm, correspondente a um gradiente de velocidade de $80 s^{-1}$ (vide gráfico da Figura 17), ocorrendo, portanto, o processo de floculação. Nesta rotação aguardava-se 5 (cinco) minutos, em seguida desligava-se o equipamento e aguardava-se mais 3 (três) minutos para permitir a sedimentação dos flocos formados.

Na Tabela 9 são apresentados os tempos de coagulação, floculação e sedimentação, além de valores de rotação adotados nos ensaios de *Jar-Test*.

Tabela 9 – Resumo dos valores de duração e rotação utilizados nos ensaios de *Jar-Test*.

	Mistura Rápida	Floculação	Sedimentação
Duração	5 segundos	5 minutos	3 minutos
Rotação	Vide Tabela 5 e Figura 17	95 rpm	0

7º Passo: Com o auxílio de uma seringa, coletava-se uma amostra de 50 mL do sobrenadante, aproximadamente a 1 (um) centímetro abaixo da superfície da água, para cada jarro, e as amostras eram então colocadas em recipientes para posterior análise de Turbidez.

A Figura 18 mostra um dos ensaios de *Jar-Test* realizado com estas concentrações iniciais.

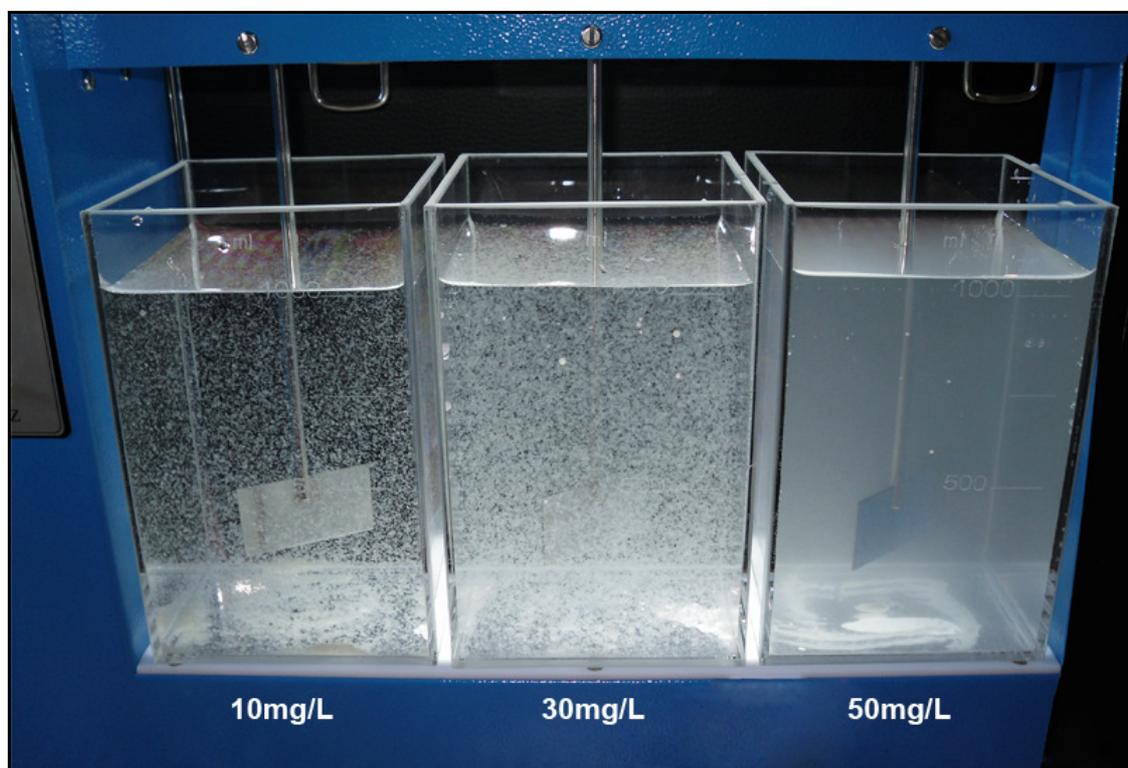


Figura 18 – Ensaio de *Jar-Test* inicial, para determinação da tendência da concentração de coagulante necessária.

Conforme se pode ver na Figura 18, a dosagem de 10 mg/L foi aquela na qual houve a maior precipitação e, conseqüentemente, menor turbidez residual no sobrenadante da água do jarro. Esta menor turbidez foi constatada pelo Turbidímetro, que, em um dos experimentos, para efeito de exemplificação, encontrou os seguintes valores: 10 mg/L = 1,36 uT; 30 mg/L = 1,46 uT e 50 mg/L = 85,6 uT. Lembrando que a turbidez da água bruta era de 200 uT.

Conforme explicado no 3º Passo, estas dosagens de 10, 30 e 50 mg/L eram aleatórias e tinham como objetivo proporcionar uma visão da tendência da concentração de coagulante necessária para uma melhor eficiência da etapa de coagulação. E esta melhor eficiência se encontra na concentração próxima de 10 mg/L, conforme se pode abstrair da Figura 18 e dos valores de turbidez encontrados.

8º Passo: Seguia-se então para dosagens próximas daquela que foi determinada como tendência nos passos anteriores, ou seja, 10 mg/L. Nesta etapa, em cada ensaio de *Jar-Test* eram utilizados os três jarros para a mesma concentração, com o intuito de ter três valores de turbidez para cada dosagem analisada e assim obter um resultado mais acurado. Repetia-se os passos de 2 ao 7, porém nesta etapa para as dosagens de 5, 10 e 15 mg/L, uma de cada vez. Anotavam-se os valores da turbidez.

A Figura 23 (apresentada na discussão dos resultados, item 5.1) exemplifica um dos ensaios que foram realizados, no qual a dosagem de 15 mg/L foi aquela que proporcionou menor turbidez no sobrenadante do jarro.

A Figura 19, a Figura 20 e a Figura 21 ilustram os ensaios com as diferentes concentrações de coagulante utilizadas.



Figura 19 – Ensaio de *Jar-Test* com dosagem de 5 mg/L.

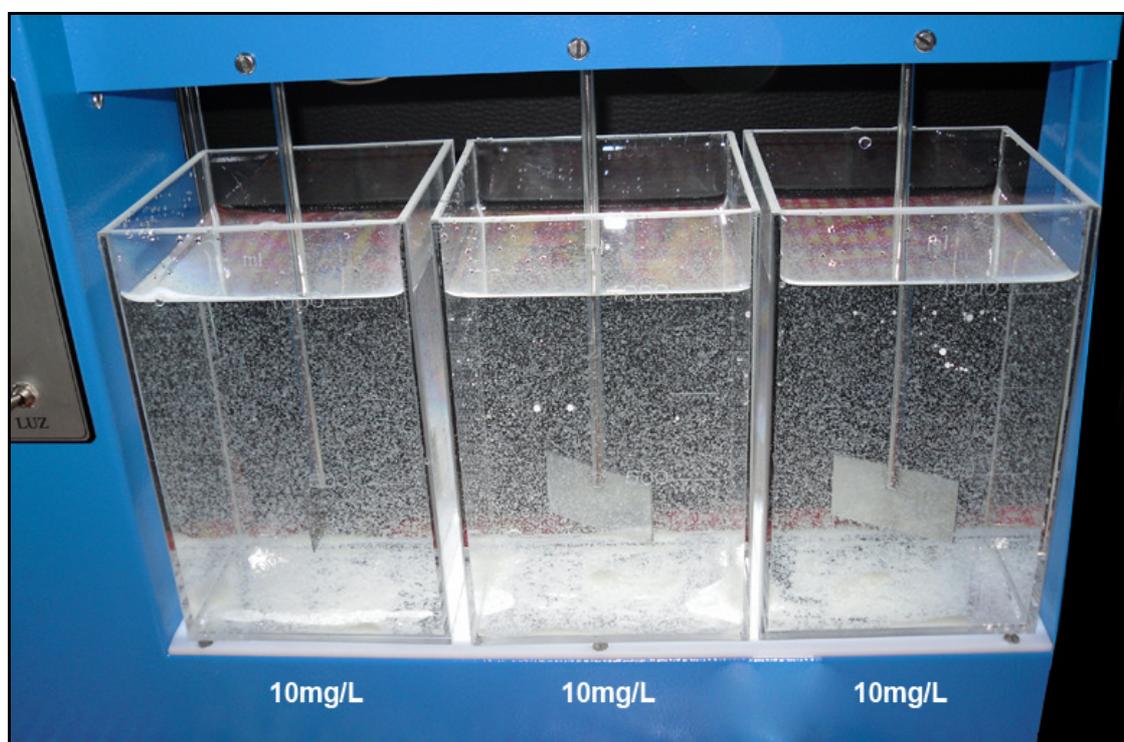


Figura 20 – Ensaio de *Jar-Test* com dosagem de 10 mg/L.

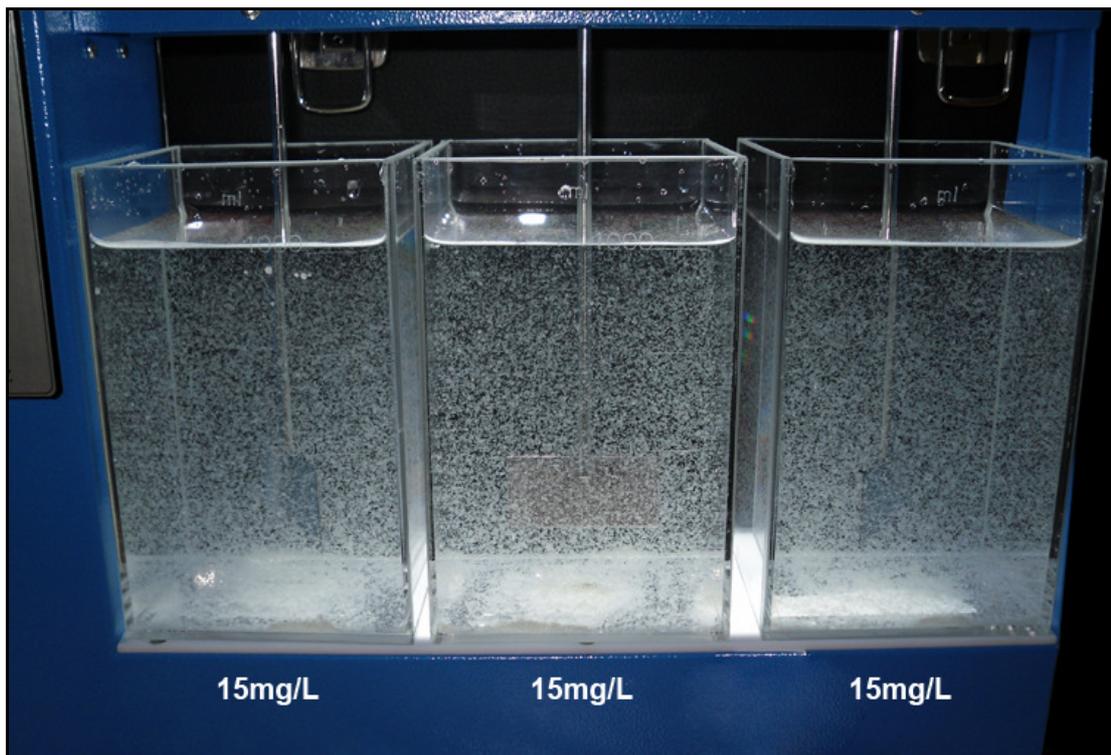


Figura 21 – Ensaio de *Jar-Test* com dosagem de 15 mg/L.

Importante salientar que todos os ensaios de *Jar-Test* realizados seguiram os mesmos critérios relativos aos procedimentos, quanto aos tempos de agitação, de mistura rápida e de floculação.

4.6 Procedimento Experimental

O sistema de Dupla Filtração que foi utilizado para esta pesquisa era pressurizado, ou seja, desde a bomba de alimentação até a saída da água filtrada após o filtro rápido descendente, não havia nenhum dispositivo que atuasse sob influência da pressão atmosférica.

Os dois filtros ascendentes estavam instalados em paralelo, ou seja, ao ligar o sistema, pôde-se escolher, através de um jogo de registros de esfera, qual filtro se desejava utilizar naquele momento. A água, ao passar pelo filtro escolhido, era então dirigida ao filtro descendente.

As carreiras de filtração foram realizadas separadamente, ora na dupla filtração com filtro ascendente em pedregulho (FAP) ora na dupla filtração com filtro ascendente de alta porosidade (FAAP).

As carreiras de filtração foram realizadas aplicando-se três taxas de filtração, 120 m³/m².dia, 180 m³/m².dia e 240 m³/m².dia, pois estas abrangem as taxas de filtração de uma grande variedade de pesquisas que analisam o desempenho de leitos filtrantes (BENINI, 2003; KURODA, 2002; MEGDA, 1999; MENDES, 1985). O final de cada carreira de filtração era caracterizado quando a perda de carga no FRD atingia o valor de 2 mca. Os parâmetros e as características de cada carreira de filtração estão indicados na Tabela 10.

Tabela 10 – Taxas de filtração utilizadas em cada ensaio.

Ensaio	Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)		Turbidez da Água Bruta (uT)
	FA	FRD	
1	120	120	200
2	180	180	200
3	240	240	200

Os ensaios foram realizados sem descarga de fundo, a perda de carga foi aferida por meio de coluna de mercúrio para o FRD e coluna de água para os filtros ascendentes, e a eficiência do sistema foi avaliada em termos de remoção de turbidez.

Duas carreiras de filtração foram realizadas para cada taxa de filtração.

4.7 Pontos de Coleta e Parâmetros de Análises

Em cada carreira de filtração foram coletadas amostras, a cada trinta minutos, da água bruta, após o filtro ascendente e após o FRD. Portanto, foram três amostras a cada meia hora para cada carreira de filtração, até o final da mesma.

Os parâmetros analisados foram: pH, turbidez, alcalinidade, perda de carga, temperatura e taxa de filtração do sistema. A Tabela 11 discrimina as frequências de realização das análises dos parâmetros que foram estudados ao longo das carreiras de filtração, assim como os pontos de coleta.

Tabela 11 – Frequência de realização dos ensaios das variáveis de interesse.

Parâmetros	Pontos de Coleta	Frequência
Vazão / Taxa de Filtração	A e D	30 minutos
pH	A	1 vez, no início da carreira
Turbidez	A, B, C e D	30 minutos
Perda de Carga	Entre os pontos: A-B; A-C; B-D e C-D	30 minutos
Alcalinidade	A	1 vez, a cada alteração da taxa de filtração
Temperatura	A	30 minutos

A: Água bruta

B: Água após o filtro ascendente em pedregulho

C: Água após o filtro ascendente em leito poroso

D: Água ao final do sistema, após o FRD

Com exceção da alcalinidade, que foi analisada no Laboratório de Saneamento Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (LSA/CTEC/UFAL), todos os outros parâmetros foram analisados *in-loco*, de acordo com os procedimentos indicados no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1998). Na Tabela 12 estão indicados os métodos analíticos e os equipamentos que foram utilizados para cada análise físico-química.

Tabela 12 – Métodos utilizados nas análises físico-químicas.

Parâmetro	Método Analítico	Equipamento
pH	Potenciométrico	pHmetro portátil, marca pHTEK
Temperatura (°C)	Leitura direta	Termômetro marca INCOTERM Escala: -10°C a 110°C:1°C
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Titulação potenciométrica com ácido sulfúrico	pHmetro e bureta
Turbidez (uT)	Nefelométrico	Turbidímetro PoliControl – AP 2000

Nota: Em cada ponto de coleta, a cada repetição da frequência de coleta, o parâmetro Turbidez era sempre repetido, individualmente, três vezes, e anotava-se o valor intermediário.

4.8 Volume Gasto na Lavagem dos Filtros Ascendentes

A lavagem dos filtros ascendentes era feita por meio de bombeamento em sentido descendente, com vazão de cerca de 3,3 m³/h, que corresponde a uma taxa de lavagem de, aproximadamente, 2.500 m³/m².dia, ou 0,029 m/s.

Para avaliar a relação entre o volume de água gasto na lavagem dos filtros com o volume de água produzido em cada carreira de filtração, ao término de cada experimento, procedia-se a lavagem do filtro ascendente segundo o roteiro:

a) Após encerrar a carreira de filtração, imediatamente conectava-se a mesma bomba utilizada para o recalque da água de estudo à rede de água limpa (com turbidez de 0,02 uT) e ajustava-se os registros de esfera de entrada e saída dos filtros ascendentes, para que direcionassem a água limpa para a parte superior destes filtros.

b) No fundo dos mesmos, esta água de lavagem era descartada por meio de uma tubulação exclusiva para este fim e que continha outro hidrômetro. Na Figura 22 estão indicados os dispositivos para realização da lavagem dos filtros ascendentes.

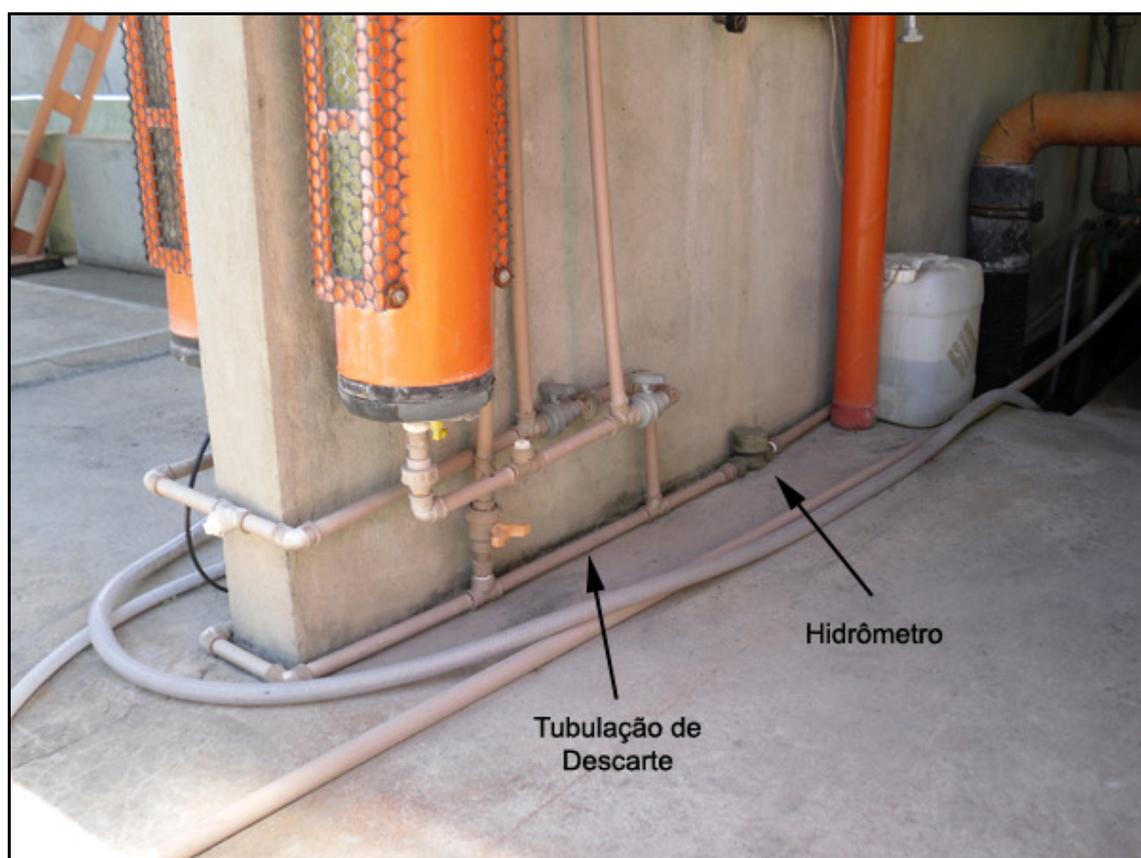


Figura 22 – Tubulação e hidrômetro utilizados na lavagem dos filtros ascendentes.

c) Em primeiro lugar anotava-se o valor inicial do hidrômetro (V1) e realizava-se uma descarga de fundo no filtro até que a água que havia restado do experimento fosse drenada completamente (método do esvaziamento total do filtro). Nesta primeira descarga de fundo uma parte dos flocos que estava retida no interior dos leitos filtrantes era expulsa do filtro, e este fato era bem visível através das 4 janelas de vidro que cada filtro possuía. Anotava-se então o novo valor do hidrômetro (V2).

d) Em seguida, de posse de um cronômetro, ligava-se a bomba, abriam-se os registros de esfera de entrada de água para lavagem e acionava-se o cronômetro e fazia-se a primeira coleta de amostra de água de lavagem.

e) Posteriormente, a cada 30 segundos fazia-se novas coletas (com copos plásticos) com cerca de 100 mL da água de lavagem para análise de turbidez. As amostras recolhidas com intervalos de 30 segundos (contados a partir do início do bombeamento) eram identificadas à caneta, com o respectivo tempo. A última amostra era recolhida aos 5 minutos do início do bombeamento, totalizando 10 amostras de água de lavagem.

f) Aos 5 minutos e 30 segundos a bomba era desligada e os registros de esfera eram fechados. Anotava-se o valor final do hidrômetro (V3).

g) Calculava-se então o volume gasto na descarga de fundo inicial pela diferença entre o V2 e V1: $V_{DF} = V2 - V1$.

h) Fazia-se a leitura de turbidez de todas as amostras e, para o cálculo do volume necessário para lavagem do filtro ascendente, utilizava-se como parâmetro indicativo de final de lavagem a amostra cuja turbidez estivesse abaixo ou igual a 50 uT (significando que o filtro estava limpo). Esta turbidez de 50 uT arbitrada é uma maneira de quantificar um ato que, usualmente em estações de tratamento de água, é executado de maneira visual, ou seja, a finalização do procedimento de lavagem dá-se quando o operador considera que a água de lavagem começou a sair límpida do filtro.

i) O volume gasto na lavagem (V5) era calculado multiplicando-se a vazão da bomba (3,3 m³/h ou 0,92 L/s) pelo tempo de coleta da primeira amostra com turbidez menor ou igual a 50 uT.

j) O volume total de água na lavagem era dado pela soma do volume da descarga de fundo inicial (V_{DF}) com o V5: $V_{LAV} = V_{DF} + V5$.

k) A avaliação do volume de água gasto na lavagem era feita pelo percentual de água de lavagem em função do volume de água produzido na carreira de filtração. Ou seja, dividia-se o volume total gasto com a lavagem do filtro (V_{LAV}) pelo volume total de água produzida (V_{AP}) na carreira de filtração: $E = 100 \times V_{LAV} / V_{AP}$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Determinação da Dosagem de Coagulação

Os resultados obtidos nos ensaios em *jar-test* mostraram que a dosagem de 15 mg/L de Al_2O_3 foi a que proporcionou menores valores de turbidez remanescente. A Figura 23 resume os resultados obtidos.

O pH após a coagulação oscilou ao redor de 6,9.

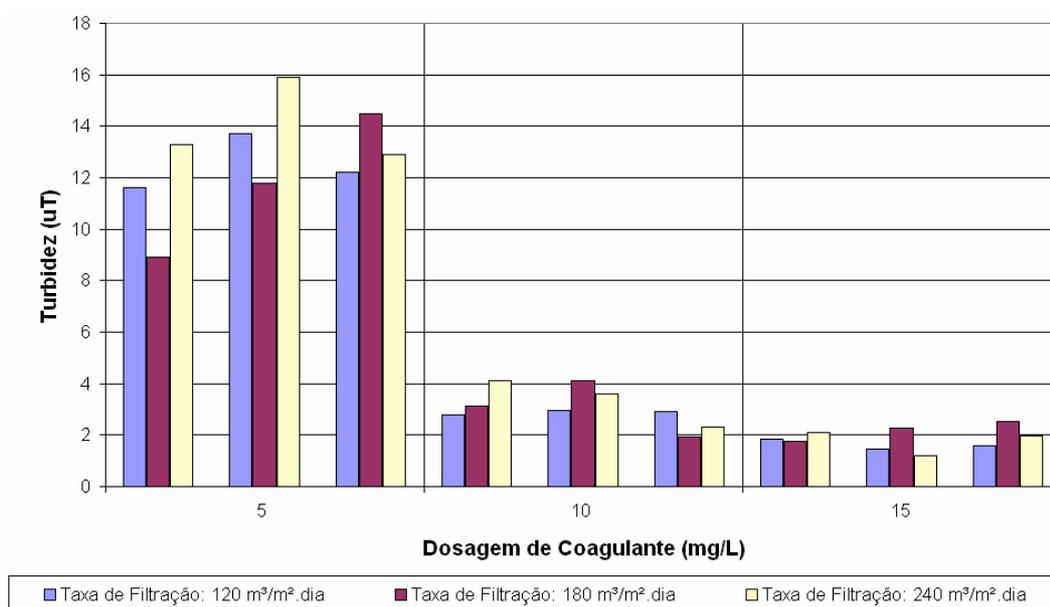


Figura 23 – Turbidez remanescente versus dosagem de coagulante nos ensaios de *Jar-Test*.

A Tabela 19 do Apêndice 2 mostra todos os dados obtidos nesta fase dos experimentos.

5.2 Aferição das Taxas de Filtração

A taxa de filtração desejada em cada experimento é função direta da vazão aplicada e do diâmetro dos filtros. Dessa forma, para verificar se as taxas de filtração aplicadas estavam dentro dos valores planejados foi feita a aferição das vazões utilizadas.

Por ter-se utilizado um sistema pressurizado por uma bomba centrífuga para a execução de todos os experimentos, era de se esperar que ocorressem variações da vazão afluente à estação piloto. Várias precauções foram tomadas para se minimizar esta variação, dentre elas a medição da vazão instantânea. Esta era feita por meio de um rotâmetro no início da instalação piloto, que corroborava o volume de água filtrada por meio de um hidrômetro instalado após o filtro descendente. Por fim, ao final da instalação piloto foi instalada uma válvula reguladora de pressão que tinha a função de estabilizar a pressão à jusante (em torno de 0,7 kgf/cm²) e em cada vazão desejada, era trocado um orifício que ficava instalado após esta válvula, orifício este que era previamente calibrado para cada uma das vazões, conforme comentado na metodologia.

Neste ponto do trabalho será calculado e discutido se a variação da vazão ao longo de todos os experimentos foi aceitável.

A Tabela 13 abaixo resume os valores da média e do desvio-padrão calculados a partir dos dados do Apêndice 2.

Tabela 13 – Média e Desvio-Padrão da Vazão afluente de todos os experimentos.

Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)	Pedregulho			Eletroduto		
	120	180	240	120	180	240
Vazão Desejada (m ³ /h)	0,1570	0,2355	0,3140	0,1570	0,2355	0,3140
Vazão Média (m ³ /h)	0,1502	0,2603	0,3102	0,1523	0,2507	0,3122
Variação da Média em relação à Vazão Desejada	4,3%	10,5%	1,2%	3,0%	6,5%	0,6%
Desvio-Padrão (m ³ /h)	0,0137	0,0154	0,0156	0,0154	0,0144	0,0230
Variação do Desvio-Padrão em relação à Vazão Média	9,1%	5,9%	5,0%	10,1%	5,7%	7,4%

Conforme indicado na Tabela 13, a variação da vazão afluyente à instalação piloto mostrou-se aceitável em todos os experimentos, sendo que a média variou, no máximo, 10,5% e o desvio-padrão 10,1%.

Importante salientar também que quando se analisa as mesmas taxas de filtração separadamente (ou seja, comparando-se o experimento do Pedregulho com taxa de 120 m³/m².dia com o experimento do Eletroduto com a mesma taxa e assim sucessivamente) nota-se que em todos a vazão média variou no mesmo sentido. Por exemplo, no experimento com pedregulho e taxa de 120 m³/m².dia a vazão média foi inferior à Vazão Desejada, assim como no experimento com eletroduto com taxa de 120 m³/m².dia e o mesmo ocorreu com a taxa de 240 m³/m².dia. Já no experimento com taxa de 180 m³/m².dia, tanto com o Pedregulho quanto com o Eletroduto a vazão média foi superior à Vazão Desejada.

Esta variação da vazão média no mesmo sentido em experimentos com a mesma taxa de filtração permite afirmar que, em todos os experimentos, este desalinhamento tornou-se ainda mais irrisório, sendo a vazão, portanto, um parâmetro que foi adequadamente administrado e que variou dentro de limites plenamente aceitáveis.

Deste fato abstrai-se ainda que os experimentos de mesma taxa de filtração e diferentes meios filtrantes foram submetidos às mesmas condições de vazão afluyente, sendo esta uma das premissas do trabalho.

5.3 Caracterização da Água Bruta

5.3.1 Turbidez

Desejou-se, durante todos os experimentos, manter a turbidez da água bruta o mais próximo possível de 200 uT, pois este era o valor tido como meta para ser removido da estação piloto utilizada, porém sabe-se que é impossível que este parâmetro apresente, em todas as medições, o valor exato, por melhor que seja o método de agitação. Portanto, com este objetivo, além de manter-se um agitador no fundo do reservatório de água bruta (Figura 13) para que não houvesse sedimentação do caulim, realizou-se também a medição de turbidez da água bruta na entrada da estação piloto, e antes da injeção do coagulante, a cada 30 minutos. De posse destes dados, que se encontram compilados nos gráficos da Figura 24, da Figura 25 e da Figura 26 a seguir, pode-se analisar se a variação da turbidez da água bruta foi excessiva ou estava dentro de limites aceitáveis.

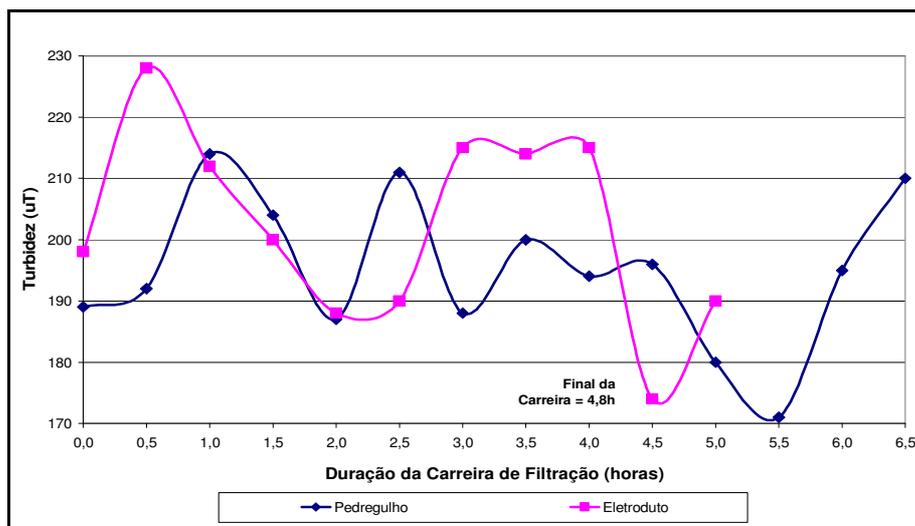


Figura 24 – Evolução da turbidez da água bruta nos experimentos com taxa de filtração de 240 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

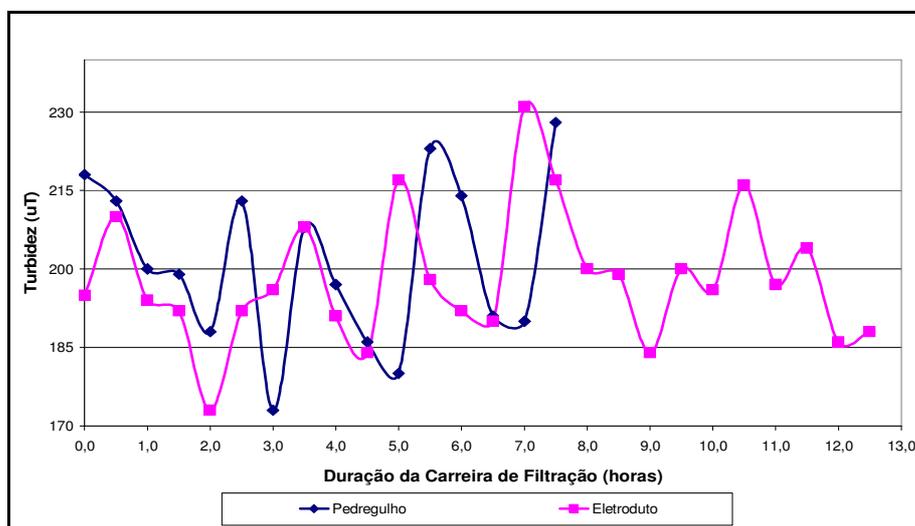


Figura 25 – Evolução da turbidez da água bruta nos experimentos com taxa de filtração de 180 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

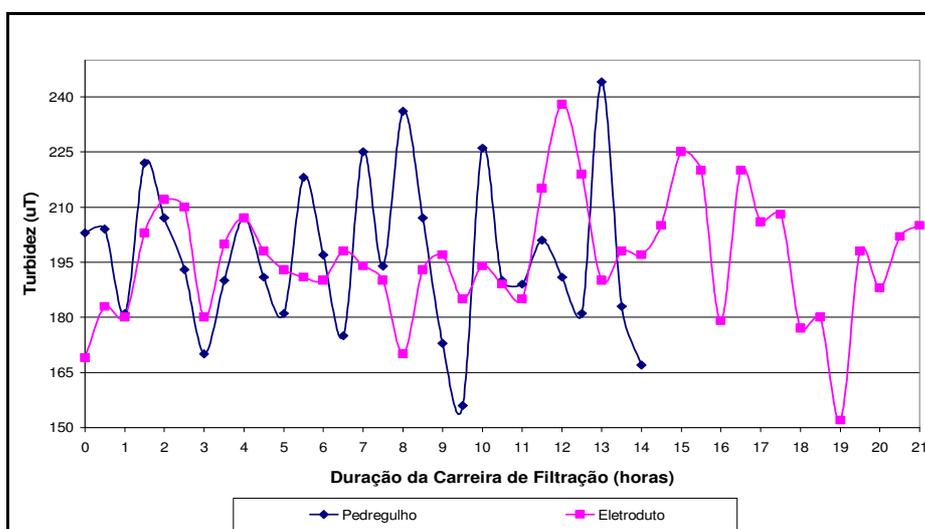


Figura 26 – Evolução da turbidez da água bruta nos experimentos com taxa de filtração de 120 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

Pelos dados do Apêndice 2 e pelos gráficos acima, pode-se calcular a média e o desvio-padrão da turbidez da água bruta do estudo em questão. Estes valores encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 – Média e Desvio-Padrão da turbidez da água bruta obtida nos experimentos.

	Pedregulho			Eletroduto		
	120	180	240	120	180	240
Taxa de Filtração (m³/m².dia)						
Turbidez Média (uT)	196,6	201,3	195,1	196,1	198,1	202,2
Varição da Média em relação à Turbidez Desejada	1,7%	0,7%	2,5%	1,9%	1,0%	1,1%
Desvio-Padrão (uT)	21,1	16,1	12,1	16,3	12,6	16,0
Varição do Desvio-Padrão em relação à Turbidez Média	10,7%	8,0%	6,2%	8,3%	6,3%	7,9%

Como se pode observar na Tabela 14, a média, em todos os experimentos, se manteve muito próxima a 200 uT (com variação máxima de 2,5%). Dada a complexidade e a dificuldade de se agitar um reservatório com volume de três mil litros, é perfeitamente aceitável que o desvio-padrão atinja o valor de 10,7% da média, que foi o máximo obtido conforme dados acima.

Esta pequena variação da média em todos os experimentos permite afirmar que a turbidez da água bruta foi um parâmetro adequadamente administrado e que variou dentro de limites aceitáveis.

Verifica-se ainda que os experimentos de mesma taxa de filtração e diferentes meios filtrantes foram submetidos às mesmas condições de turbidez afluyente (200 uT), sendo esta uma das premissas do trabalho.

5.3.2 Alcalinidade e pH da Água de Estudo

Conforme pode-se visualizar na Figura 27 e na Figura 28, os parâmetros Alcalinidade e pH, que influenciam no desempenho da coagulação, variaram pouco em todos os experimentos.

A alcalinidade média entre os experimentos foi de 103,3 mg CaCO₃/L e o pH médio foi igual a 7,0 (antes da coagulação).

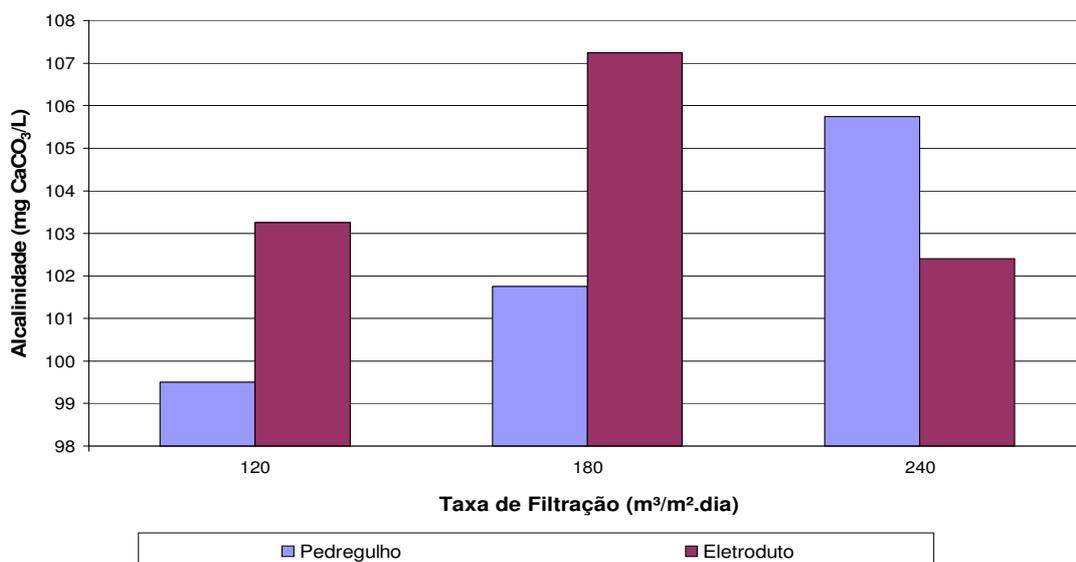


Figura 27 – Variação da alcalinidade entre os experimentos.

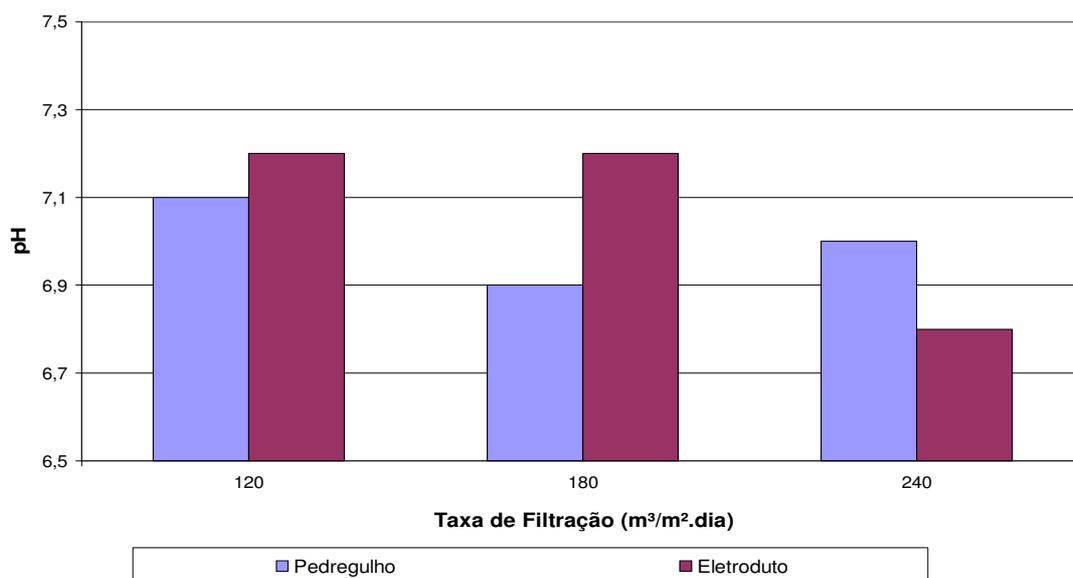


Figura 28 – Variação do pH entre os experimentos.

5.3.3 Temperatura

O objetivo do acompanhamento da evolução da temperatura nos experimentos foi o de analisar se algum dos experimentos sofreu interferência deste parâmetro diferentemente dos demais. Isto porque, a temperatura pode influir de modo decisivo no desempenho da filtração direta, isto é, à medida que diminui a temperatura, reduz-se a velocidade das reações químicas durante a coagulação e aumenta-se a possibilidade de ocorrência de transpasse durante a filtração (DI BERNARDO *et al.*, 2003).

Caso em um ou mais dos experimentos houvesse um aumento significativo deste parâmetro em relação aos outros, aqueles poderiam ter seus resultados de desempenho distorcidos em comparação com estes, com isto a análise comparativa dos meios filtrantes realizada nos parágrafos anteriores ficaria comprometida.

Conforme se pode analisar nos gráficos da Figura 29, da Figura 30 e da Figura 31 o aumento da temperatura se deu de forma equivalente em todos os experimentos. Entre o início e o fim de cada carreira de filtração houve um aumento de temperatura de cerca de até 9 °C, porém estes mesmos deltas de temperatura ocorreram em todos os experimentos, sendo, portanto, todos submetidos a variações muito semelhantes de temperatura, não sendo este um parâmetro que contribuiu para as diferentes eficiências dos leitos filtrantes.

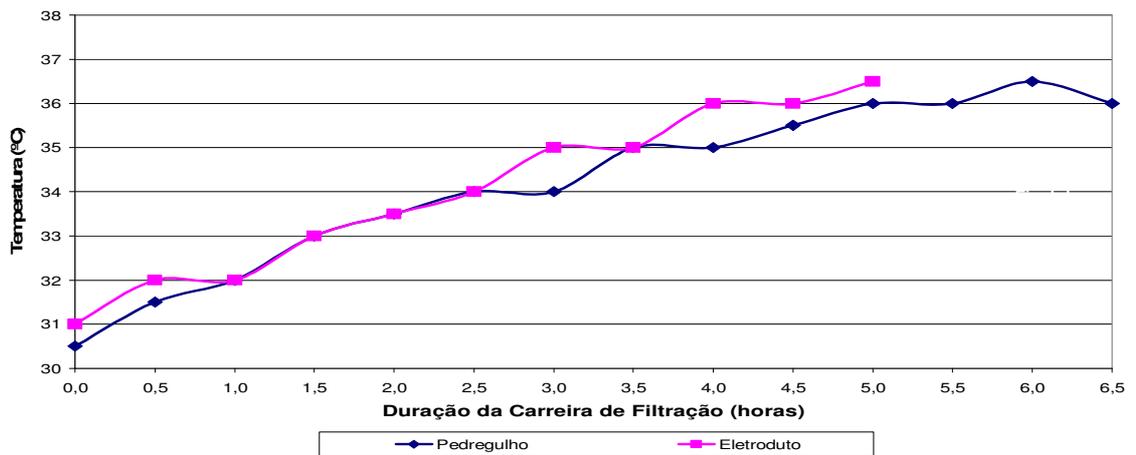


Figura 29 – Evolução da temperatura da água bruta, nos experimentos com taxa de filtração de 240 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

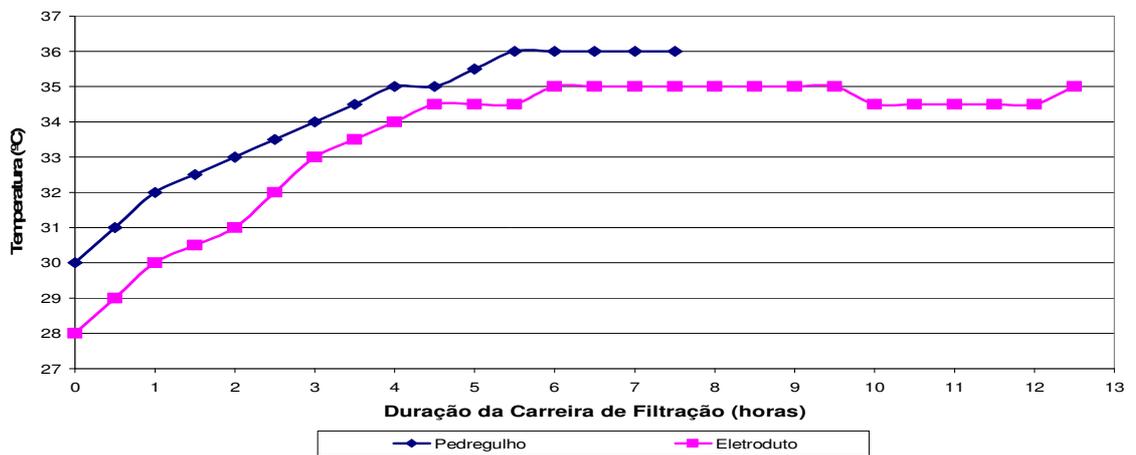


Figura 30 – Evolução da temperatura da água bruta, nos experimentos com taxa de filtração de 180 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

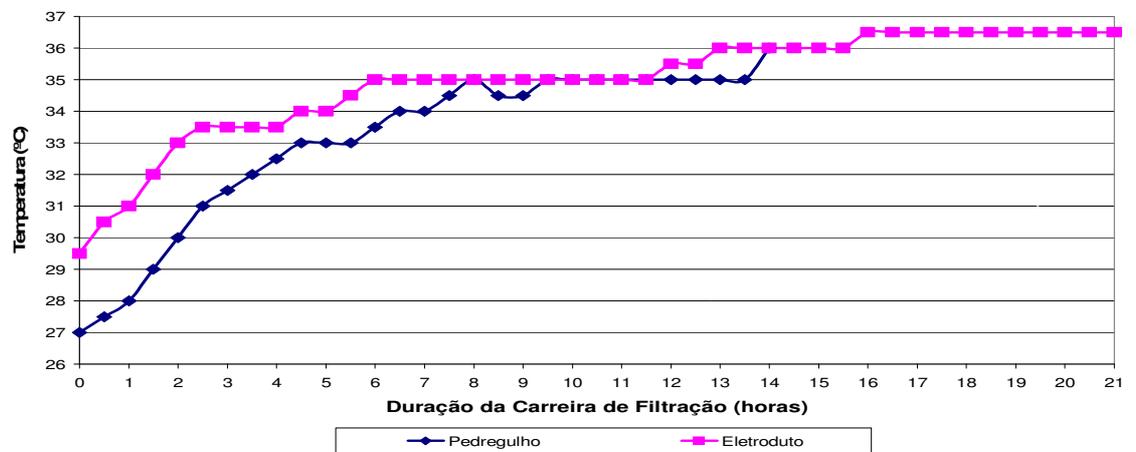


Figura 31 – Evolução da temperatura da água bruta, nos experimentos com taxa de filtração de 120 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

5.4 Avaliação das Carreiras de Filtração

Nesta etapa serão analisados os dados de perda de carga e turbidez remanescente no sistema de filtração (ascendentes e descendente).

5.4.1 Taxa de Filtração: 120 m³/m².dia

Os resultados obtidos nas carreiras de filtração com taxa de 120 m³/m².dia estão apresentados nos gráficos da Figura 32, onde pode-se perceber que a perda de carga proporcionada pelo filtro ascendente em pedregulho é muito superior à proporcionada pelo eletroduto de PVC. Pode também ser abstraído do gráfico a evolução muito mais acentuada da perda de carga nos filtros ascendentes com pedregulho ao longo de cada carreira de filtração. Isto acontece devido à menor porosidade do leito filtrante, apenas 38%, pois são nestes interstícios que os flocos coagulados são armazenados, e, quanto mais flocos são depositados, mais acentuada se torna o aumento da perda de carga.

O incremento da perda de carga no filtro ascendente com eletroduto é muito pequeno. O máximo valor encontrado foi de 0,6 cm.ca (ou 0,006 mca). Trata-se de um valor irrisório, proporcionado pela maior porosidade deste leito filtrante (91%), o qual possui muito mais capacidade de armazenamento dos flocos.

Outra desvantagem de um leito filtrante com grande perda de carga se deve ao fato de quanto maior esta perda de carga, maior a diferença de pressão entre a entrada e a saída do filtro, e maior é a pressão exercida pela água no sentido de provocar o transpasse dos flocos, comprometendo mais rapidamente a carreira de filtração.

A Figura 33 contem os gráficos da segunda carreira de filtração (réplica) para a taxa de 120 m³/m².dia.

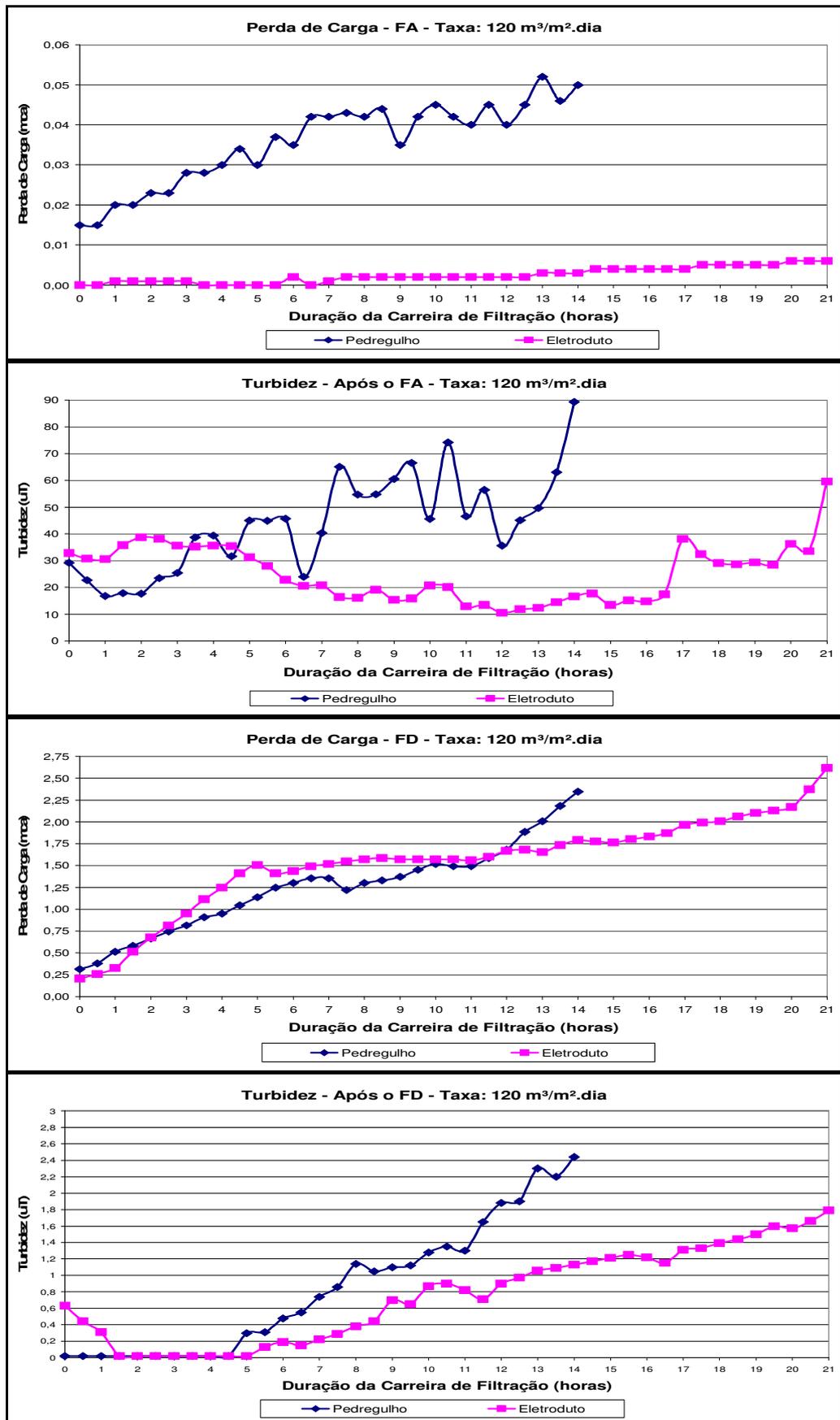


Figura 32 – Primeira carreira com taxa de filtração de 120 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

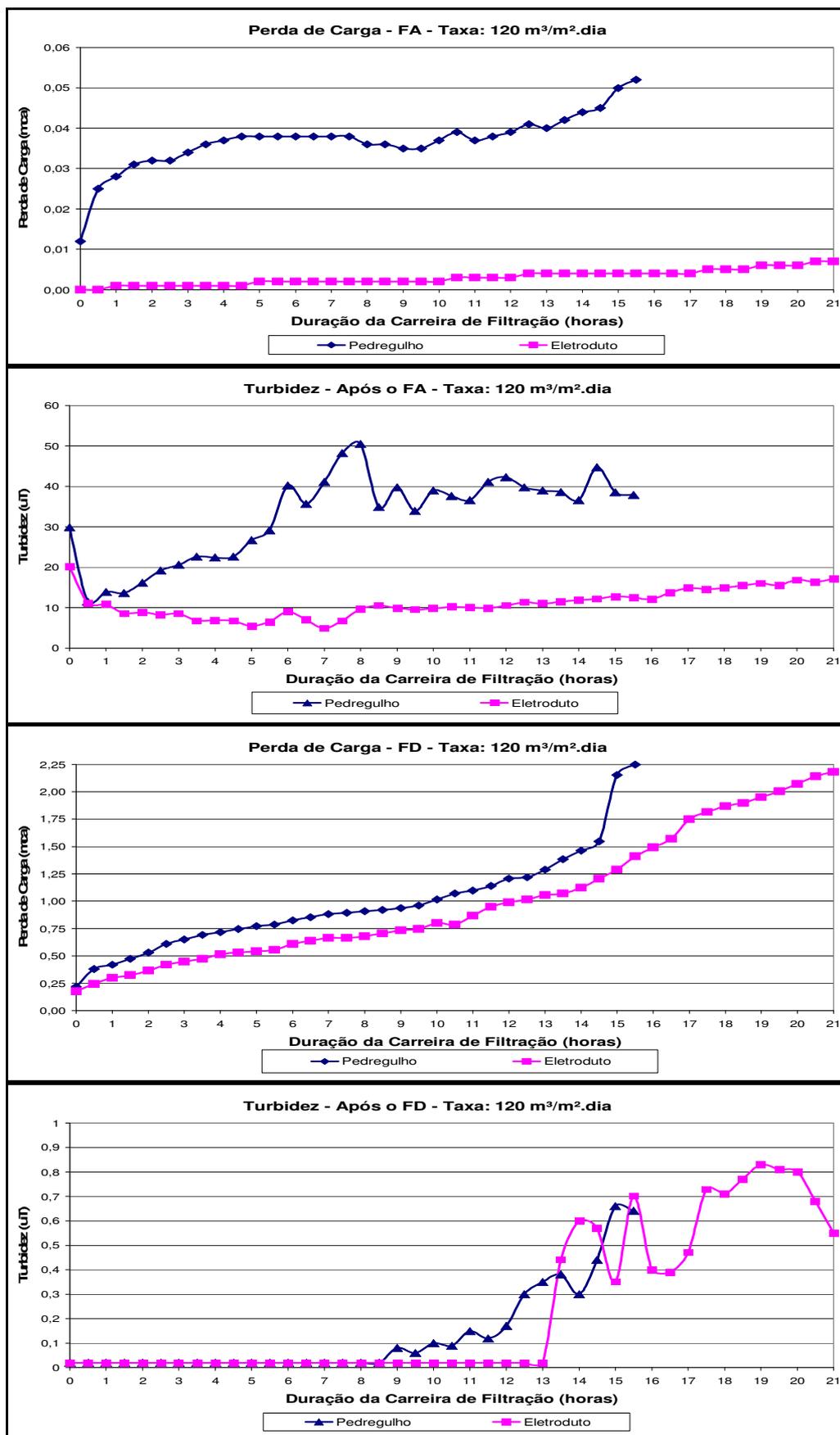


Figura 33 – Segunda carreira com taxa de filtração de 120 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

A análise do gráfico da Figura 32 indica que, para a taxa de filtração de 120 m³/m².dia, o meio filtrante em eletroduto foi mais eficiente na remoção de turbidez e a carreira de filtração foi mais longa do que a do filtro com pedregulho de ambos os experimentos (20,14 horas contra 13,88 horas).

Durante praticamente toda a carreira, a turbidez remanescente do filtro com eletroduto manteve-se menor do que a turbidez após o filtro com pedregulho. Isto indica que a maior porosidade proporcionada pelo eletroduto foi decisiva no incremento de desempenho do filtro.

O gráfico da turbidez após o filtro ascendente, da Figura 32, indica que o filtro estudado está atendendo os limites estabelecidos para aplicação da tecnologia de filtração rápida descendente (FRD), que é a próxima etapa do processo de tratamento, pois conforme se pode obter da Tabela 1, em 100% das amostras analisadas, a turbidez de entrada do filtro descendente em areia deve ser inferior a 100 uT para esta tecnologia.

Já nos filtros descendentes, a evolução de ambas as perdas de cargas ocorreu de maneira muito semelhante, com valores muito próximos ao longo de suas carreiras de filtração.

Ao analisar o gráfico da turbidez remanescente do filtro descendente, ainda na Figura 32, pode-se perceber que ambos os sistemas de dupla filtração, tanto com filtro ascendente em pedregulho quanto com filtro ascendente em eletroduto, conseguiram manter o valor da turbidez abaixo dos limites da Portaria nº 518 do Ministério da Saúde, por cerca de 5 horas. Vale lembrar que os experimentos não contemplavam descargas de fundo intermediárias (DFIs) dos filtros ascendentes, que trata-se de uma metodologia já largamente estudada e comprovada como sendo necessária e eficaz. Certamente, se houvessem sido realizadas DFIs no filtro ascendente a cada 3 horas, sua turbidez remanescente seria menor e, conseqüentemente, a do filtro descendente também, e a carreira de filtração seria prolongada.

5.4.2 Taxa de Filtração: 180 m³/m².dia

Os resultados obtidos nas carreiras de filtração com taxa de 180 m³/m².dia estão apresentados nos gráficos da Figura 34 e da Figura 35 (réplica), onde pode-se perceber que a perda de carga proporcionada pelo filtro ascendente em pedregulho é muito superior à proporcionada pelo eletroduto de PVC.

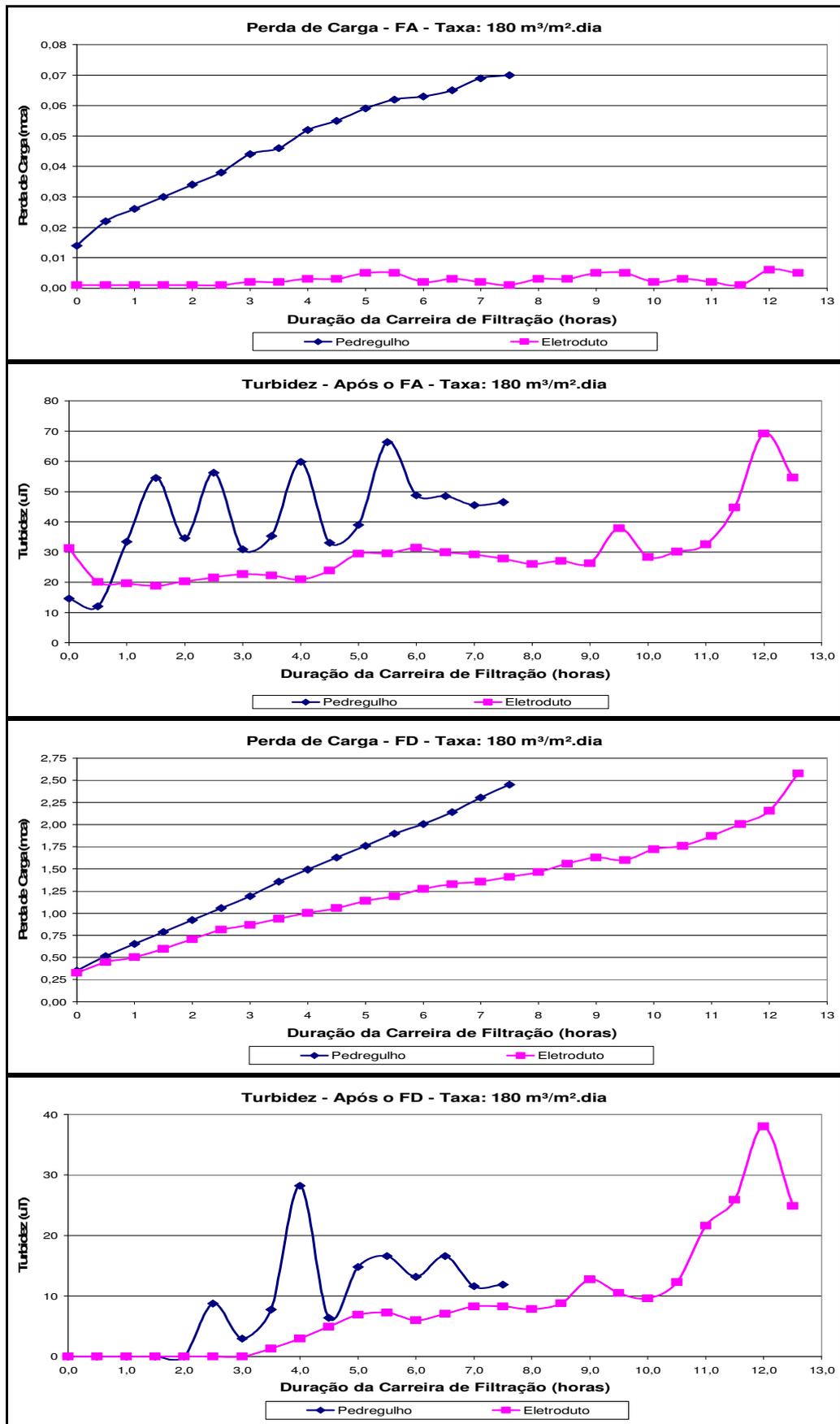


Figura 34 – Primeira carreira com taxa de filtração de 180 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

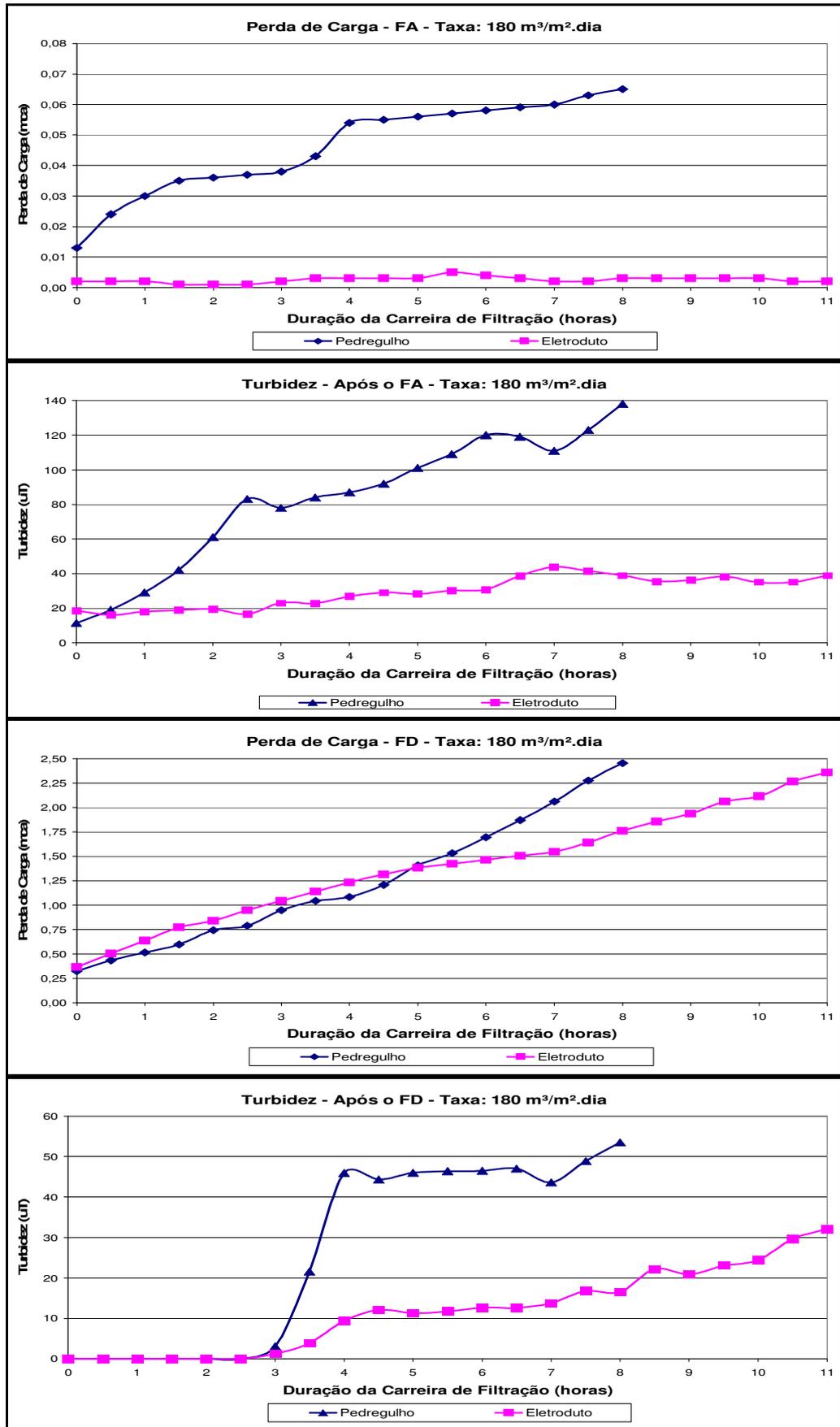


Figura 35 – Segunda carreira com taxa de filtração de 180 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

Os gráficos da Figura 34 indicam que, para a taxa de filtração de 180 m³/m².dia, o meio filtrante em eletroduto foi mais eficiente na remoção de turbidez e a carreira de filtração foi mais longa que a do filtro com pedregulho de ambos os experimentos (12,19 horas contra 7,14 horas). No entanto para essa taxa a carreira de filtração foi menor que a obtida para taxa de 120 m³/m².dia.

Pode-se perceber em todos os gráficos que os níveis de turbidez e de perda de carga nos experimentos com pedregulho, tanto após o FA quanto após o FD, mantiveram-se acima dos valores dos experimentos com eletroduto. Isto faz presumir que o meio filtrante poroso proporcionou melhor eficiência no sistema de dupla filtração no qual atuou.

Com relação à turbidez que o FA em eletroduto permitiu transpassar para o FRD, a mesma encontra-se, em 100% das amostras, abaixo de 100 uT, fato que permite afirmar que o limite da tecnologia de FRD foi respeitado.

Mais uma vez pode-se supor que, caso tivesse sido aplicada a DFI no filtro ascendente próxima da segunda hora (vide gráfico da turbidez após o FA na Figura 34), poder-se-ia manter o nível de turbidez dentro do limite estabelecido pelo Ministério da Saúde, prolongando a carreira de filtração, pois, conforme pode-se ver no gráfico em questão, este limite foi mantido apenas até próximo da quarta hora dos experimentos.

Ao analisar o gráfico da turbidez após o FA e após o FD, da Figura 34, nota-se que, em quase toda a carreira, a turbidez remanescente após o filtro com eletroduto manteve-se inferior à turbidez após o filtro com pedregulho. Isto indica que a maior porosidade proporcionada pelo eletroduto foi decisiva no incremento de desempenho do filtro.

A evolução da perda de carga no experimento que tinha o pedregulho como leito filtrante do filtro ascendente apresentou-se mais acentuada, atingindo o limite imposto de 2 mca (cerca de 150 mmHg). O experimento com o eletroduto, devido à sua maior porosidade, proporcionou maior acúmulo dos flocos no leito filtrante, retardando o início de transpasse dos mesmos, e, conseqüentemente, o final da carreira, que aconteceu com 12,19 horas, enquanto que o experimento com pedregulho foi encerrado com 7,14 horas.

Analisando-se o gráfico da perda de carga no FD, na Figura 34, abstrai-se que a evolução da perda de carga no experimento com o pedregulho foi mais acentuada. Isto pode ser explicado correlacionando este gráfico com o gráfico da turbidez após o FA, no qual nota-se que o meio filtrante em pedregulho permitiu maior transpasse de turbidez ao longo de todo o experimento.

5.4.3 Taxa de Filtração: 240 m³/m².dia

Nos experimentos com taxa de filtração de 240 m³/m².dia (Figura 36) o pedregulho apresentou-se como um meio filtrante mais eficiente do que o eletroduto, pois a duração da carreira de filtração do experimento tendo o primeiro elemento como meio filtrante foi superior (6,4 horas contra 4,8 horas).

Outro fator que corrobora a maior eficiência do meio filtrante em pedregulho, para esta taxa de filtração, é o fato de que durante todo o experimento os níveis de turbidez alcançados no experimento em eletroduto foram maiores do que os observados no experimento em pedregulho (vide gráfico da turbidez após o FA e após o FD, da Figura 36). Este fato faz presumir que a maior velocidade intersticial provocada pela maior vazão/taxa de filtração, em comparação com as duas menores taxas de filtração analisadas, com o auxílio do menor coeficiente de rugosidade do PVC, permitiu o arraste dos flocos com maior facilidade para o topo do leito filtrante em eletroduto, ocasionando o transpasse dos mesmos e aumentando a turbidez remanescente do filtro ascendente.

Conforme indicado na Figura 36, a perda de carga dos experimentos com taxa de filtração de 240 m³/m².dia, apresentou, durante toda a carreira, o eletroduto como provocando maior perda de carga no filtro descendente. Isto provavelmente ocorreu devido ao maior arraste de flocos, pelo fato de esta taxa de filtração provocar uma maior velocidade ascensional dentro de ambos os leitos filtrantes, e a ação física de coar do pedregulho, que inclusive é constituído de granulometrias de até 2 mm no topo do mesmo, foi mais efetivo do que o efeito de acúmulo de flocos na maior porosidade do filtro ascendente com eletroduto. Consequentemente, como a velocidade ascensional foi maior nesta taxa de filtração, no filtro com eletroduto os flocos eram mais facilmente carregados para o topo do leito filtrante, provocando maior transpasse para o filtro descendente e, portanto, maior perda de carga neste último.

A Figura 37 contem os gráficos da réplica para a taxa de 240 m³/m².dia.

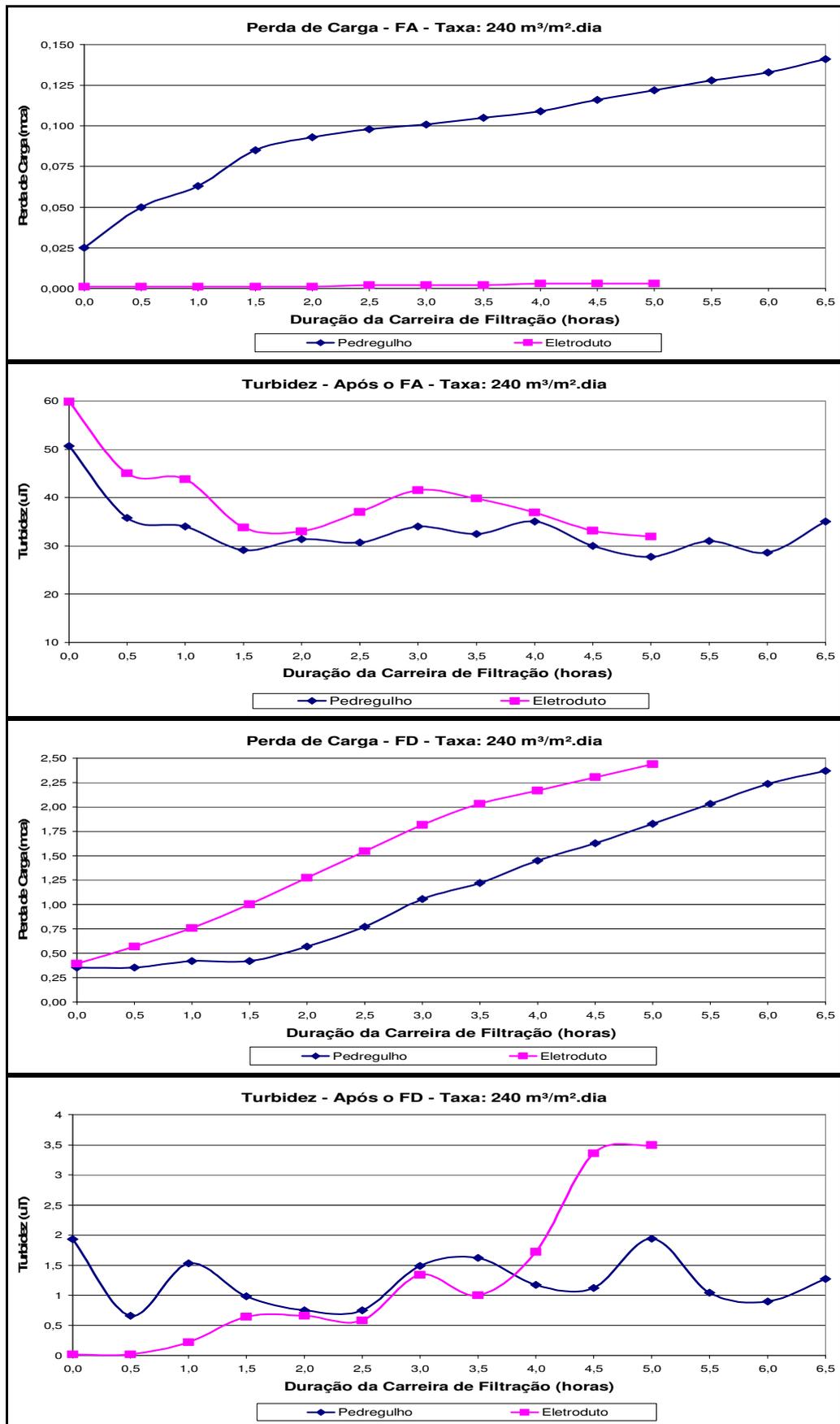


Figura 36 – Primeira carreira com taxa de filtração de 240 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

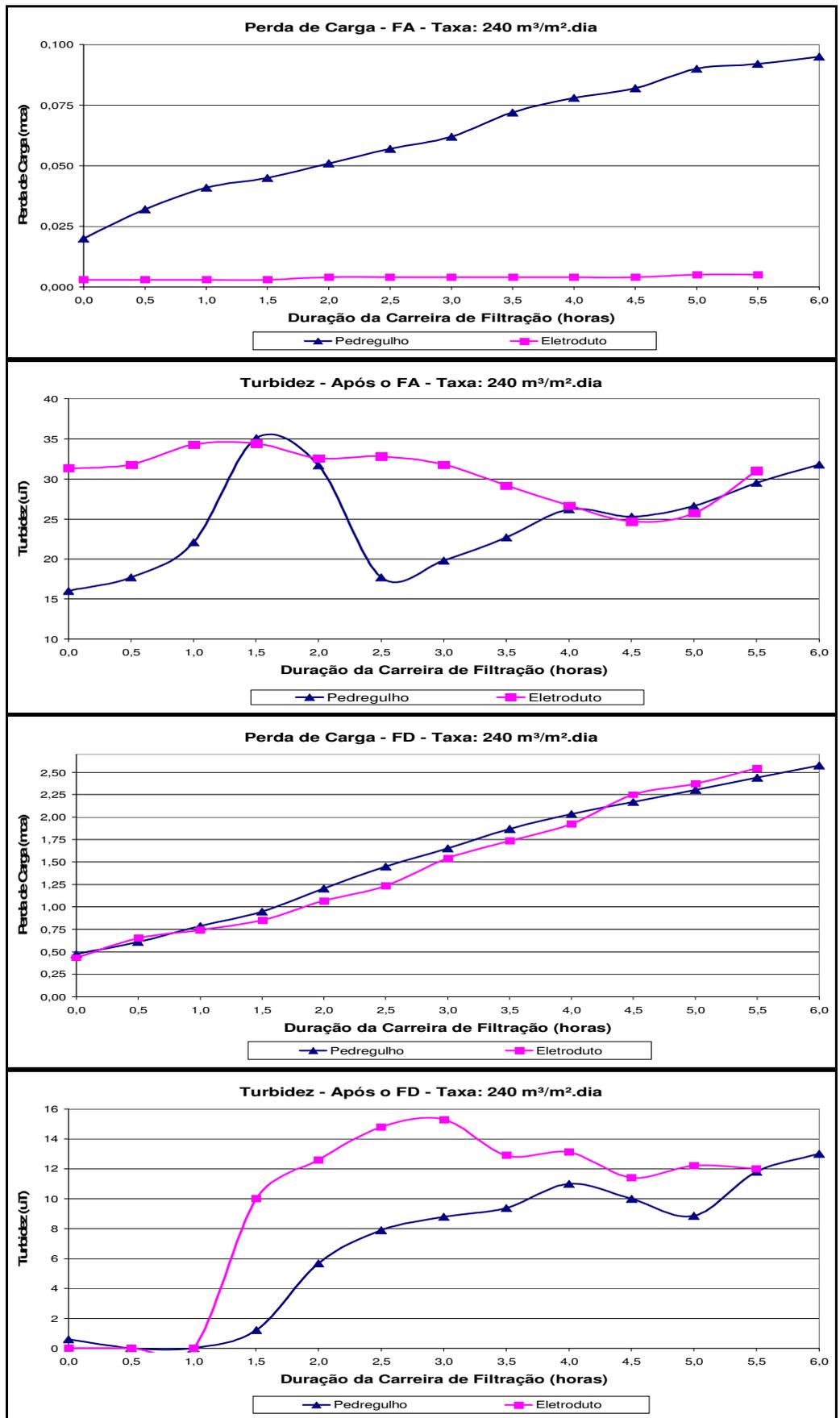


Figura 37 – Segunda carreira com taxa de filtração de 240 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

5.5 Eficiência de Remoção de Turbidez

Os gráficos da Figura 38, da Figura 39 e da Figura 40 mostram a eficiência de cada sistema de dupla filtração submetido às diferentes taxas de filtração na remoção de turbidez. Estes gráficos resumem e explicitam de maneira mais clara os dados expressados nos gráficos de turbidez após o FD da Figura 32, da Figura 34 e da Figura 36, respectivamente.

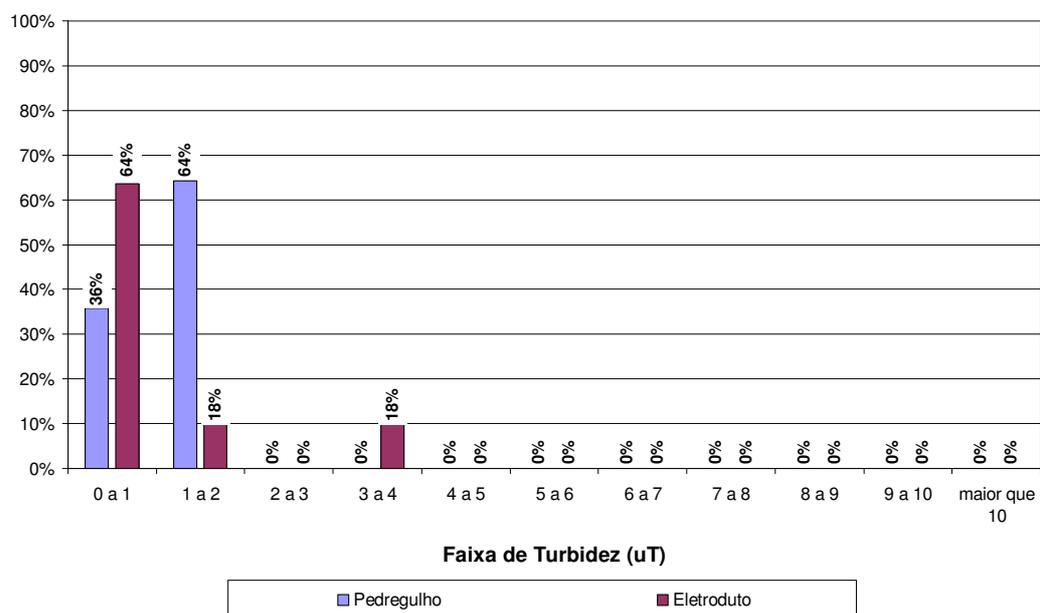


Figura 38 – Eficiência da remoção de turbidez, em categorias, no filtro descendente, para os experimentos com taxa de filtração de 240 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

A Figura 38 revela que o experimento cujo leito filtrante do FA foi o pedregulho, com taxa de filtração de 240 m³/m².dia, obteve apenas 36% das amostras com valores de turbidez abaixo de 1 uT, enquanto que para o FA com eletroduto este valor foi de 64%. Entretanto, o sistema com pedregulho apresentou 100% das amostras com turbidez abaixo de 2 uT, e o sistema com uso do eletroduto permitiu que 18% das amostras se encontrassem na faixa de 3 a 4 uT.

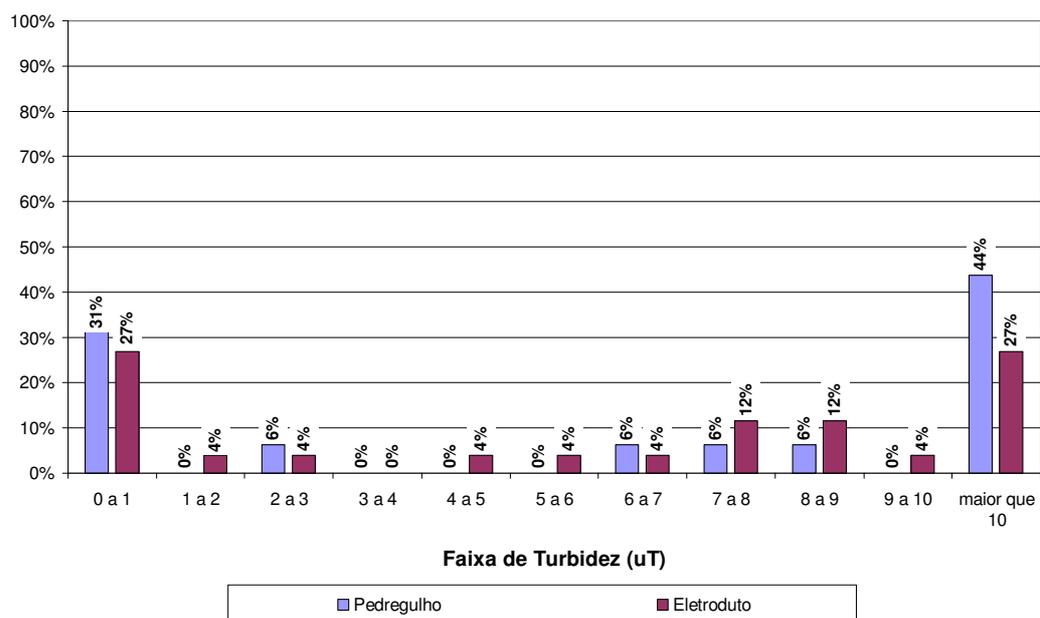


Figura 39 – Eficiência da remoção de turbidez, em categorias, no filtro descendente, para os experimentos com taxa de filtração de 180 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

No experimento com taxa de filtração de 180 m³/m².dia (Figura 39) apenas 56% das amostras finais do sistema de dupla filtração cujo FA tinha como meio filtrante o pedregulho apresentaram turbidez abaixo de 10 uT. Já no experimento com uso de eletroduto, esta porcentagem subiu para 73%.

No experimento representado na Figura 40 a seguir, com taxa de filtração de 120 m³/m².dia, 55% das amostras, quando o meio filtrante do filtro ascendente foi o pedregulho, estavam abaixo de 1 uT, enquanto que 60% foi a porcentagem do experimento com eletroduto.

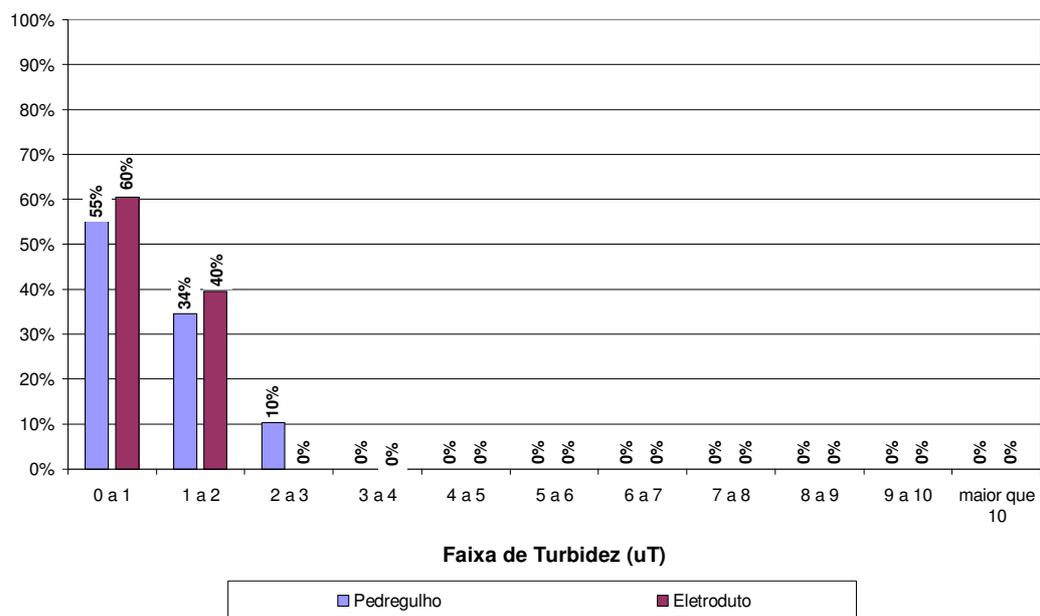


Figura 40 – Eficiência da remoção de turbidez, em categorias, no filtro descendente, para os experimentos com taxa de filtração de 120 m³/m².dia, em ambos os meios filtrantes.

Para a taxa de filtração de 120 m³/m².dia, 100% das amostras encontraram-se abaixo de 2 uT no experimento cujo leito filtrante do FA era o eletroduto. No experimento com meio filtrante de pedregulho, 10% das amostras encontravam-se entre 2 e 3 uT. Já para o experimento

A partir da análise destes três últimos gráficos, ou seja, a análise da eficiência na remoção de turbidez após o filtro descendente, pode-se afirmar que, para as taxas de filtração de 120 e 180 m³/m².dia, o leito filtrante de eletroduto apresentou melhor desempenho.

Para a taxa de filtração de 240 m³/m².dia a conclusão relevante é que o leito filtrante de eletroduto permitiu que 18% das amostras de turbidez se encontrassem entre 3 e 4 uT, enquanto que o leito filtrante de pedregulho não obteve nenhuma medição acima de 2 uT. Este fato deve ser associado ao analisado no parâmetro anterior, de turbidez após o filtro ascendente, no qual se observou maior transpasse de flocos no filtro cujo meio filtrante era o eletroduto, nesta taxa de 240 m³/m².dia.

5.6 Volume de Água Gasto na Lavagem

O volume de água gasto na lavagem dos filtros ascendentes é importantíssimo para o desenvolvimento de uma nova tecnologia de leito filtrante para filtros ascendentes e para a comparação com as tecnologias já existentes, pois não seria econômica e ambientalmente viável utilizar um leito filtrante que gaste, durante a lavagem, uma grande parcela da água que produziu.

Para efeito de exemplificação, vide a Tabela 15 abaixo, que contem os valores de turbidez para cada tempo analisado e como se pode ver, já no tempo de 60 segundos a lavagem do filtro atingiu um valor inferior a 50 uT na água de descarte.

**Tabela 15 – Análise da água de lavagem dos filtros ascendentes.
Experimento: Pedregulho – Taxa = 240 m³/m².dia**

Tempo de Lavagem (s)	Turbidez (uT)
30	75,3
60	15,3
90	2,87
120	32,8
150	45,0
180	72,9
210	33,3
240	17,7
270	11,8
300	1,26

Comportamento diferente foi observado no experimento da Tabela 16, onde somente no tempo igual a 120 segundos a água de lavagem que saía do filtro atingiu um valor igual ou inferior a 50 uT na água de descarte.

**Tabela 16 – Análise da água de lavagem dos filtros ascendentes.
Experimento: Eletroduto – Taxa = 180 m³/m².dia**

Tempo de Lavagem (s)	Turbidez (uT)
30	>1100
60	132
90	54,4
120	39,8
150	35,7
180	17,9
210	19,4
240	23,6
270	17,3
300	21,4

Esta duração que foi identificada em cada um dos experimentos impactou diretamente no consumo de água na lavagem de cada filtro ascendente. Isto porque, como se sabe que a vazão da bomba era de 3,3 m³/h (ou 0,92 L/s) bastava multiplicá-la pelo tempo transcorrido que se encontrava o volume utilizado (Dado 5).

O volume total utilizado era dado pela soma do volume da descarga de fundo inicial (Dado 4) com o Dado 5, explicado no parágrafo anterior.

Como exemplo, vide novamente os dados da Tabela 15. Esta tabela refere-se ao experimento tendo o pedregulho como meio filtrante, para a taxa de filtração de 240 m³/m².dia. Neste experimento, o valor inicial do hidrômetro (Dado 1) era de 14,8684 m³ e o valor ao final da descarga de fundo (Dado 2) era de 14,8946 m³. Obteve-se a lavagem do filtro (turbidez de descarte igual ou inferior a 50 uT) no tempo de 60 segundos, portanto, multiplicando-se 60 segundos pela vazão da bomba, obtinha-se o valor de 55 litros (Dado 5).

Resumindo:

Volume Descarga de Fundo Inicial= Dado 2 – Dado 1= 14,8946 - 14,8684= 26,2 litros

Volume Consumido na Lavagem (Duração: 60 segundos)= 55 litros.

Portanto, o volume total gasto foi de 81,2 litros.

O volume total gasto com a lavagem do filtro ascendente somente é um parâmetro importante se comparado com o volume total de água produzida em cada carreira.

Neste experimento de exemplo (Pedregulho – Taxa = 240 m³/m².dia) o volume total de água produzido foi de 2.016,6 litros (vide Apêndice 2, que detalha os dados levantados).

Portanto, dividindo-se o volume total gasto com a lavagem do filtro (81,2 litros) pelo volume total de água produzido (2.016,6 litros), obtém-se a porcentagem de água gasta com a lavagem, que neste caso foi de 4%. Esta porcentagem é um parâmetro importantíssimo na análise de eficiência de um leito filtrante.

Este procedimento detalhado acima foi realizado ao final de todos os experimentos.

A Tabela 17 relaciona o volume total de água limpa gasta na lavagem dos filtros ascendentes e o total de água produzido em cada experimento, mostrando a eficiência de cada meio filtrante quanto à sua lavagem. Os dados detalhados para esta análise podem ser vistos no Apêndice 4.

Tabela 17 – Parâmetros de lavagem dos filtros ascendentes.

	Pedregulho			Eletroduto		
Taxa de Filtração (m³/m².dia)	120	180	240	120	180	240
Volume Total Gasto (Litros)	108,7	81,5	81,2	155,9	159,5	130,9
Volume Total Produzido na Carreira (Litros)	2.102,5	1.951,9	2.016,6	3.197,6	3.133,6	1.560,8
Gasto (%)	5,2%	4,2%	4,0%	4,9%	5,1%	8,4%

Pela Tabela 17 percebe-se que em termos de volume de água, o leito de pedregulho requer menor quantidade para sua lavagem, isto pode ser explicado pelo fato de que, como o volume de vazios do leito de pedregulho é menor que o volume de vazios do leito de eletroduto, o volume de água requerido para lavagem também é menor.

No entanto, em termos percentuais em relação ao volume de água produzido, nos experimentos realizados, somente o Eletroduto com taxa de 240 m³/m².dia obteve uma baixa eficiência neste quesito, com gasto de 8,4% para lavagem de seu leito filtrante após o experimento.

Os outros experimentos obtiveram um gasto aceitável, ao redor de 5% e todos permaneceram em uma faixa muito próxima uns dos outros e as diferenças encontradas poderiam ser desconsideradas. Porém, para efeito de comparação, pode-se dizer que o leito filtrante de pedregulho foi o que obteve melhores resultados nas

taxas de filtração de 180 e 240 m³/m².dia, com 4,2% e 4%, contra 5,1% e 8,4% do meio filtrante de eletroduto, respectivamente.

Portanto, o leito filtrante de pedregulho consumiu menos água para sua lavagem nas taxas de filtração de 180 e 240 m³/m².dia, enquanto que o eletroduto foi mais eficiente neste quesito para a taxa de 120 m³/m².dia.

Outra explicação para o melhor desempenho da lavagem do leito de pedregulho pode ser o fato de o eletroduto possuir seu corpo corrugado, ou seja, possuir dezenas de ranhuras na sua configuração. Essas ranhuras podem dificultar a saída dos flocos de dentro do eletroduto, retardando a limpeza do mesmo e, conseqüentemente, aumentando o consumo de água limpa.

A Tabela 18 resume o desempenho de ambos os sistemas de dupla filtração.

Tabela 18 – Resumo do desempenho de cada experimento.

Resumo de Desempenho				
	Taxa de Filtração (m³/m².dia)	Duração da Carreira (horas)	Gasto com Lavagem	Volume Total de Água Produzido (L)
Pedregulho	240	6,35	4,0%	2.016,6
	180	7,14	4,2%	1.951,9
	120	13,88	5,2%	2.102,5
Eletroduto	240	4,78	8,4%	1.560,8
	180	12,19	5,1%	3.133,6
	120	20,14	4,9%	3.197,6

Abaixo são apresentadas algumas fotos dos leitos filtrantes durante os experimentos (Figura 41, Figura 42 e Figura 43).

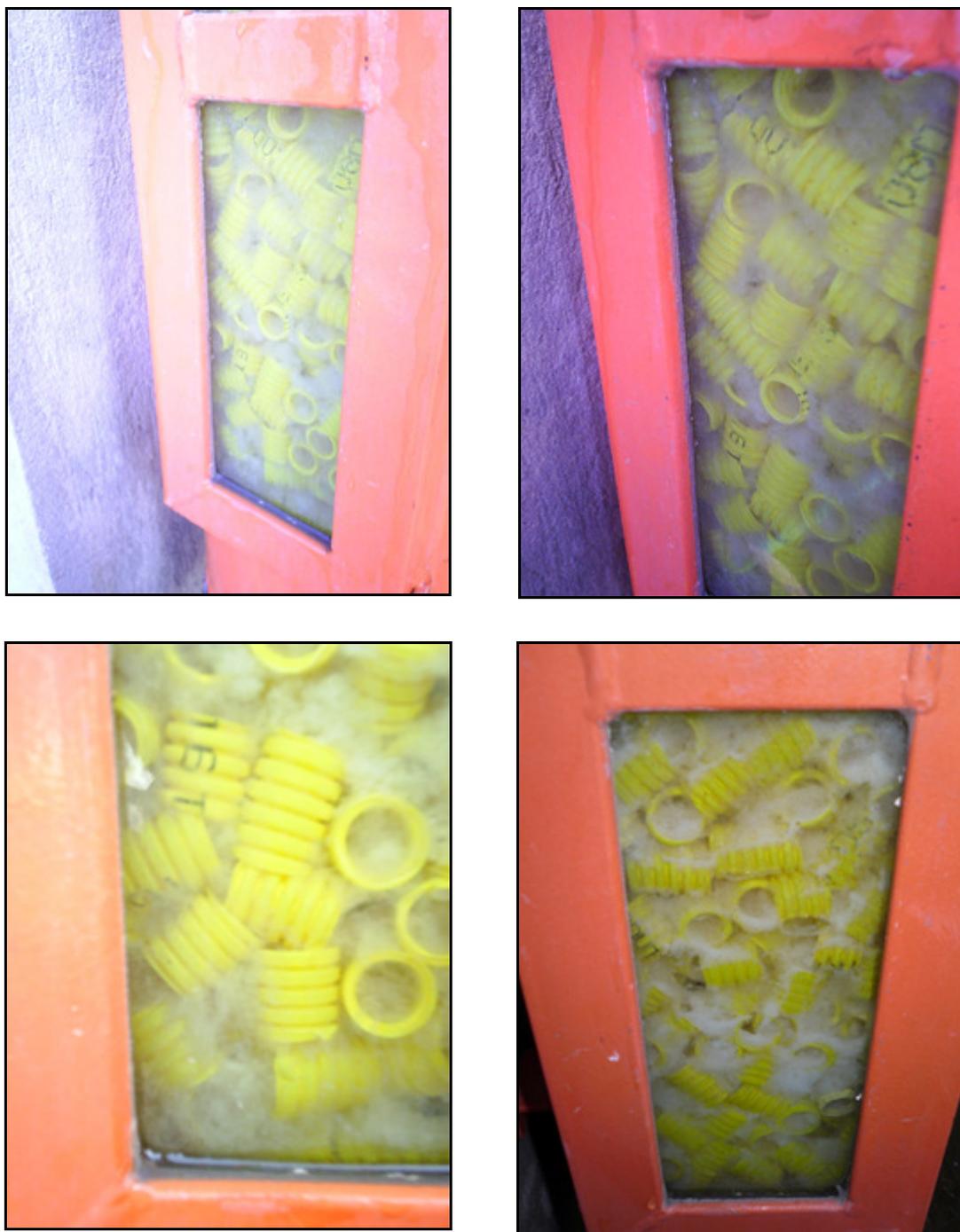


Figura 41 - Leito filtrante de Eletroduto saturado com os flocos do caulim coagulado, ao final de um dos experimentos.



Figura 42 - Exemplos do leito filtrante de Pedregulho saturado com os flocos do caulim coagulado, ao final de um dos experimentos.



Figura 43 - Exemplos do topo leito filtrante (areia) do filtro descendente ao final de um dos experimentos.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir que:

- Para as características da água bruta (200 uT), a melhor dosagem de coagulante, para coagulação pelo mecanismo de varredura, foi de aproximadamente 15 mg/L de Al_2O_3 livre;
- Os dados da turbidez após os filtros ascendentes indicaram que dois diferentes mecanismos de filtração puderam ser observados. O primeiro deles foi a capacidade de armazenamento intersticial promovida pelos meios filtrantes, isto é, o volume de vazios, entre os elementos filtrantes, que permitem que os flocos se acumulem, evitando seu transpasse no filtro ascendente. O outro mecanismo foi a ação física de coar a água, que é o efeito naturalmente esperado de qualquer tipo de filtro para água. Neste segundo mecanismo o floco encontra uma grande quantidade de barreiras no meio filtrante, que impedem sua transposição;
- No meio filtrante em eletroduto, devido sua alta porosidade em comparação com o meio filtrante em pedregulho, o primeiro mecanismo de filtração, o armazenamento intersticial, foi o predominante. Já no pedregulho, por possuir granulometria inferior e menor porosidade, conseqüentemente, um menor volume de vazios intersticiais, o mecanismo predominante foi o da ação física de coar;
- A taxa de filtração de 240 m^3/m^2 .dia apresenta uma maior velocidade entre os grãos de ambos os meios filtrantes. Os dados da pesquisa indicaram que, devido a esta maior velocidade intersticial da água, o mecanismo de filtração privilegiado foi o da ação física de coar a água. Ou seja, a aparente vantagem da maior porosidade do eletroduto transformou-se em desvantagem nesta maior velocidade, pois esta foi capaz de arrastar os flocos de entre os pequenos tubos de eletroduto para o topo do filtro ascendente, provocando o aumento da turbidez durante todo o experimento;

-
- As taxas de filtração de 120 e 180 m³/m².dia, por proporcionarem menor velocidade entre os grãos, privilegiou o mecanismo predominante no meio filtrante de eletroduto, o armazenamento intersticial. Este armazenamento dos flocos foi o responsável pelas maiores carreiras de filtração, em ambas as taxas de filtração, neste meio filtrante. Para estas duas taxas de filtração mencionadas, a maior porosidade do eletroduto foi decisiva no desempenho de todo o sistema de tratamento;
 - No filtro ascendente de pedregulho, para a taxa de filtração de 240 m³/m².dia, a ação física de coar do filtro foi predominante. Então, os dados sugerem que, para taxas de filtração próximas, este é o leito filtrante mais recomendado com relação ao critério de duração da carreira de filtração. E, pelo mesmo critério, no leito filtrante de eletroduto, com taxas de filtração de 120 e 180 m³/m².dia, a porosidade do leito filtrante foi decisiva na ampliação das carreiras de filtração, o que remete a acreditar que, com relação à duração da carreira de filtração, este leito filtrante é mais eficiente para estas faixas de taxas de filtração;
 - A força de aderência dos flocos nos meios filtrantes, foi vencida durante os experimentos cujo meio filtrante do FA era o eletroduto para a taxa de filtração de 240 m³/m².dia. Isto ocorreu, provavelmente, porque o coeficiente de rugosidade deste material é menor do que o coeficiente de rugosidade do pedregulho.
 - Com relação ao volume total de água produzida, os mesmos foram equivalentes às durações das carreiras de filtração, uma vez que ao se comparar as mesmas taxas de filtração, as vazões horárias são semelhantes. Ou seja, quanto maior a carreira de filtração, maior é o volume total de água produzido;
 - Ao analisar o mérito do consumo de água na lavagem dos filtros ascendentes, pode-se concluir que o fato de o eletroduto possuir seu corpo corrugado foi decisivo para seu pior desempenho nas taxas de filtração de 180 e 240 m³/m².dia. É de se esperar que outro meio filtrante, com as mesmas dimensões e características que o eletroduto, porém sem possuir estas ranhuras, obtenha maior eficiência neste parâmetro, pois os flocos seriam mais facilmente arrastados pela água de lavagem;

-
- Em contrapartida, talvez o fato de estas ranhuras existirem possa ser uma vantagem com relação à fixação dos flocos no interior do leito, pois aquelas proporcionam uma melhor ancoragem destes no interior do filtro, impedindo-os de serem carreados para o topo do leito filtrante e, conseqüentemente, melhorando seu desempenho. Portanto, um novo leito filtrante em formato de pequenos tubos não corrugados, teria também de ser analisado criteriosamente em um novo trabalho;
 - O meio filtrante estudado comportou-se satisfatoriamente, principalmente nos experimentos com taxa e filtração de 120 e 180 m³/m².dia. Como objetivou-se analisá-lo em casos extremos, com turbidez de 200 uT, sem DFIs e coagulando pelo mecanismo de varredura, é razoável esperar que, sob condições mais naturais e em outros períodos do ano de funcionamento da ETA com menor turbidez, o mesmo se comporte de maneira superior;

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados desta pesquisa permitem sugerir as seguintes recomendações:

- Estudar os sistemas de DF coagulando pelo mecanismo de adsorção e neutralização de cargas;
- Utilizar outros coagulantes, tais como sulfato de alumínio ou cloreto férrico;
- Avaliar a interferência do número de descargas de fundo intermediárias no desempenho da carreira de filtração dos filtros ascendentes com pedregulho e com eletrodo;
- Analisar a viabilidade de um novo leito filtrante, também em formato de pequenos tubos, porém não corrugado. Submetê-lo a testes equivalentes.
- Utilizar como meio filtrante do filtro descendente um leito misto, com antracito e areia;
- Realizar as medições de turbidez da água de lavagem com turbidímetro contínuo, digital, com medições sucessivas a cada segundo, para evitar as lacunas da medição realizada a cada 30 minutos;
- Em novos experimentos, contabilizar também o volume consumido nas retrolavagens dos filtros descendentes;
- Durante a execução dos ensaios preliminares em *Jar-Test*, realizar também variações de concentração de coagulante de 1 em 1 mg/L.

8 REFERÊNCIAS

AMIRTHARAJAH, A. (1989). *The mechanisms of coagulation*. In: Seminário Nacional Sobre Coagulação e Filtração Direta, 1989, São Carlos, Anais. São Carlos: EESC-USP, 1989, v.1, p.1-19.

AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K. M. (1982). *Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation*. American Water Works Association Journal, v.74, n.4, p. 210-216.

APHA, AWWA, WPCF. (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*, 20th edition. Washington.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1990). NBR 11799: Material Filtrante – Areia, antracito e pedregulho. Rio de Janeiro.

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

BENINI, B. D. S. (2003). *Remoção de substâncias húmicas na dupla filtração com filtro ascendente de pedregulho*. São Carlos. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BRASIL (2004). Ministério da Saúde. Portaria nº. 518, 25 de março de 2004. *Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências*. Brasília, DF.

BRITO, L. P.; NETO, C. O. A.; FILHO, M. L.; SILVA, D. A.; LIMA, A. D. (2005). *Estudo comparativo da eficiência de um wetland e um filtro anaeróbio na remoção de sólidos suspensos, DBO e DQO*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23^o, 2005, Campo Grande.

CIRNE, A. R. C.; NETO, C. O. A.; MELO, H. N. S.; ARAÚJO, A. L. C. (2007). *Avaliação comparativa de filtros anaeróbios contendo diferentes materiais de enchimento*. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24^o, 2007, Belo Horizonte.

COSTA, A. A. O.; ARAÚJO, A. L. C.; NOBRE, P. M. (2006). *Avaliação da eficiência de uma reator anaeróbio compacto*. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 1^o, 2006, Natal.

DI BERNARDO, L.; BOTARI, A.; DI BERNARDO, A. S. (2005). *Eficiência de remoção de partículas e de turbidez na filtração direta ascendente de um sistema de dupla filtração*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23^o, 2005, Campo Grande.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; POVINELLI, J. (2005). *Desempenho de sistema de dupla filtração com filtro ascendente de pedregulho no tratamento de água com turbidez elevada*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23^o, 2005, Campo Grande.

DI BERNARDO, L.; MEGDA, C. R. (2000). *Uso da filtração direta ascendente em pedregulho como pré-tratamento à filtração rápida descendente*. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27^o, 2000, Porto Alegre.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. (2005a). *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. ed., São Carlos: Ed. Rima, vol. 1.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. (2005b). *Métodos e técnicas de tratamento de água*. 2. ed., São Carlos: Ed. Rima, vol. 2.

DI BERNARDO, L. (coord.) (2003). *Tratamento de água para abastecimento por filtração direta*. São Carlos. PROSAB 3, p. 19, 22, 113, 114, 138, 162, 182, 207, 251, 252, 366.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. (2008). *Seleção de tecnologias de tratamento de água*. 1. ed., São Carlos: Ed. LDIBE Ltda., vol.1.

GUSMÃO, P. T. R. (2001). *Utilização de filtração direta ascendente como pré-tratamento para água de abastecimento*. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

KURODA, E. K. (2002). *Avaliação da filtração direta ascendente em pedregulho como pré-tratamento em sistemas de dupla filtração*. São Carlos. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

KURODA, E. K.; DI BERNARDO, L.; DE PAULA, D. (2003). *Dupla filtração com filtro ascendente em pedregulho e em areia grossa para tratamento de água*. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, v.8, n.4, p. 221-238, Out/Dez.

MENDES, C. G. N. (1985). *Estudo das influências das dosagens de produtos químicos na filtração direta ascendente*. São Carlos. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MEGDA, C. R. (1999). *Filtração direta ascendente em pedregulho como pré-tratamento à filtração rápida descendente*. São Carlos. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PAVANELLI, G. (2001). *Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada*. São Carlos. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PINTO, A. P. (2006). *Utilização da filtração direta ascendente em pedregulho como alternativa de pré-filtração em sistemas de dupla filtração*. Recife. Dissertação (mestrado) – CTG. Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO J. M. (2002). *Tratamento de Água – Tecnologia atualizada*. 4ª reimpressão. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda.

SABOGAL-PAZ, L. P.; DI BERNARDO, L. (2007). *Eficiência e risco na seleção da tecnologia de dupla filtração*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24º, 2007, Belo Horizonte.

SANTOS, J. L.; FILHO, M. L.; ARAÚJO, A. L. C. (2005). *Avaliação de tecnologias de pós-tratamento de efluentes de lagoa facultativa primária objetivando o reuso na irrigação agrícola*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23º, 2005, Campo Grande.

SENS, M. L.; FILHO, L. C. M.; DALSSASSO, R. L. (2003). *Filtração direta ascendente – Sistema hidráulico alternativo para injeção da água na interface pedregulho/areia durante as descargas de fundo intermediárias*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22º, 2003, Joinville.

SILVA, N. M.; SILVA, G. G.; SILVA, J. R. L.; NOGUEIRA, I. S. (2005). *Avaliação da filtração direta ascendente em pedregulho seguido da filtração direta para remoção de algas (Estudo de caso: Colméia-TO)*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23º, 2005, Campo Grande.

SOUZA, E. T. A.; MACHADO, L. G. T.; LIMA, R. F.; CUNHA, M. V. P. O. (2007). *Avaliação da presença do leito de contato na eficiência de sistemas de remoção de ferro das águas subterrâneas*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24º, 2007, Belo Horizonte.

VIANNA, M. R. (1992). *Hidráulica Aplicada às Estações de Tratamento de Água*. 2 ed., Belo Horizonte: Instituto de Engenharia Aplicada Editora, Cap.7, pg. 109.

WIECHETECK, G. K.; BENINI, B. D. S.; DI BERNARDO, L. (2003). *Utilização da dupla filtração com filtro ascendente de areia grossa ou de pedregulho para remoção de substâncias húmicas*. In: CONGRESSO REGIONAL DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 4º, 2003, São Paulo.

APÊNDICES

Apêndice 1

Este apêndice detalha o procedimento de cálculo para obtenção do gráfico da Figura 17, o qual representa a curva de calibração do *Jar-Test* (Gradiente de Velocidade *versus* Rotação da paleta).

Para realizar estes cálculos foi feita uma analogia entre os equipamentos de mistura rápida mecanizada e o equipamento de *Jar-Test*.

Segundo Di Bernardo e Sabogal Paz (2008), o equipamento mecanizado de mistura rápida introduz uma potência, na massa de água, que pode ser determinada da seguinte forma:

$$P = K * \rho * N^3 * D^5 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde, P: potência introduzida na água (W);

K: coeficiente que, para agitadores de paletas planas e na condição de escoamento turbulento, é sempre igual a 5;

ρ : massa específica da água = 1000 kg/m³;

N: rotação da paleta (rps);

D: diâmetro da paleta = 50 mm = 0,05 m.

Portanto, para rotação igual a 60rpm (ou 1rps), por exemplo, a potência é dada por:

$$P = 5 * 1000 * (1)^3 * (0,05)^5$$

$$\therefore P = 0,016W$$

Analogamente ao exposto acima, pode-se calcular a potência introduzida na água para qualquer valor de rotação desejada.

Segundo a ABNT (NBR12216) (1992), a potência fornecida à água por agitadores mecanizados, também pode ser calculada da seguinte forma:

$$P = \mu * G^2 * C \quad (\text{Equação 4})$$

P: potência introduzida na água (W);

μ : viscosidade dinâmica, da água (Pa.s);

G: gradiente de velocidade (s^{-1});

C: volume útil do compartimento (jarro) = 1 litro = $0,001m^3$.

Igualando-se a Equação 3 com a Equação 4, tem-se a relação direta entre o gradiente de velocidade e a rotação da paleta:

$$K * \rho * N^3 * D^5 = \mu * G^2 * C$$

$$\therefore G = \sqrt{\frac{(K * \rho * N^3 * D^5)}{(\mu * C)}} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo, portanto, a Equação 5 a responsável pela construção do gráfico reproduzido na Figura 17.

Apêndice 2

Este apêndice contém os dados obtidos nos experimentos realizados na estação piloto.

Tabela 19 – Dados dos ensaios preliminares realizados em Jar-Test para obtenção da dosagem ideal de coagulante.

			Dosagem de Al ₂ O ₃ livre desejada (mg/L)								
			5 mg/L			10 mg/L			15 mg/L		
Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)	120	Turbidez (uT)	11,6	13,7	12,2	2,8	2,94	2,9	1,84	1,44	1,58
		Turbidez Média (uT)	12,50			2,88			1,62		
	180	Turbidez (uT)	8,9	11,8	14,5	3,15	4,1	1,95	1,77	2,29	2,52
		Turbidez Média (uT)	11,73			3,07			2,19		
	240	Turbidez (uT)	13,3	15,9	12,9	4,1	3,6	2,3	2,12	1,21	1,97
		Turbidez Média (uT)	14,03			3,33			1,77		

Tabela 20 – Dados do experimento com taxa de filtração de 240 m³/m².dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 7,0. Alcalinidade = 105,75 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m ³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	88,5628	----	189	50,7	1,93	2,5	26	30,5
0,5	88,7050	284,4	192	35,8	0,66	5,0	26	31,5
1,0	88,8496	289,2	214	34	1,53	6,3	31	32,0
1,5	88,9995	299,8	204	29,1	0,98	8,5	31	33,0
2,0	89,1572	315,4	187	31,4	0,75	9,3	42	33,5
2,5	89,3152	316,0	211	30,7	0,75	9,8	57	34,0
3,0	89,4766	322,8	188	34	1,49	10,1	78	34,0
3,5	89,6225	291,8	200	32,4	1,62	10,5	90	35,0
4,0	89,7865	328,0	194	35	1,17	10,9	107	35,0
4,5	89,9483	323,6	196	30	1,12	11,6	120	35,5
5,0	90,0991	301,6	180	27,7	1,94	12,2	135	36,0
5,5	90,2657	333,2	171	31	1,04	12,8	150	36,0
6,0	90,4217	312,0	195	28,6	0,90	13,3	165	36,5
6,5	90,5794	315,4	210	35	1,27	14,1	175	36,0

Tabela 21 – Dados do experimento com taxa de filtração de 240 m³/m².dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 6,8. Alcalinidade = 102,40 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m ³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	86,7447	----	198	59,8	0,02	0,1	29	31,0
0,5	86,9237	358,0	228	45,0	0,02	0,1	42	32,0
1,0	87,0888	330,2	212	43,8	0,22	0,1	56	32,0
1,5	87,2334	289,2	200	33,8	0,64	0,1	74	33,0
2,0	87,3970	327,2	188	33,0	0,66	0,1	94	33,5
2,5	87,5418	289,6	190	37,0	0,58	0,2	114	34,0
3,0	87,7053	327,0	215	41,5	1,34	0,2	134	35,0
3,5	87,8590	307,4	214	39,8	1,00	0,2	150	35,0
4,0	88,0024	286,8	215	36,9	1,72	0,3	160	36,0
4,5	88,1548	304,8	174	33,1	3,36	0,3	170	36,0
5,0	88,3055	301,4	190	31,9	3,50	0,3	180	36,5

Tabela 22 – Dados do experimento com taxa de filtração de 180 m³/m².dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 6,9. Alcalinidade = 101,75 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m ³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	66,42	----	218	14,6	0,02	1,4	26	30
0,5	66,5614	282,8	213	12	0,02	2,2	38	31
1,0	66,6957	268,6	200	33,4	0,02	2,6	48	32
1,5	66,8306	269,8	199	54,5	0,02	3	58	32,5
2,0	66,9668	272,4	188	34,6	0,02	3,4	68	33
2,5	67,1017	269,8	213	56,2	8,75	3,8	78	33,5
3,0	67,2366	269,8	173	30,9	2,97	4,4	88	34
3,5	67,3653	257,4	208	35,3	7,75	4,6	100	34,5
4,0	67,4946	258,6	197	59,8	28,2	5,2	110	35
4,5	67,6223	255,4	186	33,1	6,37	5,5	120	35
5,0	67,7585	272,4	180	39	14,8	5,9	130	35,5
5,5	67,8746	232,2	223	66,4	16,6	6,2	140	36
6,0	67,9985	247,8	214	48,8	13,2	6,3	148	36

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
6,5	68,1222	247,4	191	48,5	16,6	6,5	158	36
7,0	68,2572	270,0	190	45,5	11,6	6,9	170	36
7,5	68,3719	229,4	228	46,5	11,9	7	181	36

Tabela 23 – Dados do experimento com taxa de filtração de 180 m³/m².dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 7,2. Alcalinidade = 107,25 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	68,7354	----	195	31,2	0,02	0,1	24	28,0
0,5	68,8532	235,6	210	20,1	0,02	0,1	33	29,0
1,0	68,9828	259,2	194	19,6	0,02	0,1	37	30,0
1,5	69,1111	256,6	192	18,8	0,02	0,1	44	30,5
2,0	69,2401	258,0	173	20,3	0,02	0,1	52	31,0
2,5	69,3793	278,4	192	21,6	0,02	0,1	60	32,0
3,0	69,4980	237,4	196	22,7	0,02	0,2	64	33,0
3,5	69,6257	255,4	208	22,2	1,4	0,2	69	33,5
4,0	69,7518	252,2	191	20,9	3,0	0,3	74	34,0
4,5	69,8872	270,8	184	23,9	5,0	0,3	78	34,5
5,0	70,0030	231,6	217	29,4	6,9	0,5	84	34,5
5,5	70,1375	269,0	198	29,5	7,3	0,5	88	34,5
6,0	70,2515	228,0	192	31,4	6,0	0,2	94	35,0
6,5	70,3760	249,0	190	29,9	7,1	0,3	98	35,0
7,0	70,5000	248,0	231	29,2	8,3	0,2	100	35,0
7,5	70,6252	250,4	217	27,8	8,3	0,1	104	35,0
8,0	70,7507	251,0	200	26,0	7,9	0,3	108	35,0
8,5	70,8740	246,6	199	27,0	8,8	0,3	115	35,0
9,0	71,0080	268,0	184	26,3	12,7	0,5	120	35,0
9,5	71,1218	227,6	200	37,9	10,5	0,5	118	35,0
10,0	71,2456	247,6	196	28,3	9,6	0,2	127	34,5
10,5	71,3790	266,8	216	30,1	12,3	0,3	130	34,5
11,0	71,4927	227,4	197	32,5	21,6	0,2	138	34,5

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
11,5	71,6180	250,6	204	44,7	25,9	0,1	148	34,5
12,0	71,7500	264,0	186	69,2	38,0	0,6	159	34,5
12,5	71,8690	238,0	188	54,6	24,9	0,5	190	35,0

Tabela 24 – Dados do experimento com taxa de filtração de 120 m³/m².dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 7,1. Alcalinidade = 99,50 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	60,4400	----	203	29,2	0,02	1,5	23	27,0
0,5	60,5106	141,2	204	22,6	0,02	1,5	28	27,5
1,0	60,5968	172,4	181	16,8	0,02	2	38	28,0
1,5	60,6720	150,4	222	17,8	0,02	2	43	29,0
2,0	60,7518	159,6	207	17,6	0,02	2,3	49	30,0
2,5	60,8300	156,4	193	23,5	0,02	2,3	55	31,0
3,0	60,9055	151,0	170	25,3	0,02	2,8	60	31,5
3,5	60,9815	152,0	190	38,7	0,02	2,8	67	32,0
4,0	61,0556	148,2	207	39,3	0,02	3	70	32,5
4,5	61,1315	151,8	191	31,6	0,02	3,4	77	33,0
5,0	61,2170	171,0	181	44,9	0,3	3	84	33,0
5,5	61,2830	132,0	218	44,8	0,31	3,7	92	33,0
6,0	61,3680	170,0	197	45,7	0,48	3,5	96	33,5
6,5	61,4339	131,8	175	23,9	0,55	4,2	100	34,0
7,0	61,5079	148,0	225	40,4	0,74	4,2	100	34,0
7,5	61,5800	144,2	194	65,1	0,86	4,3	90	34,5
8,0	61,6533	146,6	236	54,6	1,14	4,2	96	35,0
8,5	61,7381	169,6	207	54,7	1,05	4,4	98	34,5
9,0	61,8016	127,0	173	60,5	1,1	3,5	101	34,5
9,5	61,8753	147,4	156	66,5	1,12	4,2	107	35,0
10,0	61,9593	168,0	226	45,6	1,28	4,5	112	35,0
10,5	62,0239	129,2	190	74,2	1,35	4,2	110	35,0
11,0	62,1077	167,6	189	46,5	1,3	4	110	35,0

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
11,5	62,1712	127,0	201	56,4	1,65	4,5	117	35,0
12,0	62,2432	144,0	191	35,6	1,88	4	124	35,0
12,5	62,3200	153,6	181	45,1	1,9	4,5	139	35,0
13,0	62,3957	151,4	244	49,6	2,3	5,2	148	35,0
13,5	62,4738	156,2	183	63	2,2	4,6	161	35,0
14,0	62,5425	137,4	167	89,3	2,44	5	173	36,0

Tabela 25 – Dados do experimento com taxa de filtração de 120 m³/m².dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 7,2. Alcalinidade = 103,25 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	62,8624	----	169	32,7	0,63	0	15	29,5
0,5	62,9400	155,2	183	30,7	0,44	0	19	30,5
1,0	63,0295	179,0	180	30,6	0,31	0,1	24	31,0
1,5	63,1093	159,6	203	35,8	0,02	0,1	38	32,0
2,0	63,1871	155,6	212	38,7	0,02	0,1	50	33,0
2,5	63,2541	134,0	210	38,2	0,02	0,1	60	33,5
3,0	63,3305	152,8	180	35,6	0,02	0,1	70	33,5
3,5	63,4070	153,0	200	35,1	0,02	0	82	33,5
4,0	63,4848	155,6	207	35,6	0,02	0	92	33,5
4,5	63,5693	169,0	198	35,4	0,02	0	104	34,0
5,0	63,6466	154,6	193	31,2	0,02	0	111	34,0
5,5	63,7138	134,4	191	27,9	0,13	0	104	34,5
6,0	63,7995	171,4	190	22,7	0,19	0,2	106	35,0
6,5	63,8640	129,0	198	20,5	0,15	0	110	35,0
7,0	63,9342	140,4	194	20,8	0,22	0,1	112	35,0
7,5	64,0267	185,0	190	16,4	0,29	0,2	114	35,0
8,0	64,0929	132,4	170	16,1	0,38	0,2	116	35,0
8,5	64,1760	166,2	193	19,1	0,44	0,2	117	35,0
9,0	64,2407	129,4	197	15,3	0,7	0,2	116	35,0
9,5	64,3157	150,0	185	15,7	0,65	0,2	116	35,0

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
10,0	64,3905	149,6	194	20,6	0,87	0,2	116	35,0
10,5	64,4650	149,0	189	20	0,9	0,2	116	35,0
11,0	64,5400	150,0	185	12,8	0,82	0,2	115	35,0
11,5	64,6200	160,0	215	13,4	0,71	0,2	118	35,0
12,0	64,6938	147,6	238	10,4	0,9	0,2	123	35,5
12,5	64,7700	152,4	219	11,8	0,97	0,2	124	35,5
13,0	64,8490	158,0	190	12,3	1,06	0,3	122	36,0
13,5	64,9310	164,0	198	14,4	1,09	0,3	128	36,0
14,0	64,9800	98,0	197	16,6	1,13	0,3	132	36,0
14,5	65,0600	160,0	205	17,6	1,17	0,4	131	36,0
15,0	65,1365	153,0	225	13,3	1,21	0,4	130	36,0
15,5	65,2200	167,0	220	15,1	1,25	0,4	133	36,0
16,0	65,2900	140,0	179	14,7	1,22	0,4	135	36,5
16,5	65,3630	146,0	220	17,3	1,15	0,4	138	36,5
17,0	65,4419	157,8	206	38,1	1,31	0,4	145	36,5
17,5	65,5132	142,6	208	32,3	1,33	0,5	147	36,5
18,0	65,5979	169,4	177	29,1	1,39	0,5	148	36,5
18,5	65,6809	166,0	180	28,6	1,44	0,5	152	36,5
19,0	65,7512	140,6	152	29,3	1,5	0,5	155	36,5
19,5	65,8294	156,4	198	28,4	1,6	0,5	157	36,5
20,0	65,9000	141,2	188	36,2	1,57	0,6	160	36,5
20,5	65,9824	164,8	202	33,5	1,66	0,6	175	36,5
21,0	66,0600	155,2	205	59,6	1,79	0,6	193	36,5

Apêndice 3

Este apêndice contém os dados obtidos na réplica dos experimentos realizados na estação piloto.

Tabela 26 – Réplica. Dados dos ensaios preliminares realizados em Jar-Test para obtenção da dosagem ideal de coagulante.

			Dosagem de Al ₂ O ₃ livre desejada (mg/L)								
			5 mg/L			10 mg/L			15 mg/L		
Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)	120	Turbidez (uT)	14,4	12,7	16,8	4,2	3,6	5,1	2,9	3,1	2,2
		Turbidez Média (uT)	14,6			4,3			2,7		
	180	Turbidez (uT)	7,4	8,8	11,2	2,55	3,7	4,75	1,55	1,89	2,45
		Turbidez Média (uT)	9,1			3,6			1,9		
	240	Turbidez (uT)	12,4	13,9	14,2	3,8	4,3	2,7	3,4	1,2	1,5
		Turbidez Média (uT)	13,5			3,6			2,0		

Tabela 27 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 240 m³/m².dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 7,2. Alcalinidade = 102,5 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m ³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	71,9321	----	185	16	0,59	2	35	29,0
0,5	72,0966	329,0	196	17,7	0,02	3,2	45	30,0
1,0	72,2502	307,2	197	22,1	0,02	4,1	58	31,0
1,5	72,4158	331,2	220	35,1	1,22	4,5	70	31,0
2,0	72,5802	328,8	198	31,7	5,68	5,1	89	32,0
2,5	72,7430	325,6	190	17,7	7,89	5,7	107	32,0
3,0	72,9040	322,0	180	19,8	8,78	6,2	122	32,5
3,5	73,0646	321,2	205	22,7	9,38	7,2	138	33,0
4,0	73,2230	316,8	185	26,2	11	7,8	150	33,0
4,5	73,3823	318,6	194	25,3	10	8,2	160	34,0
5,0	73,5492	333,8	192	26,6	8,86	9	170	34,0
5,5	73,7000	301,6	195	29,5	11,8	9,2	180	34,5
6,0	73,8517	303,4	190	31,8	13	9,5	190	35,0

Tabela 28 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 240 m³/m².dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 6,9. Alcalinidade = 104,40 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m ³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	75,6200	----	167	31,3	0,02	0,3	32	28,0
0,5	75,7705	301,0	170	31,8	0,02	0,3	48	28,5
1,0	75,9254	309,8	199	34,3	0,02	0,3	55	29,0
1,5	76,0763	301,8	208	34,4	10	0,3	63	30,0
2,0	76,2383	324,0	169	32,6	12,6	0,4	79	30,5
2,5	76,3802	283,8	191	32,8	14,8	0,4	91	31,0
3,0	76,5312	302,0	190	31,8	15,3	0,4	114	31,5
3,5	76,6823	302,2	225	29,2	12,9	0,4	128	32,0
4,0	76,8325	300,4	202	26,7	13,1	0,4	142	33,0
4,5	76,9804	295,8	190	24,7	11,4	0,4	166	33,0
5,0	77,1387	316,6	205	25,7	12,2	0,5	175	33,5
5,5	77,2861	294,8	195	31	12	0,5	188	34,0

Tabela 29 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 180 m³/m².dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 7,3. Alcalinidade = 99,5 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m ³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	81,4600	----	205	11,4	0,02	1,3	24	30,0
0,5	81,5904	260,8	185	18,9	0,02	2,4	32	30,5
1,0	81,7288	276,8	213	29	0,02	3	38	31,0
1,5	81,8563	255,0	213	42	0,02	3,5	44	32,0
2,0	81,9880	263,4	202	61	0,02	3,6	55	33,0
2,5	82,1180	260,0	185	83	0,02	3,7	58	33,5
3,0	82,2480	260,0	195	78	3,15	3,8	70	34,0
3,5	82,3670	238,0	201	84	21,6	4,3	77	34,5
4,0	82,4937	253,4	204	87	45,9	5,4	80	35,0
4,5	82,6180	248,6	211	92	44,3	5,5	89	35,5
5,0	82,7560	276,0	186	101	46	5,6	104	36,0
5,5	82,8810	250,0	204	109	46,4	5,7	113	36,0

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
6,0	82,9962	230,4	196	120	46,5	5,8	125	36,5
6,5	83,1210	249,6	199	119	47	5,9	138	36,5
7,0	83,2444	246,8	191	111	43,6	6	152	37,0
7,5	83,3714	254,0	189	123	48,9	6,3	168	37,0
8,0	83,4901	237,4	173	138	53,5	6,5	181	37,0

Tabela 30 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 180 m³/m².dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 7,1. Alcalinidade = 106,55 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	77,9964	----	183	18,7	0,02	0,2	27	31,0
0,5	78,1164	240,0	190	16	0,02	0,2	37	31,0
1,0	78,2370	241,2	191	18	0,02	0,2	47	32,0
1,5	78,3599	245,8	196	18,8	0,02	0,1	57	32,5
2,0	78,4755	231,2	214	19,5	0,02	0,1	62	33,0
2,5	78,6087	266,4	195	16,5	0,02	0,1	70	33,5
3,0	78,7205	223,6	200	23	1,23	0,2	77	34,0
3,5	78,8425	244,0	216	22,8	3,85	0,3	84	34,0
4,0	78,9650	245,0	196	26,7	9,34	0,3	91	35,0
4,5	79,0856	241,2	188	29	12,1	0,3	97	35,5
5,0	79,2050	238,8	232	28,3	11,3	0,3	102	35,5
5,5	79,3239	237,8	205	30,1	11,7	0,5	105	36,0
6,0	79,4419	236,0	198	30,9	12,7	0,4	108	36,5
6,5	79,5695	255,2	215	38,8	12,6	0,3	111	37,0
7,0	79,6873	235,6	195	43,8	13,8	0,2	114	37,0
7,5	79,8052	235,8	204	41,5	16,8	0,2	121	36,5
8,0	79,9130	215,6	192	39	16,5	0,3	130	36,0
8,5	80,0335	241,0	177	35,5	22,2	0,3	137	36,0
9,0	80,1550	243,0	188	36,1	20,9	0,3	143	36,0
9,5	80,2749	239,8	206	38,3	23	0,3	152	36,5
10,0	80,4019	254,0	202	34,9	24,4	0,3	156	36,5

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
10,5	80,5256	247,4	210	35	29,6	0,2	167	36,5
11,0	80,6489	246,6	215	38,9	32,1	0,2	174	37,0

Tabela 31 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 120 m³/m².dia e com leito filtrante de Pedregulho. pH = 7,2. Alcalinidade = 98,25 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	80,0803	----	202	29,8	0,02	1,2	16	32,0
0,5	80,1525	144,4	202	11,5	0,02	2,5	28	32,5
1,0	80,2306	156,2	205	13,9	0,02	2,8	31	33,0
1,5	80,3168	172,4	187	13,6	0,02	3,1	35	33,5
2,0	80,3839	134,2	207	16,1	0,02	3,2	39	34,0
2,5	80,4668	165,8	217	19,2	0,02	3,2	45	34,5
3,0	80,5444	155,2	196	20,6	0,02	3,4	48	35,0
3,5	80,6124	136,0	196	22,6	0,02	3,6	51	35,5
4,0	80,6980	171,2	220	22,4	0,02	3,7	53	36,0
4,5	80,7630	130,0	229	22,6	0,02	3,8	55	36,5
5,0	80,8466	167,2	210	26,7	0,02	3,8	57	37,0
5,5	80,9116	130,0	201	29,1	0,02	3,8	58	37,5
6,0	80,9851	147,0	194	40,2	0,02	3,8	61	38,0
6,5	81,0690	167,8	187	35,7	0,02	3,8	63	38,5
7,0	81,1314	124,8	210	41,1	0,02	3,8	65	39,0
7,5	81,2047	146,6	220	48,2	0,02	3,8	66	39,0
8,0	81,2880	166,6	195	50,5	0,02	3,6	67	39,0
8,5	81,3514	126,8	229	34,9	0,02	3,6	68	39,0
9,0	81,4243	145,8	230	39,8	0,08	3,5	69	39,0
9,5	81,4998	151,0	210	33,9	0,06	3,5	71	39,0
10,0	81,5723	145,0	212	38,9	0,1	3,7	75	39,0
10,5	81,6439	143,2	199	37,6	0,09	3,9	79	39,0
11,0	81,7152	142,6	198	36,6	0,15	3,7	81	39,0
11,5	81,7874	144,4	194	41,1	0,12	3,8	84	39,0

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
12,0	81,8635	152,2	203	42,3	0,17	3,9	89	39,0
12,5	81,9342	141,4	208	39,8	0,3	4,1	90	39,5
13,0	82,0177	167,0	209	38,9	0,35	4	95	39,5
13,5	82,0881	140,8	210	38,6	0,38	4,2	102	39,5
14,0	82,1599	143,6	205	36,6	0,3	4,4	108	39,5
14,5	82,2315	143,2	201	44,7	0,44	4,5	114	39,5
15,0	82,3149	166,8	188	38,5	0,66	5	159	39,0
15,5	82,3939	158,0	185	37,9	0,64	5,2	166	39,0

Tabela 32 – Réplica. Dados do experimento com taxa de filtração de 120 m³/m².dia e com leito filtrante de Eletroduto. pH = 7,2. Alcalinidade = 102,25 mg CaCO₃/L.

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
0,0	83,5477	----	192	20,2	0,02	0	13	28,0
0,5	83,6131	130,8	226	11,1	0,02	0	18	29,0
1,0	83,6989	171,6	202	10,8	0,02	0,1	22	29,5
1,5	83,7716	145,4	207	8,64	0,02	0,1	24	30,0
2,0	83,8452	147,2	198	8,8	0,02	0,1	27	31,0
2,5	83,9390	187,6	191	8,3	0,02	0,1	31	32,0
3,0	84,0218	165,6	194	8,5	0,02	0,1	33	33,0
3,5	84,0955	147,4	196	6,82	0,02	0,1	35	34,0
4,0	84,1693	147,6	205	6,9	0,02	0,1	38	34,0
4,5	84,2409	143,2	226	6,66	0,02	0,1	39	35,0
5,0	84,3187	155,6	207	5,5	0,02	0,2	40	35,5
5,5	84,3902	143,0	196	6,51	0,02	0,2	41	36,0
6,0	84,4728	165,2	198	9	0,02	0,2	45	37,0
6,5	84,5440	142,4	200	7,03	0,02	0,2	47	37,0
7,0	84,6254	162,8	213	4,9	0,02	0,2	49	37,0
7,5	84,6975	144,2	220	6,84	0,02	0,2	49	37,5
8,0	84,7732	151,4	209	9,63	0,02	0,2	50	37,5
8,5	84,8466	146,8	211	10,5	0,02	0,2	52	37,5
9,0	84,9284	163,6	223	9,96	0,02	0,2	54	37,5

Duração da Carreira (horas)	Leitura do Hidrômetro		Turbidez (uT)			Perda de Carga		Temperatura (°C)
	Leitura (m³)	Vazão (L/h)	Água Bruta	Após FA	Após FD	Após FA (cm.ca)	Após FD (mmHg)	
9,5	84,9997	142,6	210	9,45	0,02	0,2	55	38,0
10,0	85,0794	159,4	228	9,8	0,02	0,2	59	38,0
10,5	85,1555	152,2	199	10,2	0,02	0,3	58	38,0
11,0	85,2279	144,8	202	10,1	0,02	0,3	64	38,5
11,5	85,3017	147,6	198	9,93	0,02	0,3	70	38,5
12,0	85,3800	156,6	190	10,5	0,02	0,3	73	38,0
12,5	85,4623	164,6	195	11,3	0,02	0,4	75	38,0
13,0	85,5432	161,8	197	11	0,02	0,4	78	38,0
13,5	85,6228	159,2	187	11,5	0,44	0,4	79	38,0
14,0	85,6994	153,2	195	11,9	0,6	0,4	83	38,0
14,5	85,7784	158,0	202	12,2	0,57	0,4	89	38,0
15,0	85,8599	163,0	206	12,8	0,35	0,4	95	37,5
15,5	85,9423	164,8	198	12,5	0,7	0,4	104	37,5
16,0	86,0215	158,4	205	12,1	0,4	0,4	110	37,5
16,5	86,0993	155,6	202	13,7	0,39	0,4	116	37,5
17,0	86,1794	160,2	194	14,9	0,47	0,4	129	37,5
17,5	86,2579	157,0	192	14,6	0,73	0,5	134	37,5
18,0	86,3329	150,0	204	14,9	0,71	0,5	138	37,0
18,5	86,4144	163,0	202	15,5	0,77	0,5	140	37,0
19,0	86,4998	170,8	209	16	0,83	0,6	144	37,0
19,5	86,5849	170,2	211	15,6	0,81	0,6	148	37,0
20,0	86,6599	150,0	225	16,9	0,8	0,6	153	37,0
20,5	86,7369	154,0	231	16,4	0,68	0,7	158	37,0
21,0	86,8147	155,6	207	17,1	0,55	0,7	161	37,0
21,5	86,8869	144,4	209	16,9	0,8	0,7	168	37,0

Apêndice 4

Seguem abaixo os dados detalhados levantados nas lavagens dos filtros ascendentes.

Tabela 33 – Dados detalhados da operação de lavagem dos filtros ascendentes para análise de eficiência de cada meio filtrante com relação ao gasto de água limpa para este fim.

		Pedregulho			Eletroduto		
Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)		120	180	240	120	180	240
		Turbidez (uT)					
Tempo de Lavagem (s)	30	424	59,5	75,3	>1100	>1100	>1100
	60	55,2	21,7	15,3	280	132	113
	90	28,9	15,1	2,87	92	54,4	47,7
	120	20,2	9,91	32,8	38,3	39,8	27,4
	150	23,3	12,1	45	24,1	35,7	24,4
	180	239	13,7	72,9	16,9	17,9	29,5
	210	23,7	19,6	33,3	30,9	19,4	30,1
	240	27,9	15,3	17,7	22,4	23,6	29,7
	270	13	6,17	11,8	13,5	17,3	34,1
	300	12,7	14,5	1,26	17,3	21,4	23,3
Volume da Descarga de Fundo Inicial (Litros)		26,2	26,5	26,2	45,9	49,5	48,4
Tempo para a lavagem atingir valor igual ou inferior a 50 uT na água de descarte (s)		90	60	60	120	120	90
Volume Consumido na Lavagem (Litros)		82,5	55	55	110	110	82,5
Volume Total Gasto (Litros)		108,7	81,5	81,2	155,9	159,5	130,9
Volume Total produzido na Carreira (Litros)		2.102,5	1.951,9	2.016,6	3.197,6	3.133,6	1.560,8
Gasto (%)		5,2%	4,2%	4,0%	4,9%	5,1%	8,4%

Tabela 34 – Réplica. Dados detalhados da operação de lavagem dos filtros ascendentes para análise de eficiência de cada meio filtrante com relação ao gasto de água limpa para este fim.

		Pedregulho			Eletroduto		
Taxa de Filtração (m ³ /m ² .dia)		120	180	240	120	180	240
		Turbidez (uT)					
Tempo de Lavagem (s)	30	97,5	128	155	>1100	>1100	>1100
	60	18,5	15	25,1	50	123	152
	90	10,1	11,2	15,6	25,2	63,2	40,1
	120	14,4	12,6	11,7	13,5	40,1	27,8
	150	13	10	18	12,9	42,6	24,3
	180	6	10,4	9,78	11,4	39,5	45,4
	210	9,38	15,9	11,6	11,4	17,7	18,3
	240	12,8	10,4	20,1	18,5	21,2	23,6
	270	12,4	11,2	13,8	15,1	20,7	21,9
	300	12,7	9,85	14,5	16,7	15,2	20,7
Volume da Descarga de Fundo Inicial (Litros)		23,4	20,0	25,7	46,8	51,0	50,0
Tempo para a lavagem atingir valor igual ou inferior a 50 uT na água de descarte (s)		60	60	60	60	120	90
Volume Consumido na Lavagem (Litros)		55	55	55	55	110	82,5
Volume Total Gasto (Litros)		78,4	75,0	80,7	101,8	161,0	132,5
Volume Total produzido na Carreira (Litros)		2.313,6	2.030,1	1.919,6	3.339,2	2.652,5	1.666,1
Gasto (%)		3,4%	3,7%	4,2%	3,0%	6,1%	8,0%