

Juliana Marques Schöntag

**ESFERAS DE POLIESTIRENO COMO ELEMENTO
FILTRANTE EM FILTRAÇÃO RÁPIDA DESCENDENTE.**

Tese submetido(a) ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Doutora em Engenharia
Ambiental
Orientador: Prof. Dr. Maurício Luiz
Sens

Florianópolis,
Março de 2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schöntag, Juliana Marques

ESFERAS DE POLIESTIRENO COMO ELEMENTO FILTRANTE EM
FILTRAÇÃO RÁPIDA DESCENDENTE. / Juliana Marques Schöntag ;
orientador, Maurício Luiz Sens - Florianópolis, SC, 2015.
280 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Poliestireno. 3. meio
filtrante granular. 4. retrolavagem. 5. produção efetiva.
I. Sens, Maurício Luiz . II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.
III. Título.

Juliana Marques Schöntag

**ESFERAS DE POLIESTIRENO COMO ELEMENTO
FILTRANTE EM FILTRAÇÃO RÁPIDA DESCENDENTE.**

Esta Tese foi julgado(a) adequado(a) para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Ambiental, e aprovad(o)a em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental

Florianópolis, 13 de Março de 2015.

Prof. William Gerson Matias, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.º Maurício Luiz Sens, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Renato Machado, Dr.
Pontifícia Universidade Católica do Rio
Grande do Sul

Prof.º Luiz Antônio Daniel, Dr.
Universidade de São Paulo

Prof. Marcelo De Julio, Dr.
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Prof.º Ramon Lucas Dalsasso, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profª. Maria Eliza Nagel Hassemer, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado ao meu esposo, aos meus queridos pais e aos
meus colegas do LAPOÁ

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus. Sem ele nada haveria.

Agradeço ao meu esposo Michel Muza, sem dúvida um companheiro. Aos meus pais que mesmo de longe me apoiam sempre.

Agradeço ao professor Maurício Sens pela oportunidade concedida e confiança depositada.

Aos colegas e amigos do LAPOA: Fernando Hymnô, Marina Tateoka, Victor Jangada, Luís Romero, Alcione Almeida, Thyara Nonato, Tiago Guedes, Renata Mondardo, Márcio Cardoso, Laura Muller e em especial ao Bruno Pizzolatti pela ajuda em momentos importantes.

Aos Bolsistas que passaram pelo Laboratório: Filipe Moreira, Agnes Ghisi, Fernanda Poersh, Fernanda Facin, Aloísio Stüpp, Luís Paulo Campos (Gaúcho), Renata Saviato, Carolina Gemeli, Márcio Ishii (Japa) pela cooperação.

As agências de fomento Cnpq, FINEP e PRONEX por financiarem a pesquisa.

Ao programa de Pós-graduação, em particular ao chefe de expediente Lucas P. Keunecke sempre gentil e disposto a ajudar.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desse trabalho.

E por último (mas não menos importante), à Cora Coraline, alegria da mamãe.

“Se os fatos não se encaixam na teoria, modifique os fatos.”
(Albert Einstein)

RESUMO

Problemas constantes encontrados em sistema de tratamento e distribuição de água e o crescente aumento do custo de produção, devido à degradação da qualidade da água disponível vêm motivando pesquisas por novas soluções em tratamento e obtenção de maiores produções efetivas. Com esse intuito, esse trabalho propôs o estudo de um material leve e reutilizável. As esferas poliméricas de poliestireno apresentaram-se como uma alternativa, pois além de serem leves e inertes têm características similares a de uma areia grossa e estão disponíveis comercialmente. Primeiramente, caracterizou-se esse material que apresentou granulometria entre 0,5 e 1,2 mm, diâmetro específico de 0,68 mm, coeficiente de uniformidade de 1,36 e massa específica de 1046 kg/m³. Após a caracterização desse material, simulou-se matematicamente a utilização como elemento filtrante, em aspectos como o coeficiente de permeabilidade do leito filtrante e especialmente parâmetros pertinentes à retrolavagem. Os parâmetros simulados demonstraram que, apesar de possível, a utilização desse material necessita de suporte (como a aplicação do ar) para atingir uma quantidade satisfatória de cisalhamento com baixas velocidades e elevado grau de expansão durante a retrolavagem.

A qualidade da água produzida pelo filtro com as esferas de poliestireno foi bastante similar ao filtro de dupla camada de areia e antracito, contudo a produção efetiva, não apresentou grande superioridade, mesmo com o sistema otimizado. Apesar disso, o material demonstrou potencialidades em gerar uma economia ao sistema de tratamento, que ainda precisam ser melhor exploradas.

Verificou-se através de ensaios experimentais que o índice de filtração manteve-se constante ao longo da filtração e a ação da profundidade atingida pelo leito ficou em torno de 40 cm, quando utilizada como fonte de água bruta o manancial Lagoa do Peri. Além desses fatores foi avaliada a capacidade adsortiva desse material, utilizando como adsorvato o azul de metileno. Esse material demonstrou baixa capacidade adsortiva devido ao baixo grau de rugosidade da sua superfície, a ação adsortiva é física, não espontânea, envolvendo fracas forças de atração.

Palavras-chave: *Poliestireno, meio filtrante granular, filtros rápidos descendentes, retrolavagem, qualidade da água, produção efetiva.*

ABSTRACT

Constant troubles in treatment system and water supply and the increasing cost of production due to deterioration of available quality water come motivating research for new solutions in treatment and higher effective production. This paper proposed the studies in a lightweight, reusable material. The granules of polystyrene were presented as an alternative, because are light, inerts and are assimilares to sand characteristics and were commercially available. First, this material was characterized and presented a grain size between 0.5 and 1.2 mm, specific diameter of 0.68 mm and specific mass of 1046 kg / m³. Based on the extracted characteristics were simulated mathematically using this material as a media filter, besides of permeability coefficient, especially parameters to backwash, which can be demonstrate that special care would need to achieve a satisfactory backwash, showing low shear rates and a high degree of expansion. Through of experimental analysis were found that the filtration rate remained constant throughout the filtration, and the bed depth achieved 40 cm, when used as raw water Peri Lagoon source. In addition was evaluated adsorptive capacity of the material, using as the adsorbate Methylene blue. This material showed low adsorption capacity due to the low roughness, the adsorptive action is physical, not spontaneous involving weak forces of attraction.

The quality of the water produced by the filter to the polystyrene granules was very similar to the dual filter layer of sand and anthracite, but the effective production did not show significative superiority, even with optimized system. Nevertheless, the material demonstrated potential to generate savings to the treatment system, which still need to be better exploited.

Keywords: *Polystyrene, Granular media filter, Radip down-flow filters, Water quality, Backwashing, Effective production.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de Filtração (DI BERNARDO & DANTAS, 2005)	35
Figura 2 - Escala de comparação visual da forma dos grãos e valores do coeficiente de esfericidade (DI BERNARDO & DANTAS 2005)	41
Figura 3 - Esquema do comportamento da perda de carga em função da velocidade ascensional (DI BERNARDO & DANTAS, 2005).	54
Figura 4 - Forças sobre a partícula durante a fluidificação.	55
Figura 5 - Esferas de poliestireno (PS).	71
Figura 6 - (a) Coluna acrílica e câmara de nível com piezômetros que indicavam a perda de carga durante os ensaios de expansão (b) camada suporte do material sob análise.....	76
Figura 7 - Esquema da instalação dos Pilotos de filtração direta	78
Figura 8 - Esquema de funcionamento do sistema piloto de filtração direta dos filtros de areia/antracito e esferas de poliestireno.	83
Figura 9 - Disposição dos piezômetros ao longo dos filtros	88
Figura 10 - Esquema do filtro PS. (a) disposição dos piezômetros; (b) espessura do leito.	90
Figura 11 – Curva Granulométrica média das esferas de poliestireno (PS)	92
Figura 12 – Curva Granulométrica média da Areia	94
Figura 13 - Curva Granulométrica média do Antracito	95
Figura 14 – Curva do pH _{zpc} em KCl 0,1N após 24 horas de contato a 20°C e agitação de constante de 250 rpm para as esferas de poliestireno.....	96
Figura 15 – Espectro de absorção da solução de 3,0 mg/L de azul de metileno com pH 8 e meio iônico de 0,1 N de KCl/NaOH.....	97
Figura 16 – Curva analítica para o azul de metileno com pH 8 nas concentrações de 0,1; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5 mg/L em meio iônico de 0,1 N KCl/NaOH	98
Figura 17 - Diagrama <i>Jar-test</i> , para temperaturas variando entre 15,5 a 24°C. Indica a dosagem de PAC (ou Al ⁺³), a variação do pH da água coagulada e a turbidez da água após filtração em papel filtro Whatman 40.	99
Figura 18 - Resultado experimental da perda de carga de acordo com a velocidade superficial pelo modelo de WEN e YU (1966).	102
Figura 19 – Ensaio de expansão de PS (expansão (%) x velocidade (m/h).....	103
Figura 20 – Porosidade calculada a partir do grau de expansão do leito versus a velocidade superficial dos materiais com diferentes massas específicas.	105
Figura 21 – Variação da tensão hidrodinâmica de cisalhamento em função de diferentes porosidades do meio filtrante.	106
Figura 22 – Gradiente de velocidade vs. Fração de sólidos	107
Figura 23 – Coeficiente de dissipação da turbulência vs. Fração de sólidos... ..	108
Figura 24 – Parâmetros de turbulência vs. Fração de sólidos	109
Figura 25 – Curva $\Delta H/L$ em diferentes estágios de porosidade (colmatação) e seus coeficientes de permeabilidade.	110
Figura 26 - Comportamento médio da perda de carga no meio filtrante (cm) e turbidez (uT) durante a carreira de filtração.	114

Figura 27 - Comportamento das frentes de impurezas ao longo da carreira de filtração.....	115
Figura 28 – Comportamento do IFI (Ives,1978) em relação à perda de carga, ao longo de toda a carreira de filtração.	117
Figura 29 – Quantidade adsorvida de azul de metileno <i>versus</i> tempo para as esferas de poliestireno, 20°C, em cinco valores de concentrações iniciais: 0,5; 1,5; 3; 4; 5 mg/L.....	120
Figura 30 – Modelos cinéticos aplicados aos dados do azul de metileno nas esferas de poliestireno, 20°C, em cinco valores de concentrações iniciais: 0,5; 1,5; 3; 4; 5 mg/L (a) pseudo-primeira-dem; (b) pseudo-segunda-ordem.	120
Figura 31 – Quantidade adsorvida de azul de metileno nas esferas de poliestireno para três diferentes temperaturas; percentagem de remoção.	122
Figura 32 – Modelo de pseudo-segunda-ordem para três temperaturas – esferas de poliestireno: 15; 20; 25 °C.....	123
Figura 33 – Gráfico de Arrhenius para a adsorção do AM nas esferas poliméricas de poliestireno.	124
Figura 34 – Gráfico de Eyring para adsorção nas esferas de poliestireno.	124
Figura 35 – Quantidade adsorvida no equilíbrio e a percentagem de remoção <i>versus</i> concentração inicial, 20°C, para as esferas de poliestireno.	125
Figura 36 – Isotermas de adsorção de Lagmuir do AM nas esferas de poliestireno.	126
Figura 37 – Gráfico da equação de Van't Hoff para as esferas de poliestireno.	127
Figura 38 - Imagens das esferas de poliestireno antes de serem utilizadas (limpas) ampliadas 100, 250,1500 e 5000 vezes.	128
Figura 39 - Imagens das esferas de poliestireno reutilizadas (retrolavadas) ampliadas 100, 250, 500,1500 e 5000 vezes.....	128
Figura 40 - Imagens das esferas de poliestireno utilizadas (sujas) ampliadas 100, 250, 1500 e 5000 vezes.....	129
Figura 41 – Detalhe da imagem da esfera de poliestireno utilizada (suja) ampliado 1500 vezes	129
Figura 42 - Média e desvio das perdas de carga dos filtros PS e A+A durante as carreiras de filtração.	134
Figura 43 – Ação da profundidade no filtro PS (o percentual indica a duração da carreira de filtração).	135
Figura 44 – Ação da profundidade no filtro A+A (o percentual indica a duração da carreira de filtração).....	135
Figura 45 – Média e desvio padrão da tubidez e cor aparente no período de recuperação de dez carreiras de filtração para os filtros PS e A+A.	136
Figura 46 - Temperatura média e desvio padrão das amostras de água bruta e filtradas pelo filtro A+A e PS durante a carreira de filtração e Variação média e desvio padrão do pH das amostras de água bruta e filtradas pelos filtros A+A e PS durante a carreira de filtração.	138
Figura 47 - Percentual médio de remoção da turbidez das águas filtradas pelos filtros A+A e PS durante as carreiras de filtração.....	139

Figura 48 - Percentual médio de remoção da cor verdadeira das águas filtradas pelos filtros A+A e PS durante as carreiras de filtração.	139
Figura 49 - Percentual médio de remoção das células das cianobactérias <i>cylindrospermopsis raciborskii</i> das águas filtradas pelos filtros A+A e PS em diferentes carreiras de filtração.	140
Figura 50 - Resultado médio dos sólidos totais dissolvidos e condutividade da água bruta e filtradas pelos filtros A+A e PS durante a carreira de filtração. .	141
Figura 51 – Residual de alumínio das águas filtradas pelos filtros A+A e PS obtidos em 9 diferentes carreiras de filtração (valores absolutos).	142
Figura 52 - Curva de turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro de dupla camada de antracito e areia (valores médios e desvio padrão de uma amostra de dez carreiras).....	143
Figura 53 – Partículas aderidas aos grãos de PS que sedimentaram durante o processo de retrolavagem, quando a velocidade superficial era de 6,6 m/h (0,11 m/min).	144
Figura 54 – Segregação das partículas e grãos de PS, após a introdução de ar, quando a velocidade superficial era de 6,6 m/h (0,11 m/min), quando a forças de arraste foram insuficientes.	145
Figura 55 - Curva de turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro com esferas de poliestireno, com expansão de 200% em 10 min, ou seja, 22,8 m/h (0,38 m/min). (valores médios e desvio padrão de uma amostra de dez carreiras).	145
Figura 56 – Média e desvio padrão das perdas de carga do filtro PS e A+A durante carreiras de filtração.....	150
Figura 57 - Média e desvio padrão da Turbidez e Cor Aparente no período de recuperação de dez carreiras de filtração para os filtros A+A e PS.	151
Figura 58 - Curva de turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro de dupla camada de antracito e areia (valores médios e desvio padrão de uma amostra de dez carreiras).....	152
Figura 59 - Curva de turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro com esferas de poliestireno, com expansão de 100, 150 e 200% em 20 minutos de retrolavagem com água, ou seja, 12,8, 17 e 22,8 m/h respectivamente (valores médios e desvio padrão de dez carreiras).....	154
Figura 60 - Curvas médias de expansão (%) no tempo (min) para de PS para as velocidades de 19,1 e 29,3 m/h (três análises realizadas).	155
Figura 61 - Curva de turbidez da água de lavagem do filtro com esferas de poliestireno, com expansão de 100 e 200% em 5 min de retrolavagem com água, ou seja, 19,1 e 29,3 m/h respectivamente. (valores médios e desvio padrão de uma amostra de 3 carreiras).	156
Figura 62 - (a) Desenho do sistema de entrada de água lateral; (b) Fotografia do aspersor de água giratório, ambos instalados a 21 cm abaixo do topo do leito filtrante.	157
Figura 63 - (a) Curva de expansão em um tempo de 5 minutos, com uma velocidade de 21,4 m/h, no leito de 68 cm (valores médios e desvio padrão de uma amostra de 3 aferições).	158

Figura 64 - Turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro com esferas de poliestireno, com expansão de 182% em 5 minutos de retrolavagem com água, ou seja, 21,4 m/h. (valores médios e desvio padrão de uma amostra de 3 lavagens).....	159
Figura 65 - Comportamento da perda de carga e turbidez da água filtrada pelo filtro PS (com 68 cm) ao longo da carreira de filtração.....	160
Figura 66 - Curva da perda de carga ao longo da carreira de filtração, das diferentes espessuras de leito PS, com 97 cm e 68 cm.	161
Figura 67 – Expansão de 50% do leito PS (9,7 m/h) em 5 min (valores médios e desvio padrão de 3 aferições).	161
Figura 68 - Turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro com esferas de poliestireno, com expansão de 50% em 5 min de retrolavagem com água, ou seja, 9,7 m/h (valores médios e desvio padrão de uma amostra de 5 lavagens).	162
Figura 69 - Curva de produção L/h de acordo com a carreira de filtração para os filtros A+A e PS, considerando a produção efetiva de 93.8% e 96% respectivamente.	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de relação entre as durezas (CIDRA PRECISION, 2012) adaptado.....	44
Tabela 2 - Coeficientes recomendados para a Equação de Ergun.....	53
Tabela 3 - Sequência de formação da camada suporte.....	79
Tabela 4 - Parâmetros de qualidade da água que foram analisados e equipamentos utilizados.....	86
Tabela 5 - Características granulométricas de PS.	93
Tabela 6 - Características granulométricas da Areia e Antracito.	95
Tabela 7 - Características da água da Lagoa do Peri de novembro de 2012 à novembro de 2014.	98
Tabela 8 - Propriedades físicas dos meios filtrantes granulares modelados....	104
Tabela 9 - Valores médios dos tempos, perdas de carga e turbidez do afluente / efluente extraídos do filtro durante 10 carreiras de filtração (valores médios).	116
Tabela 10 - Variação da perda de carga e retenção da turbidez durante a filtração.....	118
Tabela 11 - Resultados da área superficial, diâmetro e volume dos poros para as esferas de poliestireno.....	119
Tabela 12 – Parâmetros cinéticos da adsorção do azul de metileno nas esferas de poliestireno a 20°C.	121
Tabela 13 – Parâmetros cinéticos em três diferentes temperaturas para as esferas de poliestireno.....	123
Tabela 14 – Parâmetros termodinâmicos de ativação para as esferas de poliestireno.	125
Tabela 15 – Parâmetros de Lagmuir e Freundlich para três temperaturas.	126
Tabela 16 – Parâmetros termodinâmicos de adsorção.	127
Tabela 17 - Valores médios, máximos e mínimos da qualidade da água obtidas da Água bruta e filtrada pelos filtros PS e A+A, para as 10 carreiras analisadas (os valores absolutos são apresentados no apêndice).....	137
Tabela 18 - Produção efetiva do filtro de areia e antracito e esferas de poliestireno, valores médio obtidos a partir de cinco carreira de filtração, com otimização dos resultados.	153
Tabela 19 - Valores médios referentes a cada velocidade de retrolavagem aplicada.....	156
Tabela 20 - Características da água filtrada pelos filtros PS com 97 e 68 cm de leito (percentual de remoção médio).....	159
Tabela 21 – Médias dos valores referentes a qualidade da água para o Filtro PS. Valores utilizados para a comparação estatística.	179

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
A+A – Filtro de areia e Antracito
AM – Azul de Metileno
BET – Teoria de Adsorção Multimolecular
CASAN – Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
ETA – Estação de Tratamento de Água
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LAPOÁ – Laboratório de Potabilização de águas
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
PS - Filtro com esferas de poliestireno
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

Gregos:

ρ_a densidade específica do fluido com os grãos (usado para descrever o cisalhamento no fluido);

ρ_s densidade específica do material;

ρ_w densidade da água à 25°C;

$\alpha_1 = \frac{V_i}{V_t}$ Coeficiente relativo as características do grãos;

β Movimento estocástico dos grãos;

ΔH perda de carga (m);

ε Porosidade;

ε_0 porosidade do leito fixo;

μ viscosidade da água à 25°C;

ψ Esfericidade;

Latinos:

C Coeficiente de dissipação de turbulencia;

C_e Coeficiente de esfericidade;

CU coeficiente de uniformidade;

d Diâmetro médio do grão;

d_{10} Diâmetro específico;

V_{mf} Velocidade mínima de fluidificação;

g aceleração da gravidade;

G_a número de galileu,

k_K Coeficiente de Kozeny;

k_l Coeficiente de perda de carga devido a forças inerciais ;

d_{eq} diametro equivalente

k_v Coeficiente de perda de carga devido a forças relativos a forças de viscosidade;

k_0 constant universal Von Karman, para água pura = 0,4;

k_1 Coeficiente pseudo primeira-ordem;

K_2 Coeficiente pseudo segunda-ordem;

L Espessura do leito;

L_0 profundidade do leito fixo;

n coeficiente de expansão do leito;

P_d dissipação de energia;

pH_i pH inicial;

pH_{zpc} pH ponto de carga zero;

V velocidade superficial;

V_t Velocidade de sedimentação terminal;

V_i Velocidade de interceptação;

V_* Velocidade de fricção;

S_e área específica da superfície do grão, m^{-1}

$(1 - \varepsilon)$ =fração de sólidos;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
2	HIPÓTESE.....	27
3	OBJETIVOS	29
3.1	OBJETIVO GERAL	29
3.1.1	Objetivos Específicos	29
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
4.1	FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE	32
4.1.1	Condições de coagulação e mistura rápida antes da filtração rápida descendente	33
4.2	MECANISMOS DE FILTRAÇÃO	34
4.3	CINÉTICA DE FILTRAÇÃO	36
4.4	ÍNDICE DE FILTRABILIDADE	37
4.5	MATERIAIS GRANULARES USADOS PARA A FILTRAÇÃO RÁPIDA DESCENDENTE.....	38
4.6	MATERIAIS GRANULARES COM DIFERENTES MASSAS ESPECÍFICAS UTILIZADOS NA FILTRAÇÃO RÁPIDA DESCENDENTE.....	45
4.7	HIDRÁULICA DO FLUXO ATRAVÉS DO MEIO GRANULAR	48
4.8	PERDA DE CARGA ATRAVÉS DOS FILTROS GRANULARES LIMPOS.	49
4.8.1	Considerações para o cálculo do meio limpo	52
4.9	HIDRÁULICA DA RETROLAVAGEM – FLUIDIFICAÇÃO DO LEITO	53
4.10	FORÇAS SOBRE AS PARTÍCULAS.....	55
4.11	EXPANSÃO DO LEITO E POROSIDADE.....	57
4.12	MODELOS DE RETROLAVAGEM	58
4.13	COEFICIÊNTE DE PERMEABILIDADE.....	63
4.14	CRITÉRIO DE DESEMPENHO DOS FILTROS	63
4.15	ADSORÇÃO DE MATERIAIS GRANULARES	66
4.15.1	Área superficial	66
4.15.2	Cinética de Adsorção	66
4.15.3	Isotermas de adsorção	69
4.15.4	Isoterma de Langmuir	69

4.15.5	Isoterma de Freundlich	70
5	MATERIAIS E MÉTODOS	71
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	71
5.1.1	Determinação da área superficial.....	73
5.1.2	Testes da capacidade de adsorção das esferas de poliestireno	74
5.2	ENSAIO DE EXPANSÃO	75
5.3	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA PILOTO	76
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	92
6.1	RESULTADOS PRELIMINARES.....	92
6.1.1	Caracterização dos materiais filtrantes	92
6.1.2	Testes da capacidade de adsorção das esferas de poliestireno	96
6.1.3	Caracterização da água bruta.....	98
6.1.4	Ensaio Jar-test	98
6.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES – ARTIGOS	101
6.2.1	(Artigo 1) CARACTERIZAÇÃO DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO COMO UM ELEMENTO FILTRANTE GRANULAR.....	101
6.2.2	(Artigo 2) CAPACIDADE DE FILTRAÇÃO EM FILTROS RÁPIDOS E CARACTERÍSTICAS ADSORTIVAS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO.....	113
6.2.3	(Artigo 3) QUALIDADE DA ÁGUA PRODUZIDA POR FILTRO RÁPIDO DESCENDENTE COM ESFERAS GRANULARES DE POLIESTIRENO COMO ELEMENTO FILTRANTE	133
6.2.4	(Artigo 4) PRODUÇÃO EFETIVA DE FILTRO RÁPIDO USANDO ESFERAS DE POLIESTIRENO COMO ELEMENTO FILTRANTE.....	149
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	167
	REFERÊNCIAS.....	171
	APENDICE.....	179
	COMPARAÇÕES ESTATÍSTICAS DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	179
	TABELAS E PLANILHAS.....	183

1 INTRODUÇÃO

A grande demanda por água potável nas grandes cidades, aliada a poluição dos mananciais de abastecimento, faz com que as companhias de saneamento encontrem cada vez mais dificuldades em produzir água com qualidade e quantidade suficiente para todos. Para amenizar esses problemas e melhorar a qualidade de águas cada vez mais poluídas é preciso criar e aperfeiçoar tecnologias de tratamento, tornando-as mais viáveis e propiciando maior produção efetiva.

A filtração representa o principal processo de tratamento em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) (BERNARDO, DI; DANTAS, 2005) e em ETAs convencionais a limpeza dos filtros é feita utilizando água filtrada. A limpeza dos filtros é de extrema importância, pois tem a função de remover as partículas retidas no meio filtrante de forma que esse não perca sua capacidade de filtração. A lavagem também é a maior fonte de problemas na filtração (CLEASBY; LONGSDON, 1999). Não é necessário um longo período de limpeza, para que ela seja eficiente. O filtro necessita de um período de recuperação após a limpeza e o ideal é que essa recuperação seja no menor período possível (CRITTENDEN *et al.*, 2011) e deve consumir pouca água no processo de lavagem para uma boa produção efetiva.

Muitos artifícios são utilizados para melhorar o desempenho dos filtros rápidos, tanto para a ampliação da carreira de filtração, quanto para a redução das velocidades da água de lavagem dos filtros, como a utilização de múltiplas camadas e a adoção de diferentes materiais filtrantes. Uma das formas de se obter uma maior produção é otimizando a retrolavagem dos filtros.

Assim, essa pesquisa propõe a aplicação de esferas de poliestireno como meio filtrante em filtros rápidos descendentes. Esse material foi escolhido por se tratar de um elemento granular com baixa massa específica. Por ser leve, ele exige menor velocidade da água durante o processo de retrolavagem, podendo assim representar uma economia de água no processo.

Foram realizados testes experimentais em escala piloto utilizando filtração direta descendente. Como água bruta foi utilizado, o manancial da Lagoa do Peri, localizada no sul de Florianópolis. As características da água da Lagoa do Peri, são compatíveis com a tecnologia de filtração direta, nos quesitos cor verdadeira e turbidez. Contudo, foi constatada a elevação da concentração de fitoplânctons nesse manancial, prejudicando o funcionamento da ETA existente no local, que também conta com a tecnologia de filtração direta, porém essa característica não inviabiliza o estudo.

Os resultados e discussões foram divididos em quatro capítulos referentes aos artigos produzidos ao longo do trabalho. No primeiro, as esferas de poliestireno foram caracterizadas e modelos matemáticos referentes ao comportamento durante o processo de expansão do material foram modelados prevendo seu comportamento. O segundo relata o desempenho desse material quando empregado como um meio filtrante granular, a cinética de filtração e o índice de filtração foram extraídos através de testes experimentais, além da

capacidade adsortiva do material. No terceiro, o desempenho do filtro com as esferas de poliestireno (PS) foi comparado a outro filtro convencional de dupla camada de areia e antracito (A+A). Foi comparada a qualidade da água produzida por cada filtro, a duração das carreiras de filtração e a ação de profundidade atingida em cada leito. O quarto capítulo faz um levantamento da produção efetiva do filtro de poliestireno e compara com a produção efetiva do filtro convencional de Areia e Antracito. Esse capítulo, mostra a relação custo x benefício desse material, quando empregado como elemento filtrante granular.

Cada artigo apresenta suas conclusões, que ao final foram compilados em uma única conclusão geral, seguida das recomendações sobre a utilização das esferas de poliestireno como meio filtrante granular no tratamento de águas para abastecimento.

2 HIPÓTESE

O grande inconveniente de se efetuar a lavagem de um meio filtrante granular convencional com água é a velocidade ascensional que é excessivamente alta, sendo 0,02 a 0,4 m/s (1728 e 34560 m/d). Só com altas velocidades se atinge a porosidade ótima para o despreendimento das partículas (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Além do despreendimento das partículas, a velocidade de retrolavagem está diretamente relacionada ao arraste delas para fora do filtro, durante a retrolavagem.

A utilização de um material com baixa massa específica, como as esferas de poliestireno pode produzir água com qualidade equivalente a um filtro convencional de dupla camada areia/antracito, além de reduzir a velocidade ascensional da água empregada durante a retrolavagem, pois é um material leve com 1046 kg/m³.

Com a velocidade ótima é possível o despreendimento das partículas aderidas aos grãos e o arraste até o ponto de coleta da água de lavagem, sem a perda do material. A velocidade ascensional é menor e assim, há uma economia da água de lavagem gerando maior produção efetiva.

3 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa foi aprimorar a tecnologia de filtração rápida descendente, utilizando um material com baixa massa específica, no caso as esferas de poliestireno, para a obtenção de água potável. Além disso, definir parâmetros hidráulicos para a utilização desse material, através de cálculos e testes experimentais. Verificar também se a utilização das esferas de poliestireno apresenta maior economia da água de lavagem.

3.1 OBJETIVO GERAL

Estudar e avaliar a tecnologia de filtração rápida descendente de camada única de meio filtrante de esferas de poliestireno, para uma maior produção efetiva de água de abastecimento.

3.1.1 Objetivos Específicos

- Selecionar e caracterizar o elemento filtrante granular quanto ao tamanho efetivo, coeficiente de uniformidade, massa específica, porosidade do meio fixo.
- Determinar a qualidade da água produzida pelo filtro PS, utilizando como fonte de água bruta a Lagoa do Peri, nos seguintes parâmetros: cor aparente, turbidez, condutividade, pH, contagem de cianobactérias, alumínio e estireno;
- Avaliar as condições de operação do filtro PS: taxa de filtração, duração das carreiras de filtração, velocidade, tempo de retrolavagem e volume de água de lavagem;
- Investigar a ação da profundidade atingida pelo leito quando atingir uma perda de carga de 2 metros e definir a espessura útil do leito;
- Analisar a produção efetiva do filtro PS com diferentes configurações de retrolavagem e definir a viabilidade de sua aplicação.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o aumento das populações urbanas a necessidade de água tratada para o consumo é cada vez maior. A incapacidade das companhias em produzir água em quantidade e qualidade suficientes tornou o produto cada vez mais escasso e caro. Nas Estações de Tratamento convencional de Água, os filtros rápidos descendentes são limpos por água tratada, o que representa um alto custo em longo prazo. A fim de se obter uma maior produção efetiva de água e conseqüentemente a redução dos custos de produção, foi proposta a caracterização de um elemento filtrante com baixa massa específica e sua potencialidade em constituir um filtro rápido descendente, que represente uma redução no volume de água usado para a limpeza.

Para estudar a filtração rápida com um elemento filtrante de baixa massa específica o estudo experimental baseou-se na filtração direta descendente, onde os sólidos são retidos nos filtros evidenciando suas vantagens e desvantagens.

Para esse estudo, foi utilizado o manancial Lagoa do Peri como fornecedor de água bruta. A Lagoa do Peri está localizada no sul da ilha de Florianópolis e abastece as regiões leste/sul da ilha. A ETA da Lagoa do Peri foi construída com tecnologia de filtração direta descendente com dupla camada de antracito e areia. Essa concepção, de acordo com DALSSASSO & SENS, (2006) é compatível com os parâmetros de turbidez e cor verdadeira da Lagoa, que são inferiores a 10 uT e 20 uH, respectivamente. Porém, segundo os mesmos autores, após um ano de início da operação da ETA, foi constatada a elevação da concentração de fitoplânctons na Lagoa. O manancial que já se caracterizava pela presença de fitoplânctons, com domínio de espécies filamentosas como a *cylindrospermopsis raciborskii* e *pseudoanabaena sp* e contava com 10.000 ind/mL ou menos saltaram para ocorrências sucessivas de até 250.000 ind/mL.

Os índices de partículas determinados por DALSSASSO & SENS (2006) revelaram que essa mudança nos padrões da água trouxe problemas operacionais à ETA, pela redução de tempo das carreiras de filtração e pela queda de qualidade da água produzida. Testes de partículas determinados para as águas da Lagoa do Peri apresentaram predomínio de partículas com tamanho entre 2 e 3 μm , com uma variação de 71,49% a 81,91%. Em uma faixa mais ampla de 2 a 5 μm variou entre 88,22% a 92,84%. Segundo DI BERNARDO & DANTAS, (2005), para águas com predominância de partículas menores que 5 μm é recomendada a floculação antes da filtração. Sabendo dessas

condições, DALSSASSO (2005), sugeriu a implementação de floculadores antes da filtração direta. Sugeriu e recomendou também, a troca do elemento filtrante, que propicie uma maior carreira de filtração e maior produção efetiva de água.

No caso da Lagoa do Peri, que apresenta partículas predominantemente menores que 5 μm e a ETA trabalha com filtração direta sem o auxílio de floculadores, a operação pode estar sendo onerosa (carreira de filtração menor).

Além de DALSSASSO (2005), outros autores propuseram alternativas para resolver esse problema. MONDARDO (2009) propôs a diluição das águas da Lagoa do Peri, com águas obtidas através da tecnologia de filtração em margem, em uma taxa de 85% (água filtrada em margem) mais 15% (água bruta da lagoa). A autora constatou que a tecnologia de filtração em margem remove 100% de fitoplânctons presente na água. Quando a água bruta é diluída nas águas da filtração em margem, há uma redução dos fitoplânctons e consequentemente das partículas presentes nela, reduzindo os custos de operação da filtração direta.

Apesar de a água deste manancial proposto não ser adequada a filtração direta, devido a grande presença de fitoplânctons, nesse estudo auxiliou na aceleração dos resultados, trazendo carreiras de filtração mais curtas. Além do que, o filtro com esferas de poliestireno foi comparada ao tratamento similar já existente na ETA. Outros fatores contribuíram para a utilização do uso das águas da Lagoa do Peri no estudo, como: maior facilidade na construção de um sistema piloto de tratamento; o Laboratório de Potabilização de Águas da UFSC (LÁPOA) já possuir uma unidade experimental apropriada para a filtração direta instalada na ETA da Lagoa do Peri (que possui a tecnologia de filtração); através da filtração direta, o estudo foi agilizado.

4.1 FILTRAÇÃO DIRETA DESCENDENTE

A filtração direta descendente é o tratamento em que a água, depois de coagulada (e em alguns casos, também floculada), escoar com movimento descendente através de um meio filtrante (normalmente areia e/ou antracito), ocorrendo então a filtração em profundidade.

Segundo DI BERNARDO (2005) essa tecnologia possui algumas vantagens em relação ao tratamento convencional, pois possui menos unidades envolvidas, contando apenas com o processo de coagulação, floculação (eventualmente) e filtração. Consome menos produtos

químicos, além de ser a técnica que apresenta menor custo de implementação. Todavia, apresenta algumas desvantagens. É uma técnica restritiva quanto a qualidade da água bruta, pois nem todas as águas seriam potáveis se simplesmente passassem por esse tratamento. O tempo de detenção da água na ETA é curto, o que dificulta ao operador tomar medidas corretivas, caso observe uma alteração brusca na qualidade da água.

Não só a qualidade do manancial deve ser observada. É necessário que a ETA de filtração direta descendente seja projetada, construída e operada corretamente.

Essa tecnologia consiste na remoção de partículas suspensas, coloidais e de micro organismos presentes na água permeada pelo meio filtrante. Com o término da carreira de filtração, há necessidade da lavagem do filtro, geralmente realizada por meio da introdução da água no sentido ascensional, com velocidade relativamente alta para promover a fluidificação parcial do meio granular com liberação das impurezas.

Apesar de existir descrições quantitativas da filtração envolvendo formulações matemáticas dos mecanismos de remoção de partículas no meio granular, as teorias para análise da filtração ainda necessitam da combinação de elementos teóricos e empíricos, a fim de analisar projetos, construção e operação (AMIRTHARAJAH, 1988).

4.1.1 Condições de coagulação e mistura rápida antes da filtração rápida descendente

A coagulação é a primeira etapa que a água bruta passa ao entrar na ETA. Sabe-se que quando presentes na água as partículas coloidais apresentam carga negativa, impedindo a aproximação entre si. Através do processo de coagulação são alteradas essas forças iônicas do meio pela adição de sais de alumínio ou ferro ou de polímeros sintéticos ou vegetais catiônicos, provocando a união dessas partículas. O mecanismo de coagulação utilizado para a filtração direta descendente é a adsorção e neutralização de cargas. Segundo DI BERNARDO, (2005) a desestabilização de uma dispersão coloidal consiste nas interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente. Em espécies hidrolisadas, como é o caso dos sais de alumínio, de ferro ou de polímeros sintéticos catiônicos é comum ocorrer a adsorção específica entre coagulante e colóide. O mecanismo de adsorção-neutralização de cargas é muito importante, quando a tecnologia empregada é a filtração direta, pois a formação de flocos ocorre em meio granular (não há

sedimentação), as partículas são desestabilizadas e posteriormente retidas pelo filtro.

BRANDÃO *et al.* (1996) afirmaram que se for garantido o mecanismo de coagulação por adsorção–neutralização de carga, pelo ajuste do pH e por dosagem ótima de coagulante, pode-se obter alta eficiência de tratamento por filtração direta para águas com elevadas concentrações de microalgas e cianobactérias, que é o caso da Lagoa do Peri. Para uma dosagem ótima de coagulante com o pH adequado é necessária a realização do teste de jarros (Jar-test). Neste teste é possível variar as dosagens de coagulante, para diferentes pH a diferentes misturas (gradiente de velocidade e tempo de contato). Sendo que, o tempo de mistura e agitação garante ou não a interação entre o coagulante e a água particulada, formando espécies hidrolisadas.

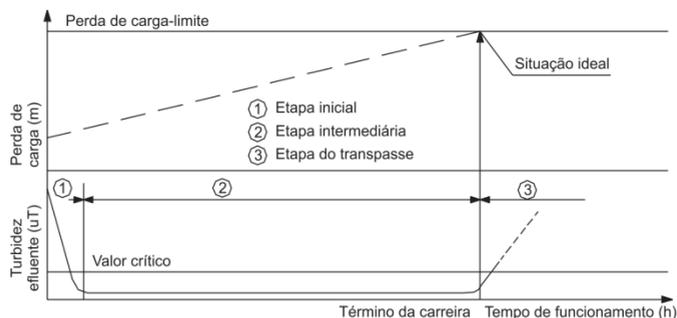
4.2 MECANISMOS DE FILTRAÇÃO

São os mecanismos de filtração os agentes que promovem a ação de profundidade, ou não desta. Essas ações são fortemente influenciadas por características físicas e químicas das partículas, da água, do elemento filtrante, da taxa de filtração e do método de operação dos filtros. Esses mecanismos são divididos em três partes: Transporte, aderência e desprendimento (DI BERNARDO, 2005).

Os mecanismos de transporte levam as partículas suspensas para próximo à superfície dos coletores (material filtrante), essas podem se aderir por meio de forças superficiais, resistindo às forças de cisalhamento.

Se a taxa de filtração (vazão do afluente dividida pela área do filtro) ou velocidade de aproximação permanecer constante, a velocidade de escoamento nos poros (velocidade intersticial) aumenta em função da retenção das partículas, o que causa seu arraste para subcamadas inferiores do meio filtrante, sucessivamente até aparecerem na água filtrada, ocasionando o transpasse (DI BERNARDO, 2005). Isso significa que a capacidade do meio filtrante em reter impurezas não existe mais. E com isso há efeitos negativos que podem comprometer a desinfecção final, como a elevação da turbidez, do número de partículas, e incremento do número de organismos. O ideal seria que o início do transpasse e as perdas de carga limite ocorressem simultaneamente (conforme Figura 1), porém essas condições variam de acordo com as características do afluente e com as condições de operação do filtro.

Figura 1 - Etapas de Filtração (DI BERNARDO & DANTAS, 2005)



Por questões de segurança, a filtração deve ocorrer sem que haja qualquer tipo de transpasse e em casos extremos deve ser encerrada quando inicia o transpasse.

Para entender o fenômeno da filtração é necessário relacionar a dimensão das partículas (partículas do efluente), do coletor (elemento filtrante), poros (distância entre os grãos do elemento filtrante) e as distâncias nas quais os mecanismos de aderência atuam. Os filtros são normalmente constituídos por grãos de areia com diâmetro médio de 500 μm e removem partículas coloidais de 0,01 a 10 μm , visto que os poros variam entre 35 a 50 μm . Isso mostra que durante a filtração ocorrem outros fenômenos além da ação física de coar (DI BERNARDO & DANTAS, 2005). Os mecanismos de transporte (que levam as partículas para as proximidades dos grãos do meio filtrante) foram apresentados por Ives em 1975 (IVES, 1982) e são os seguintes: impacto inercial, interceptação, sedimentação, difusão e ação hidrodinâmica.

Mecanismos de Aderência: Ocorre quando as partículas são aderidas aos grãos do meio filtrante (coletores). Essas partículas podem ser diretamente aderidas pelo coletor ou a outras partículas já aderidas. Para TOREGAS (1983), após a ligação a partícula é sujeita a duas forças. A primeira é uma força de fixação, que resulta de forças de longo alcance, bem como qualquer outra força, por exemplo, por gravidade, para a fixação entre a suspensão e a fase estacionária. A segunda força é a hidrodinâmica de cisalhamento, que atua na interface entre as fases móveis e estacionárias.

Os mecanismos de aderência podem envolver forças de London-Van der Waals, interações químicas de superfície, forças eletrostáticas, hidratação, interações hidrofóbicas, ou interações estéricas (TOBIASON

& O'MELIA, 1988). Os mecanismos de aderência estão relacionados com a capacidade adsorptiva do material, que será abordada a seguir.

As dimensões (das partículas, coletores, vazios entre grãos) mostram que a ação física de coar, não tem grande influência no processo de filtração em profundidade, sendo que essas partículas se movem em vazios com diâmetro que chegam a ter 1000 vezes o seu tamanho (AMIRTHARAJAH, 1988).

ELIMELECH (1992) comprovou que a eficiência da colisão das partículas está relacionada com a eficiência da sua aderência. A eficiência da aderência varia de um valor de 1,0 (colisão entre uma partícula e o coletor) para um valor de zero (sem aderência) (CRITTENDEN *et al.*, 2011). Quando há atração entre as partículas e os coletores, as colisões são bem sucedidas e a eficiência da adesão será quase 1,0. A aderência é afetada pelas partículas e pelas soluções químicas (O'MELIA, 1985).

O fator mais importante para alcançar a alta eficiência da aderência é a adequada desestabilização das partículas por coagulação. Estudos de laboratório encontraram valores de eficiência de fixação que vão de 0,004 a 1,0 (ELIMELECH & O'MELIA, 1990). Conforme colocado por CRITTENDEN *et al.* (2011), as expressões matemáticas para a eficiência de adesão não foram incorporadas com sucesso em modelos de filtração em profundidade, mas os valores da eficiência de adesão podem variar dentro dos intervalos identificados em estudos de laboratório ao usar modelagem para analisar a importância da desestabilização sobre o desempenho do filtro.

4.3 CINÉTICA DE FILTRAÇÃO

Duas teorias descrevem o transporte, aderência e desprendimento das partículas: A teoria das trajetórias (YAO *et al.*, 1971)(CUSHING; LAWLER, 1998) e a fenomenológica. A teoria fenomenológica ou macroscópica, aqui apresentada, utiliza uma equação de balanço de massas para descrever a taxa de deposição das partículas nos filtros em função do tempo de filtração e profundidade no meio filtrante. Crittenden *et al.* (2011) sugerem que o modelo fenomenológico possa ser desenvolvido para permitir uma análise mais fácil dos dados obtidos dos experimentos com o filtro piloto. Os pressupostos que os autores utilizam para a sua análise simplificada são: 1) o depósito específico do filtro inteiro; 2) os sólidos se acumulam a uma taxa constante em toda a carreira de filtração, onde o tempo de recuperação é ignorado, pois tem pouca influência sobre o depósito recolhido durante a carreira e 3) a

perda de carga aumenta a taxa constante. Com estes pressupostos, o depósito específico pode ser determinado através da realização de um balanço de massas em todo o leito.

4.4 ÍNDICE DE FILTRABILIDADE

Como já dito anteriormente, a eficiência da filtração depende das características da suspensão, das características do meio filtrante e das características hidráulicas (taxa de filtração e carga hidráulica disponível). Como analisar todos os aspectos é extremamente complexo, alguns autores, como Aboleda (1973), Ives (1978) entre outros, propuseram índices, a fim de quantificar a filtrabilidade de uma suspensão em um determinado meio filtrante. Esses índices tentam quantificar a influência de alguns parâmetros no desempenho da filtração. O índice de Ives (1978) utiliza como variáveis as perdas de carga ao longo do processo de filtração, os valores de turbidez do afluente e do efluente em determinado instante e a velocidade de aproximação, conforme equação 1.

$$IFI = \frac{\Delta H.T_{ue}}{T_{ua}.t.V_{\infty}} \quad (1)$$

Onde: ΔH = Perda de carga (cm); T_{ue} = Turbidez do Efluente (NTU); T_{ua} = Turbidez do afluente (NTU); t = tempo de filtração (min); V_{∞} = velocidade superficial (m/s) e IFI = Índice de Filtração de Ives (adimensional);

Para Ives (1978), quanto menor o IFI, maior será a eficiência de filtração. Assim será possível acompanhar o desempenho da filtração nas suas diferentes etapas.

Outras formas de análise de desempenho da filtração podem ser utilizadas sobre o elemento filtrante granular. Muitos autores compararam diferentes tipos de material filtrante e seu desempenho como elementos filtrantes em filtros rápidos (KNUDSEN, 1980) (DAVIES; WHEATLEY, 2012). Contudo, cada tipo de material exigirá uma análise diferente, sempre contemplando o objetivo maior de produção de água com padrões satisfatórios de qualidade e a questão custo/benefício envolvidos no processo.

4.5 MATERIAIS GRANULARES USADOS PARA A FILTRAÇÃO RÁPIDA DESCENDENTE.

Como já mencionado anteriormente, a eficiência da filtração está relacionada com as características da suspensão (partículas do afluente) e as características do meio filtrante (material, tamanho, coeficiente de uniformidade, massa específica e espessura da camada filtrante). Hoje, em ETA são utilizados três tipos de materiais filtrantes (antracito, areia e granada), contudo outros materiais granulares podem ser aplicados. O conhecimento das características do material filtrante é necessário para projetar um sistema de filtração.

Tamanho dos grãos: O tamanho dos grãos e sua distribuição são obtidos através de ensaios granulométricos, que são realizados através de peneiras padronizadas (conforme NBR-7181, 1984). Coloca-se o material na peneira de maior abertura, localizada na parte superior, e imediatamente abaixo destas, encontra-se as demais peneiras com aberturas sucessivamente menores. As peneiras com o material são vibradas através de equipamentos específicos. Em seguida, pesa-se a quantidade de material retida em cada uma das peneiras. Após, é possível construir a curva que relaciona o percentual das quantidades que passam e/ou ficam retidas nas peneiras em relação ao seu tamanho. Através da curva é possível determinar os diâmetros máximo e mínimo do material granular. Os meios filtrantes de menor granulometria têm menor carreira de filtração e dificilmente há transpasse das partículas, já as de granulometria maior, pode haver transpasse, mas haverá uma maior carreira de filtração. Assim, neste segundo caso, será necessário um maior volume e velocidade de água para a limpeza (DI BERNARDO & DANTAS, 2005)

Tamanho Efetivo (D10): Corresponde ao tamanho equivalente a 10% do material (pesado), que passa pelas peneiras. Segundo DI BERNARDO & DANTAS, (2005), na filtração rápida (onde normalmente os materiais filtrantes encontram-se estratificados, devido às lavagens com fluxo ascensional), podem ocorrer mudanças significativas se o coeficiente de uniformidade for alterado, mesmo mantendo-se o tamanho efetivo D10.

Coefficiente de Uniformidade (CU): É a razão entre os tamanhos, correspondentes a 60% e 10% do material que passa pelas peneiras, foi tratado por DI BERNARDO & DANTAS, (2005), como coeficiente de desuniformidade. A penetração das partículas ao longo do material filtrante está relacionada a esse parâmetro, pois quanto menor CU, mais profunda será a penetração das partículas. A condição ideal é aquela em

que o término da carreira de filtração ocorre perda de carga limite, praticamente junto com o transpasse;

Geometria e forma: A forma do grão afeta o desempenho do filtro de três formas: 1) afeta o tamanho determinado pela peneira. Para esferas, a abertura da peneira corresponde ao diâmetro, mas para grão não esféricos, a abertura da peneira corresponde à dimensão máxima do grão. CLEASBY & WOODS, (1975) compararam o tamanho determinado pela peneira ao volume-equivalente da esfera e descobriram que era de 5% a 10% maior que o tamanho da areia e antracito e 2% maior que a granada. 2) A forma como os grãos se arranjam dentro do filtro. A porosidade de um leito arranjado aleatoriamente para grãos esféricos é aproximadamente 38%, mas a porosidade de um leito típico (grãos não esféricos) é de 40% a 60%. 3) o fluxo hidráulico através de grãos com superfície muito angular é diferente do fluxo através de grãos esféricos.

Quanto mais irregular for a superfície de um grão, melhor será seu desempenho durante a filtração (recolhendo melhor as partículas), enquanto que grãos esféricos possuem melhores resultados durante a limpeza e perda de carga final entre 20% e 30% , sendo menor que as apresentadas por grãos de forma irregular. A literatura sobre filtração caracteriza a forma dos grãos pelo coeficiente de esfericidade (C_e) e o Diâmetro volumétrico equivalente (Deq), assim é possível calcular a superfície específica do material, conforme equação 2:

$$S_e = \frac{6}{d_v} \quad (2)$$

Onde:

S_e = Superfície específica dos grãos, m^2/m^3

d_v = Diâmetro volumétrico médio, m

Para grãos esféricos, o diâmetro específico é $C_e = 1$. Para grãos não esféricos S_e pode ser calculada pela equação 3.

$$S_e = \frac{6}{C_e d_v} \quad (3)$$

O coeficiente de esfericidade corresponde a cada subcamada do material granular. Assim utiliza-se como parâmetro, o coeficiente de esfericidade médio, correspondente ao meio granular não uniforme (C_{emed}) e o tamanho equivalente dos grãos do meio granular (D_{eq}), que pode ser calculado da seguinte forma, pela equação 4:

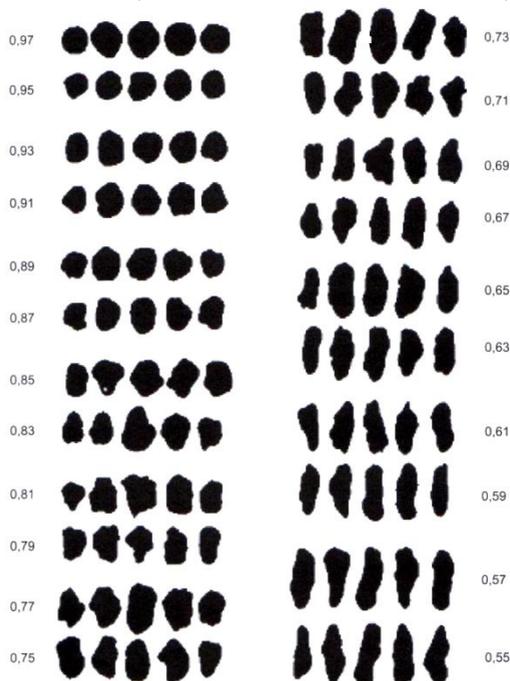
$$D_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=n}^n \frac{X_i}{D_{imed}}} \quad (4)$$

Onde: X_i = Fração do material entre duas peneiras consecutivas da série granulométrica (no caso de material granular não uniforme);

D_{imed} = Tamanho médio correspondente a subcamada do meio granular, dado pela média geométrica das aberturas das duas peneiras envolvidas.

Segundo DI BERNARDO & DANTAS, (2005) o coeficiente de esfericidade (C_e), pode ser determinado por dois métodos: um deles sugerido por SUGUIO (1973) por comparação visual, onde se utiliza uma lupa e uma escala de comparação visual (Figura 2), determina-se o coeficiente de esfericidade.

Figura 2 - Escala de comparação visual da forma dos grãos e valores do coeficiente de esfericidade (DI BERNARDO & DANTAS 2005) .



A outra forma de determinar o coeficiente de esfericidade consiste na determinação das perdas de carga do meio granular em estado fixo e fluidificado, e varia-se a velocidade de escoamento descendente e ascendente da água a uma determinada temperatura. Esse método foi sugerido por CLEASBY & FAN, (1981), que sugere a aplicação de uma equação que relaciona a perda de carga para determinar o coeficiente de esfericidade.

Porosidade: É a razão entre o volume de vazios pelo volume total dos grãos do leito filtrante. Esse parâmetro afeta diretamente a velocidade da água necessária para a limpeza dos filtros, a perda de carga no meio fixo, e a capacidade de retenção das impurezas. Quanto menor for o coeficiente de esfericidade do grão, maior será a porosidade. O coeficiente de uniformidade (CU) não tem efeito sobre a porosidade, contudo se pequenos grãos se alojarem dentro de vazios deixados por grandes grãos, podem reduzir a porosidade do leito. A porosidade pode ser determinada colocando-se certa massa do material filtrante com massa específica conhecida em uma coluna transparente

que tenha o seu diâmetro interno conhecido. Obtendo a altura ocupada pelo material filtrante é possível calcular o volume total ocupado por ele. O volume dos grãos será sua massa total dividida pelo seu peso específico. O volume de vazios será o volume total menos o volume dos grãos (TOBIASON *et al.*, 2011). A porosidade é afetada pela compactação do leito. Se os grãos são colocados no filtro sem compactação (sedimentando livremente), a maior porosidade será obtida (até 5% maior que a medida depois da compactação. A porosidade do leito granular é maior perto das paredes do filtro, o que pode ser representativo para filtros piloto, pois a porosidade medida pode ser maior, se comparada a grandes escalas, afetando também os estudos da remoção de partículas e perda de carga. Para IVES (1970), a distância mínima de parede a parede do filtro deve ser de pelo menos 50 vezes o maior tamanho do grão filtrante. LANG *et al.*, (1993) relacionaram o diâmetro do filtro (D) e o tamanho efetivo (d_{10}) do meio filtrante. Os autores observaram que a relação (D/d_{10}) na faixa de valores entre 26 e 6000 não afetavam os valores médios de turbidez e taxa do desenvolvimento de perda de carga, nem os valores de turbidez e contagem das partículas após o amadurecimento do filtro. Assim, eles recomendam que a razão (D/d_{10}) seja igual ou superior a 50, podendo ser consideradas situações até 26, porém devidamente controladas. Essas condições possibilitam o estudo com outros tipos de elementos filtrantes de diferentes granulometrias.

Massa Específica: Trata-se da massa do material dividido por seu volume. Esse parâmetro do elemento filtrante tem extrema importância nesse estudo, pois afeta a expansão e o fluxo de retrolavagem, além de interferir no cálculo de perda de carga. Grãos de densidade mais elevada, mas com o mesmo diâmetro exigem maiores taxas de lavagem para obter a fluidificação.

Os materiais comumente utilizados como elementos filtrantes, apresentam as seguintes massas específicas: Areia – 2650 a 2670 kg/m³; Antracito – 1400 a 1700 kg/m³; Granada – 4100 a 4500 kg/m³.

O método mais utilizado para a determinação da massa específica (ρ_s) é a do picnômetro, muito utilizada pela mecânica dos solos (DI BERNARDO & DANTAS, 2005), mas também pode ser calculada, semelhante ao método de determinação da porosidade. Utilizando uma coluna transparente com diâmetro interno conhecido, coloca-se o material filtrante e água. O volume da água mais o volume dos grãos é igual ao volume total. Conhecendo o peso específico da água a qualquer temperatura, pode-se determinar o volume real ocupado pela água, pois

o volume da água é igual a sua massa, dividida pelo peso específico. O volume dos grãos é igual à massa do material dividido pela massa específica deste. Conhecendo o volume real e sua massa, é possível saber seu peso específico.

Na literatura é citada também a massa específica aparente conforme equação 5:

$$\rho_{ap} = \rho_s (1 - \varepsilon) \quad (5)$$

Normalmente, a massa específica aparente é utilizada para calcular o volume do material que será adquirido.

Dureza dos grãos: A dureza está relacionada a resistência mínima à abrasão do material. É importante para a durabilidade dos grãos durante o tempo de operação como elemento filtrante. A expansão do leito e decorrentes limpezas podem desgastar o grão gerando material mais fino e alterando a curva granulométrica. Quando a limpeza é realizada com auxílio do ar, esse efeito é maior especialmente no antracito, por exemplo, que possui menor dureza que a areia. A dureza em minerais normalmente é medida em Moh, sendo a capacidade de eles serem riscados por outro objeto mais duro. O elemento mais duro é o diamante com 10 Mohs e o menos duro é o talco com 1 Moh. DI BERNARDO & DANTAS, (2005) entre outros autores recomendam que a dureza do antracito não deva ser menor que 2,7. A AWWA sugere dois métodos para a avaliação da resistência abrasão do antracito (TOBIASON *et al.*, 2011), e apesar da sua fragilidade, a redução de tamanho dos seus grãos não é um problema grave. A escala de dureza para outros materiais, que não sejam minerais varia de acordo com a natureza destes. CIDRA PRECISION, (2012) indica em sua página on-line uma Tabela que relaciona as diferentes escalas de dureza com a dureza dos minerais (Tabela 1). Assim, mesmo que o material filtrante não seja um mineral é possível relacionar seus valores.

Tabela 1 – Tabela de relação entre as durezas (CIDRA PRECISION, 2012) adaptado.

Mohs (MM)	Vickers (HV)	Materiais
1	27	Talco
2	61	Gipsita (antracito)
2,5	102	(antracito)
3	157	Calcita (antracito)
3,5	229	--
4	315	Fluorita
4,5	418	--
5	535	Apativa
5,5	669	--
6	817	Ortoclásio
6,5	982	-- (granada)
7	1161	Quartzo (Areia) (granada)
8	1567	Topázio
9	2035	Coríndon
10	--	Diamante

Solubilidade em ácido clorídrico: Essa análise é realizada para a determinação da presença de compostos solúveis em ácido existentes no meio granular, que poderiam ser liberados para a água. De acordo com DI BERNARDO & DANTAS (2005), a solubilidade não deve ultrapassar 1%.

Solubilidade em hidróxido de sódio: determina a quantidade de material solúvel em hidróxido de sódio (1%) presente no meio filtrante e que poderia ser liberado na água.

Os parâmetros de resistência cáustica e ácida podem ser determinados por ensaios no material filtrante. Existem normas técnicas que descrevem os procedimentos para essa determinação. A norma ASTM D 543, (2001) descreve os procedimentos para análise de resistência química em plásticos e foi utilizada nesse trabalho.

4.6 MATERIAIS GRANULARES COM DIFERENTES MASSAS ESPECÍFICAS UTILIZADOS NA FILTRAÇÃO RÁPIDA DESCENDENTE

Como já mencionado anteriormente, os materiais comumente utilizados como elemento filtrante são a areia, antracito, granada e ilminita. Esses materiais são largamente utilizados, pois possuem um custo relativamente baixo e estão disponíveis em grande escala, especialmente no Brasil.

KNUDSEN, (1980) estabeleceu relações entre diferentes tamanhos de grãos e distintas massas específicas dos materiais normalmente utilizados em filtração rápida descendente (areia, antracito e granada). Concluiu que meios mistos, ou seja, com tripla camada, geram uma maior carreira de filtração e uma economia de agente coagulante, porém não mencionou nada sobre a retrolavagem destes.

Além desses meios tradicionais, existe a possibilidade de uso de materiais alternativos, quando se busca um resultado específico durante um processo de filtração, seja para o tratamento de água ou outro tipo de filtração. Neste caso, buscou-se materiais com diferentes massas específicas, a fim de descrever o seu desempenho durante todo o ciclo de filtração. O primeiro deles é a Pedra Pomes, que também é um mineral, porém é altamente poroso e mais leve que a água (689 kg/m^3). Em 2003, FARIZOGLU et al. realizaram um experimento comparando um filtro de areia com outro de pedra pomes. Foi utilizado um filtro em coluna vedado e fluxo descendente a uma vazão de de 0,5 a 5 L/min. Os autores não relataram a eficiência da limpeza ou recuperação do filtro, somente que houve fluidificação de 10% do leito durante essa limpeza. Contudo, afirmam que tiveram maiores carreiras de filtração, pois como a pedra pomes é mais porosa que a areia, sua capacidade de depósito foi maior. A pedra pomes atualmente é utilizada na ETA Pindamonhangaba, interior de São Paulo. Essa ETA mostrou alta eficiência na remoção de turbidez das águas daquela região nos períodos de 2004 a 2005 conforme SIERRA FILHO et al.(2005).

ESCUDEIRO & HEINDEL, (2011) relacionam a altura do leito filtrante e a densidade do material sob a velocidade mínima de fluidificação. Neste trabalho, os autores utilizam como fluido o ar e como elemento filtrante esferas de vidro, casca de arroz e milho com diâmetros entre 500 a 600 μm . Eles determinaram a velocidade mínima de fluidificação para os três materiais e concluíram que a velocidade mínima de fluidificação é independente da espessura do leito. Também concluíram que quanto maior a massa específica, maior será velocidade

mínima de fluidificação. No Japão, em 2009 foi patenteado um elemento chamado Marimo (ANDO *et al.*, 2009). Esse elemento possui tentáculos fibrosos (poliméricos) que capturam as partículas sólidas da água através das forças eletrostáticas de London-Van de Waals (normalmente utilizada em aquários). Sabendo que os polímeros são normalmente mais leves, buscou-se na bibliografia a utilização deste, como meio filtrante. Descobriu-se que para filtros biológicos a utilização do plástico é bastante comum. Um filtro biológico é constituído por um braço que joga águas residuárias através do meio filtrante, que pode ser rocha, plástico entre outros. O material deve ser grosseiro, permitindo a entrada do ar (PEARCE & JARVIS, 2011). O trabalho também fala das vantagens do plástico em relação à rocha, para esse tipo de filtro. Contudo, a utilização de meios plásticos em filtração rápida descendente é pouco relatada, mas existe. Em 2008, FABRIS *et al.*, compararam as concentrações de matéria orgânica natural das águas bruta e tratada para os hemisférios norte e sul. Neste estudo, os autores coletaram águas produzidas na Austrália e na Noruega. E mais especificamente na Noruega, o autor relata a estação de tratamento de água de Skullerud, que foi escolhida para o estudo. Essa ETA possui a tecnologia de filtração direta descendente, cujos filtros possuem tripla camada filtrante (duas camadas de diferentes meios plásticos e uma camada de areia). Essa ETA abastece 10% da população de Oslo e desde 1994 está em operação. A planta foi concebida para uma capacidade de 500-600 L/ s, com uma taxa de filtração de 216-240 m³/m².d, através de filtros de 33 m². Esses filtros são constituídos da seguinte forma:

- 60 cm esferas grandes de plástico (3,1 a 3,5 mm, massa específica de 1250 kg /m³);
- 60 cm esferas pequenas de plástico (2,0 a 2,4 mm, massa específica de 1450 kg /m³);
- 60 cm de Areia (0,8 a 1,2 mm, densidade 2600 kg /m³).
- Camada suporte de 45 cm.

É adicionada à água bruta cal (CaO) e CO₂, antes de ser enviado através de um canal de floculação. Também é adicionado sulfato de alumínio e, em seguida, o floculante Magnafloc LT20 antes de ser distribuída para os seis filtros.

Os filtros são retrolavados com ar e água, de 1 a 3 vezes ao dia, cada um. A retrolavagem ocorre primeiro com ar, a uma velocidade de 0,5 m/min, normalmente de 1 a 5 minutos, e em seguida com água, a uma velocidade de até 1 m/min em geral de 5 a 10 minutos.

Segundo relatos da engenheira chefe do departamento de água de Oslo, Marie Fossum (contato pessoal), a ETA funcionou bem por

muitos anos e estavam satisfeitos com a qualidade da água. No entanto, têm-se notado que a capacidade dos filtros se deteriorou nos últimos anos (DIVISÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO – OSLO/NORUEGA, 2012). Hoje, produz 200 L/s através de 5 filtros ao invés de 6, pois um está em processo de renovação. Atualmente a ETA está com problemas de alta turbidez e altas perdas de carga. Os filtros precisam ser retrolavados a cada 2400m³ produzidos (por cada filtro), sendo 8 minutos por ar, 1 minuto de assentamento, posteriormente 10 minutos retrolavado por água a 350 L/s (38 m/h). Conta também com um tempo de recuperação de 12 a 20 minutos. Com esses problemas, deram início a uma série de investigações. Aparentemente a camada de esferas de plástico é susceptível ao desgaste. A massa específica de pequenas esferas plásticas que era de 1250 kg/m³ agora é medido 1330 kg/m³, o que significa que as duas camadas de grânulos plásticos se misturaram. Eles acreditam que isso ocorre porque as esferas são produzidas com polietileno e cal, e ao longo dos últimos anos, devido às limpezas, a cal é eliminada. De acordo com o descrito pela engenheira, pode estar acontecendo o seguinte fenômeno: com os grão “sujos” (devido ao tempo de uso) a incrustação tornou-os mais pesados, mas isso é apenas uma suposição.

Eles estão trabalhando em um projeto para melhorar a capacidade e substituir o material dos filtros pelas seguintes opções:

1. Conseguir um novo fornecedor para substituir as esferas de plástico, por outras com a mesma especificação do anterior, ou;
2. Tentar usar como elemento filtrante, o Filtralite (pequenos grãos produzidos em cerâmica inerte, altamente porosa).

A utilização dos materiais poliméricos apresentou-se com uma boa alternativa, pois são leves, disponíveis comercialmente e sua forma pode ser moldada. Alguns trabalhos que utilizaram o poliestireno como meio filtrante foram encontrados, como HSU *et al.*, (2001) que testaram uma abordagem semi empírica para prever a eficiência da colisão de cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium* para uma deposição coloidal em leitos de esferas de vidro de 2 mm e esferas de poliestireno de 2 mm. Eles observaram que ajustando as concentrações de eletrólitos, as variações na eficiência de remoção e colisões experimentais de ambos os parasitas pelas esferas de vidro pode ser menos significativa do que pelas esferas de poliestireno. No entanto, os resultados contrários entre esferas de vidro e esferas de poliestireno foram obtidos através do ajuste dos valores de pH.

HARWANTO *et al.* (2011), observaram a eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal total (NAT) em filtros de areia, poliestireno e

Kaldnes sob diferentes carregamentos. As taxas de remoção de NAT aumentaram com o aumento do carregamento de NAT para todos os filtros. Taxas de remoção volumétricas médias de NAT em areia foram maiores que no poliestireno ou *Kaldnes*. Este resultado foi relacionado às diferenças nas áreas de superfície específica do meio filtrante. Contudo, o poliestireno foi o meio filtrante mais econômico para uma eficiente remoção de NAT.

Já ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ *et al.* (2009) testaram a eficiência da filtração através de um leito de esferas de poliestireno expandido (EPS) e observaram que o uso de EPS como meio filtrante diminui o custo de capital e operação e oferece boas possibilidades de otimização do filtro.

4.7 HIDRÁULICA DO FLUXO ATRAVÉS DO MEIO GRANULAR

Um regime de fluxo no meio granular é identificado pelo número de Reynolds para o fluxo através de grãos esféricos, o qual se utiliza o diâmetro do meio granular (equivalente), para a sua determinação conforme a equação 6.

$$\text{Re}_n = \frac{D_{eq} V_n \rho_a}{\mu} \quad (6)$$

Re_n = Número de Reynolds;

ρ_a = massa específica da água, kg/m³;

μ = viscosidade absoluta da água, N s/m²;

V_n = velocidade superficial. m/s;

D_{eq} = diâmetro equivalente, m.

O fluxo no meio granular não tem uma rápida transição do regime laminar para o turbulento, como normalmente é observado em tubulações, e é dividido em 4 regimes (TRUSSELL & CHANG, 1999). O fluxo de Darcy ocorre quando o número de Reynolds é menor que 1, sendo caracterizado pelo comportamento do fluxo viscoso. O outro fluxo chamado Forchheimer, ocorre quando o número de Reynolds está entre 1 e 100. Esses dois fluxos podem ser descritos como fluxo laminar estável, pois demonstram que o fluido segue diferentes linhas de

corrente. Contudo, o fluxo de Forchheimer é influenciado tanto pela viscosidade quanto pelas forças de inércia.

O terceiro regime é uma zona de transição e tem como limites máximos um número de Reynolds que pode variar entre 600 e 800. Já o quarto regime encontra-se acima desses valores do número de Reynolds, onde ocorre toda turbulência. O número de Reynolds que compreende os valores entre 100 a 600 trata-se de um regime de transição entre os fluxos laminar e turbulento.

O regime de fluxo de cada tecnologia de filtração pode ser definido pela faixa de valores para o diâmetro efetivo e taxa de filtração. Assim a filtração lenta está dentro do regime de fluxo de Darcy, com número de Reynolds entre 0,03 a 0,3. Tipicamente filtros rápidos têm o número de Reynolds entre 0,5 a 5, ou seja, indefinição entre os regimes de fluxo de Darcy e Forchheimer. Altas taxas de filtração podem ser designadas (792 m³/m².d), atingindo um número de Reynolds igual a 18. A retrolavagem em filtros rápidos ocorre com um número de Reynolds entre 3 e 25, sendo completamente no fluxo de Forchheimer.

4.8 PERDA DE CARGA ATRAVÉS DOS FILTROS GRANULARES LIMPOS.

A perda de carga aumenta quando as partículas são retidas. A perda de carga máxima está relacionada ao projeto do filtro. A capacidade de retenção de partículas é a diferença da perda de carga máxima e da perda de carga do meio limpo.

Regime de fluxo de Darcy

O estudo do fluxo através de meios granulares começou em 1856 com Henry Darcy, que publicou um relatório declarando a relação entre a velocidade, perda de carga e profundidade do leito, conforme equação 7.

$$V = \kappa_p \frac{h_L}{L} \quad (7)$$

Onde: V = velocidade superficial (taxa de filtração), m/s; κ_p = coeficiente de permeabilidade hidráulica, m/s; h_L = perda de carga em todo o meio filtrante, m; L = profundidade do meio granular, m.

A lei de Darcy não contém descrições matemáticas sobre a porosidade do material e conseqüentemente não tem valores preditivos de projeto. Uma equação com as propriedades hidráulicas foi desenvolvida por Koseny em 1927 e posteriormente confirmada por outros pesquisadores (CRITTENDEN et. al, 2005). Ele desenvolveu um modelo para o escoamento em meios granulares limpos, combinando a teoria do raio hidráulico com a superfície específica (CRITTENDEN *et al.*, 2011). Assumindo que os vazios intergranulares sejam iguais a um conjunto de tubos capilares, a equação de Poiseuille pode ser aplicada a cada capilar individual, resultando na equação 8:

$$\frac{h_L}{L} = \frac{32\mu V}{\rho_w g d^2} \quad (8)$$

V = velocidade superficial, m/s;
 d = diâmetro equivalente, m;
 ρ_w = massa específica da água, kg/m³;
 μ = viscosidade da água, kg/m.s;
 g = aceleração da gravidade, 9,81 m/s².

Igualando o volume de vazios ao volume interno total do canal e a área superficial do meio à área superficial interna do canal Kozeny chegou a seguinte expressão, equação 9.

$$\frac{h_L}{L} = \frac{K_\kappa \mu s^2 V}{\rho_w g \varepsilon^3} \quad (9)$$

Onde:

K_κ = Coeficiente de Kozeny, adimensional;
 s = área superficial específica, m⁻¹;
 V = velocidade superficial, m/s;
 ε = porosidade, adimensional.

O coeficiente de Kozeny é empírico, introduzido para chegar aos resultados experimentais. Outros pesquisadores determinaram que o valor de K_κ poderia ser 5 para meios esféricos. Eles propuseram que o

valor de K_κ era independente das propriedades do meio e introduziram um fator de correção para grãos não esféricos utilizando a esfericidade e o fator de forma.

Regime de fluxo de Forchheimer

Estudos mostraram que a perda de carga em meios granulares era maior que o previsto pela equação 9, quando o número de Reynolds é maior que 1. Forchheimer propôs uma equação não linear que mais se ajusta a perda de carga com maior velocidade ou meios grandes, conforme equação 10.

$$\frac{h_L}{L} = k_1V + k_2V^2 \quad (10)$$

Onde:

V = velocidade superficial, m/s;

k_1 = coeficiente de permeabilidade para o termo linear, s/m;

k_2 = coeficiente de permeabilidade para o termo quadrado, s²/m².

AHMED & SUNADA (1969) mostraram que uma equação com essa forma pode ser derivada da equação de Navier-Stokes, com 2 suposições: 1) o meio e o fluido são homogêneos e isotrópicos e 2) os efeitos químicos e termodinâmicos são pequenos. Contudo para ter a capacidade de prever o coeficiente de permeabilidade é necessário o conhecimento das propriedades do meio. A equação que melhor demonstrou resultado, segundo todos os autores pesquisados, foi a equação sugerida por Ergun em 1952.

$$h_L = K_v \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 C_e^2} \frac{\mu LV}{\rho_w g d e q^2} + K_1 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{LV^2}{C_e g d e q} \quad (11)$$

Onde:

k_v = Coeficiente de perda de carga devido à viscosidade;

k_I = Coeficiente de perda de carga devido à força inercial.
(ambos adimensionais).

d_{eq} = diâmetro equivalente, m;

C_{eq} = coeficiente de esfericidade, adimensional.

Segundo CRITTENDEN. *et al.* (2005) Ergun compilou 640 experimentos, cobrindo uma variação do número de Reynolds entre 1 e 2000, quando o diâmetro “d” era um diâmetro baseado na superfície específica. Da análise desses dados saíram os valores de $k_v = 150$ e $k_I = 1,75$, que podem ser usados para ajustarem os dados experimentais. A dependência de μ , L , ν , ρ_w , g e d no primeiro termo é consistente à equação de Poiseuille (isto é, fluxo laminar), já a dependência sobre estas seis variáveis no segundo termo é consistente com a equação de Darcy-Weisbach, o que descreve o fluxo através de tubos invíscidos (sem viscosidade) ou condições turbulentas, onde a energia cinética é predominante (STREETER e WYLIE, 1979).

4.8.1 Considerações para o cálculo do meio limpo

Como já mencionado, o fluxo no filtro rápido está em transição entre Darcy e Forchheimer, assim o cálculo da perda de carga com diferentes equações dependeria do regime de fluxo. Felizmente essa transição entre os regimes de fluxo é gradual. A maioria dos experimentos afirma que o fluxo de Forchheimer pode ser usado para determinar a perda de carga do meio limpo, ao longo de todos os valores de interesse na filtração rápida. Os coeficientes propostos por Ergun foram baseados no diâmetro efetivo, que não é facilmente medido. Outros estudos reexaminaram a perda de carga através dos meios granulares (CHANG *et al.*, 1999)(TRUSSELL & CHANG, 1999)(TRUSSELL *et al.*, 1999) para leitos de vidro esféricos e os valores de Ergun foram razoáveis. CRITTENDEN *et al.*(2005) propõem diferentes valores de coeficientes para o antracito e a areia, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes recomendados para a Equação de Ergun

Meio	k_v	k_I	$\varepsilon(\%)$
Areia	110 – 115	2,0 – 2,5	40 – 43%
Antracito	210 – 245	3,5 – 5,3	47 – 52%

A perda de carga é sensível à porosidade, em particular quando a velocidade aumenta, ou seja, a perda de carga aumenta à medida que a porosidade diminui. A perda de carga também depende da temperatura, pois a viscosidade do fluido aumenta, quando a temperatura diminui, e aumentando assim a perda de carga.

4.9 HIDRÁULICA DA RETROLAVAGEM – FLUIDIFICAÇÃO DO LEITO

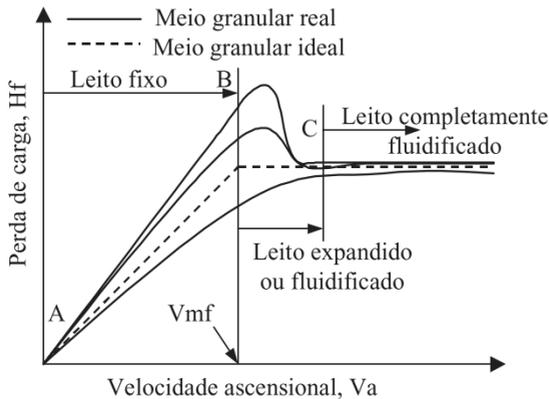
No fim da carreira de filtração, os filtros rápidos descendentes normalmente são retrolavados por água bombeada no sentido ascensional do fluxo. A taxa de retrolavagem precisa ser grande o suficiente para lavar (remover) o material capturado pelo leito, mas não tão alta que o material seja empurrado para fora do filtro (perda). Para prevenir a perda do material filtrante é necessário determinar a expansão do leito que ocorre com o material fluidizado.

A função da retrolavagem pode ser calculada através da equação de perda de carga. AKGIRAY & SAATÇI, (2001) demonstraram que a equação de Ergun é igualmente válida para os leitos fixos e expandidos. Assim, a equação de Ergun pode ser usada e aplicável no leito fixo até o momento da expansão, já que a hidráulica da retrolavagem ocorre dentro do regime de fluxo de Forchheimer. A Figura 3, extraída de DI BERNARDO & DANTAS, (2005) ilustra como se comporta a perda de carga em um leito expandido. No ponto B há curvas de dois meios granulares que, em decorrência da compactação estão localizados acima da linha ideal. Pode ocorrer de a curva real situar-se abaixo da ideal, em razão da não uniformidade dos grãos, da esfericidade ou da formação de caminhos preferenciais no escoamento ascensional. A partir do ponto C, a perda de carga permanece praticamente constante, independentemente do aumento da velocidade ascensional, já que o meio está totalmente fluidificado.

De acordo com SENS (1997), para materiais com baixa massa específica, quando ocorre a expansão do material, a perda de carga cresce formando uma curvatura cujo ápice está acima da velocidade mínima de fluidificação, posteriormente decresce para em seguida

permanecer constante. Quanto menor a densidade do grão mais acentuada e mais longa será a curvatura. Para grãos muito densos, como é o caso da areia, a perda de carga cresce proporcionalmente até a expansão para quase que instantaneamente decrescer e permanecer constante.

Figura 3 - Esquema do comportamento da perda de carga em função da velocidade ascensional (DI BERNARDO & DANTAS, 2005).



Também conforme DI BERNARDO & DANTAS (2005) na condição de equilíbrio, quando o leito encontra-se completamente fluidificado, a perda de carga passa a ser constante e pode ser expressa pela equação 12.

$$h_L = \frac{L(\rho_s - \rho_w)(1 - \varepsilon_0)}{\rho_w} \quad (12)$$

Onde:

L = Espessura do leito não expandido, m;

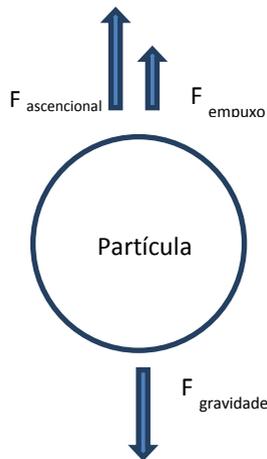
ρ_s = Massa específica dos sólidos (grãos do leito), kg/m³;

ε_0 = Porosidade do meio granular limpo, não expandido.

4.10 FORÇAS SOBRE AS PARTÍCULAS

Como já mencionado, a taxa de retrolavagem precisa ser grande o suficiente para remover as partículas coletadas durante a filtração (dependendo das características da partícula do afluente), mas não tão alta que provoque a perda do material filtrante. As forças que atuam sobre as partículas individuais (partícula do afluente ou grão do meio) sujeita a um fluxo ascensional é mostrada na Figura 4.

Figura 4 - Forças sobre a partícula durante a fluidificação.



A partícula vai se acomodar (ou não fluidificar) quando as forças descendentes (gravidade) forem predominantes, e será carregada quando as forças ascendentes (arraste + empuxo) forem predominantes sobre ela.

A força da gravidade e do empuxo podem ser calculadas pela mesma equação, sendo considerado o peso do material flutuante. Para partículas esféricas as forças resultantes da gravidade menos o empuxo podem ser calculadas conforme a equação 13.

$$\begin{aligned}
 F_E &= \rho_w \left(\frac{\pi d^3}{6} \right) g \\
 F_G &= \rho_p \left(\frac{\pi d^3}{6} \right) g \\
 F_R &= (\rho_p - \rho_w) \left(\frac{\pi d^3}{6} \right) g
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Onde:

F_E = Força do empuxo sobre a partícula, N;

F_G = Força da gravidade (descendente) sobre a partícula, N;

F_R = Força resultante sobre a partícula (gravidade menos Empuxo), N;

m = Massa da partícula, kg;

g = Aceleração da gravidade, (9,81 m/s²);

ρ_p = Massa específica da partícula.

As forças ascensionais de arraste são causadas pelo fluxo da retrolavagem, o que é dependente do fluxo (CRITTENDEN *et al.*, 2011) e pode ser calculada pela equação 14:

$$F_A = \begin{cases} 3\pi\mu v d \rightarrow \text{Re} < 2 \\ \frac{2,31}{\text{Re}} \pi \rho_w v^2 d^2 \rightarrow 2 \leq \text{Re} \leq 500 \end{cases}
 \tag{14}$$

Onde:

F_A = Força ascensional de arraste, N.

Pela equação de arraste e força resultante gravitacional menos empuxo é possível determinar “o destino” das partículas individuais,

baseados no tamanho e massa específica. A velocidade exigida para manter uma partícula individual suspensa pode ser determinada pela equação 15:

$$v = \left[\frac{g(\rho_p - \rho_w)d^{1,6}}{13,9 \cdot \rho_w^{0,4} \mu^{0,6}} \right]^{0,714} \quad (15)$$

A velocidade exigida para suspender uma partícula isolada em um campo de fluxo uniforme (isto é, acima do leito filtrante, longe das influências do leito), pode ser determinada usando a equação 15, já dentro do leito filtrante, a velocidade é alta devido ao volume ocupado pelo meio.

4.11 EXPANSÃO DO LEITO E POROSIDADE

O estado de equilíbrio entre as forças gravitacionais e de arraste é estabelecido no leito filtrante. Durante a retrolavagem a velocidade é maior no leito fixo, do que em uma partícula isolada devido à presença do meio filtrante, causando maior força de arraste que no meio expandido. Como o meio filtrante se expande, aumenta a porosidade e a velocidade diminui até a força de arraste entrar em equilíbrio com as forças gravitacionais. A relação entre a expansão e a porosidade é descrita pela equação 16.

$$\frac{L_E}{L_F} = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_{ex}} \quad (16)$$

Onde:

L_E = Profundidade do leito expandido, m;

L_F = Profundidade do leito fixo, m;

ε_{ex} = Porosidade no leito expandido.

Velocidade Mínima de Fluidificação (V_{mf})

A passagem do estado fixo ao estado fluidificado corresponde a uma velocidade mínima de fluidificação V_{mf} . A mínima taxa de

fluidificação pode ser calculada pela determinação da velocidade que produz perda de carga igual ao peso do meio na porosidade do leito fixo. A velocidade mínima de fluidificação está em função do tamanho do grão, com menor velocidade de fluidificação da partícula de maior meio (CLEASBY & LONGSDON, 1999). A V_{mf} é dada pela equação 17.

$$V_{mf} = \frac{\mu}{\rho_w deq} \left(\sqrt{(33,7)^2 + 0,0408 G_a} - 33,7 \right) \quad (17)$$

$$G_a = deq^3 g \rho_w (\rho_s - \rho_w) / \mu^2$$

Onde: V_{mf} = Velocidade mínima de fluidificação, m/s, G_a = número de Galileu; μ = viscosidade da água kg/m.s; ρ_w = massa específica da água kg/m³; ρ_s = massa específica do material, kg/m³; deq = diâmetro equivalente dos grãos, m.

A maioria das equações que permitem o cálculo da velocidade mínima de fluidificação utiliza correlações relativas ao estado fixo ou ao estado fluidificado, principalmente entre a porosidade e a velocidade de escoamento do líquido.

A equação proposta necessita do conhecimento da porosidade antes da fluidificação ou da expansão. Para um leito homogêneo com esferas quase idênticas como meio granular a porosidade é $\varepsilon_0 = 0,38$.

4.12 MODELOS DE RETROLAVAGEM

Os modelos apresentados por TURAN *et al.* (2003) e NASEER *et al.* (2011) descrevem o comportamento do meio filtrante durante a retrolavagem. De fato, a eficiência da retrolavagem depende de outros parâmetros como as características físico-químicas, o número de sítios ativos da superfície dos grãos, entre outros aspectos. Contudo, os modelos apenas consideram os parâmetros físicos.

Quando submetidos a diferentes velocidades superficiais durante a retrolavagem, o material atinge diferentes graus de expansão e diferentes porosidades. Usando esse parâmetro como variável, foram extraídas das equações respostas relativas à turbulência, tensão hidrodinâmica de cisalhamento e gradiente de velocidade das esferas de PS usada como meio filtrante.

Modelos de expansão e fluidificação do leito: A correlação de RICHARDSON & ZAKI (1954) é amplamente utilizada para descrever as características do leito fluidificado para grãos esféricos, de acordo com a Equação 18.

$$\frac{V}{V_i} = \varepsilon^n \quad (18)$$

Onde: V é a Velocidade superficial, V_i é a Velocidade de interceptação, n é o coeficiente de expansão do leito e ε é a porosidade do leito fluidificado.

CLEASBY e FAN, (1981) concluíram que grãos não esféricos se comportam de maneira diferente no leito durante a retrolavagem, comparado a grãos esféricos e seguem a equação 19.

$$\frac{V_i}{V_t} = 0.91\psi^{-0.4} \quad (19)$$

Onde, V_t é a Velocidade de sedimentação terminal e ψ é a esfericidade do grão.

A velocidade superficial do leito fluidificado é sempre maior que do leito fixo. Quando o volume de grãos no filtro é constante, o leito fixo e fluidificado são descritos pela equação 20.

$$\frac{L}{L_0} = \frac{(1 - \varepsilon_0)}{(1 - \varepsilon)} \quad (20)$$

Onde: L é a espessura do leito expandido, L_0 é a espessura do leito fixo, ε_0 é a porosidade do leito fixo e ε é a porosidade do leito expandido.

O coeficiente de expansão com grãos esféricos pode ser descrito pela equação 21.

$$n = \left(4,45 + 18 \frac{deq}{D} \right) \text{Re}_t^{-0,1} \quad \text{para } 1 < \text{Re} < 200 \quad (21)$$

Para grãos não esféricos, segundo CLEASBY e FAN, (1981) pode ser descrita como a equação 22:

$$n = \left(4,45 + 18 \frac{deq}{D} \right) \text{Re}_t^{-0,1} \psi^a \quad \text{para } 15 < \text{Re} < 200 \quad (22)$$

Sendo, $a = -2,9237\psi^{0,884} \text{Re}^{-0,363}$ e $\text{Re} = \frac{\rho_w V_t deq}{\mu}$, D = diâmetro da coluna filtrante.

Essas condições são válidas para uma retrolavagem com fluxo laminar.

Dissipação de Energia durante a retrolavagem: Como dito anteriormente, a eficiência de retrolavagem não depende somente dos parâmetros físicos, mas também dos parâmetros físico-químicos, dos sítios ativos e da superfície do grão, entre outros. Contudo, os modelos sugeridos somente consideram os parâmetros físicos. Neste caso, são considerados para o modelamento matemático os parâmetros físicos dos grãos que constituem o leito, como: tamanho, massa específica, velocidade superficial, porosidade e o tipo e quantidade de material depositado durante a filtração.

O gradiente de velocidade e o cisalhamento hidrodinâmico são muito importantes para prever uma limpeza ótima. O gradiente de velocidade, para fluxos laminares, foi apresentado por Camp em 1964, como $\tau = \mu G$ (onde τ é à força de cisalhamento e G é o gradiente de velocidade médio). Como o processo de retrolavagem normalmente ocorre em um regime de transição de estados (CHANG *et al.*, 1999; TRUSSELL; CHANG, 1999) (TRUSSELL *et al.*, 1999) (LANG *et al.*, 1993), o gradiente pode ser escrito como a equação 23:

$$G = \left(\frac{P_d}{\mu(1+C)} \right)^{0,5} \quad (23)$$

Onde: P_d é a potência dissipada e C é o coeficiente de dissipação de turbulência durante a dissipação total da energia.

A equação de energia para fluxo de retrolavagem pode ser expressa como a equação 24:

$$\tau \frac{du}{dy} = (\alpha_1 \rho_w V_*^3 / KL_m + \beta \alpha_1 \rho_w V_*^3 / KL_m + \rho_w V_*^3 / Ky) \varepsilon^{(n-1)} \quad (24)$$

Onde: β representa o movimento aleatório dos grãos e $\alpha_1 = V_i / V_t$ é um coeficiente relacionado às características do grão (TURAN, 1992).

Nesta equação o lado esquerdo representa a energia produzida por Reynolds, relativos a velocidade de água empregada e a direita, sucessivamente, o poder necessário para suspender os grãos em unidade de volume, a taxa de energia removida devido ao movimento aleatório de suspensão, como rotação, movimento retilíneo em relação ao fluido e a potência dissipada por um movimento turbulento. Caso o regime seja laminar, esses itens são pouco representativos.

A constante do fluxo universal de Von Karman com partículas em suspensão, K e Monin-Obukhov, L_m são dados como as equações 25 e 26.

$$K = \frac{K_0}{(1 + 2(1 - \varepsilon))} \quad (25)$$

$$L_m = \frac{V_*^3}{Kg V_t (\rho_p / \rho_w - 1)(1 - \varepsilon)} \quad (26)$$

Onde: K_0 é a constante universal de Von Karman que para fluxos de água pura é 0,4 e $(1 - \varepsilon)$ é a fração de sólidos ou concentração. Também densidade específica do fluido e mistura dos grãos ρ_a e velocidade de fricção V_* são apresentados, conforme equações 27 e 28.

$$\rho_a = \rho_w(1 + (\rho_p / \rho_w - 1)(1 - \varepsilon)) \quad (27)$$

$$V_* = (g\rho_w(\rho_p - 1)(1 - \varepsilon)D / 4\rho_w)^{0,5} \quad (28)$$

Parâmetros de dissipação de energia: O modelo apresentado por TURAN *et al.* (2003) foi desenvolvido para descrever a influência entre os diferentes tipos de material filtrante nos parâmetros de dissipação de energia, tais como a tensão hidrodinâmica de cisalhamento, o gradiente de velocidade, o coeficiente de dissipação de turbulência e o parâmetro de turbulência ($Ca^{0,5} / Re$) em um filtro retrolavado. Assim, o gradiente de velocidade foi desenvolvido como sendo a equação 29:

$$G = 8V_*(\ln(\rho_w V_* D / 23,2\mu) - 1) / KD \quad (29)$$

Usando a equação da energia de dissipação para a retrolavagem do filtro, a tensão hidrodinâmica de cisalhamento pode ser obtida como as equações 30 e 31:

$$\tau_a = \rho_w V_*^2 \varepsilon^{(n-1)} ((\alpha D / 6L_m) + 1) \quad (30)$$

$$\text{Onde o coeficiente } \alpha \text{ é: } \alpha = \alpha_1(1 + \beta) = 7V_i / V_t \quad (31)$$

Se a equação 23 é arranjada em uma forma de média aritmética, pode ser calculado o coeficiente de dissipação da turbulência Ca é apresentado conforme equação 32:

$$Ca = (\tau_a / \mu G - 1) \quad (32)$$

O parâmetro de turbulência ($Ca^{0,5} / Re$), que descreve o efeito da turbulência em fase líquida é calculado como:

$$Ca^{0,5} / Re = (\tau_a / \mu G - 1)^{0,5} / Re \quad (33)$$

Sendo: $Re = \rho_w V_{deq} / \mu$, onde V é a velocidade de aproximação e deq o diâmetro equivalente do grão.

4.13 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

O Coeficiente de permeabilidade é um valor que indica numericamente, o fluxo da água através do leito granular, indicando maior ou menor facilidade de passagem durante o processo de filtração. O coeficiente de permeabilidade é determinado de acordo com a equação de Kozeny-Carman, como apresentado na equação 34.

$$K_k = \frac{(\Delta H/L) \cdot \rho_w \cdot g \cdot \varepsilon^3}{2\mu(1-\varepsilon)^2 \cdot S_e^2 \cdot V_\infty} \quad (34)$$

Onde: K_K = Coeficiente de Kozeny; ΔH = Perda de carga (m); L = profundidade do leito (m); ρ_w = massa específica da água (kg/m³); g = aceleração da gravidade 9,81 m/s²; ε = Porosidade; μ = viscosidade da água; S_e = área da superfície específica, m⁻¹; V_∞ = velocidade superficial (m/s).

4.14 CRITÉRIO DE DESEMPENHO DOS FILTROS

Os primeiros critérios para o projeto de um filtro que será utilizado no tratamento de água são: a qualidade dessa água, a duração da carreira de filtração e o aproveitamento, ou seja, a razão entre o líquido e a água total filtrada. O projeto dos filtros precisa considerar critérios relacionados ao capital, incluindo custos de manutenção/operação, confiabilidade e facilidade de manutenção.

Qualidade do Efluente: A forma mais comum de determinar se uma água contém particulados é a turbidez. A turbidez mede a luz dispersa pelas partículas presentes na água. Esse parâmetro é usado como substituto para a concentração de partículas na água. A portaria 2914 de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde estabelece para águas tratadas por filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta) um valor máximo permitido de 0,5 uT (unidades de turbidez) em 95% das amostras (após 4 anos de operação). A turbidez na água filtrada pode variar de acordo com a variação da turbidez na água bruta. Um segundo método para a determinação da qualidade da água seria a contagem de partículas. A contagem fornece o número de partículas e sua distribuição por tamanho. Apesar de ser um bom

parâmetro para avaliação da presença de partículas na água, não existe métodos padronizados para a medição, ou regulamentação do número de partículas para a água filtrada, apenas indicações para a recomendação de tecnologias de acordo com as características das partículas presentes na água bruta, conforme DI BERNARDO, (2003).

Ação de profundidade: Segundo DI BERNARDO & DANTAS (2005), a ação de profundidade pode ser entendida como resultado de uma sucessão de estágios relativos à colmatação das subcamadas que compõem o meio filtrante. A primeira subcamada retém partículas até o momento em que as forças de cisalhamento, em razão do escoamento, superam as forças que mantêm as partículas aderidas aos grãos do meio filtrante, arrastando-as para a subcamada subsequente.

A saturação de cada subcamada poderá ser acompanhada por meio de coleta de amostras ao longo do meio filtrante ou visualização do nível de água em cada piezômetro, a partir do instante em que a diferença de leitura piezométrica entre dois piezômetros (correspondente a uma subcamada qualquer) não muda com o tempo de filtração. Isto significa que aquela subcamada encontra-se saturada, ou seja, a quantidade de partículas que sai é igual à quantidade de partículas que entra.

A filtração rápida deve preferencialmente ser realizada com ação de profundidade, ao contrário disso poderão resultar em carreiras de filtração curtas, com baixa produção efetiva de água se a filtração ocorrer, predominantemente com ação superficial.

Duração da Carreira de Filtração: A duração da carreira de filtração dita quantas vezes (com qual frequência) será necessário retrolavar o filtro e o impacto no aproveitamento. Na maioria dos serviços, o operador precisa realizar a retrolavagem manualmente ou supervisionar a retrolavagem automatizada. Em alguns casos, a frequência da retrolavagem tem impacto direto na quantidade de água produzida e de trabalho envolvido na operação.

Produção Efetiva: É a razão entre a quantidade de água disponível e total filtrada. Porções de água filtrada são usadas na retrolavagem e parte é descartada durante o tempo de recuperação. A produção disponível é menor que a total. A produção efetiva é avaliada usando o conceito de unidade de volume de carreira de filtração (UVCF) e unidade de volume da retrolavagem (UVR), (TRUSSELL *et al.*, 1999). Além de UVRec, que se refere a unidade de volume descartada durante a recuperação (amadurecimento do filtro).

A UVCF é o volume de água que passa através do filtro durante a carreira, a UVR é o volume necessário para a retrolavagem do filtro e UVRec é o volume utilizado no período de recuperação.

$$UVCF = v_F \cdot t_F \quad (35)$$

$$UVR = v_R \cdot t_R \quad (36)$$

$$UVRec = v_F \cdot t_{rec} \quad (37)$$

Onde:

$UVRec$ = Unidade de volume de recuperação, m³/m²;

v_F = velocidade de filtração, m/h;

v_R = velocidade de retrolavagem, m/h;

t_F = Duração da carreira de filtração, h;

t_R = Tempo de retrolavagem, h;

t_{rec} = Tempo de recuperação, h.

A razão entre a quantidade de água líquida e total filtrada é a produção efetiva, conforme Equação 38.

$$PE = \frac{UVCF - UVR - UVRec}{UVCF} \quad (38)$$

A taxa de filtração efetiva (q_{FE}) é o volume líquido de água produzida sobre o tempo total de uma carreira de filtração.

$$q_{FE} = \frac{UVCF - UVR}{t_F - t_R} \quad (39)$$

Onde:

q_{FE} = taxa de filtração efetiva, m/h .

CRITTENDEN *et al.* (2011) afirmam que filtros podem ser projetados para alcançar uma produção efetiva de 95%, mas para isso a UVCF precisa atingir no mínimo $200 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Algumas vezes, os operadores dos filtros acreditam que uma maior taxa de retrolavagem ou uma limpeza por um tempo maior resultará em uma carreira de filtração também maior, ou com menor turbidez. Contudo, uma retrolavagem excessiva é contraprodutiva, pois gera um período maior de recuperação e assim redução da produção efetiva.

Baseados nesse balanço de produção efetiva, esse trabalho propõe a idéia de que, se o meio filtrante tiver uma massa específica próxima à da água, os valores de velocidade ascensional para fluidificação teoricamente não serão tão altos e assim haverá uma redução do volume de água empregado para a limpeza, porém essa afirmação deverá ser analisada, pois para haver uma limpeza eficiente dos filtros, algumas variáveis necessariamente precisaram ser analisadas, como: comportamento do material filtrante, a característica da água que será filtrada, carreira de filtração, tempo de recuperação e tempo de retrolavagem, entre outras.

4.15 ADSORÇÃO DE MATERIAIS GRANULARES

A adsorção é um fenômeno físico e/ou químico, que pode ser diferenciado pelas forças de interação, calor de adsorção, camadas formadas e reversibilidade.

Há alguns fatores que influenciam na capacidade adsortiva do material, como: temperatura, a área superficial, a concentração inicial, além do pH e força iônica.

4.15.1 Área superficial

A área superficial de um material é obtida empregando o método determinação da área superficial (B.E.T.). Este método considera a adsorção física de uma quantidade de N_2 na superfície de um sólido em função da pressão

4.15.2 Cinética de Adsorção

Para avaliar a cinética de adsorção, normalmente é utilizada uma técnica chamada “Banho Infinito”, onde certa massa conhecida do

material adsorvente (m) é colocada em um volume (V) de solução do adsorvato a uma concentração também conhecida (C_0), sob agitação em certo tempo a uma temperatura controlada. A diminuição da concentração ao longo do tempo indica a quantidade que está sendo adsorvida.

O equilíbrio é estabelecido quando a quantidade de adsorvato permanece constante em relação à solução livre e não há mais a transferência de massa.

Um balanço de massa entre as condições inicial e final fornece o ponto de equilíbrio para o sistema a uma temperatura, como observado na Equação 40.

$$q = \frac{V \cdot (C_0 - C_e)}{m} \quad (40)$$

Onde: q é quantidade de massa adsorvida (mg/g) e C_e é a concentração final (mg/L) da solução no tempo t (min).

A cinética de adsorção descreve a quantidade de soluto removida de uma solução em relação ao tempo, sendo dependente das características físicas e químicas do adsorbato, adsorvente e sistema experimental. Há diversos modelos para explicar a cinética de adsorção, os quais avaliam o mecanismo ou etapa limitante em cada processo adsorvativo específico.

A cinética de pseudo primeira ordem foi proposta por Lagergren em 1898, descrita na equação 41 e linearizada na equação 42.

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q) \quad (41)$$

$$\ln(q_e - q) = \ln q_e - k_1 t \quad (42)$$

Os valores obtidos para k_1 representam a constante da taxa de adsorção de pseudo primeira-ordem (s⁻¹), e q_e e q são as quantidades adsorvidas por grama de adsorvente no equilíbrio e no tempo t , respectivamente (mg/g). A constante de velocidade de pseudo-primeira-ordem (k_1) é determinada pela inclinação da reta do gráfico $\ln(q_e - q)$ versus t .

A cinética de pseudo segunda ordem, fundamentada na adsorção de equilíbrio é expressa na equação 43 e sua linearização na equação 44.

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q)^2 \quad (43)$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (44)$$

onde k_2 (h g/mg) é a constante de pseudo segunda ordem; q é a quantidade adsorvida no tempo t e q_e (mg/g) é quantidade adsorvida no equilíbrio.

O acréscimo da temperatura aumenta a velocidade de vários processos físicos e químicos. Verifica-se uma dependência entre a temperatura e a constante de velocidade de adsorção. Com a constante de velocidade de três temperaturas diferentes pode-se construir um gráfico de $\ln k$ versus $1/T$ de acordo com a equação de Arrhenius.

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (45)$$

K é a constante de velocidade de adsorção; A o fator de frequência de Arrhenius; E_a é a energia de ativação; R a constante dos gases ideais ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e T a temperatura (K).

A energia livre de Gibbs, ΔG^* , a entalpia ΔH^* e a entropia ΔS^* de ativação podem ser calculadas através do gráfico $\ln(k/T)$ versus $1/T$ de acordo com a equação de Eyring, conforme equação 46.

$$\ln \frac{k_{ads}}{T} = \ln \left(\frac{K_b}{h} \right) + \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{R} \quad (46)$$

Onde K_b é a constante de Boltzmann e h é a constante de Planck. O valor da entalpia e entropia de ativação pode ser calculado através dos coeficientes angular e linear. A entalpia e a entropia se relacionam com a energia livre de Gibbs através da equação 47.

$$\Delta G_{ads}^o = \Delta H_{ads}^o - T \Delta S_{ads}^o \quad (47)$$

O valor de ΔG indica a espontaneidade do processo de adsorção e seu valor negativo implica dizer que a adsorção é espontânea. A entalpia

informa a natureza da adsorção como sendo endotérmica ou exotérmica. Valores positivos de ΔH implicam em natureza endotérmica e valores de $\Delta H < 0$, indicam adsorção de natureza exotérmica (ERDEM *et al.*, 2009). A variação de entalpia devido à quimisorção tem valores entre 40 e 120 kJ mol⁻¹ (ERDEM *et al.*, 2009), então valores baixos da entalpia indicam que a natureza da adsorção é física, envolvendo forças de atração fracas. A entropia analisa a desorganização na interface adsorvente/adsorbato. Valores positivos de ΔS são interpretados como aumento na desorganização na interface

4.15.3 Isotermas de adsorção

O equilíbrio de adsorção é alcançado quando a taxa de moléculas adsorvidas é igual à taxa das moléculas que desorvem. Quando o sistema encontra-se neste equilíbrio a expressão matemática que relaciona a concentração do adsorbato na interface com a concentração de equilíbrio na fase fluida a uma temperatura fixa é definida como isoterma de adsorção. Entre os modelos existentes para ajuste de dados estão às equações de Langmuir e Freundlich. Os modelos são aplicados e avaliados pelo fator de correlação, r . Quanto mais próximo a 1, melhor o modelo que representa o processo de adsorção.

4.15.4 Isoterma de Langmuir

O método matemático proposto por Langmuir em 1916 assume que a adsorção ocorre em monocamada, na qual a energia de adsorção é distribuída homogeneamente e a distribuição de moléculas adsorvidas ocorre de maneira uniforme (LAGMUIR, 1918). Esta isoterma é fundamentada nas hipóteses de que todas as moléculas adsorvem sobre sítios definidos, cada sítio pode ser ocupado por apenas uma molécula. A energia de adsorção de cada sítio é igual e quando moléculas ocupam sítios vizinhos a outras moléculas adsorvidas não há interações entre estas. Assim, pode-se expressar a quantidade adsorvida em função da concentração na fase fluida em equilíbrio conforme a equação 48.

$$q_e = \frac{QK_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (48)$$

Onde K_L (L/mg) é a constante de Langmuir, representa a afinidade entre adsorvente e adsorbato e Q (mg/g) a quantidade

máxima adsorvida, representa o número total de sítios disponíveis no material adsorvente para formação de monocamada. A forma linear da equação de Langmuir é apresentada na equação 49. Os parâmetros K_L e Q podem ser calculados através dos coeficientes angular e linear de um gráfico C_e/q_e versus C_e .

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{QK_L} + \frac{C_e}{Q} \quad (49)$$

4.15.5 Isoterma de Freundlich

A teoria de adsorção descrita por Freundlich estabelece uma relação entre a quantidade de material adsorvido e a concentração do material na solução. A equação empírica proposta considera que a superfície do adsorvente é heterogênea, assumido que os sítios com ligação mais forte são ocupados primeiro e que a força de ligação diminui com o aumento do grau de ocupação do sítio, ou seja, prevendo a existência de multicamadas.

A isoterma de Freundlich não prevê a saturação do adsorvente. Assim, o modelo permite a existência de uma cobertura superficial infinita (BORBA, 2006).

O modelo matemático descrito na equação 50 sugere que a energia de adsorção decresce logaritmicamente à medida que a superfície vai se tornando coberta pelo soluto, o que a diferencia da equação de Langmuir (COUTO, 2009).

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (50)$$

Através da equação linearizada de Freundlich, equação 51, pode-se obter os parâmetros K_F (L/mg) e n . O coeficiente linear da reta corresponde a $\ln K_F$ e o coeficiente angular da reta $1/n$. A constante $1/n$ tem valor entre 0 e 1 e está relacionada a heterogeneidade da superfície e fornece uma indicação se a isoterma é favorável ou desfavorável, sendo valores de n no intervalo de 1 a 10 representativos de condições de adsorção favoráveis e uma superfície mais heterogênea.

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (51)$$

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os trabalhos experimentais foram conduzidos através da construção de unidades piloto no Laboratório de Águas da Lagoa do Peri, administrado pela UFSC, mas situado na Estação de Tratamento de Águas (CASAN), localizado ao Sul de Florianópolis.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Durante o processo de seleção do elemento filtrante, buscou-se um material leve, com baixa massa específica. Outras características foram observadas na seleção do material como: a granulometria, resistência, composição química, entre outras. Assim, os polímeros surgiram possibilidade. Alguns tipos foram analisados como ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), PP (polipropileno) e mesmo o PS (poliestireno), mas com granulometria maior, de 6 mm, o que é desfavorável. As esferas de Poliestireno (PS) foram selecionadas porque apresentaram características granulométricas semelhantes à da areia. Além disso, são leves, inertes e disponíveis comercialmente (NOVA CHEMICALS, 2005). As esferas de PS podem ser vistas na Figura 5.

Figura 5 - Esferas de poliestireno (PS).



Fonte: Schöntag (2012).

O referido material é de poliestireno, polímero de estireno ou poliestireno cristal. Sua composição química é $(C_8H_8)_n$. O poliestireno expansível é a matéria prima para fabricação do “*isopor*”. O agente expensor normalmente é o gás pentano, sendo que este corresponde a aproximadamente 3% do volume do material. Esse material é expandido quando submetido a elevadas temperaturas de vapor d’água, aumentando seu tamanho em até 50 vezes.

As fornecedoras desse produto no Brasil são as empresas *Innova Petroquímica* e *Videolar*. Contudo, este produto foi adquirido através da revendedora Soesferas, localizada em São Paulo/SP.

Para verificar se o material é capaz de constituir um filtro, ele precisa ser caracterizado nos seguintes critérios: tamanho, esfericidade, porosidade, dureza, massa específica (nesse caso, pouco maior que a da água) e se possui resistência cáustica e ácida (CLEASBY; WOODS, 1975).

Ensaio granulométricos foram realizados com esse material (NBR-7181, 1984). Com a curva granulométrica obtém-se o tamanho máximo, mínimo e efetivo, coeficiente de uniformidade e diâmetro médio equivalente.

Para a determinação da forma e geometria, utilizou-se a equação de Ergun (equação 11), onde através do ensaio de expansão (descrito a seguir) obteve-se as perdas de carga do meio granular em estado fixo e fluidizado, e variou-se a velocidade de escoamento ascendente da água, através de ensaios de expansão do material.

A porosidade e massa específica podem ser determinadas através de um ensaio recomendado por TOBIASON *et al.* (2011) com auxílio de água, com massa específica de $997,04 \text{ kg/m}^3$ à 25°C .

A dureza foi determinada com auxílio do Laboratório de Engenharia de Materiais da UFSC. Por se tratar de um polímero, esse material é medido em escala Vickers (HV), relacionando esse valor na Tabela 1 para a escala Moh.

Os parâmetros de resistência cáustica e ácida foram feitos através de ensaios sugeridos pela ASTM D 543, (2001). Assim, 14,26g de material foram deixadas submersas em uma solução de 1% de HCl e solução de 1% de NaOH por 30 dias. Após esse período, o material foi lavado com água destilada e deixada em estufa a 45°C por 24 horas, resfriado (temperatura ambiente) e pesado.

Foram caracterizados também a Areia e Antracito utilizados no filtro de dupla camada, ao qual o filtro PS (esferas de poliestireno) foi comparado.

5.1.1 Determinação da área superficial

Para a análise da área superficial foi utilizado um aparelho da marca Quantachrome, modelo AUTOSORB-1 do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Uma massa conhecida da amostra foi colocada em um tubo apropriado. A volatilização dos vapores de água foi feita durante 26 horas a 80°C. A temperatura utilizada para a medida foi de 77,3 K, temperatura do nitrogênio líquido. O método considera a adsorção física de uma quantidade de N₂ na superfície do adsorvente estudado em função da pressão. A partir da variação da pressão, o volume do gás adsorvido é medido e através de equações específicas a área superficial é quantificada.

Para a equação BET foi assumido que 1) na primeira camada, a taxa de condensação das moléculas em sítios vazios é igual a taxa de evaporação dos sítios cobertos por uma molécula e 2) o calor de adsorção além da primeira camada, é constante e é igual ao de liquefação. Assumindo que essas premissas estejam corretas a equação BET é dada como a equação.

$$\frac{q}{q_m} = \frac{b(P/P_s)}{(1 - P/P_s)(1 - P/P_s + bP/P_s)} \quad (52)$$

Onde P_s é a saturação do vapor na temperatura usada no teste (uma temperatura usada a qual P_s é 1 atm), q é a quantidade de substâncias adsorvidas na dada pressão P , e q_m é a quantidade de substâncias adsorvidas quando uma camada molecular da superfície atinge cobertura total. Essa equação pode ser rearranjada para:

$$\frac{P}{q(P_s - P)} = \frac{1}{bq_m} + \left(\frac{1}{bq_m} \right) (b - 1) \left(\frac{P}{P_s} \right)$$

Toma-se os dados sobre a quantidade adsorvida (q) para diferentes pressões (P) usadas e calcula os valores de $P/q (P_s - P)$. Estes valores são plotados versus o correspondente P/P_s e o conjunto de pontos linearizados usando os mínimos quadrados. Para a última equação, pode ser visto a interceptação $P/P_s = 0$ em um gráfico é igual a $(1/bq_m)$ e o coeficiente angular é igual a $(1/bq_m)(1-b)$. A partir dos valores do coeficiente angular e interceptação pode-se determinar b e q_m .

Como já mencionado, q_m representa o valores (moles) de nitrogênio correspondente a uma camada monomolecular de cobertura completa da superfície. Então, usa-se um valor de $16,2 \text{ \AA}$ como área coberta por cada molécula de N_2 , então o valor da área superficial do sólido pode ser facilmente calculada.

5.1.2 Testes da capacidade de adsorção das esferas de poliestireno

Foi testada a capacidade adsorviva das esferas de poliestireno. O composto adsorvido utilizado foi o corante Azul de Metileno.

A técnica do banho infinito utilizada foi uma adaptação das técnicas apresentadas pela bibliografia (JIS K 1474, 1991; (COTTET, 2009); (COLPANI, 2012). Primeiramente, definiu-se o ponto de carga zero das esferas PS. Para isso foram utilizadas 12 amostras de 2 gramas cada das esferas PS. As amostras foram colocadas em erlenmeyer com 25 ml de solução KCl 0,1N, com pH de 2; 2,31; 2,95; 3,97; 4,61; 5,3; 6,3; 6,69; 6,72; 7,15; 8,01 e 8,3. Os pH foram ajustados com ácido clorídrico 0,1M e Hidróxido de sódio 0,1 e 0,01M. Após 24 horas de contato, as soluções foram filtradas em membranas de fibra de vidro de $0,7\mu\text{m}$ e a leitura do pH realizada na sequência. Para detectar o ponto de carga zero, basta traçar a curva pH_i (inicial) versus ΔpH ($\text{pH}_i - \text{pH}_f$), sendo pH_i inicial menos o final, ou seja, antes e após o contato da solução com o adsorvente.

O ponto de carga zero (pH_{zpc}) corresponde ao valor de pH em que a soma das cargas na superfície do adsorvente é igual a zero. Neste ponto, a solução apresenta pH_i igual ao pH_f . A carga líquida na superfície do adsorvente será positiva quando pH_i da solução for menor do que pH_{zpc} ($\text{pH}_i < \text{pH}_{zpc}$) e negativa quando estiver acima desse ($\text{pH}_i > \text{pH}_{zpc}$).

5.1.2.1 Parâmetros utilizados para os ensaios de adsorção

Todos os reagentes utilizados foram de grau analítico. São eles: azul de metileno; cloreto de potássio; ácido clorídrico e hidróxido de sódio. As soluções foram preparadas com água ultra pura do Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA) da UFSC em meio iônico de 0,1 N de KCl. Foi realizada varredura no espectro visível de uma solução de 3,0 mg/L de azul de metileno com pH 8.

As absorvidades do azul de metileno foram calculadas para o comprimento de onda 665 nm.

5.1.2.2 Ensaios de adsorção – banho infinito

Os ensaios foram feitos em batelada em erlenmeyers de 100 mL contendo 2 gramas de adsorvente PS em 25 mL de solução de azul de metileno nas seguintes concentrações: 0,5; 1,5; 3; 4; 5 mg/L e pH 8. O adsorvente ficou em contato com adsorvato sob agitação constante de 250 rpm ($\sim 300\text{s}^{-1}$ a 450s^{-1}) e temperatura constante de 20°C, em incubadora de bancada CT 712 R da *CIENTEC equip. lab.* Foram determinadas as concentrações da solução antes e a cada intervalo de 5 minutos até atingir 30 minutos. Assim, foi determinado o tempo de equilíbrio de adsorção.

Uma vez definido o tempo de equilíbrio o mesmo experimento foi realizado para a concentração de 4 mg/L de corante AM (azul de metileno) em 2 gramas de PS, com agitação de 250 rpm, para outras duas diferentes temperaturas: 15 e 25 °C. As concentrações foram medidas antes e ao final do tempo de equilíbrio determinado.

Os resultados foram ajustados aos modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem e as isotermas de Langmuir e Freundlich. Também foi construído o gráfico de Van't Hoff que permite a obtenção da entalpia, entropia e energia livre para os processos de adsorção a fim de avaliar o fenômeno termodinâmico (CESTARI *et al.*, 2009).

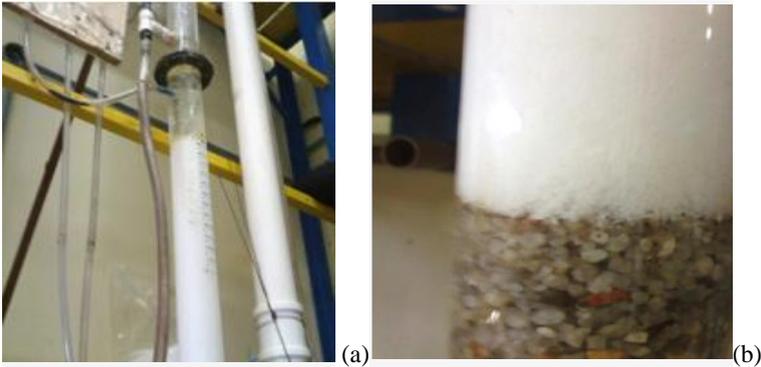
5.2 ENSAIO DE EXPANSÃO

Os ensaios de expansão foram realizados experimentalmente em uma coluna de acrílico transparente com 60 mm de diâmetro interno e 2 metros de altura. Foi construída uma câmara de nível e três piezômetros foram instalados para medir as perdas de carga durante a expansão. Para o ensaio de expansão as esferas de poliestireno foram colocadas dentro da coluna com água (molhada) Figura 6(a).

Foi colocada uma camada suporte de 20 cm de seixo rolado com diâmetros que variavam de 1,6 a 19 mm, como mostrado na Figura 6(b). As esferas de poliestireno, por serem menores, penetraram um pouco na camada suporte, mas não a ponto de prejudicar os testes.

O desempenho do material durante a expansão experimental foi avaliada e uma análise teórica foi realizada para avaliar o comportamento durante a retrolavagem (CLEASBY; LONGSDON, 1999).

Figura 6 - (a) Coluna acrílica e câmara de nível com piezômetros que indicavam a perda de carga durante os ensaios de expansão (b) camada suporte do material sob análise.



Os ensaios de expansão foram realizados em triplicata. O leito filtrante das esferas de poliestireno, nestes ensaios, possuíam 20 cm de espessura (facilmente fluidificável).

O ensaio de fluidificação foi realizado com auxílio de bombas centrífuga e peristáltica, para diferentes graus de expansão médio: 5, 7, 11, 16, 32 46, 51, 62, 88 %. Cada grau de expansão corresponde a uma velocidade e uma vazão da água aplicada no sentido ascensional. Durante o ensaio de expansão foi verificada a perda de carga para diferentes velocidades. Através desse ensaio foi possível determinar a velocidade mínima de fluidificação e o coeficiente de esfericidade.

5.3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA PILOTO

O experimento foi realizado, no Laboratório de Águas da Lagoa do Peri, administrado pela UFSC, mas situado na Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, localizado ao Sul de Florianópolis, sob responsabilidade da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). A alimentação do sistema piloto foi com água proveniente da Lagoa do Peri (mesmo manancial que alimenta a ETA da CASAN) que foi extraída do poço de captação localizado nas dependências da Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri.

O manancial, Lagoa do Peri, tem área superficial de 5,2 km² e vazão de drenagem de 20,1 km² (CASAN, 2009), é alimentado principalmente por dois rios, o rio Cachoeira Grande e o rio Ribeirão Grande. Têm contato com o mar através do canal Sangradouro e o

desnível entre o mar e o manancial é de aproximadamente 3 m, isso faz com que a lagoa não receba água salgada, sendo totalmente doce. A lagoa tem um volume de aproximadamente $(21,2 \pm 0,1) \times 10^6$ m³, profundidade média de 4,2 m e máxima de 11 m, comprimento máximo de 3,8 km (eixo NE/SW) e largura máxima de 1,8 km (eixo E/W).

5.3.1 Ensaios Jar test

A coagulação química foi realizada com solução de PAC (hidroxicloreto de alumínio) com teor de Al₂O₃ de 11,35% e basicidade de 63,58%. O PAC utilizado é fornecido pela NHELL Química, fornecido para a ETA da Lagoa do Peri e cedido pela CASAN para a realização desse experimento. A solução de PAC foi introduzida na câmara de mistura rápida, a dispersão deste produto foi realizada por meio de agitador mecânico. Para o gradiente de velocidade foi adotado 1200 s⁻¹, conforme indicado por DALSSASSO, (2005). A dosagem de PAC foi determinada através de testes de bancada em equipamento de jar-test Nova Ética modelo LDB 310 com jarros de 2 L. Utilizou-se a rotação de 500 rpm (1200 s⁻¹) para a mistura. Após a aplicação da dosagem de PAC (variável) foi realizada a mistura rápida do coagulante, por 30 segundos. Logo após o processo de mistura rápida, o gradiente de mistura foi reduzido para ~90 rpm (120 s⁻¹). Nesse momento foi feita a leitura do pH de coagulação (nos jarros). A filtração foi realizada através de papel filtro Whatman 40. Os primeiros 50 mL filtrados foram descartados. Após, foi coletado 100 mL, onde será determinada a cor aparente e turbidez. A correção do pH da água bruta (testado) foi realizada com geocálcio 20%, diluída em água destilada a 0,5%, e ácido sulfúrico 0,05 N e foi realizada em função da determinação do diagrama de coagulação da água de estudo. Essa correção foi utilizada visando manter o pH em uma determinada faixa, onde a dosagem do coagulante fosse apropriada para a filtração.

Os ensaios Jar-teste foram realizados antes das carreiras de filtração e sempre que necessário.

Foram realizados 30 ensaios Jar-test, onde a temperatura da água variou de 15,5 a 24 °C. Foram realizados testes com diferentes dosagens de PAC, para diferentes pH. Para a construção do diagrama foi utilizado o programa “Surfer” versão Demo 11, e o método de interpolação de dados utilizada foi a Krigagem ou Processo Gaussiano de Regressão.

5.3.3 Sistemas Pilotos de Filtração Rápida Descendente

1. Disposição do sistema

Os estudos foram desenvolvidos, no LAPOÁ (Lagoa do Peri). Por se tratar de um estudo experimental foram utilizados dois filtros. Um filtro de dupla camada de Antracito e Areia e outro com as esferas de poliestireno. Os dois filtros trabalharam com a mesma taxa de filtração. Foram operados simultâneamente, com a mesma água coagulada. Os sistemas piloto foram abastecidos com a mesma água, proveniente da mesmo ponto de captação.

Os filtros foram construídos de acordo com o seguinte esquema:

Filtro direto descendente com dupla camada (antracito e areia), sendo 30 cm de areia e 80 cm de antracito;

Filtro direto descendente com camada única (esferas de poliestireno), sendo 97 cm das esferas de poliestireno, conforme Figura 7.

Os filtros piloto foram construídos em aço inoxidável, com secção quadrada de 20 cm de lado. As camadas suportes foram de seixo rolado com tamanho entre 19 e 1,18 mm, com a espessura de 35 cm, divididas conforme a Tabela 3.

Figura 7 - Esquema da instalação dos Pilotos de filtração direta.

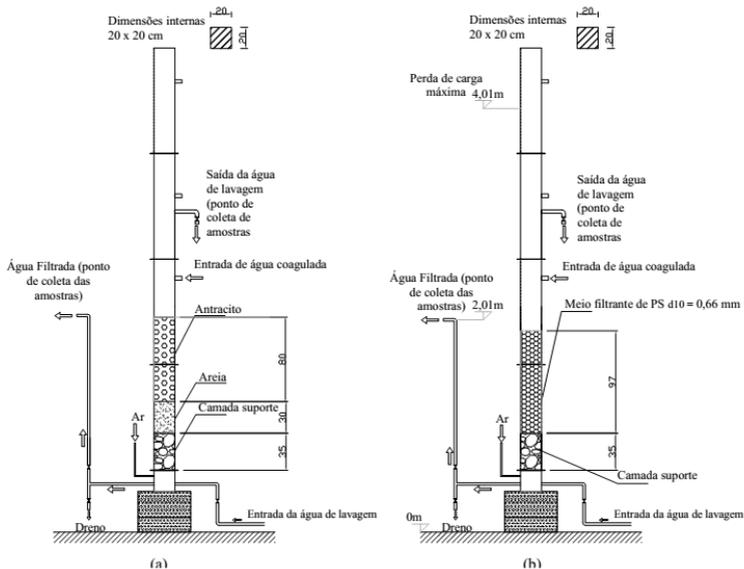


Tabela 3 - Sequência de formação da camada suporte

Camada	Tamanhos (mm)
Topo (5 cm)	19 – 9
5ª camada (5 cm)	6,3 – 4,25
4ª camada (5 cm)	4,25 – 1,18
3ª camada (5 cm)	6,3 – 4,25
2ª camada (5 cm)	9 – 8
Fundo (10 cm)	19 - 9

Esse sistema de camada suporte é indicado quando a limpeza dos filtros é feita por ar e água, a fim de evitar o desarranjo das camadas (BAYLIS, 1959).

A espessura da camada filtrante respeitou a relação L/d (espessura do meio filtrante pelo diâmetro efetivo) entre 1000 e 2000, para uma eficiente filtração (CRITTENDEN et. al., 2011). Por esse motivo é importante conhecer as características dos elementos filtrantes antes da construção do filtro.

Inicialmente trabalhou-se com uma espessura de 97 cm de leito das no filtro contendo as esferas de poliestireno e no filtro de dupla camada de areia e antracito a espessura do leito foi 30 e 80 cm respectivamente, similares a ETA da Lagoa do Peri.

Operou-se a taxa constante e carga hidráulica variável.

Segundo PIZZI (2003), seis parâmetros devem ser observados durante construção e a operação dos filtros, são eles: 1) a profundidade do leito; 2) a relação L/d; 3) a relação $d_{90(\text{antracito})} / d_{10(\text{areia})}$ deve ficar entre 3 e 4 (para filtros de dupla camada); 4) deve ser observada a turbidez da água de lavagem no tempo (de forma a otimizar esse tempo); 5) deve ser observada a produção efetiva; 6) a retenção dos sólidos no leito (através dos parâmetros de qualidade da água). Dessa forma, entre outras variáveis, foi observada a velocidade de fluidificação adequada à limpeza dos filtros, tempo de lavagem e volume de água para lavagem.

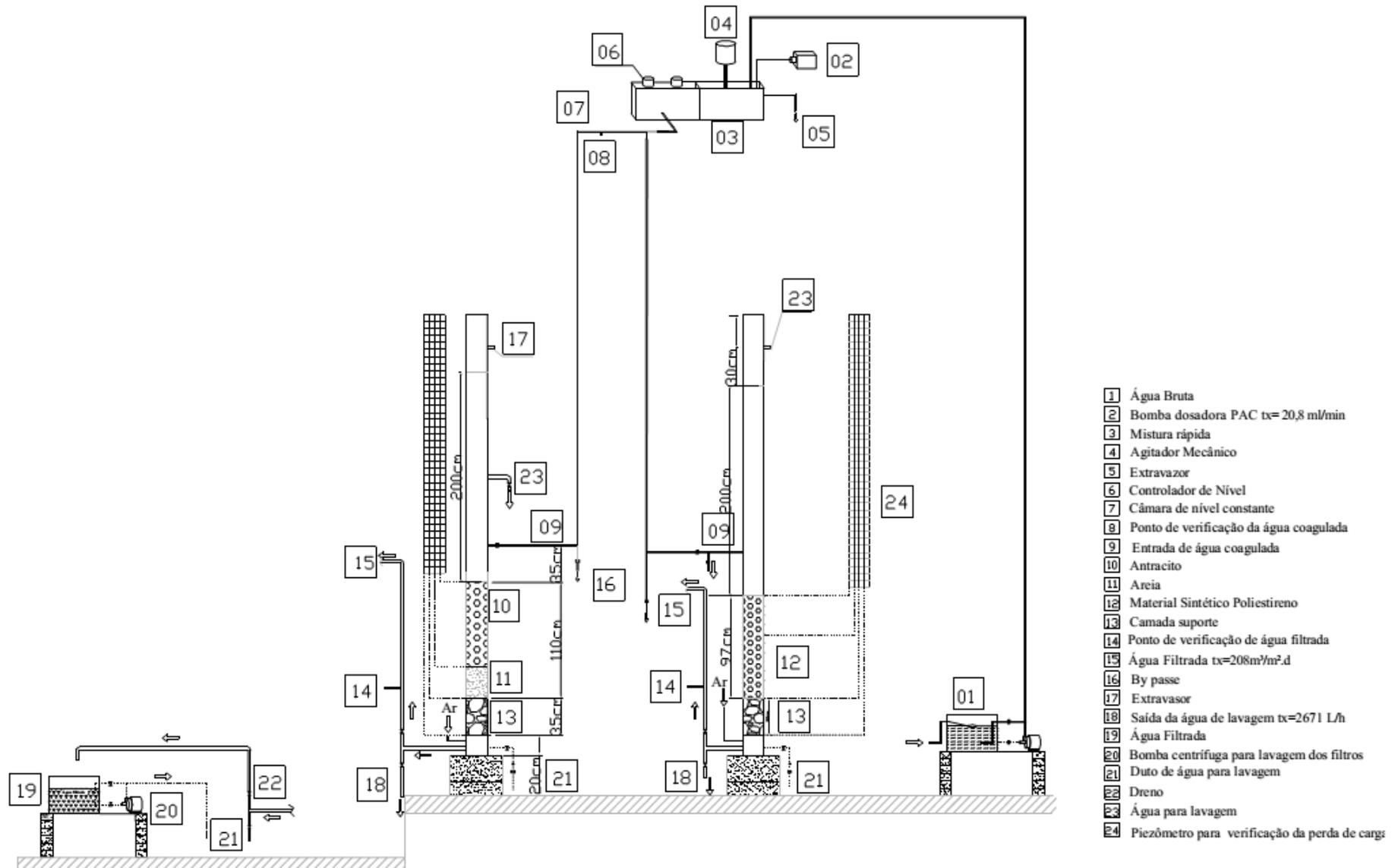
A água bruta foi recalçada por uma bomba centrífuga até a câmara de nível constante, dotada de orifício calibrado (10 mm para ambas as vazões e carga constante de 27 cm aproximadamente), de modo a fornecer a vazão de 693,6 L/h (416 m³/m².d) para a unidade de mistura rápida. A mistura rápida foi realizada em uma câmara onde a solução de coagulante PAC foi aplicado através de bomba dosadora, com concentração determinadas nos ensaios de bancada (jar-test). A

concentração ficou em $1,08 \text{ mg Al}^{+3} / \text{L}$, ou 18 mg/L de PAC. A mistura rápida foi feita através de agitador mecânico com controle eletrônico de rotação e paletas recambiáveis, com um gradiente de velocidade de 1200 s^{-1} . Após a adição de coagulante a água foi dividida, através de um controlador de nível, em duas partes iguais ($208 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ para cada filtro) e alimentou os filtros de fluxo descendente. O esquema de funcionamento é apresentado na Figura 8.

Foram utilizadas no esquema duas bombas centrifugas de $\frac{1}{2} \text{ CV}$ para elevação da água bruta até a câmara de mistura e outra de 1 CV utilizada para a retrolavagem com água. Através de um compressor, com pressão de 8 kgf/cm^2 foi introduzido ar comprimido, para a promoção do cisalhamentos, durante a limpeza. Para a dosagem do coagulante foi utilizada uma bomba dosadora, que bombeou PAC para a câmara de mistura.

A carreira de filtração foi encerrada quando a perda de carga atingiu 2 m (altura estabelecida), sendo medida através de piezômetros. Ao todo foram realizadas 25 carreiras de filtração, tanto para análise dos parâmetros de qualidade da água, quanto para a otimização dos sistemas de retrolavagem.

Figura 8 - Esquema de funcionamento do sistema piloto de filtração direta dos filtros de areia/antracito e esferas de poliestireno.



5.3.3.1 Variáveis de qualidade Monitorados

Os parâmetros que foram monitorados são alguns dos exigidos pela Portaria nº 2914 de 12 Dezembro de 2011 do Ministério da Saúde (M. SAÚDE, 2011), para se considerar a potabilidade da água em estudo. As amostras das águas foram analisadas através de: condutividade, Contagem de cianobactérias, cor aparente, cor verdadeira, pH, sólidos totais dissolvidos, temperatura e turbidez. As análises foram realizadas nas águas brutas e filtradas.

Os valores de contagem não são indicados pela portaria 2914 do Ministério da Saúde, no entanto por se tratar de água bruta com grande concentração de cianobactérias, em especial a *cylindrospermopsis raciborskii*, essa água deve ser monitorada constantemente, conforme indicado no artigo 37, parágrafo 3º e 4º da portaria 2914 do Ministério da Saúde.

Devido à composição sintética do meio filtrante com baixa massa específica, foram ser realizadas algumas análises de estireno, sobre a água tratada pelo filtro de poliestireno, em laboratório contratado. Segundo a portaria 2914, os valores de estireno não devem ultrapassar 20 µg/L.

Amostras de água filtrada foram coletadas de 01 em 01 minuto, nos primeiros 30 minutos, para análise da recuperação do filtro. Após esse tempo, foram coletadas amostras de água bruta dos dois filtros, a cada 30 minutos, para análise de qualidade da água, conforme indicado na Tabela 4.

Para a análise dos parâmetros de qualidade foram realizadas dez carreiras de filtração, das quais foram analisados os valores médios e desvio padrão. As dez carreiras de filtração também atingiram diferentes durações. Para estabelecer as médias da qualidade da água para esses diferentes tempos, foi preciso estabelecer a equivalência da duração da carreira. A cada duração da carreira, atribuiu-se o valor 100% e os valores obtidos pelas amostras a cada 30 minutos valores percentuais equivalentes a duração da carreira. Através de regressão linear, chegou-se aos valores de qualidade de água de zero a 100%, espaçados a cada 5%. Os resultados médios de cada filtro foram comparados através do teste estatístico de hipóteses Mamm-Whitney, disponível no programa Minitab 17, assim como o percentual de remoção. Trata-se de um teste não paramétrico, (pois os dados não obedecem uma distribuição normal) para amostras independentes, analisando com 95% de confiança, se as amostras são estatisticamente iguais, ou não.

Tabela 4 - Parâmetros de qualidade da água que foram analisados e equipamentos utilizados.

Parâmetros	Método	Equipamento
Conductividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Standard Methods	Condutivímetro portátil HACH – Modelo HQ40D
Contagem de cianobactérias (<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>) (cel/mL) (amostras recolhidas no início da carreira e com 1 e 2 m de carga)	(AZEVEDO & SANT'ANNA, 2006)	Câmara de contagem Sedgewick Rafter Cell S50- Microscópio BX 40
Cor aparente (uH)	Procedimento Hach adaptado do Standard methods	espectrofotômetro HACH DR/2010
Cor verdadeira (uH)	Procedimento Hach adaptado do Standard methods	Filtração em papel filtro 0,45 μm – leitura em espectrofotômetro HACH DR/2010
pH	Procedimento Hach adaptado do Standard methods	pHmetro HACH
Sólidos totais dissolvidos (mg/L)	Procedimento Hach adaptado do Standard methods	Condutivímetro portátil HACH
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Procedimento Hach adaptado do Standard methods	Equipamento multiparâmetros – HACH - Modelo HQ40D
Turbidez (uT)	Standard Methods	Turbidímetro HACH 2100P
Estireno ($\mu\text{g}/\text{L}$) (somente água filtrada pelo filtro PS) (amostras recolhidas no início e no fim da carreira)	SMEWW 6200 B 21° ed. 2005 (IT 10-355)	Cromatógrafo gasoso (laboratório contratado)
Alumínio residual (mg/L)	adaptado do Standard methods	Espectrofotômetro HACH DR/2010 (HEXIS, 2004)

Todas as análises, com exceção do estireno foram realizadas no LAPOA, localizado na Lagoa do Peri e no LAPOÁ da UFSC.

Para os parâmetros de condutividade, cor aparente e verdadeira, pH, pH de coagulação, sólidos totais dissolvidos, temperatura e turbidez amostras foram extraídas no início e a cada 30 min durante toda a carreira de filtração.

Para a análise do Estireno, amostras foram recolhidas no início, no meio e no final das carreiras de filtração, conforme recomendado pela empresa contratada SGS Environ, baseados no método SMEWW 6200 B 21° ed. 2005 (IT 10-355) e foram encaminhadas para análise em

São Bernardo do Campo em São Paulo, em um prazo máximo de 24 horas sob refrigeração de 4°C. Ao todo foram realizadas seis análises de estireno, de seis diferentes carreiras de filtração.

Para análise da contagem de cianobactérias e alumínio residual, alíquotas de 500 ml foram recolhidas nos 30 min iniciais e no final da carreira de filtração. Para a preservação da amostra de contagem foi utilizado lugol (AZEVEDO & SANT' ANNA, 2006) (0,3 mL a cada 100 mL) e para preservação do amostra para a análise do alumínio foi utilizado ácido nítrico PA (0,5 mL a cada 100mL).

Variáveis Operacionais

a) Vazão de alimentação do sistema:

As vazões de entrada/saída foram aferidas volumetricamente com auxílio de crônometros, provetas e recipientes graduados no ponto de saída da água filtrada. O procedimento foi repetido sempre que necessário. A vazão de entrada/saída de cada um dos filtros foi fixada em $347 \pm 0,2$ L/h ($208 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$).

b) Recuperação do filtro:

A recuperação foi avaliada nos 30 minutos iniciais de cada carreira de filtração. A cada minuto foi recolhida uma alíquota de água filtrada de cada um dos filtros e foi avaliada a turbidez e cor aparente. O resultado da análise indicou o tempo de acomodação do meio granular e o início de produção de água de melhor qualidade.

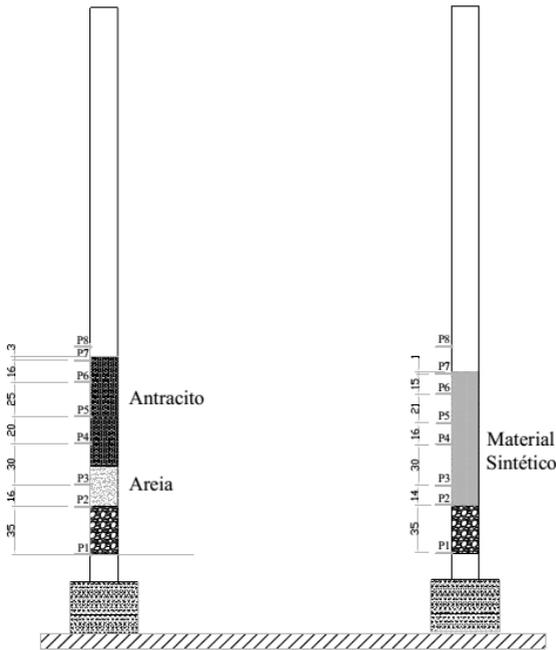
c) Perda de Carga:

A carga hidráulica foi obtida visualmente através de piezômetros instalados ao lado de cada filtro e em diferentes profundidades do leito, conforme Figura 9.

A carga hidráulica foi registrada no início da carreira e a cada 30 minutos, até término, quando a perda de carga atingir 2 metros.

Foram também determinadas através da utilização dos piezômetros (Figura 9), as frentes de impurezas, ou seja, o grau de profundidade que o filtro atinge de acordo com a variação da perda de carga ao longo do tempo.

Figura 9 - Disposição dos piezômetros ao longo dos filtros



A perda de carga em cada subcamada é igual a diferença entre os níveis de água nos piezômetros situados acima e abaixo da mesma. A perda de carga total do leito será o valor lido no piezômetros P8 menos o valor de P2.

d) Sistemas de Retrolavagem

A retrolavagem dos filtros foi efetuada após o final das carreiras de filtração. Ar e água (intercalados) foram introduzidos no sentido ascensional os processos de retrolavagem foram distintos, conforme apresentado a seguir:

- Retrolavagem do Filtro A+A: A velocidade ficou em 66 m/h (1,1 m/min) para uma expansão de 40%. A vazão de ar comprimido ficou entre 48 a 50 NL/min, medidos com rotâmetro, com pressão de 8 kgf/cm².
- Retrolavagem do Filtro PS: Através de ensaios de expansão verificou-se que a velocidade mínima de fluidificação de PS foi

0,89±0,044 m/h. Para atingir uma expansão de 40% foi necessária uma velocidade da água de 6,6 m/h (0,11 m/min), que é muito pequena se comparado as velocidades necessárias para a expansão da areia e antracito que varia entre 36 a 72 m/h (0,6 a 1,2 m/min). Assim, inicialmente utilizaram-se duas velocidades: 6,6 m/h e 22,8 m/h (0,11 e 0,38 m/min), para as expansões de 40 e 200%, respectivamente. No primeiro processo de retrolavagem utilizou-se para o filtro PS a velocidade de retrolavagem da água 6,6 m/h (0,11 m/min). Para os demais processos, utilizou-se a expansão de 200%, ou seja, velocidade de 22,8 m/h (0,38 m/min). A vazão de ar utilizada, na retrolavagem do filtro PS foi de aproximadamente 20 NL/min.

Foram realizados 10 processos de retrolavagem, que obedeceram os seguintes critérios, para os dois filtros: nos 5 minutos iniciais foi introduzido o ar, após respeitou-se um intervalo de 1 a 2 minutos (para não haver perda de material), logo em seguida 10 minutos de água. O processo foi repetido obedecendo um intervalo de 1 a 2 minutos.

Durante a limpeza foram coletadas amostras da água de lavagem a cada minuto, e analisou-se a turbidez, dessa forma pode-se otimizar o tempo de retrolavagem.

Após, outras velocidades da água de retrolavagem foram utilizadas no filtro PS, além das dez já descritas, tais como:

12,8 m/h – perfazendo uma expansão de 100% em 10 minutos de aplicação;

17,0 m/h – perfazendo uma expansão de 150% em 10 minutos de aplicação;

19,1 m/h – perfazendo um expansão de 100% em 5 minutos de aplicação;

29,3 m/h – perfazendo uma expansão de 200% em 5 minutos de aplicação;

Essas velocidades foram introduzidas após a aplicação do ar por 5 minutos e intervalos de 2 minutos, para não haver perda do material, conforme processo anterior.

Todas essas velocidades de retrolavagem foram testadas três vezes, onde foram coletadas amostras da água de retrolavagem e foram extraídas a média e o desvio padrão.

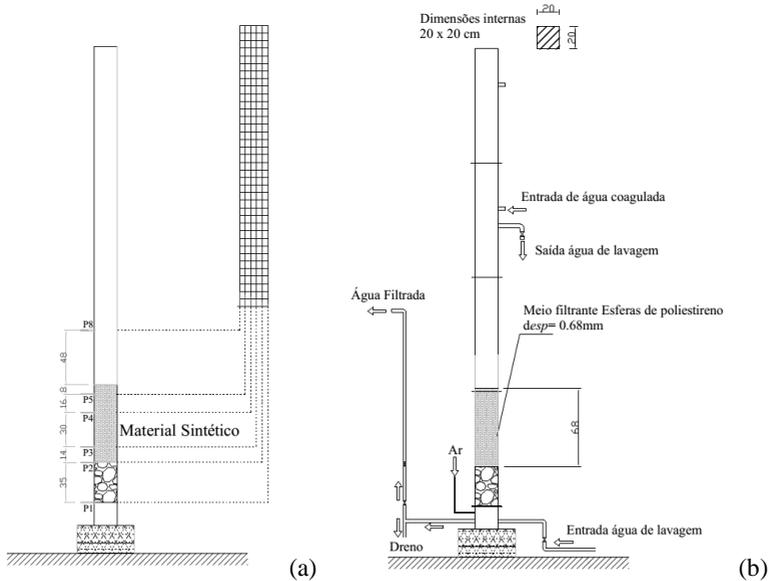
Para todas as condições foi calculado o valor da produção efetiva e comparados aos valores do filtro A+A, considerando todos os processos otimizados.

Uma vez determinado a duração da carreira de filtração e os processos de retrolavagem foi possível calcular a produção efetiva. Conforme o critério de CRITTENDEN *et al.* (2011) os filtros podem ser

projetados para alcançar uma produção efetiva de 95%, mas para isso a taxa de filtração precisa ser de no mínimo 200 m³/m².d. Este estudo apostou na ideia de que com um meio filtrante leve, poderia haver a diminuição dos volumes de retrolavagem.

Em um segundo momento a espessura do leito foi reduzida para 68 cm (Figura 10) (obedecendo a relação $L/d_{10} \sim 1000$), visto que a ação da profundidade atingida pelo leito ficou na casa dos 40 cm conforme SCHÖNTAG *et al.* (2015). Com uma espessura menor, têm-se uma perda de carga inicial menor. Assim, reduziu-se a espessura do leito, a fim de verificar o comportamento quanto à produtividade.

Figura 10 - Esquema do filtro PS. (a) disposição dos piezômetros; (b) espessura do leito.



Foram realizadas 3 carreiras de filtração com essa configuração. Os mesmos controles de operação e qualidade dos filtros foram tomados. As carreiras de filtração também atingiram diferentes durações. Os resultados médios de cada filtro foram comparados através do teste estatístico de hipóteses, assim como o percentual de remoção.

Foram realizados 3 processos de retrolavagem, que obedeceram aos seguintes critérios: nos 3 minutos iniciais foi introduzido o ar à 20NL/min, após respeitou-se um intervalo de 1 a 2 min (para não haver perda de material), logo em seguida 3 min de água (21,4 m/h), mais 1

minuto de ar, 2 min de intervalo e mais 4 min de água, atingindo expansão de 182%.

Durante a limpeza foram coletadas amostras da água de lavagem a cada minuto, e analisou-se a turbidez, dessa forma pode-se otimizar o tempo de retrolavagem.

Posteriormente, o ponto de saída da água de lavagem que estava à 117 cm acima do topo do leito, na etapa anterior (com 97 cm de espessura do leito), foi modificado ficando a 54 cm acima do topo do elemento filtrante com espessura de 68 cm. Uma velocidade de retrolavagem de 9,7 m/h atingindo uma expansão de 50% em 5 minutos de retrolavagem. Foram realizados outros 5 processos de retrolavagem, que obedeceram aos seguintes critérios: nos 2 minutos iniciais foi introduzido o ar à 30NL/min, após respeitou-se um intervalo de 1 a 2 min (para não haver perda de material), logo em seguida 5 minutos de água, mais 1 min de ar, 2 min de intervalo e mais 5 minutos de água. Em todos os casos foram determinados os tempos de carreira de filtração e tempo de recuperação para posterior cálculo de produção efetiva.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 RESULTADOS PRELIMINARES

Na etapa dos resultados preliminares, são apresentados os resultados que deram suporte para a elaboração dos resultados apresentados nos 4 artigos a seguir:

6.1.1 Caracterização dos materiais filtrantes

6.1.1.2 Esferas de poliestireno

O material esferas de poliestireno (PS) foi o material escolhido para compor o filtro por sua baixa massa específica. Este material é disponível comercialmente, sem pigmentação, leve e com diâmetro menor que 2 mm. Este produto foi adquirido através da revendedora *Soesferas*, que comercializa o produto principalmente para a Federação Paulista de Malha. Apesar de serem bastante esférico, o que não é muito recomendado para um elemento filtrante, essa característica auxília no processo de limpeza. A curva granulometrica média extraída de três experimentos desse material é apresentada na Figura 11, e apresentada na Tabela 5.

Figura 11 – Curva Granulométrica média das esferas de poliestireno (PS)

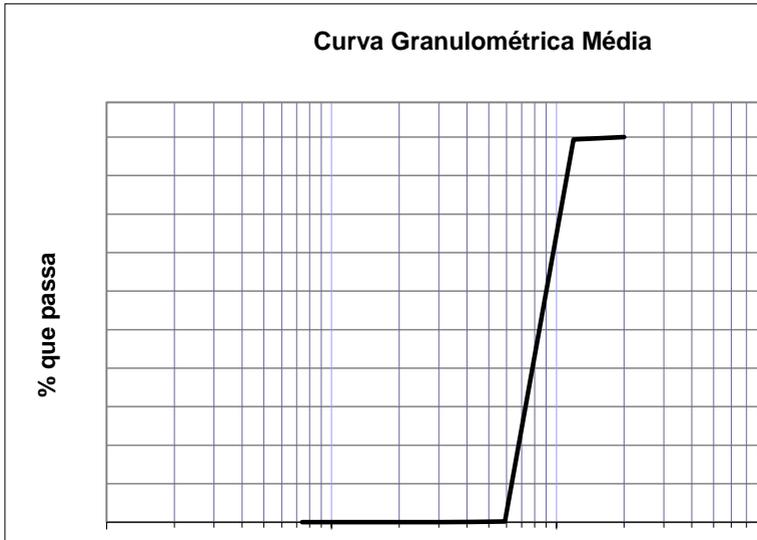


Tabela 5 - Características granulométricas de PS.

Esferas poliméricas de poliestireno		
Características	Resultados	Erro (%)
Diâmetro mínimo (mm)	0,52±0,03	5,7
Diâmetro máximo (mm)	1,25±0,05	4
Diâmetro Efetivo (mm)	0,66±0,014	2,1
D ₆₀ (mm)	0,89±0,01	1,12
Coefficiente de uniformidade	1,36±0,024	1,7
Diâmetro médio do grão (mm)	0,87±0,04	4,6

Fonte: Schöntag (2012).

A porosidade inicial foi determinada de acordo com a metodologia da AWWA (1999) e através do mesmo cálculo, foi obtido o valor médio da massa específica do material. A porosidade inicial atingiu um valor de $0,382 \pm 0,00045$, com um erro relativo de 0,11% e a massa específica chegou a um valor de $1,046 \pm 0,0005 \text{ g/cm}^3$, com erro relativo de 0,05%. A massa específica do poliestireno comercial fica entre $1,04$ a $1,09 \text{ g/cm}^3$ (MAGNO, 2012), mostrando que os resultados estão coerentes. O coeficiente de esfericidade, obtido através da equação de Ergun e pelo ensaio de expansão foi de $0,96 \pm 0,086$. Os testes de dureza foram realizados pelo Laboratório de Engenharia dos Materiais da UFSC e os valores atingidos foram de $15,2 \pm 1,15 \text{ HV}$ (Vickers), com um erro relativo de 7,6%.

A resistência cáustica e ácida avaliadas com HCl e NaOH (1%) apresentaram uma perda de 0,18% e 0,07% respectivamente. De acordo com a NBR 12216, a solubilidade não deve ultrapassar 1%.

6.1.1.3 Areia e Antracito

Os materiais areia e antracito são habitualmente utilizados na composição de filtros. Os materiais utilizados para compor o filtro já existiam no LAPOÁ (Laboratório de Potabilização de Águas) e foram reaproveitados. Para isso os materiais foram devidamente caracterizados. A curva granulométrica média da areia e antracito estão apresentadas nas Figuras 12, 13 e Tabela 6 e foram extraídas de três análises experimentais.

Figura 12 – Curva Granulométrica média da Areia

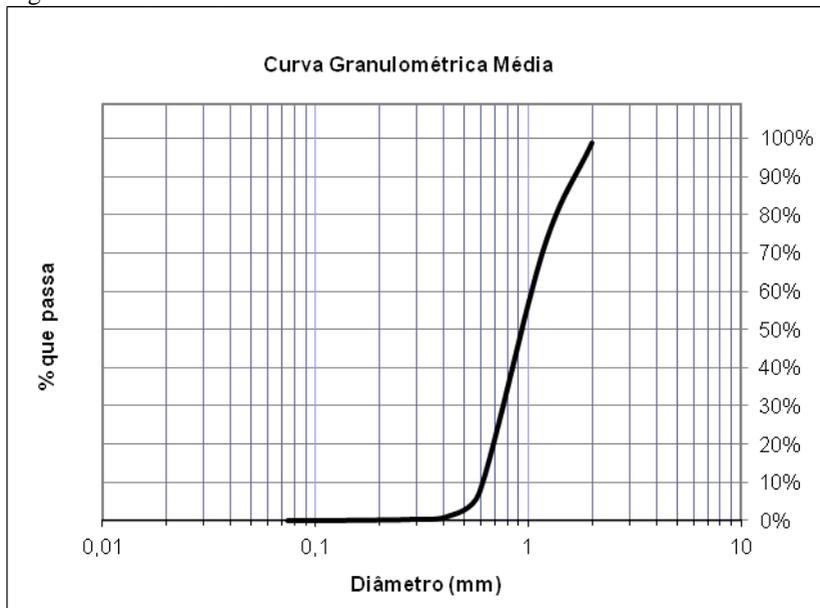


Figura 13 - Curva Granulométrica média do Antracito

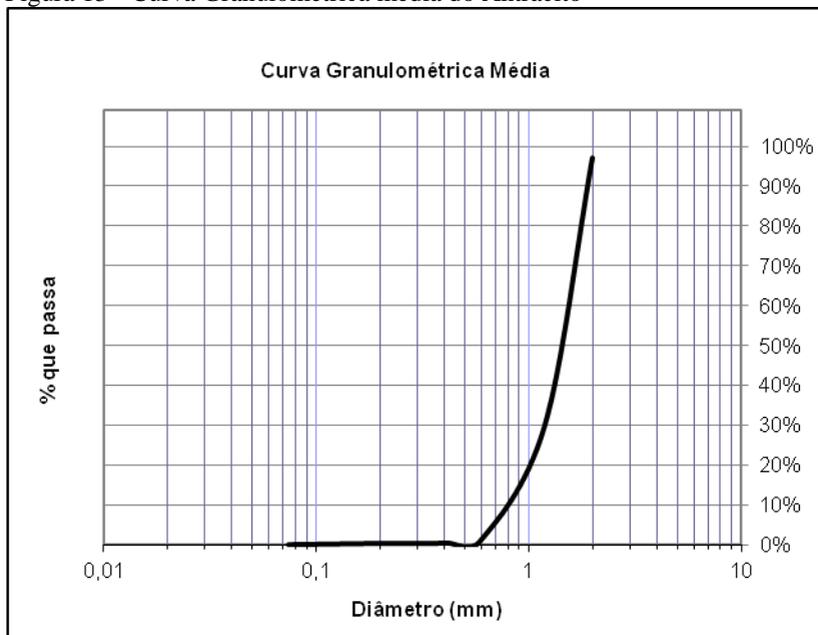


Tabela 6 - Características granulométricas da Areia e Antracito.

Características	Areia	Erro (%)	Antracito	Erro (%)
Diâmetro mínimo (mm)	0,4	5,1	0,6	4,0
Diâmetro máximo (mm)	2	3,6	2	3,5
Diâmetro Efetivo (mm)	0,62	2,2	0,85	1,9
D60 (mm)	1,04	1,2	1,4	0,55
Coef. de uniformidade	1,64	1,2	1,65	1,3
Diâmetro médio do grão (mm)	0,95	3,2	1,38	3,6

Fonte: Schöntag (2012).

A porosidade inicial da Areia atingiu um valor de $0,55 \pm 0,0027$, com um erro relativo de 1,5% e a massa específica chegou a um valor de

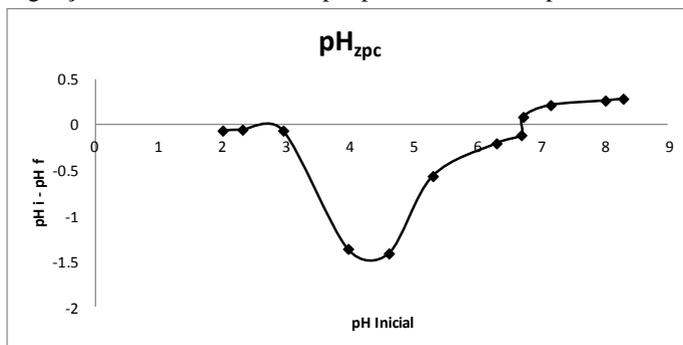
$2,61 \pm 0,013 \text{ g/cm}^3$, com erro relativo de 0,5%. A dureza da Areia fica em torno de 7 Mohs (CIDRA, 2012).

O antracito atingiu a porosidade de $0,66 \pm 0,02$, com erro relativo de 3%. A massa específica ficou em $1,35 \pm 0,013$, com erro relativo de 1%. A dureza do antracito ficou na faixa de 2 a 3 Mohs (CIDRA, 2012). A areia e antracito utilizados não foram testados quanto a resistência ao HCl e NaOH, mas por serem minerais amplamente utilizados como elementos filtrantes em filtros para tratamento de água, acredita-se que tanto a areia como o antracito apresentam boa resistência ácida e cáustica.

6.1.2 Testes da capacidade de adsorção das esferas de poliestireno

Para testar a capacidade adsorptiva das esferas de poliestireno foi preciso determinar o ponto de carga zero (pH_{zpc}) que corresponde ao valor de pH em que a soma das cargas na superfície do adsorvente é igual a zero. O resultado para as esferas de poliestireno pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Curva do pH_{zpc} em KCl 0,1N após 24 horas de contato a 20°C e agitação de constante de 250 rpm para as esferas de poliestireno.

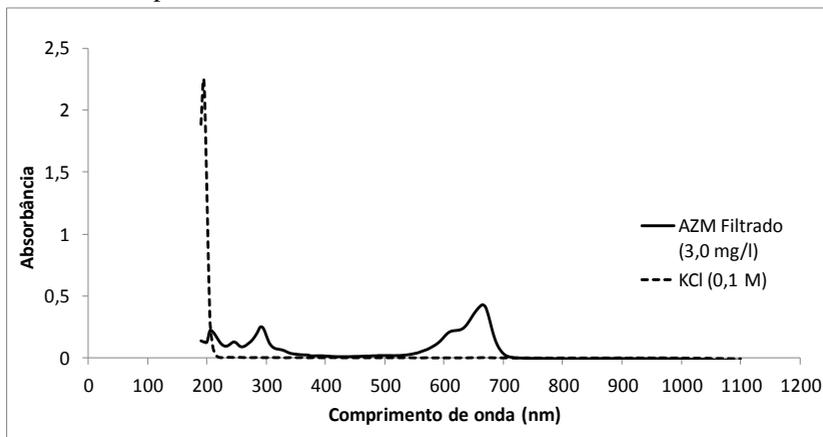


Considerando que o pH_{zpc} é de aproximadamente 6,7 admite-se que o adsorvente PS em solução KCl, no qual o pH_i estiver abaixo desse valor, apresentará seus sítios ativos protonados. Como o corante azul de metileno foi utilizado para os ensaios de adsorção e por ser um corante catiônico, a tendência é que ele seja melhor adsorvido em pH maiores (COLPANI, 2012). Assim, para a realização dos ensaios de adsorção com azul de metileno, o pH utilizado será 8, ou seja, em meio alcalino.

Parâmetros utilizados para os ensaios de adsorção

Foi realizada varredura no espectro visível de uma solução de 3,0 mg/L de Azul de metileno com pH 8, conforme Figura 15.

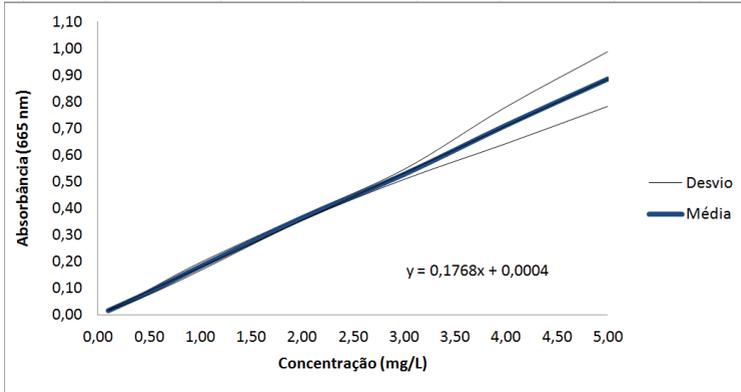
Figura 15 – Espectro de absorção da solução de 3,0 mg/L de azul de metileno com pH 8 e meio iônico de 0,1 N de KCl/NaOH.



As absorvidades do azul de metileno foram calculadas para o comprimento de onda 665 nm.

Para tanto foi construída uma curva analítica que relaciona a absorbância em 665 nm para diferentes concentrações de Azul de Metileno, conforme Figura 16.

Figura 16 – Curva analítica para o azul de metileno com pH 8 nas concentrações de 0,1; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5 mg/L em meio iônico de 0,1 N KCl/NaOH



6.1.3 Caracterização da água bruta

Os experimentos foram realizados entre novembro de 2012 e novembro de 2014, perfazendo dois anos. Nesse período a água bruta apresentou as seguintes características, conforme Tabela 7:

Tabela 7 - Características da água da Lagoa do Peri de novembro de 2012 à novembro de 2014.

Parâmetros	mínimo	máximo	média
Cor verdadeira (uH)	3,5	25	11,9
Cor Aparente (uH)	8,1	110	76,3
Turbidez (uT)	3,7	9,2	5,8
pH	5,9	7,8	6,8
Sólidos totais dissolvidos (STD) (mg/L)	47,4	59,3	48,2
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	74,1	92,8	75,4
Contagem de Cianobactérias (<i>cylindrosp, raciboskii</i>) (cel/mL) $\times 10^4$	37,5	75,4	62,4

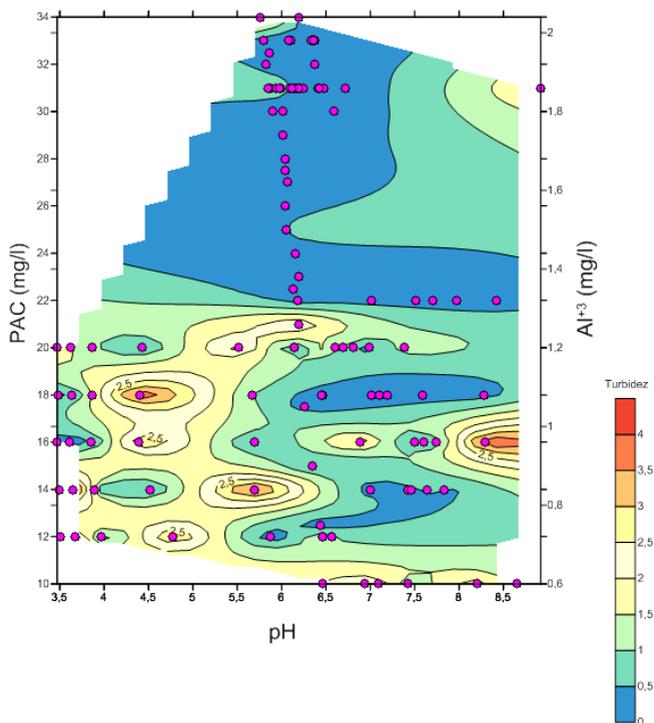
Ao todo foram realizadas 25 análises de cada parâmetro. Foram considerados os valores somente quando foram obtidas carreiras de filtração realizadas com sucesso.

6.1.4 Ensaios Jar-test

De acordo com os resultados apresentados no diagrama da Figura

17, a faixa de dosagem indicada seria na ordem de 13 mg/L de PAC. Contudo, foi escolhida a dosagem de trabalho 18 mg/L de PAC (1,08 mg/L de Al^{+3}), com a turbidez da água filtrada (pelo papel filtro whatman 40) menor que 0,5 uT, em uma faixa grande de pH (6 a 8,5). Como o pH das águas da Lagoa do Peri (no período) variou entre 5,9 a 7,8, escolheu-se essa dosagem por questões práticas, não havendo a necessidade de um regulador de pH, para essas faixas, onde haveria a necessidade e mais uma bomba dosadora, além de ser mais um parâmetro para controle. E como a adição de PAC altera muito pouco o pH da água natural adotou-se a dosagem de 18 mg/L.

Figura 17 - Diagrama *Jar-test*, para temperaturas variando entre 15,5 a 24°C. Indica a dosagem de PAC (ou Al^{+3}), a variação do pH da água coagulada e a turbidez da água após filtração em papel filtro Whatman 40.



6.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES – ARTIGOS

Nessa etapa os resultados foram divididos em 4 partes. Cada parte é referente a um artigo submetido a revistas indexadas.

6.2.1 (Artigo 1) CARACTERIZAÇÃO DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO COMO UM ELEMENTO FILTRANTE GRANULAR

Publicado na *Desalination and Water Treatment* dia 20 de junho de 2014.

1. Abordagem:

Nesse artigo foram realizadas análises para a obtenção das características desse material tais como o tamanho do grão, porosidade inicial, densidade e dureza, assim como a resistência ácida e cáustica, já apresentadas no capítulo 3.1. Além disso, foram realizados ensaios de expansão, de forma a obter as constantes para modelar matematicamente e simular o desempenho durante retrolavagem, tais como a velocidade mínima de fluidização, velocidade de sedimentação e o coeficiente de esfericidade, entre outros. Assim, foi possível simular mecanismos físicos, com alterações das velocidades superficiais (hipotética), sem uma comparação experimental. O coeficiente de permeabilidade também foi determinado, de acordo com os aspectos físicos do material. Nessa etapa não foram considerados os aspectos físico-químicos da água ou do material, uma vez que é uma análise teórica e é a primeira observação da utilização deste material, para esta finalidade.

2. Resultados

Primeiramente as constantes físicas do material foram investigadas. Posteriormente, calculou-se as variáveis relacionadas à porosidade e frações de sólido, obtidas através das velocidades superficiais. Assim, foi necessário seguir o raciocínio sugerido por alguns estudos prévios (MOHAMMED *et al.*, 2013; NASEER *et al.*, 2011; TURAN *et al.*, 2003) para se obter as respostas dos parâmetros físicos de retrolavagem. Para todas as simulações, foi considerada uma temperatura de 25 °C.

De acordo com o modelo de Wen e Yu (1966) (equação 18), a velocidade mínima de fluidificação desse material é $0,248 \pm 0,16$ mm/s

ou 0,89 m/h. A equação de Wen e Yu pode ser utilizada para a determinação da velocidade mínima de fluidificação, pois o meio é praticamente uniforme com CU igual a 1,36, e o leito com as esferas de poliestireno é facilmente fluidificado devido a sua baixa massa específica e espessura do leito de 20 cm (fluidificando todo o leito). Além disso, o valor de 0,89 m/h está dentro do desvio padrão apresentado pelos resultados experimentais (Figura 18). O resultado do ensaio de expansão também pode ser apresentado pelo percentual de expansão de acordo com a respectiva velocidade, como na Figura 19, onde a velocidade de 1,69 mm/s ou 6,08 m/h atinge expansão de aproximadamente 50%.

Figura 18 - Resultado experimental da perda de carga de acordo com a velocidade superficial pelo modelo de WEN e YU (1966).

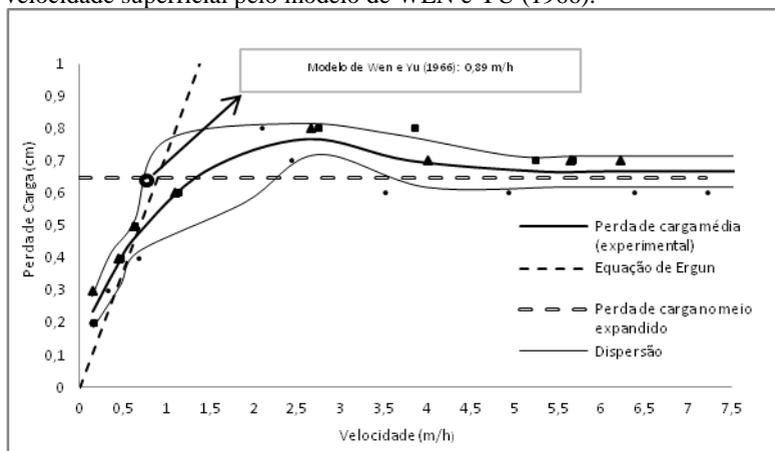
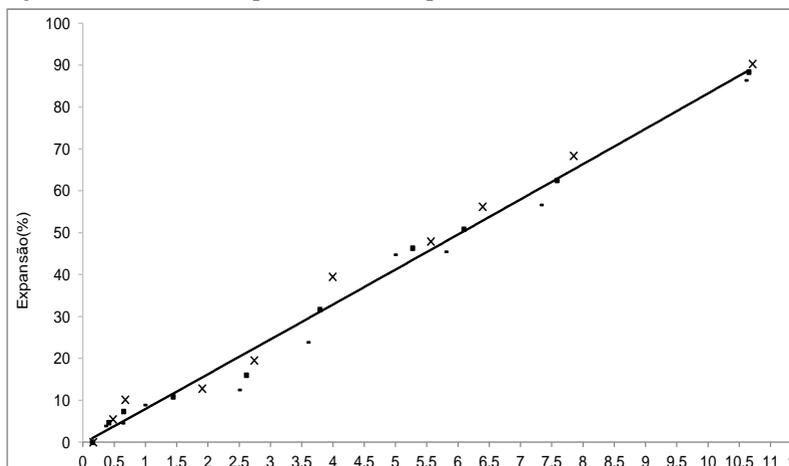


Figura 19 – Ensaio de expansão de PS (expansão (%) x velocidade (m/h))



Através dos resultados da perda de carga extraída dos ensaios de expansão, foi possível calcular a esfericidade do material, utilizando a equação de Ergun (11) (AHMED; SUNADA, 1969; CRITTENDEN *et al.*, 2011). Esse material atingiu um valor de 0.96 ± 0.086 , com um erro relativo de 4%. De fato, se o valor da esfericidade do material é 1, o resultado não muda significativamente.

Para se chegar à velocidade de sedimentação do material, seguiu-se os métodos sugeridos por CLEASBY e FAN (1981). Através de testes experimentais, foram traçadas duas marcas em uma coluna de vidro com água a $23,8^{\circ}\text{C}$ e foi contado o tempo de percolação individual dos grãos. Assim, a velocidade de sedimentação das esferas de PS foi de $10,1 \pm 1$ mm/s ou 32,65 m/h, com erro relativo de 9,9%.

Com os resultados da caracterização dos grãos, foi possível determinar através de modelos matemáticos o comportamento do material durante a retrolavagem. Os resultados obtidos para as esferas PS foram comparados com os materiais já conhecidos e estudados pela bibliografia de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades físicas dos meios filtrantes granulares modelados.

Materiais	Diâm. (mm)	Massa esp. (g/cm³)	\mathcal{E}	deq (mm)	Esf.	Vt (cm/s)	Ret
Areia*	1,00/0,84	2,65	0,467	1,006	0,73	12,58	143
Antracito*	1,68/1,41	1,73	0,597	1,516	0,46	6,95	118
Antracito*	0,853/0,69	1,46	0,564	0,815	0,64	3,94	35,7
PS esferas (média)	1,25/0,52	1,046	0,382	0,87	0,96	1,01	8,99

*dados extraídos de CLEASBY e FAN (1981)

Onde: V_t é a Velocidade de sedimentação terminal e Ret é o número de Reynolds relativo à velocidade de sedimentação. Baixos valores de sedimentação das esferas de PS mostraram que a densidade do material é ligeiramente maior que a da água. Baseado nisso, pode se concluir que a duração da retrolavagem foi prejudicada, pois pode requereu um maior tempo para a conclusão do processo.

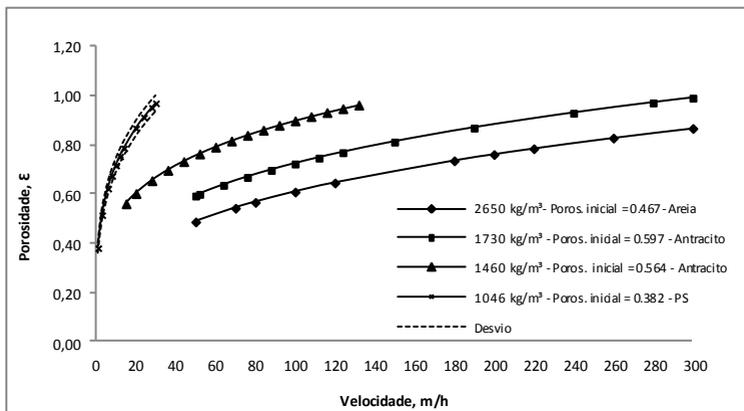
A equação apresentada por TURAN *et al.*(2003) e NASEER *et al.*(2011) foram usadas para simulação dos parâmetros físicos da retrolavagem em meios filtrantes convencionais (areia e antracito). Nestas equações, valores relativos à permeabilidade não entram. Isso não significa que não é relevante, pois influenciam essa etapa do processo. No entanto, o objetivo é seguir o modelo sugerido por esses autores. Os parâmetros de permeabilidade foram investigados em uma segundo momento.

Com a porosidade inicial determinada pelo método AWWA *et al.* (1999), a variação da velocidade superficial foi atribuída com valores entre 0 a 83,3 mm/s (300 m/h). Assim, foi possível calcular a porosidade teórica do material durante a limpeza. A idéia foi observar o desempenho da retrolavagem com o aumento da expansão, ou seja, aumento da porosidade. Obviamente existem diferenças entre a porosidade do meio limpo e sujo, assim a variação da porosidade foi analisada considerando a porosidade inicial um valor de porosidade máxima, ou seja, 100%.

O objetivo desse estudo foi caracterizar as esferas de PS como um possível elemento filtrante para filtros rápidos, comparado a areia e antracito. Nesse estudo, somente os parâmetros físicos foram analisados, como o tamanho dos grãos, a massa específica, dureza e resistência ácida e cáustica. Uma vez obtido esses valores, seguiu-se os modelos matemáticos apresentados por TURAN *et al.*(2003) e NASEER *et al.*, (2011), assim foi possível calcular a porosidade, a tensão hidrodinâmica de cisalhamento e a turbulência. Estipulou-se que a velocidade

superficial variasse entre 0 a 83,3 mm/s ou 300 m/h e os coeficientes de expansão também foram calculados pelas equações 21 e 22. Os resultados relativos à velocidade superficial e porosidade são apresentados na Figura 20.

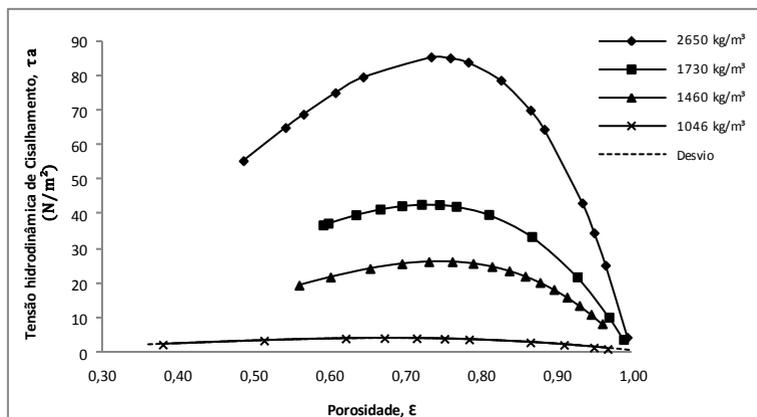
Figura 20 – Porosidade calculada a partir do grau de expansão do leito versus a velocidade superficial dos materiais com diferentes massas específicas.



A Figura 20 ilustra o comportamento do meio filtrante com as taxas de retrolavagem necessárias para a fluidificação do meio. Percebe-se que grãos mais leves necessitam de menor velocidade para a retrolavagem. As esferas de PS precisam de uma velocidade de 2,2 mm/s ou 7,9 m/h para atingirem uma expansão entre 65 e 85% e uma porosidade de 0,72 aproximadamente. Já a areia precisa de 50 mm/s (180 m/h) para a mesma função. Os desvio apresentado refere-se ao erro acumulado, relativo aos resultados experimentais.

Uma vez determinada a porosidade, de acordo com as velocidade superficiais, a tensão hidrodinâmica de cisalhamento foi calculada. Porém, para se chegar ao resultado, precisou-se primeiro determinar a velocidade de fricção, o coeficiente α e comprimento de Monin-Obukhov (equações 24 a 28). Os resultados relativos a porosidade são apresentados na Figura 21.

Figura 21 – Variação da tensão hidrodinâmica de cisalhamento em função de diferentes porosidades do meio filtrante.



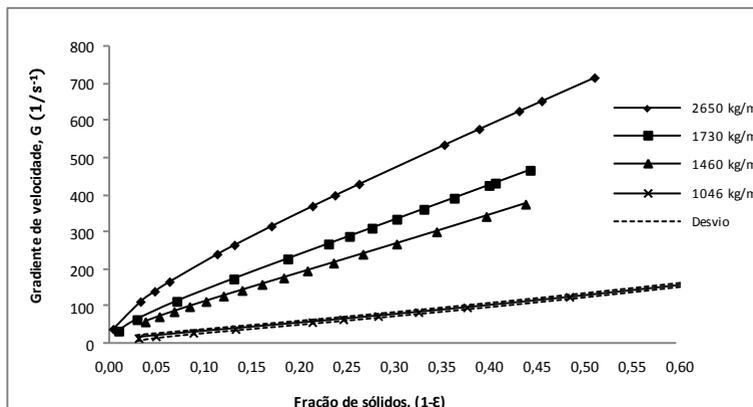
A tensão hidrodinâmica de cisalhamento contribui para o despreendimento do material aderido aos grãos durante a filtração, na quebra dos flocos formados, facilitando a retrolavagem. Na Figura 21 há comportamentos distintos entre os diferentes materiais. Entende-se que a tensão hidrodinâmica de cisalhamento é pequena quando a porosidade é baixa, porque a fricção entre os grãos é menor, devido à falta de turbulência. A Figura 21 apresenta seu ápice com a porosidade entre 0,7 e 0,8 e com o aumento da porosidade os grãos afastam-se, reduzindo a fricção e assim a tensão hidrodinâmica de cisalhamento. Além disso, diferente da areia e antracito, as esferas de PS têm tensão hidrodinâmica de cisalhamento menor, sendo que o maior valor que atingiu foi em torno de 4 N/m² a uma porosidade de 0,7, o que corresponde a uma baixa velocidade e alta expansão (comparado a areia e antracito). O desvio, referente ao erro propagado dos resultados experimentais, neste caso é tão pequeno que é quase imperceptível junto ao valor médio. Assim, dependendo das características da água bruta, do tipo e quantidade de material retido durante a filtração, essa agitação não será suficiente para a separação das partículas e dos grãos. Assim, esse processo deverá requerer um suplemento para a realização dessa tarefa, como, por exemplo, a adição de ar.

À primeira vista, o melhor material teria uma massa específica mais elevada, porque, com uma tensão de cisalhamento hidrodinâmico e fricção maiores, haveria um maior despreendimentos das partículas. No entanto, a característica da água bruta, assim como a velocidade ótima e

os volumes de água utilizados na limpeza devem ser considerados, buscando-se sempre a maior produção efetiva.

Com estes parâmetros de velocidade de fricção (eq. 28) e a constante universal (eq.25), é possível calcular o gradiente de velocidade (Eq.29). Os resultados do gradiente de velocidade foram relacionados com a fração de sólidos e são mostrados na Figura 22.

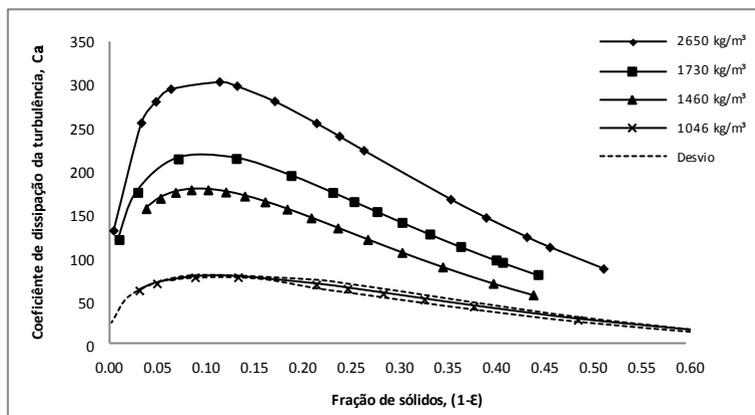
Figura 22 – Gradiente de velocidade vs. Fração de sólidos



Como visto na Figura 22, o valor do gradiente de velocidade aumenta com o aumento da fração de sólidos e a massa específica do material (TURAN *et al.*, 2003). Além disso, é percebido que para uma velocidade superficial menor, resultará em um gradiente de velocidade maior. Para as esferas de PS é observado que nas condições ótimas de cisalhamento, ou seja, fração de sólidos de aproximadamente 0,31, o gradiente de velocidade é 78 s^{-1} .

Determinando a tensão hidrodinâmica de cisalhamento e o gradiente de velocidade, o coeficiente de dissipação da turbulência pôde ser calculado pela equação 32. Os resultados foram relatados para as frações de sólidos e são apresentadas na Figura 23.

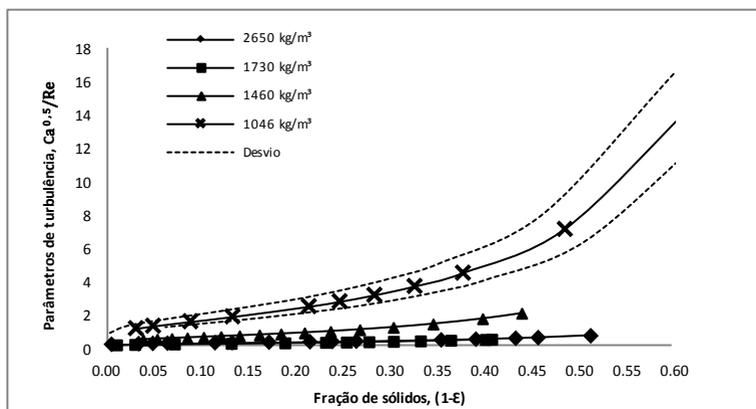
Figura 23 – Coeficiente de dissipação da turbulência vs. Fração de sólidos.



O valor de Ca indica a contribuição das flutuações de turbulência para a dissipação de energia total em um filtro. Em todos os casos da Figura 23 é observado que o valor máximo de Ca está em uma fração de sólidos de aproximadamente 0,1, esse coeficiente diminui com o aumento da fração de sólidos. Observou-se também que o valor de Ca reduz com a diminuição da massa específica e com o tamanho dos grãos. Isto pode significar que a energia dissipada será menor quando o material é mais leve. No entanto, esta observação precisa ser analisada detalhadamente, porque de acordo com a bibliografia, quanto maior a densidade e o tamanho de grão, menor será a energia dissipada (NASEER *et al.*, 2011; TURAN *et al.*, 2003). Recomenda-se realizar um estudo detalhado com o mesmo material, porém com diâmetros específicos diferentes, assim como, diferentes materiais com diâmetros específicos iguais, para que se possa fazer uma afirmação quanto a variação da energia dissipada.

Finalmente, com o coeficiente de dissipação de turbulência, o parâmetro de turbulência foi determinado pela equação 33. Como os outros parâmetros, os parâmetros de turbulência estão relacionados com os valores da fração de sólidos. Os resultados são mostrados na Figura 24.

Figura 24 – Parâmetros de turbulência vs. Fração de sólidos



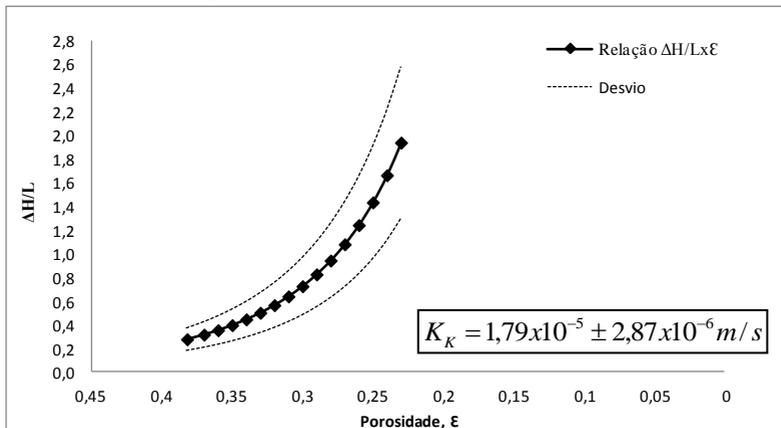
Esse parâmetro caracteriza o efeito de turbulência e suas intensidades. É observado na Figura 24, que a intensidade da turbulência aumenta com o aumento da fração de sólidos. Do mesmo modo, com o aumento da massa específica e diminuição do tamanho dos grãos. Os grãos mais leves causam um aumento na taxa de turbulência em relação às partículas mais pesadas. As esferas de PS são mais susceptíveis a turbulência quando comparadas à areia e antracito, que são mais pesados e precisam de valores altos de velocidades e fração de sólidos, para alcançar valores de turbulência maiores. Neste caso, quanto maior for a fração de sólidos e turbulência, maior será o desvio. A turbulência auxilia na separação das partículas durante o processo de retrolavagem. Quando as partículas estão soltas e são pequenas elas são mais facilmente transportadas para fora do filtro durante o processo de limpeza.

Para determinar o coeficiente de permeabilidade, os únicos parâmetros utilizados foram as características físicas de PS. Nesse caso não foram considerados os parâmetros de retrolavagem modelados. A perda de carga do filtro com meio limpo foi medida no início de cada carreira de filtração, realizada 10 vezes. Nessa etapa, diferentes ciclos de retrolavagem e a diminuição da permeabilidade inicial indicada pela variação da perda de carga e diferentes porosidades iniciais foram consideradas.

Para a porosidade inicial, foi medido um valor de $0,382 \pm 0,0045$, a relação entre a perda de carga (ΔH) e espessura do meio filtrante (L) ficou em $0,27 \pm 0,04$ m. Portanto, o coeficiente de permeabilidade das

esferas PS, utilizada como um meio filtrante, em água à uma temperatura de 25°C, foi calculada. O resultado pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Curva $\Delta H/L$ em diferentes estágios de porosidade (colmatação) e seus coeficientes de permeabilidade.



O coeficiente de permeabilidade relativo a variação da perda de carga, e com a porosidade decrescente devido a elevação da colmatação do filtro foi de $1,79 \times 10^{-5} \pm 2,87 \times 10^{-6}$ m/s. A linha pontilhada indica a variação de acordo com os resultados experimentais.

O coeficiente de permeabilidade dos leitos de areia, geralmente encontrado é de 1×10^{-4} m/s (para diâmetros específicos superior a 2 mm) e menores que este valor para leitos mais finos (menores que 0,074 mm). Em comparação com o coeficiente de permeabilidade da areia, o resultado para as esferas de poliestireno foi satisfatório.

3. Conclusão

De acordo com os modelos e testes apresentados, verifica-se que as características físicas das esferas de PS mostraram-se capazes de serem utilizadas como um elemento filtrante em filtros rápidos de fluxo descendente. No entanto, parâmetros físico-químicos, entre outros, ainda precisam ser analisados. O material tem um tamanho de grãos semelhante aos grãos da areia, aproximadamente homogêneos. Eles apresentam uma esfericidade de $0,96 \pm 0,086$ e baixa rugosidade, que embora não seja recomendado para a filtração é uma característica

valiosa no processo de retrolavagem. O material é leve, o que era uma característica procurada para este estudo. As esferas de PS atingiram uma velocidade mínima de fluidificação de $0,248 \pm 0,16$ mm/s (0,89 m/h) em testes de expansão experimentais, o que pode trazer benefícios econômicos para sistemas de limpeza em filtros rápidos para tratamento de água potável. Tem resistência cáustica e ácida significativa, não gerando subprodutos na água. Tem uma dureza de $15,2 \pm 1,15$ HV, que corresponde a 1 MOH (CIDRA, 2012), mas tem plasticidade notável, de modo que o material não quebra, mas apresenta deformações, por conseguinte, essa característica precisa ser avaliada a longo prazo.

Verificou-se que durante a retrolavagem, um cuidado especial é necessário, pois é um elemento com baixa massa específica. Como foi verificado através de ensaios experimentais de expansão, baixas velocidades são necessárias para fluidificação, o que resultaria em menores volumes de água durante o processo de limpeza. No entanto, é necessário controlar outros parâmetros importantes durante o processo de retrolavagem, tais como a tensão hidrodinâmica de cisalhamento, gradiente de velocidade e a turbulência envolvidos no processo de despreendimento e quebra dos flocos aderidos durante a filtração. Estes parâmetros foram modelados. Foi constatada que uma baixa velocidade é necessária para alcançar uma porosidade aproximada de 0,7 (expansão entre 65 e 85%), ou 18 vezes menor que a velocidade aplicada à areia, para atingir o mesmo estado de porosidade durante a expansão. Além disso, o gradiente de velocidade necessário para a mesma fração de sólidos seria seis vezes inferior. Embora os grãos mais leves e menores aumentem a taxa de turbulência, mostram uma tensão de cisalhamento hidrodinâmico e dissipação de turbulência baixas. Então, dependendo das características da água bruta, isto exige um suporte para aumentar o cisalhamento durante retrolavagem, a fim de quebrar os flocos formados pelas impurezas retidas durante a filtração. Recomenda-se um estudo aplicado sobre qual seria a melhor maneira de aumentar esse cisalhamento. Uma possibilidade é a introdução de ar, que seria adequado no presente caso, uma vez que é um material leve.

Durante o experimento para determinar o coeficiente de permeabilidade, procedimentos de retrolavagem foram realizados após o término das carreiras de filtração. Neste processo de lavagem, foi utilizado ar para a quebra dos flocos formados durante a filtração. A

utilização do ar, aparentemente, mostra bons resultados, mas deve ser melhor analisado.

O resultado do coeficiente de permeabilidade é satisfatória. Além disso, esse experimento indica que este elemento pode ser utilizado como um meio de filtração e é possível realizar retrolavagens.

Como a taxa de retrolavagem (água) precisa ser grande o suficiente para arrastar as partículas coletadas durante a filtração, estes estudos sugerem que, para alcançar uma velocidade de lavagem ótima, é essencial conhecer a água bruta a ser tratada, pois o arraste depende das características destas impurezas retidas durante a filtração. Além disso, baixas velocidades de sedimentação sugerem que haverá necessidade de um tempo maior para a realização da retrolavagem.

Outros parâmetros ainda precisam ser analisados para a utilização deste material, tal como a sua capacidade de filtração, pelo índice de filtração, a ação da profundidade que esse filtro atinge, visando otimizar a espessura do leito, e a qualidade final da água filtrada. Uma outra investigação deve ser conduzida a fim de minimizar os tempos necessários para a realização da retrolavagem, e se as velocidades empregadas no processo podem ser diminuídas, a fim de, diminuir o volume de água filtrada utilizado na limpeza.

Como vantagem, o material apresenta uma baixa perda de carga, possibilitando a redução de custos na construção de sistemas de limpeza, a utilização de bombas de menor potência, ou a construção de reservatórios mais baixos.

6.2.2 (Artigo 2) CAPACIDADE DE FILTRAÇÃO EM FILTROS RÁPIDOS E CARACTERÍSTICAS ADSORTIVAS DAS ESFERAS DE POLIESTIRENO.

1. Abordagem:

Nesse artigo aspectos sobre os mecanismos de filtração foram considerados. Análises de retenção da turbidez e variação da perda de carga ao longo da filtração foram observadas. A capacidade adsortiva também foi considerada. Esse material apresentou índices de filtração aceitáveis, além de apresentar características de aderência de particulados em sua superfície, que foram observados através de microscopia eletrônica por varredura.

Foi proposto nesse trabalho uma adaptação do pressuposto de CRITTENDEN *et al.* (2011). Foram considerados os valores médios de turbidez da água filtrada. A perda de carga aumenta à taxa constante onde, a taxa de variação da turbidez dividida pela área do leito em função do tempo de detenção no filtro, pode ser demonstrada pela equação 51:

$$T_{turbidez} = \frac{v(T_0 - T_F)t_i}{L} \quad (53)$$

Onde: $T_{turbidez}$ = taxa de retenção da turbidez (uT); v = velocidade de aproximação (m/s); $(T_0 - T_F)$ = turbidez inicial menos turbidez final (uT); t_i = Tempo em determinado instante (s); L = espessura do leito (m).

Assim, foi possível determinar o grau de retenção médio da turbidez ao longo da filtração. Com esses valores de turbidez, também foi possível determinar o índice de filtrabilidade de acordo com o sugerido por Ives (1978).

Foram também determinadas as frentes de impurezas, ou seja, o grau de profundidade que o filtro atinge de acordo com a variação da perda de carga ao longo do tempo.

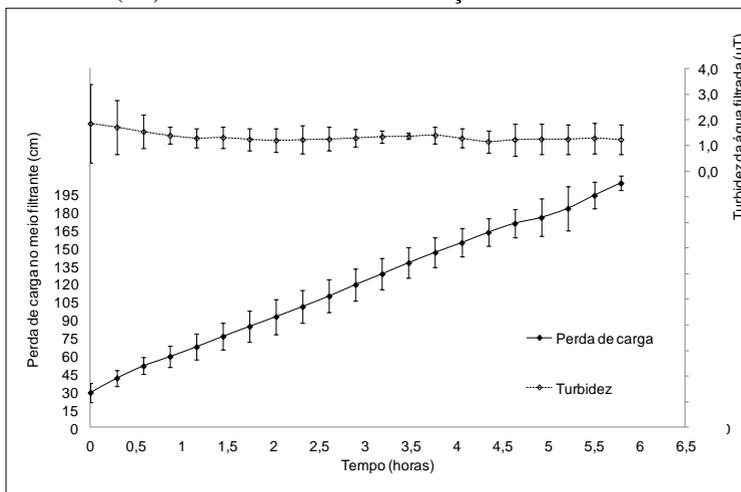
Além da capacidade adsortiva analisada através da técnica do banho infinito, o elemento filtrante foi analisado de forma qualitativa. Para isso, foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura através do equipamento JEOL JSM-6390LV, com auxílio do Laboratório Central

de Microscopia Eletrônica da UFSC (LCME). Foram registradas imagens ampliadas dos grãos filtrantes e como as partículas da suspensão ficaram aderidas à sua superfície. Assim, foram extraídas algumas conclusões sobre o elemento filtrante.

1. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O tempo de duração média de dez carreiras analisadas foi $5,8 \pm 1,4$ h (Figura 26). A carreira de filtração é relativamente curta se comparada a filtros convencionais de dupla camada, que chegam a pelo menos o dobro disso.

Figura 26 - Comportamento médio da perda de carga no meio filtrante (cm) e turbidez (uT) durante a carreira de filtração.

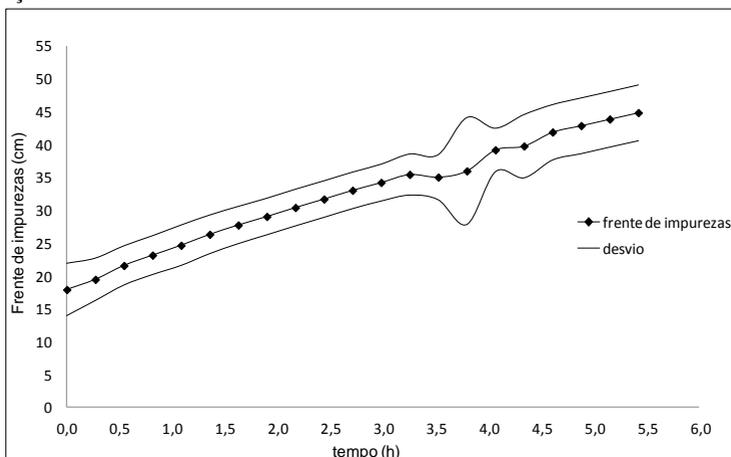


Isso ocorre porque a porosidade do meio PS é menor que a porosidade de filtros convencionais de areia, visto que, o tamanho efetivo dos grãos, o coeficiente de uniformidade e a esfericidade evidenciam esse fato. Além disso, a grande quantidade de cianobactérias (*cylindrospermopsis raciborskii*) presentes na lagoa do Peri, manancial de abastecimento da água bruta, na ordem de $62,4 \cdot 10^4$ cel/mL, faz com que a penetração (filtração em profundidade) seja baixa, ou seja, menor que 40 cm.

As frentes de impurezas ou ação da profundidade podem ser entendidas como o resultado de uma sucessão de estágios relativos a

colmatção das subcamadas que compõem o meio filtrante. O avanço das frentes de impureza, ou ação da profundidade durante o tempo de filtração são descritas pela Figura 27.

Figura 27 - Comportamento das frentes de impurezas ao longo da carreira de filtração.



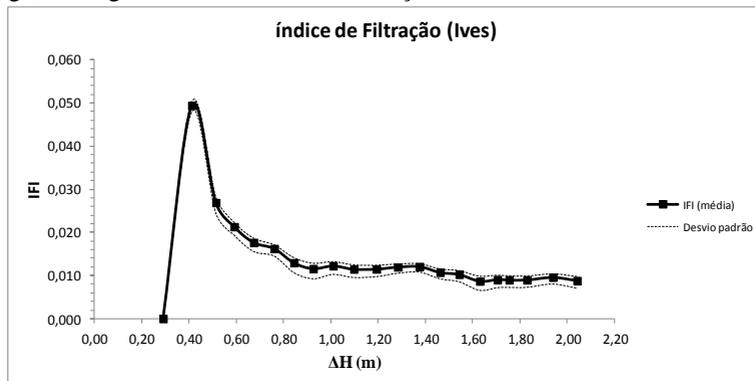
Foi possível perceber que para atingir maiores profundidades durante a filtração seria necessário maior carreira de filtração. Contudo os 2 metros de perda de carga (altura máxima designada) foram atingidos antes que a frente de impurezas alcançasse maiores profundidades. Com esse resultado, acredita-se que a espessura do leito possa ser reduzida.

Foram extraídos os valores de turbidez e perda de carga durante toda a filtração (Tabela 9) e foi possível calcular os índices de filtrabilidade segundo o critério estabelecido por Ives (1978), como pode ser visto na Figura 28.

Tabela 9 - Valores médios dos tempos, perdas de carga e turbidez do afluente / efluente extraídos do filtro durante 10 carreiras de filtração (valores médios).

t (%)	t (min)	$\Delta H(\text{cm})$	Ta (uT)	Te (uT)	IFI (IVES)
0	0,0	29,1	5,6	1,9	0,0
5	17,4	41,2	5,7	1,7	0,0494
10	34,8	51,4	5,9	1,5	0,0269
15	52,2	59,2	5,1	1,4	0,0213
20	69,6	67,4	4,9	1,3	0,0177
25	87,0	76,1	4,9	1,3	0,0162
30	104,4	84,4	5,4	1,2	0,0130
35	121,8	92,6	5,5	1,2	0,0116
40	139,2	101,0	5,1	1,2	0,0122
45	156,6	109,8	5,3	1,3	0,0115
50	174,0	119,4	5,4	1,3	0,0115
55	191,4	128,3	5,2	1,3	0,0120
60	208,8	137,6	5,2	1,4	0,0121
65	226,2	146,3	5,9	1,4	0,0107
70	243,6	154,4	5,5	1,3	0,0102
75	261,0	163,1	5,8	1,2	0,0087
80	278,4	170,6	5,8	1,2	0,0091
85	295,8	175,5	5,8	1,3	0,0090
90	313,2	183,0	5,7	1,2	0,0090
95	330,6	194,0	5,5	1,3	0,0096
100	348	204,2	5,7	1,2	0,0088

Figura 28 – Comportamento do IFI (Ives,1978) em relação à perda de carga, ao longo de toda a carreira de filtração.



A velocidade de aproximação foi constante, ou seja, 14,4 cm/min. Para cada nível de perda de carga determinado foram calculados os índices de filtrabilidade, onde foram determinados os valores médios e o desvio padrão do IFI. Os índices de IFI indicam uma maior eficiência de filtração. Como pode ser observado, os índices de IFI começam a decair quando a perda de carga chega a 50 cm e estabilizam após uma perda de carga de 80 cm, o que corresponde a aproximadamente 1,0 h de filtração. Esse período de recuperação, se considerado, é muito alto, visto que a duração da carreira de filtração é em média 5,8 h, o que não é ideal em termos de custo x benefício.

Em termos práticos foi considerado como tempo de recuperação os valores de turbidez. O período de recuperação do filtro PS, segundo esse critério, foi de 12 min. De fato, o resultado da qualidade da água filtrada não é ideal (Tabela 9). Isso acontece porque a tecnologia de filtração direta não é a recomendada para a água bruta com as características apresentadas pelo manancial da Lagoa do Peri. Essa tecnologia foi escolhida, pois os índices de turbidez e cor verdadeira do manancial são baixos, ou seja, inferiores a 10 uT e 20 uH (DALSASSO; SENS, 2006). Contudo, a elevada presença de fitoplânctons no manancial, com domínio de espécies filamentosas como a *cylindrospermopsis raciborskii* e *pseudoanabaena sp*, com tamanhos menores que 5 μ m, prejudicaram a qualidade da água produzida pelos filtros rápidos diretos. Todavia, a qualidade da água, nesse caso, não invalida os resultados.

O índice de permeabilidade foi determinado como sendo de $K_K = 1,79 \times 10^5 \pm 2,87 \times 10^6 \text{ m/s}$ (SCHÖNTAG & SENS, 2014). Foram calculadas as taxas de elevação de perda de carga e de retenção da turbidez, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Variação da perda de carga e retenção da turbidez durante a filtração.

<i>Parâmetro</i>	<i>média</i>	<i>desvio padrão</i>
Taxa de variação da perda de carga (cm) a cada minuto	0,517	0,0781
Retenção da turbidez (uT) a cada variação da perda de carga (cm)	0,108	0,0014

A turbidez e a perda de carga inicial (primeira hora) não foram considerados por se tratar do período de recuperação do filtro, onde a variação dos parâmetros não se mostrou constante. A retenção da turbidez foi considerada apenas nos 40 cm iniciais, ou seja, profundidade atingida pela frente de impurezas, ou ação da profundidade. Esses resultados demonstraram as características do material, com CU igual 1,36 e porosidade do leito em torno de 38,2%, a elevada variação de perda de carga e retenção de turbidez nas camadas iniciais do elemento filtrante.

De acordo com os resultados apresentados nas Figura 27 e 28 não há transpasse até o momento em que o filtro atinge a perda de carga máxima, ou seja, 2 m. Esses resultados são equivalentes aos apresentados em trabalho anterior, como por exemplo PROSAB 3 (DI BERNARDO, 2003) onde para o mesmo manancial, em filtros rápidos descendentes, obtiveram curtas carreiras de filtração, sem transpasse, havendo a retenção de impurezas apenas no início do leito filtrante.

Isso ressalta mais uma vez a idéia de que é possível diminuir a espessura do leito a uma espessura ótima (sem transpasse). Isso poderia acarretar em uma maior carreira de filtração devido a diminuição da perda de carga inicial.

Os resultados da análise da determinação da área superficial das esferas de poliestireno são apresentados na Tabela 11. Pode ser observado que a área superficial das esferas de poliestireno é pequena se comparada a outros materiais indicados para adsorção, por exemplo a área superficial do carvão ativado pode variar de 100 a 1200 m²/g.

Tabela 11 - Resultados da área superficial, diâmetro e volume dos poros para as esferas de poliestireno.

Parâmetros	Valores obtidos pelos ensaios BET
Área superficial (m ² /g)	1,27
Volume total dos poros menores que 31917,2 Å (cm ³ /g)	2,24x10 ⁻³
Média diâmetro dos poros	70,34 Å

Å (angstrom) – 1Å = 10⁻¹⁰ m

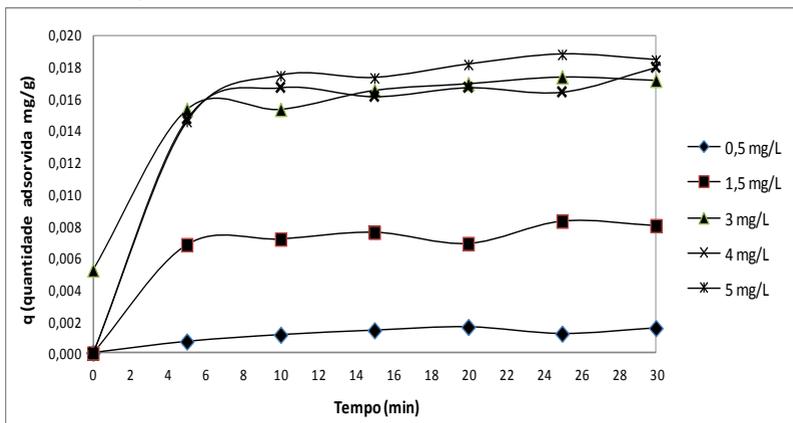
A capacidade adsorptiva do material também foi analisada.

Conforme verificado na metodologia, a carga zero das esferas de poliestireno encontra-se aproximadamente no pH 6,7 e conforme analisado, se o pHi estiver abaixo desse valor, apresentará seus sítios ativos protonados. Como o corante azul de metileno foi utilizado para os ensaios de adsorção e por ser um corante catiônico, a tendência é que ele seja melhor adsorvido em pH's maiores (COLPANI, 2012). Assim, para a realização dos ensaios de adsorção com azul de metileno, o pH utilizado foi 8, ou seja, em meio alcalino.

Os ensaios foram realizados com o meio iônico controlado sob solução de 0,1N KCl, portanto não se analisou o efeito da força iônica durante a adsorção.

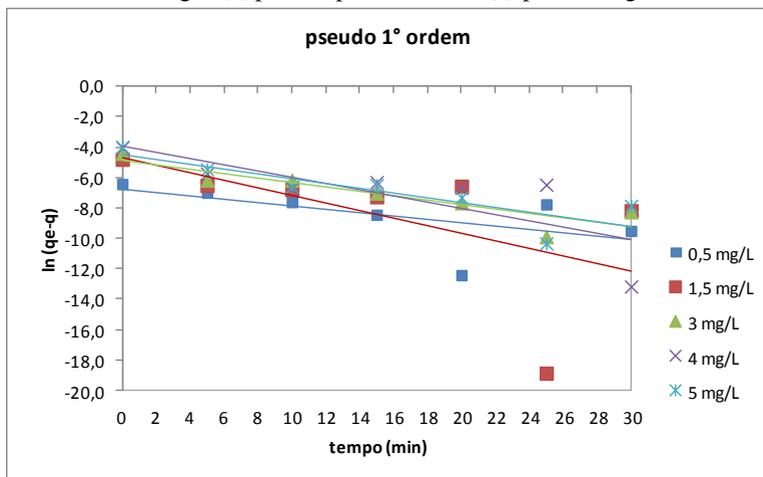
Quanto a cinética de adsorção, a quantidade de AM adsorvida pelas esferas PS *versus* o tempo, para cinco concentrações iniciais, pode ser verificada na Figura 29. As soluções apresentaram equilíbrio a partir dos 10 minutos de contato, e indicam que quanto maior a concentração inicial de azul de metileno maior a quantidade adsorvida.

Figura 29 – Quantidade adsorvida de azul de metileno *versus* tempo para as esferas de poliestireno, 20°C, em cinco valores de concentrações iniciais: 0,5; 1,5; 3; 4; 5 mg/L

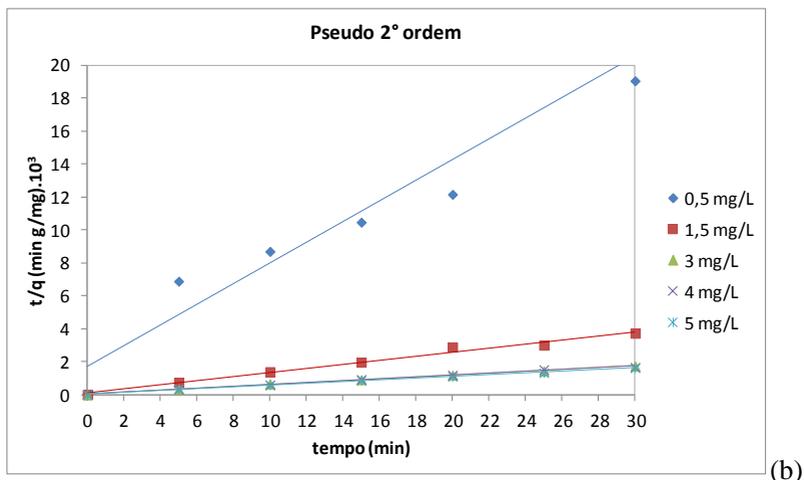


Os dados da Figura 29 ajustados para o modelo de pseudo-primeira-ordem e pseudo-segunda-ordem das equações 42 e 44, respectivamente são apresentados na Figura 30, para as cinco concentrações iniciais e os resultados são apresentados na Tabela 12.

Figura 30 – Modelos cinéticos aplicados aos dados do azul de metileno nas esferas de poliestireno, 20°C, em cinco valores de concentrações iniciais: 0,5; 1,5; 3; 4; 5 mg/L (a) pseudo-primeira-ordem; (b) pseudo-segunda-ordem.



(a)



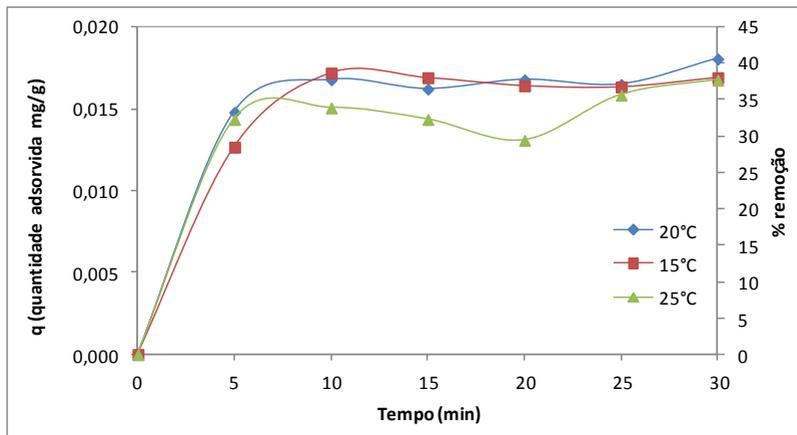
Na Tabela 12 os coeficientes de correlação para pseudo-primeira-ordem, r_1 apresentam valores entre 0,3209 e 0,8118 e os valores para pseudo-segunda-ordem, r_2 , entre 0,9196 e 0,9982. Portanto, o modelo mais apropriado para estes dados é o de pseudo-segunda ordem, pois apresenta valores de r_2 mais próximos a 1.

Tabela 12 – Parâmetros cinéticos da adsorção do azul de metileno nas esferas de poliestireno a 20°C.

mg/L	q_e (mg/g)	K_1	r_1	K_2	r_2
0,5	0,00165	0,1116	0,3588	231,9	0,9196
1,5	0,00833	0,2473	0,3209	134,68	0,9196
3,0	0,01750	0,1461	0,8118	89,30	0,9982
4,0	0,01805	0,2065	0,6032	81,61	0,9942
5,0	0,01890	0,158	0,7368	63,89	0,9973

Quanto ao efeito da temperatura na quantidade adsorvida e na porcentagem de remoção de AM nas esferas de poliestireno a 15, 20 e 25°C, são apresentadas na Figura 31, para concentração inicial de 4,0 mg/L.

Figura 31 – Quantidade adsorvida de azul de metileno nas esferas de poliestireno para três diferentes temperaturas; percentagem de remoção.

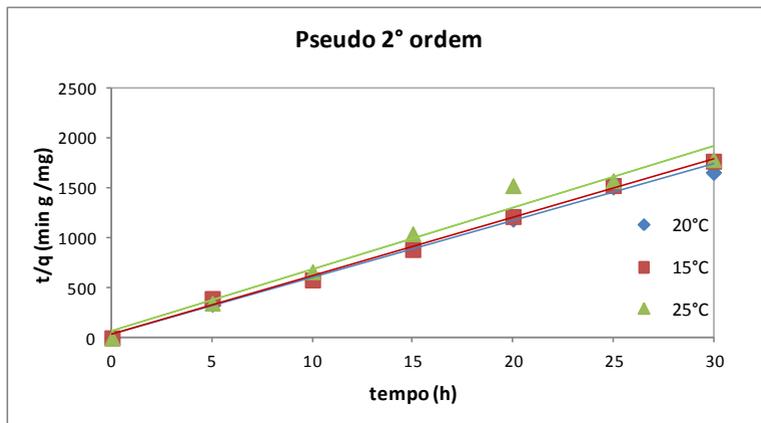


Com o aumento da temperatura, a quantidade adsorvida e a percentagem de remoção de AM diminuí. Isso pode ocorrer devido ao aumento da viscosidade da água diminuindo a mobilidade das moléculas e fazendo com que elas permaneçam aderidas.

Na Tabela 13 pode ser observado que a quantidade adsorvida aumenta com a diminuição da temperatura.

Os dados experimentais da Figura 31 foram ajustados ao modelo, pseudo-segunda-ordem.

Figura 32 – Modelo de pseudo-segunda-ordem para três temperaturas – esferas de poliestireno: 15; 20; 25 °C

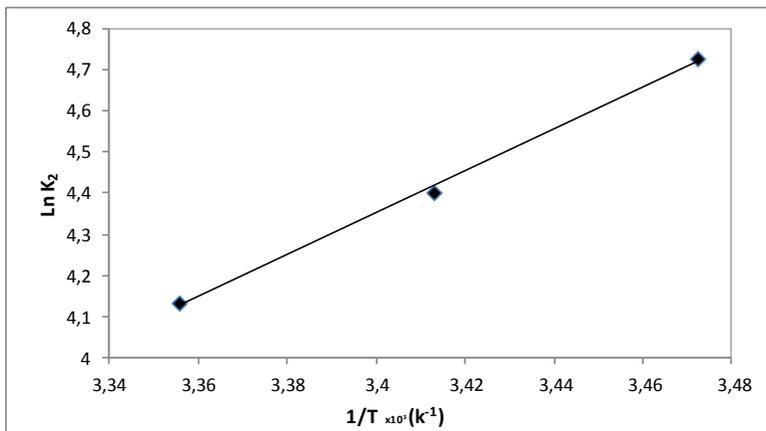


Utilizando as constantes de velocidade, k_2 , da Tabela 13, o gráfico de Arrhenius da equação 45, pode ser apresentado na Figura 33 e através dele a energia de ativação pode ser calculada.

Tabela 13 – Parâmetros cinéticos em três diferentes temperaturas para as esferas de poliestireno.

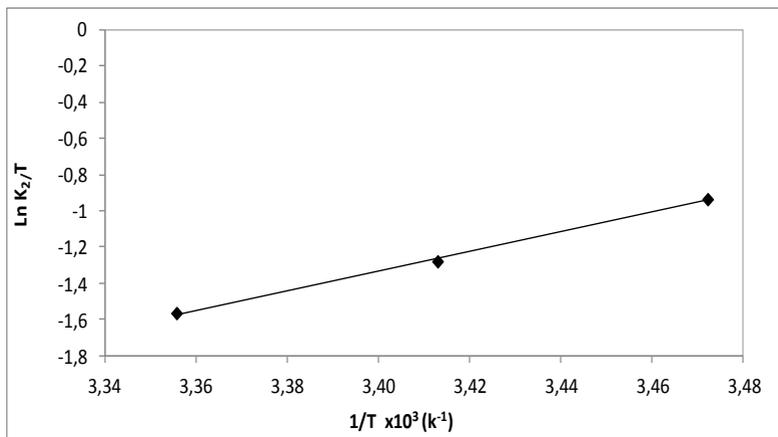
Temperatura (°C)	C_0 (mg/L)	q_e (mg/g)	k_2	r_2
15	4	0,01719	113,07	0,9962
20	4	0,01805	81,61	0,9942
25	4	0,01676	62,36	0,9721

Figura 33 – Gráfico de Arrhenius para a adsorção do AM nas esferas poliméricas de poliestireno.



A Figura 34 mostra o gráfico de Eyring, $\ln (K_2/T)$ versus $1/T$.

Figura 34 – Gráfico de Eyring para adsorção nas esferas de poliestireno.



A Tabela 14 apresenta os valores dos parâmetros termodinâmicos de ativação que foram encontrados através dos dados da Figura 34 e da equação 46, onde $-\Delta H/R$ é o coeficiente angular, e $\ln(K_b/h) + \Delta S/R$ é o coeficiente linear. A energia de Gibbs de ativação foi calculada com a temperatura à 20°C.

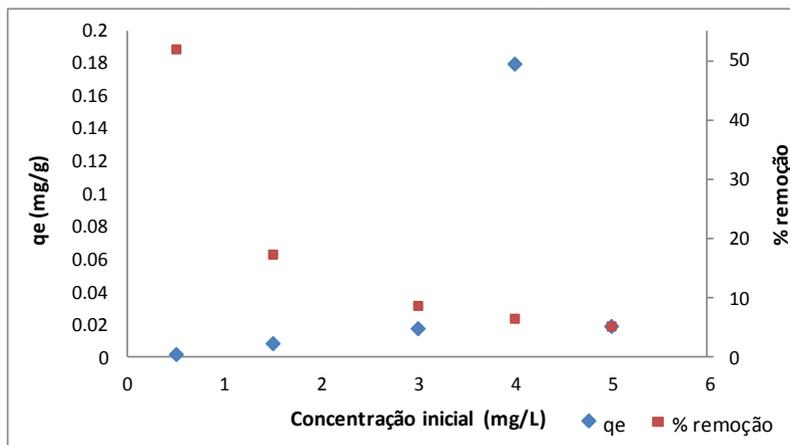
Tabela 14 – Parâmetros termodinâmicos de ativação para as esferas de poliestireno.

Adsorvente	Adsorvato	ΔS (J/Kmol)	ΔH (KJ/mol)	ΔG (KJ/mol)
Esferas de poliestireno	AM	-361,0	-44,9	105,7

Na Tabela 14, o valor de ΔS negativo sugere a diminuição da aleatoriedade do sistema adsorvente/adsorvato do complexo ativado, ou seja, uma diminuição do grau de liberdade das moléculas adsorvidas, e também sugere que nenhuma mudança ocorreu na estrutura interna do grão pelo AM. O ΔH negativo indica que o processo é exotérmico, e de natureza física, envolvendo fracas forças de atrações. O valor ΔG (energia livre de Gibbs) positivo indica a presença de barreiras energéticas no processo de adsorção, sendo que a reação de formação do complexo adsorvente/adsorvato precisa de energia para ocorrer, sendo não espontânea.

O efeito da concentração inicial versus a quantidade adsorvida no equilíbrio e a percentagem de remoção à 20°C, está apresentada na Figura 35.

Figura 35 – Quantidade adsorvida no equilíbrio e a percentagem de remoção versus concentração inicial, 20°C, para as esferas de poliestireno.



Pode ser observado que a quantidade adsorvida em equilíbrio aumenta com o aumento da concentração inicial. As percentagens de remoção diminuem com o aumento da concentração.

As isotermas de adsorção pelo modelo de Lagmuir (equação 47) e Modelo Freundlich (equação 49) são apresentadas na Figura 36 e Tabela 15, para três temperaturas diferentes.

Figura 36 – Isotermas de adsorção de Lagmuir do AM nas esferas de poliestireno.

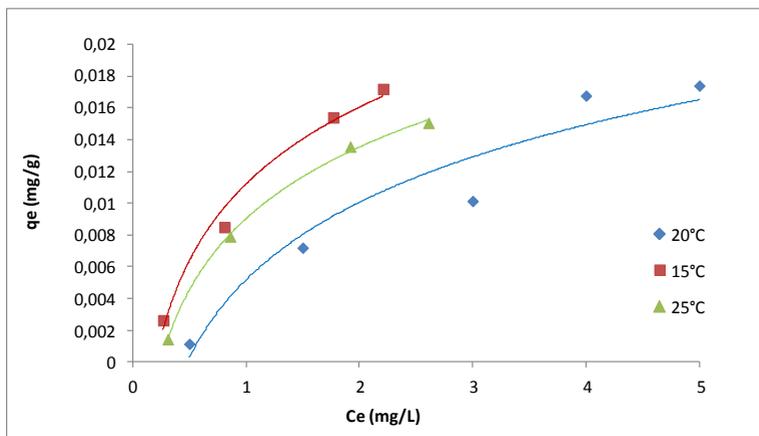


Tabela 15 – Parâmetros de Lagmuir e Freundlich para três temperaturas.

Parâmetros	15°C	20°C	25°C
KL (L/mg)	$-2,4 \times 10^6$	$-1,2 \times 10^3$	$-1,65 \times 10^3$
Q (mg/g)	$-5,03 \times 10^{-5}$	-0,136	-0,104
r (Lagmuir)	0,2092	0,0389	0,077
KF (L/mg)	0,0127	0,00639	0,00641
1/n	1,40	1,09	1,10
R (Freundlich)	0,7212	0,9538	0,9513

Os valores dos coeficientes de correlação para o modelo Freundlich estão mais próximos a 1,000 do que Lagmuir. Assim, o modelo de Freundlich é mais adequado, ou seja, não prevê saturação do adsorvente e há formação de multicamadas de acordo com as cargas elétricas dos sítios ativos.

Os valores associados a energia livre de Gibbs foram calculadas segundo as equações: $K_d = C_{ads}/C_e$ (C_{ads} = concentração adsorvida pelo adsorvente; C_e = concentração da solução em equilíbrio) (FERNANDES *et al.*, 2011) e $\Delta G = -RT \ln K_d$, onde R é a constante dos gases e T é a temperatura em Kelvin.

O Gráfico de $\ln K_d$ versus $1/T$ é apresentado na Figura 37, segundo a equação de Van't Hoff (equação 54):

$$\ln K_d = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad 54$$

Onde:

K_d é a constante de equilíbrio da adsorção; R a constante dos gases ideais, e T (K) temperatura.

A partir dos coeficientes angular e linear da Figura 37, os valores para os parâmetros termodinâmicos de adsorção foram encontrados e estão na Tabela 16.

Figura 37 – Gráfico da equação de Van't Hoff para as esferas de poliestireno.

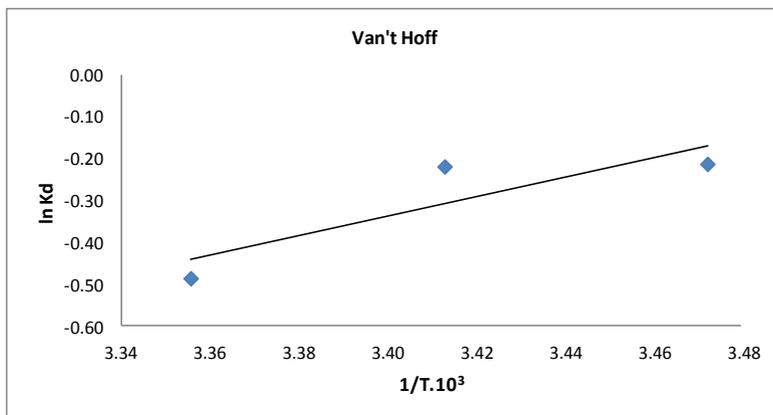


Tabela 16 – Parâmetros termodinâmicos de adsorção.

Adsorvente	Adsorvato	ΔS^0 (J/Kmol)	ΔH^0 (KJ/mol)	ΔG^0 (KJ/mol)
Esferas de poliestireno	AM	-68.80	-19,41	0,528

O valor negativo de ΔS^0 indica que a entropia diminuiu durante a adsorção, sugerindo que o sistema tende a uma organização maior com a diminuição da aleatoriedade na interface sólido/solução (COTTET, 2009). E um valor igualmente negativo para ΔH^0 indica que o processo é de natureza física e exotérmica, explicando a diminuição da quantidade adsorvida com o aumento da temperatura (SISMANOGLU *et al.*, 2004).

O valor positivo, embora baixo de ΔG^0 , indica que o processo,

apesar de quase em equilíbrio, não é espontâneo (HASSAN *et al.*, 2009).

O elemento filtrante também foi analisado de forma qualitativa através da microscopia eletrônica de varredura. Foram registradas imagens ampliadas dos grãos filtrantes em três diferentes momentos: antes do uso (limpo); elemento usado (sujo); elemento a ser reutilizado (retrolavado), conforme Figuras 38 a 41.

Figura 38 - Imagens das esferas de poliestireno antes de serem utilizadas (limpas) ampliadas 100, 250,1500 e 5000 vezes.

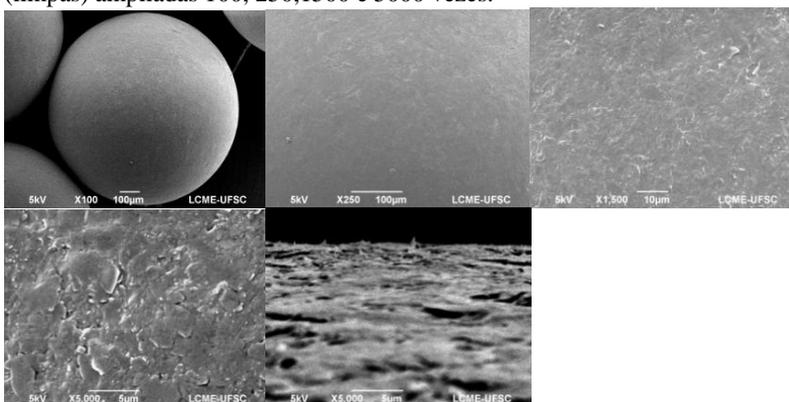


Figura 39 - Imagens das esferas de poliestireno reutilizadas (retrolavadas) ampliadas 100, 250, 500,1500 e 5000 vezes.

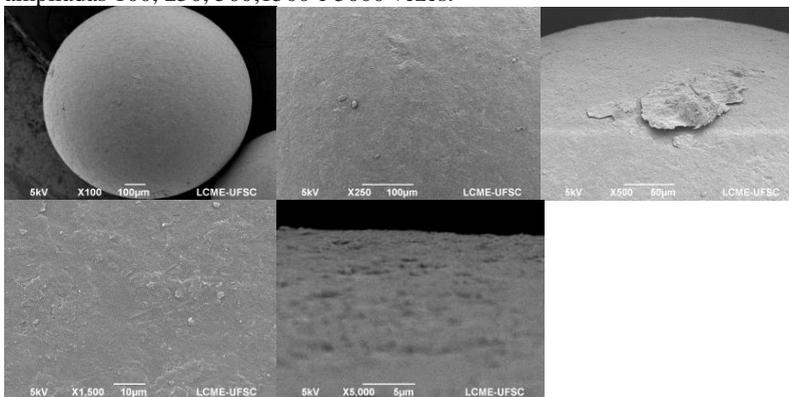


Figura 40 - Imagens das esferas de poliestireno utilizadas (sujas) ampliadas 100, 250, 1500 e 5000 vezes.

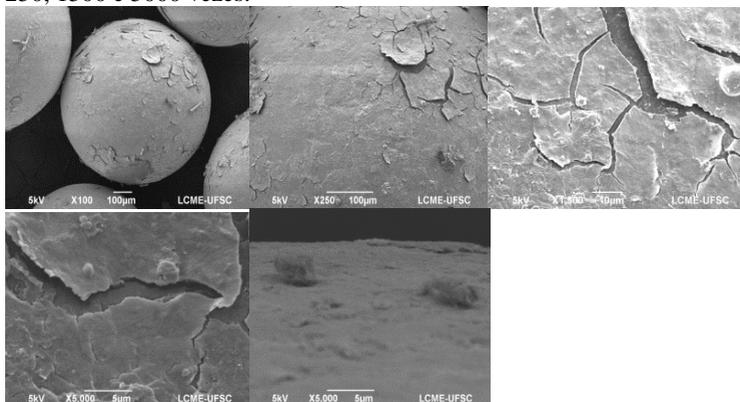
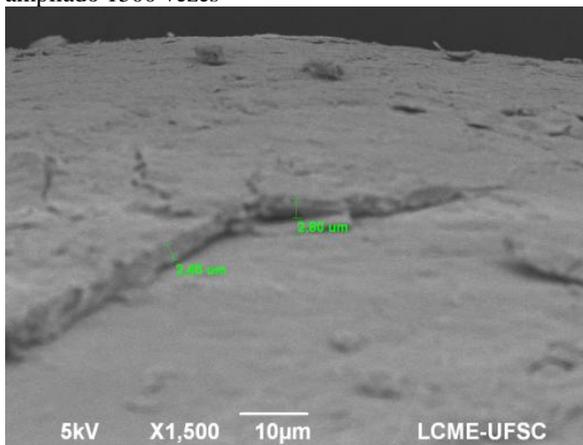


Figura 41 – Detalhe da imagem da esfera de poliestireno utilizada (suja) ampliado 1500 vezes



A diferença entre as imagens é nítida. No primeiro caso, Figura 38, onde as esferas estão limpas, a superfície da esfera está limpa. Nessa situação é possível observar a presença de alguma rugosidade do material (Figura ampliada 5000 vezes). Quando as esferas foram retrolavadas (Figura 39), inicialmente observa-se o grão igualmente limpo, porém quando ampliadas as imagens, observa-se algumas placas de sujeira e a rugosidade superficial menor. A rugosidade é visivelmente menor devido ao cisalhamento que ocorre durante a retrolavagem, o que causa um desgaste da superfície do grão. Com isso, acredita-se que em

longo prazo, a capacidade de filtração dos grãos diminua consideravelmente. Já na Figura 40, onde as esferas encontram-se sujas, as placas aderidas à superfície dos grãos é evidente. Através do equipamento foi possível medir a espessura aproximada das placas de sujeira, chegando a valores de 2,8 μm , conforme a Figura 41.

2. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A esferas de poliestirenos empregadas como elemento filtrante apresentaram curtas carreiras de filtração, quando utilizadas para filtração direta em um manancial com presença considerável de cianobactérias. De fato, as águas da lagoa do Peri não possuem características apropriadas para o uso dessa tecnologia, mas não invalidam o resultado. Contudo, esse fato fez com que a variação das perdas de carga durante a filtração apresentassem valores altos de 0,517 cm/min . Os índices de remoção de turbidez ficaram na casa dos 70%, também devido a esse fato, ou seja, 4,33 NTU ou 0,108 uT/cm nos 40 cm iniciais do leito.

A remoção da turbidez assim como os índices de filtração apresentaram-se estáveis durante a filtração, com excessão da etapa de recuperação, onde esses valores ficaram acima do normal, o que já era esperado. Houve uma divergência entre os tempos de recuperação extraídos pelo índice de filtração e pelos valores de turbidez, sendo de 104 e 12 minutos respectivamente. Por isso, adotou-se o valor de 12 minutos dados pela variação de turbidez, pois é o tempo mais viável, considerando a duração da carreira de filtração e onde a variação da turbidez é praticamente estável, sendo uma água com característica aceitável.

As frentes de impurezas ou ação de profundidade foram traçadas ao longo do tempo da filtração e atingiram ao final do processo uma profundidade de 40 cm, primeiramente devido as característica das esferas de poliestireno, com porosidade de 0,382 e CU igual a 1,36, além da considerável presença de cianobactérias na água bruta. Esse resultado possibilita a diminuição da espessura do leito para 68 cm, valor este, que além de estar acima do 40 cm previstos, obedece o critério da relação L/d , ficando com o valor limite de 1000. Além de possibilitar a ampliação da carreira de filtração, contudo esse dado ainda precisa ser verificado.

Com os resultados do B.E.T observa-se que a adsorção será pequena, visto o tamanho da área superficial e diâmetros dos poros das esferas de poliestireno, muito menores que outros materiais conhecidos

por sua grande capacidade de adsorção, como por exemplo o carvão ativado.

De acordo com a adsorção do Azul de Metileno para as concentrações testadas em uma solução controlada de pH 8, esse material apresentou uma adsorção física observada pelo valor negativo da Energia de ativação, na qual ocorre pela ação de forças eletrostáticas e de Van der Waals, onde há um campo de força que aprisiona as partículas. Essas forças são fracas e reversíveis, sendo possível a reutilização do material. A adsorção das esferas de poliestireno é melhor enquadrada pela isoterma de Freundlich, ou seja, não prevê uma saturação do adsorvente. Nesse caso, há a formação de multicamadas. O processo de adsorção não é espontâneo, sugerindo que a reação de formação de complexos adsorvente/adsortivo precisa de energia para ocorrer.

Através das imagens extraídas pelo microscópio de varredura, fica claro que o processo de filtração através das esferas de poliestireno apresenta aspectos adsorptivos e possivelmente eletrostáticos que fogem da ação simples de coar. Foi observado que a rugosidade superficial vai se perdendo de acordo com a utilização e limpeza do material. Contudo, mostra também, que o processo de retrolavagem é eficiente, porém acredita-se que esse processo deforme o material a longo prazo, fato que ainda precisa ser averiguado.

6.2.3 (Artigo 3) QUALIDADE DA ÁGUA PRODUZIDA POR FILTRO RÁPIDO DESCENDENTE COM ESFERAS GRANULARES DE POLIESTIRENO COMO ELEMENTO FILTRANTE

Submetido ao Journal of Water Processing Engineering – (em processo de revisão).

1. Abordagem:

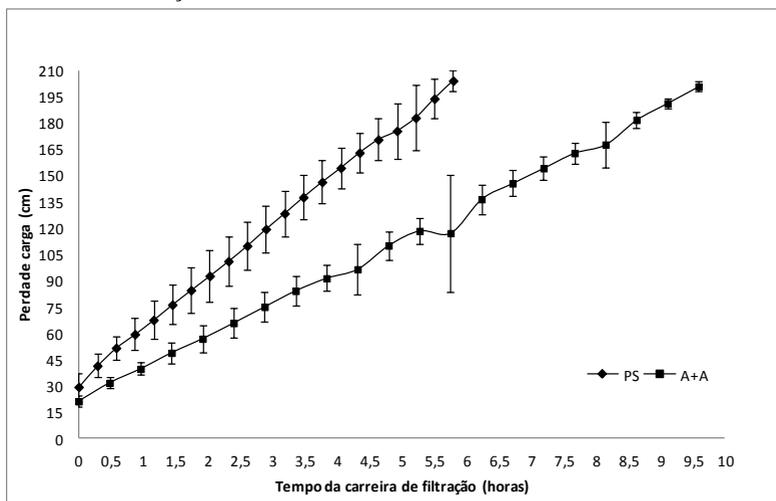
Neste estudo foi construído um filtro rápido descendente utilizando esferas de poliestireno, que foi comparado a um filtro rápido descendente de areia e antracito. O desempenho dos filtros foram comparados, em termos de qualidade da água como: turbidez, cor aparente e verdadeira, condutividade, sólidos totais dissolvidos, temperatura, pH, alumínio residual, remoção de cianobactérias (*cylindrospermopsis raciborskii*) sob as mesmas condições operacionais de filtração. O filtro de areia/antracito atingiu maiores carreiras de filtração, porém a qualidade da água do filtro de poliestireno apresenta qualidade similar ao filtro de areia e antracito. Além disso, o filtro contendo as esferas de poliestireno como meio filtrante pode representar uma economia com a diminuição da água de lavagem e construção de reservatórios com menor carga hidráulica.

2. Resultados e Discussões

2.1 Carreira de filtração

A carreira de filtração do filtro A+A teve duração média de 9,6 horas, enquanto o filtro PS obteve duração média de 5,8 h, ou seja, quase metade do tempo para mesma taxa de produção, conforme verificado na Figura 42, que relaciona a duração da carreira com a perda de carga.

Figura 42 - Média e desvio das perdas de carga dos filtros PS e A+A durante as carreiras de filtração.



Isso ocorre, pois a porosidade do meio das esferas de PS é menor que a porosidade do filtro com areia e antracito, visto que, o tamanho efetivo e coeficiente de uniformidade dos grãos evidência esse fato. Além disso, a grande quantidade de cianobactérias (*cylindrospermopsis raciborskii*), faz com que a penetração (filtração em profundidade) seja baixa, em torno de 40 cm (Figura 43). A presença de dois elementos filtrantes, (sendo o antracito com diâmetro efetivo de 0,85 mm, seguido pela areia com 0,62 mm) faz com que as impurezas se espalhem e atinjam maiores profundidades, na casa dos 80 cm, conforme pode ser visto na Figura 44. As curvas apresentadas nas Figuras 43 e 44 indicam o alcance da profundidade da impureza, quando as linhas das perdas de carga se unem paralelamente.

Figura 43 – Ação da profundidade no filtro PS (o percentual indica a duração da carreira de filtração).

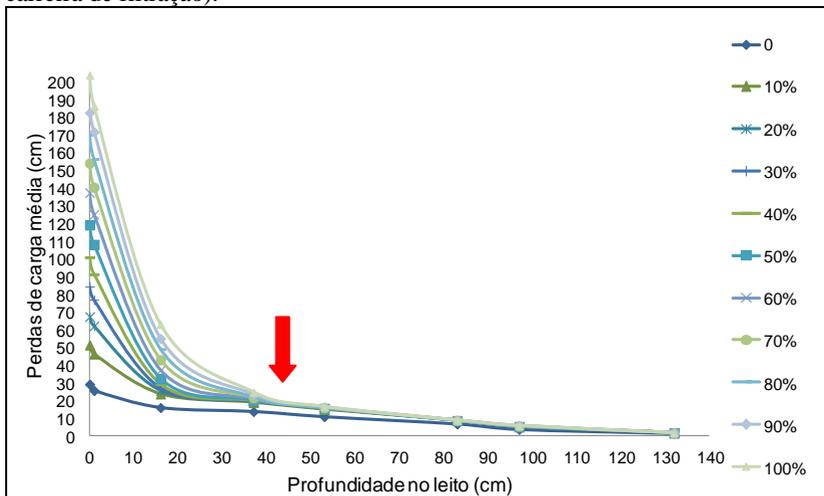
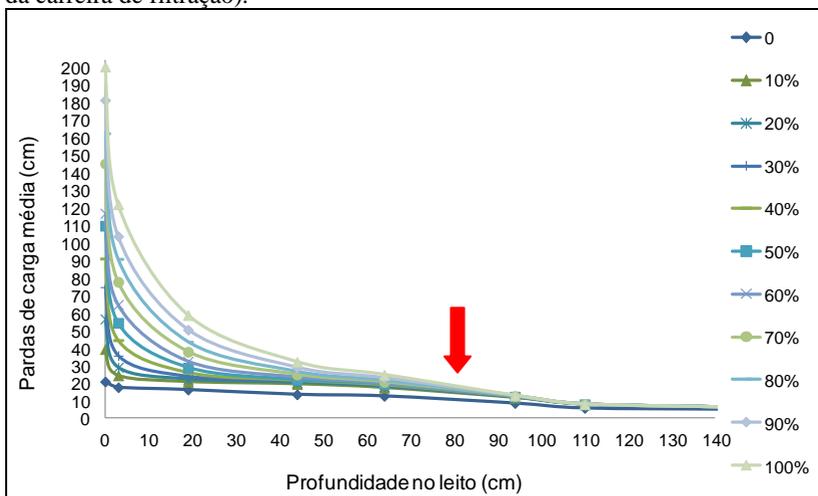


Figura 44 – Ação da profundidade no filtro A+A (o percentual indica a duração da carreira de filtração).

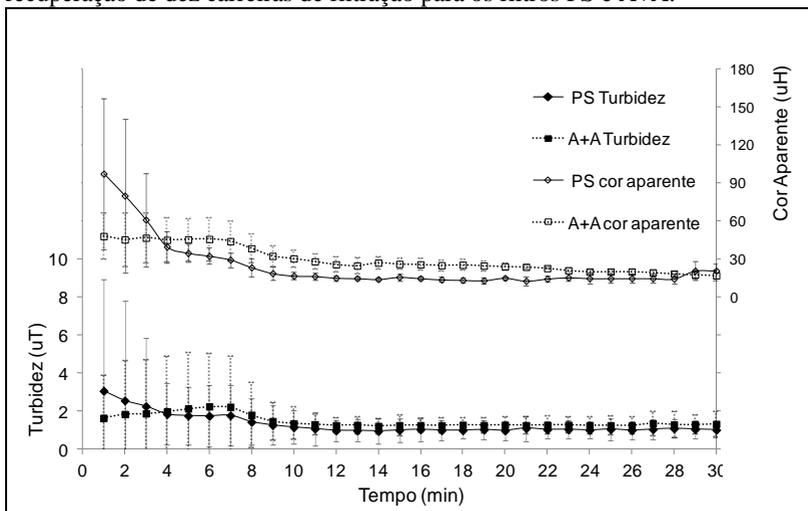


O período de recuperação foi verificado para as dez carreiras de filtração. As médias e desvio padrão da turbidez e cor aparente dos 30 primeiros minutos de filtração são apresentados nas Figura 45.

O período de recuperação é o tempo que o filtro leva para

estabilizar as características da água filtrada. Com 95% de confiança, o período de recuperação do filtro PS e do filtro A+A apresentado na Figura 45, são iguais, ou seja, 12 min. Foi observado também que a qualidade da água tratada pelo filtro PS é um pouco melhor que a água do filtro A+A, a partir dos 4 min iniciais de filtração, chegando a ser equivalente em alguns momentos, até o final dos 30 min iniciais.

Figura 45 – Média e desvio padrão da turbidez e cor aparente no período de recuperação de dez carreiras de filtração para os filtros PS e A+A.



2.2 Qualidade da Água

A qualidade da água dos filtros foi verificada no início e a cada 30 min. Os valores médios, máximos e mínimos são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores médios, máximos e mínimos da qualidade da água obtidas da Água bruta e filtrada pelos filtros PS e A+A, para as 10 carreiras analisadas (os valores absolutos são apresentados no apêndice).

Parâmetros	Água Bruta			Filtro de Poliestireno			Filtro de areia/antracito		
	Máx.	Min.	Média	Máx.	Min.	Média	Máx.	Min.	Média
Turbidez (uT)	5,88	4,91	5,5	1,35	0,9	1,28	1,85	0,3	1,31
Cor Aparente (uH)	85,6	57,5	75,9	22	5	22,8	24	2	19,7
Cor Verdadeira (uH)	15,3	6,7	11,9	10	<LQ*	7,25	1	10,5	8,13
Condutividade (µS/cm)	76,2	74,4	75,1	84	81	81,4	99,9	79,9	81
Alumínio residual (mg/L)	**	**	**	0,11	0,02	0,1	0,20	<LQ*	0,09
Remoção (<i>Cylindrosp. raciborskii</i>) (cel/ml) x 10 ⁴	75,5	37,5	64	39,9	11,6	22,5	26,3	6,6	11,7

* Menor que o limite de detecção.

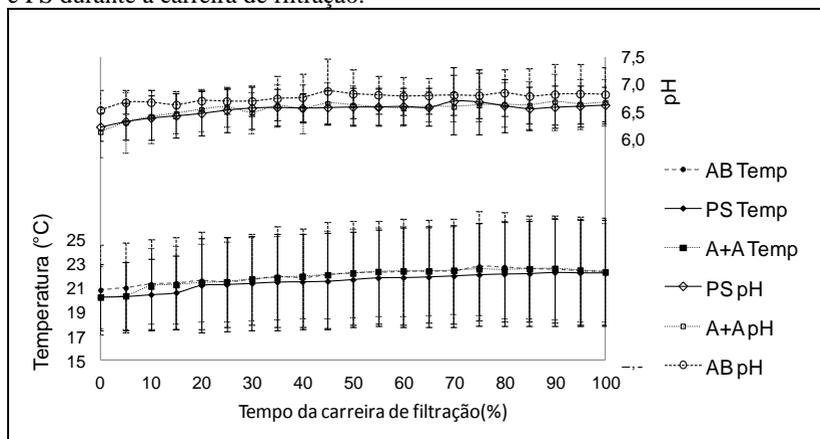
** Valores não verificados para água bruta;

Como pode ser observado na Tabela 17, o resultado da qualidade da água filtrada não é ideal. Isso acontece porque a tecnologia de filtração direta não é a recomendada para a água bruta com as características apresentadas pelo manancial da Lagoa do Peri. Essa tecnologia foi escolhida, em função dos índices de turbidez e cor verdadeira do manancial serem baixos, ou seja, inferiores a 10 uT e 20 uH (DALSASSO; SENS, 2006). Contudo a elevação da presença de fitoplânctons no manancial, com domínio de espécies filamentosas como a *cylindrospermopsis raciborski* e *pseudoanabaena sp* prejudicaram a qualidade da água produzida pelos filtros rápidos diretos. Outros trabalhos já se depararam com esse problema (MONDARDO, 2009). Todavia, a qualidade da água, nesse caso, não invalida a comparação desses filtros. Todos os parâmetros de qualidade da água, citados na Tabela 17, foram monitorados durante a carreira de filtração e são apresentados nas Figuras 46 a 51.

O pH dos filtros apresentaram-se estatisticamente iguais, apesar da diferença de temperatura entre eles, que mostraram-se estatisticamente diferentes, com uma diferença estimada em 0,478°C. A adição do coagulante PAC fez o pH cair, mas a alteração foi pequena, mantendo os resultados dentro do estabelecido nos ensaios de bancada. O pH da água filtrada pelo filtro PS é mais estável, mas as duas condições são

bastante próximas e permanecem dentro do aceitável. A temperatura da água durante a filtração variou entre 20 e 23°C nos períodos em que os experimentos foram realizados entre novembro de 2012 a setembro de 2014. As temperaturas são crescentes, assim como os valores de pH. Essa variação ocorreu porque as carreiras de filtração eram iniciadas no período da manhã e seguiam ao longo do dia, sendo associadas a elevação da temperatura do ambiente e mostrando assim, sua influência nos valores de pH.

Figura 46 - Temperatura média e desvio padrão das amostras de água bruta e filtradas pelo filtro A+A e PS durante a carreira de filtração e Variação média e desvio padrão do pH das amostras de água bruta e filtradas pelos filtros A+A e PS durante a carreira de filtração.



Os percentuais de remoção de turbidez, cor aparente e verdadeira são apresentados nas Figuras 47 e 48.

Figura 47 - Percentual médio de remoção da turbidez das águas filtradas pelos filtros A+A e PS durante as carreiras de filtração.

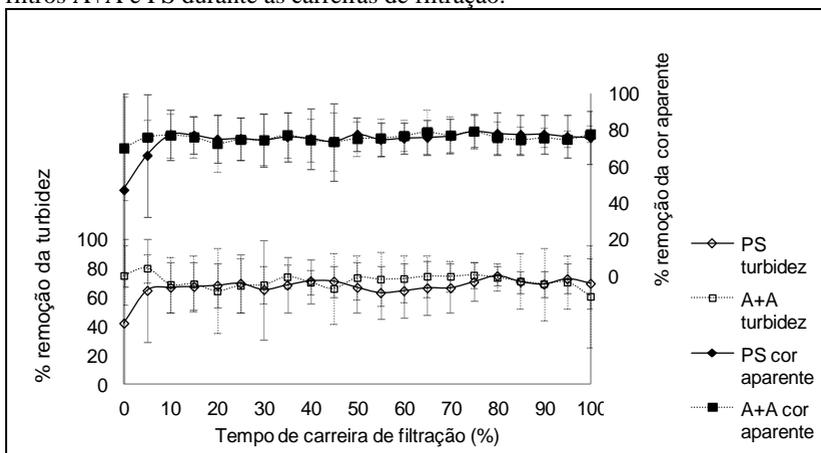
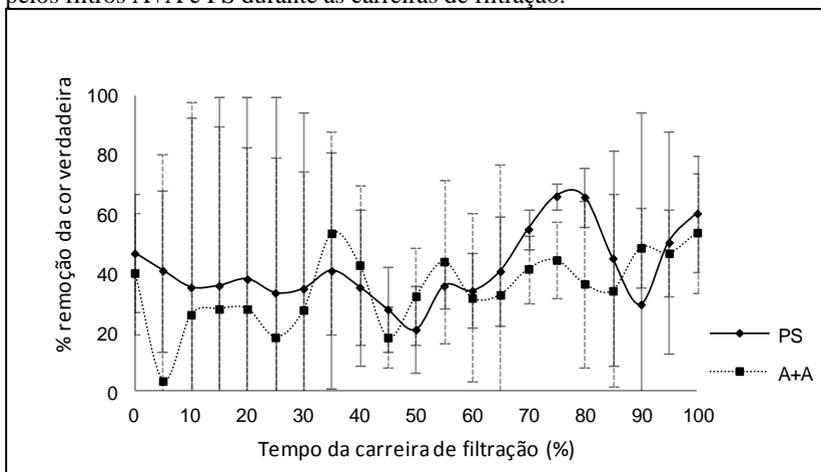


Figura 48 - Percentual médio de remoção da cor verdadeira das águas filtradas pelos filtros A+A e PS durante as carreiras de filtração.

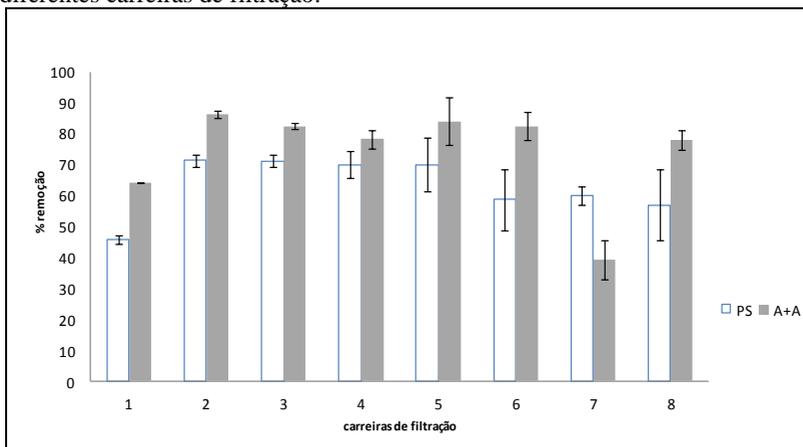


O percentual de remoção da turbidez do filtro PS é estatisticamente igual ao do filtro A+A, com 99% de confiança, durante todo o período de filtração. Os percentuais de remoção de cor aparente, apesar de próximos, são estatisticamente diferentes, mostrando vantagem para o filtro A+A, com uma diferença estimada de 2,91 uH, ou ~ 9% da remoção. Já o percentual de remoção de cor verdadeira

(Figura 48) mostra grande alternância, mas os valores médios obtido são bastante próximo sendo 7,25 uH para PS e 8,12 para A+A, e são estatisticamente iguais com 95% de confiança. As comparações estatísticas referente a qualidade da água são apresentas no Capítulo 9 Apêndice.

De fato, os valores de turbidez, cor aparente e verdadeira são altos, não sendo indicado como resultado final para abastecimento. A Portaria n° 2914 do Ministério da Saúde indica como resultado de turbidez após filtração rápida com tratamento completo ou filtração direta valores menores que 0,5 uT em 95% das amostras e 15 uH, sendo o valor máximo permitido para cor aparente, não fazendo referência a cor verdadeira. Essa baixa remoção pode estar acontecendo, porque a água bruta da Lagoa do Peri, apresenta baixos valores de cor e turbidez, mas também apresenta alta concentração de Fitoplâncton, o que explicaria esses índices, conforme dito anteriormente. A espécie de fitoplâncton dominante é a cianobactéria *cyndrospermopsis raciborski*. Foram realizadas contagens dessa espécie. Os percentuais de remoção de cada filtro são apresentadas na Figura 49.

Figura 49 - Percentual médio de remoção das células das cianobactérias *cyndrospermopsis raciborski* das águas filtradas pelos filtros A+A e PS em diferentes carreiras de filtração.

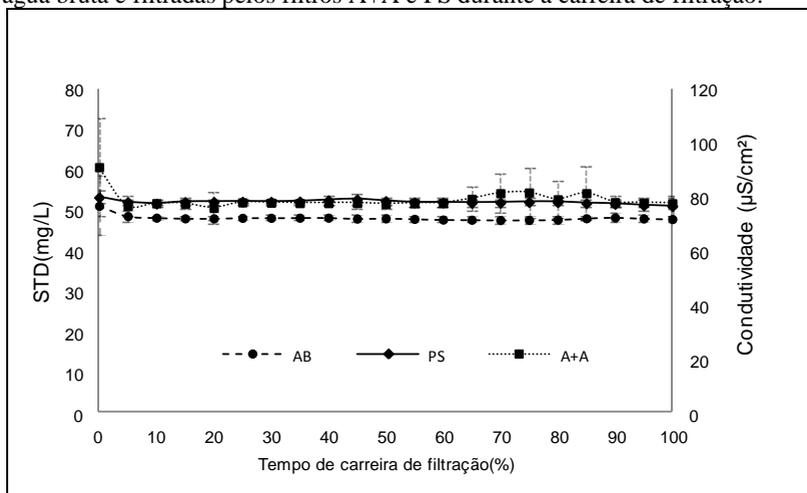


O resultado apresentado na Figura 49 mostra o percentual de remoção de algas em oito carreiras de filtração. A primeira carreira obteve uma baixa remoção, entre 45 e 65% nos dois filtros. Após a primeira, a taxa de remoção sobe para 70 e 80%. Apesar de apresentar

resultados próximos, os valores de remoção são, com 95% de confiança, estatisticamente diferentes ao filtro A+A, que apresenta remoção maior. Os valores mostram que os filtros não são muito eficazes na remoção de cianobactérias e indicam que a filtração direta não é a tecnologia mais recomendada para as águas do manancial Lagoa do Peri.

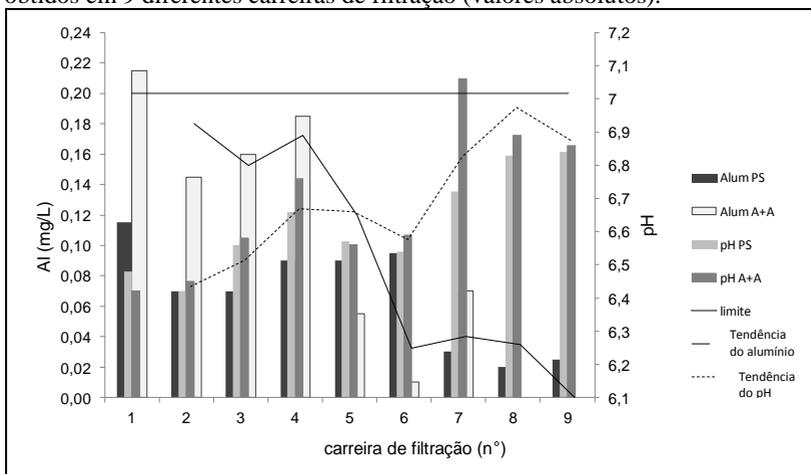
Os índices de sólidos totais dissolvidos (STD) e condutividade apresentam comportamento similar, e com 95% de confiança são estatisticamente iguais, contudo estão dentro dos valores permitidos pela portaria 2914 do MS. O comportamento pode ser observado na Figura 50.

Figura 50 - Resultado médio dos sólidos totais dissolvidos e condutividade da água bruta e filtradas pelos filtros A+A e PS durante a carreira de filtração.



Os valores de condutividade e STD são medidos concomitantemente, pois existe uma relação entre essas variáveis. É observado nos resultados que os valores para a água bruta são menores que os valores da água filtrada. Acredita-se que esse fenômeno ocorra devido a adição do coagulante PAC. Além disso o coagulante pode alterar os valores de pH. Quanto menor o pH maior a solubilidade do alumínio na água, aumentando assim seu teor. Para verificar essa afirmação realizou-se a análise do alumínio residual dessas águas, em nove dentre as dez carreiras de filtração, e o resultado é observado na Figura 51.

Figura 51 – Residual de alumínio das águas filtradas pelos filtros A+A e PS obtidos em 9 diferentes carreiras de filtração (valores absolutos).



O valor máximo de alumínio permitido (VMP) tanto pela Organização mundial da saúde (OMS), EPA (USA) e a portaria 2.914 do Ministério da Saúde do Brasil é 0,20 mg/L de Al (indicado pela linha cheia). Com exceção do primeiro resultado que ficou acima dos limites estabelecidos, e das carreiras 8 e 9 onde não detectou-se a presença de alumínio para o filtro A+A, os demais resultados apresentam-se abaixo do VMP, todavia apresentaram alumínio. Acredita-se que essa presença seja suficiente para alterar a condutividade e STD da água filtrada. Contudo, os valores residuais de alumínio de ambos os filtros são iguais, com 95% de confiança.

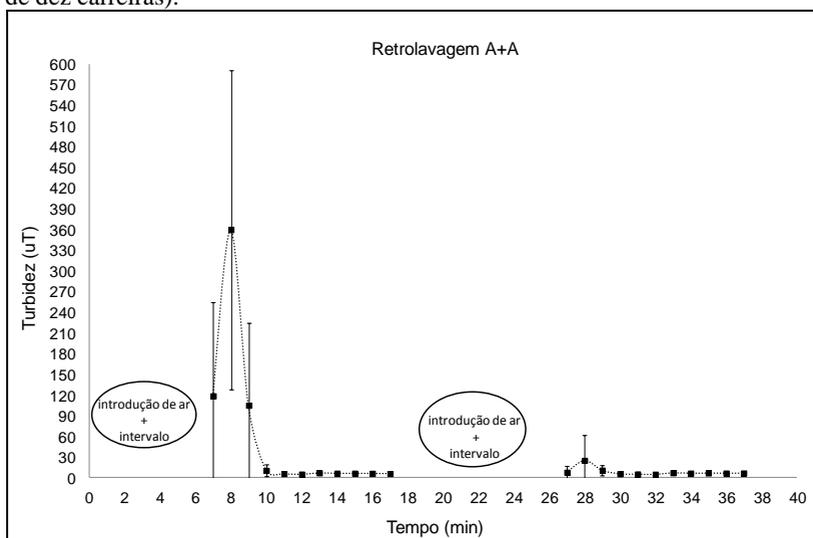
A análise de estireno foi realizada em seis das dez carreiras de filtração, para as águas filtradas pelo filtro PS. As análises foram realizadas pelo laboratório SGS Environ Ltda. A metodologia utilizado pelo laboratório contratado foi a SMEWW 6200 B – 21° ed. 2005 (IT 10-355) em cromatógrafo gasoso. Nos laudos emitidos pelo laboratório, todas as amostras ficaram abaixo do limite de detecção, ou seja, 4 µg/L. Assim, não é possível afirmar a presença dessa substância. Além do que, pela portaria 2.914 do Ministério da saúde do Brasil e pela Organização mundial da saúde, o limite máximo permitido para esse elemento na água potável é 20 µg/L, e pela EPA (*Environmental Protection Agency*) é 100 µg/L, sendo assim aceitável.

2.3 Retrolavagem

O processo de retrolavagem foi realizado ao final de cada carreira. Todo o processo de retrolavagem durou 37 min (Ar + Água).

Os resultados para o filtro A+A são apresentados na Figura 52. A turbidez da água de lavagem estabiliza após 3 min de retrolavagem, com velocidade da água de 66 m/h. Este tempo mostra-se suficiente para uma limpeza eficaz, sem desperdícios da água tratada.

Figura 52 - Curva de turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro de dupla camada de antracito e areia (valores médios e desvio padrão de uma amostra de dez carreiras).



Para o filtro PS, inicialmente, aplicou-se a retrolavagem apenas por água com velocidade de 6,6 m/h (0.11 m/min), isto é, 40% de expansão. Observou-se que apenas a introdução da água na velocidade ascensional não seria suficiente para promover o desprendimento e quebra dos flocos aderidos ao PS. Estas partículas aderidas aos grãos de PS formaram flocos mais pesados, que sedimentaram para a parte inferior do filtro, conforme Figura 53. Assim, aplicou-se o ar, durante os primeiros 5 min de lavagem. O ar realizou cisalhamento suficiente, causando desprendimento das partículas aderidas. Após a aplicação do ar, a água foi aplicada novamente, com a velocidade de 6,6 m/h, durante 10 min. Embora não houvesse a presença de partículas aglomeradas

aderidas aos grãos de PS, a aplicação da água (nesta velocidade superficial de 6,6 m/h (0,11 m/min)) não obteve força suficiente para arrastar as partículas de sujeira até o ponto de saída, mas promoveu a segregação entre grãos e partículas (Figura 54). A fim de aumentar a força de arrasto, a velocidade superficial da água foi aumentada para 10,8 m/h (0,18 m/min), isto é, expansão de 100 %, após aplicação do ar. Verificou-se que as partículas foram arrastadas com a expansão, mas não o suficiente para a saída do filtro. Assim, a velocidade superficial foi aumentada novamente para 22,8 m/h (0,38 m/min), isto é, expansão de 200%. Apenas essa velocidade superficial de água foi suficiente para remover as partículas coletadas ao longo da filtração.

Figura 53 – Partículas aderidas aos grãos de PS que sedimentaram durante o processo de retrolavagem, quando a velocidade superficial era de 6,6 m/h (0,11 m/min).

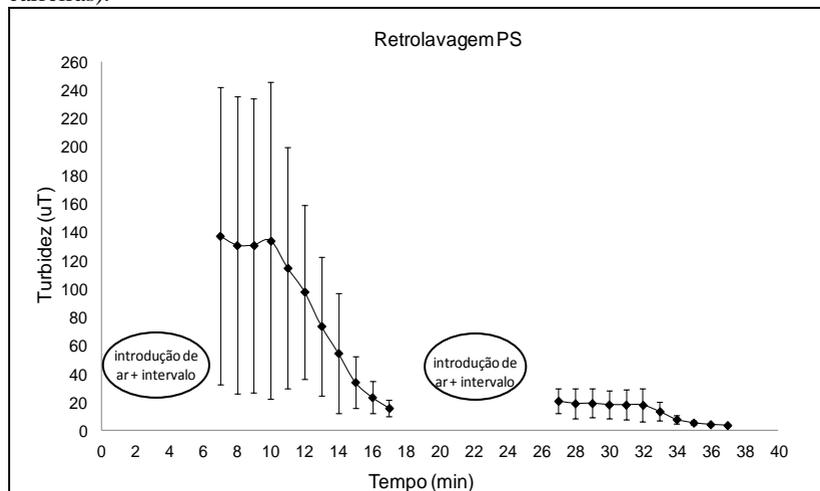


Figura 54 – Segregação das partículas e grãos de PS, após a introdução de ar, quando a velocidade superficial era de 6,6 m/h (0,11 m/min), quando a forças de arraste foram insuficientes.



O processo de retrolavagem com expansão de 200% foi realizado. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 55.

Figura 55 - Curva de turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro com esferas de poliestireno, com expansão de 200% em 10 min, ou seja, 22,8 m/h (0,38 m/min). (valores médios e desvio padrão de uma amostra de dez carreiras).



Para a velocidade de 22,8 m/h (0,38 m/min), o material leva 10 min para atingir esse grau de expansão, o que leva mais tempo para a limpeza do filtro. Quando o tempo de retrolavagem com água é otimizado, ou seja, 3 minutos para o filtro A+A e 10 min para o filtro PS, os valores da produção efetiva são 92 e 89 %, respectivamente. Apesar de, o Filtro PS ter uma vazão de retrolavagem menor que a utilizada na retrolavagem do filtro A+A, o tempo de retrolavagem é maior e a carreira de filtração menor, o que torna a produção efetiva dos dois filtros muito próxima. O processo de retrolavagem deve ser melhor observado. O ponto de saída da água de lavagem deve ser alterado e outras vazões e graus de expansão devem ser analisados.

3. Conclusões e Recomendações

Em todos os parâmetros de qualidade analisados, a água produzida pelo filtro PS mostrou-se bastante similar ao filtro A+A, apesar das diferenças estatísticas. Os grãos de PS não liberam quantidades perceptíveis de estireno para a água, podendo portanto ser utilizado como um elemento filtrante.

A grande diferença entre os filtros foi o tempo de duração das carreiras de filtração e a velocidade de aproximação da água durante a retrolavagem, devido ao seu baixo peso específico. A duração da carreira do filtro PS foi 1,65 vezes menor que a do filtro A+A. Por ser um elemento granular com grãos praticamente esféricos e de pequena granulometria, apresenta menor porosidade do leito e coeficiente de uniformidade maior que 1,2. Essas características fizeram com que a perda de carga do filtro PS atingisse 2 m mais rapidamente, encerrando assim as carreiras precocemente. Em contrapartida, a velocidade de aproximação da água durante a retrolavagem pode ser até 3 vezes menor, e o tempo necessário para uma limpeza eficiente foi 3,3 vezes maior, considerando os tempos otimizados.

Em um primeiro momento, a produção efetiva do filtro PS foi pouco menor que o filtro A+A, não mostrando vantagens na utilização desse novo material. A relação entre a velocidade de aproximação e tempo de retrolavagem ainda necessita maiores análises. O tempo e a velocidade podem ser melhorados e otimizados, de forma que a produção efetiva do filtro PS possa ser superior ao filtro A+A, gerando economia no processo.

Uma vantagem apresentada pelo material PS foi a baixa perda de carga durante a retrolavagem. A perda de carga do filtro PS fluidificado

foi até 15 vezes menor que a apresentada pelo filtro A+A. Por ser leve, pode ser mais facilmente fluidificado. Essa característica pode auxiliar o processo de limpeza, gerar uma economia, não só de volume de água, com a redução dos tamanhos dos reservatórios, mas também a construção de reservatórios em cotas menores, menor diâmetro das tubulações/válvulas ou mesmo a utilização de bombas com menor potência.

6.2.4 (Artigo 4) PRODUÇÃO EFETIVA DE FILTRO RÁPIDO USANDO ESFERAS DE POLIESTIRENO COMO ELEMENTO FILTRANTE

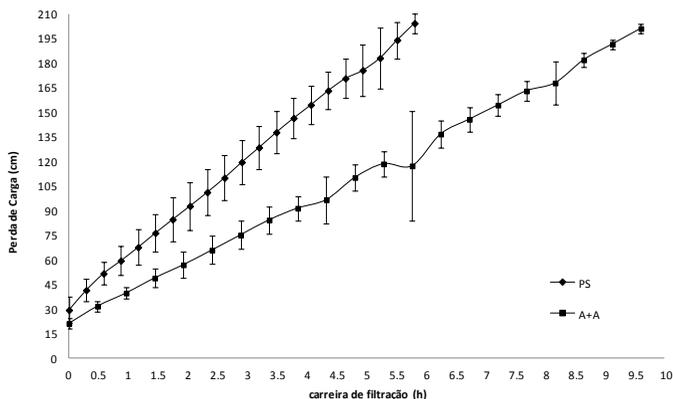
1. Abordagem:

Nesse artigo, diferentes configurações de retrolavagem foram testadas para o filtro com poliestireno granular e seus resultados foram comparados a um filtro convencional de areia e antracito, com processo de retrolavagem convencional. Foram avaliados os desempenhos hidráulicos durante o processo de retrolavagem por ar e água intercalados. Apesar de, apresentar uma elevada fluidez, com taxas inferiores (em comparação com filtros convencionais) de retrolavagem, esse fato não representa necessariamente uma economia da água de retrolavagem, pois necessita mais tempo para a limpeza. Foi observado também, que há um valor ótimo para a remoção de partículas recolhidas durante a filtração, sem perda de material.

2. Resultados e Discussões:

Nos primeiros testes realizados, a carreira de filtração do filtro A+A teve duração média de 9,6 h, enquanto o filtro PS obteve duração média de 5,8 h, ou seja, quase metade do tempo para mesma taxa de filtração, conforme verificado na Figura 56, que relaciona a duração da carreira com a perda de carga.

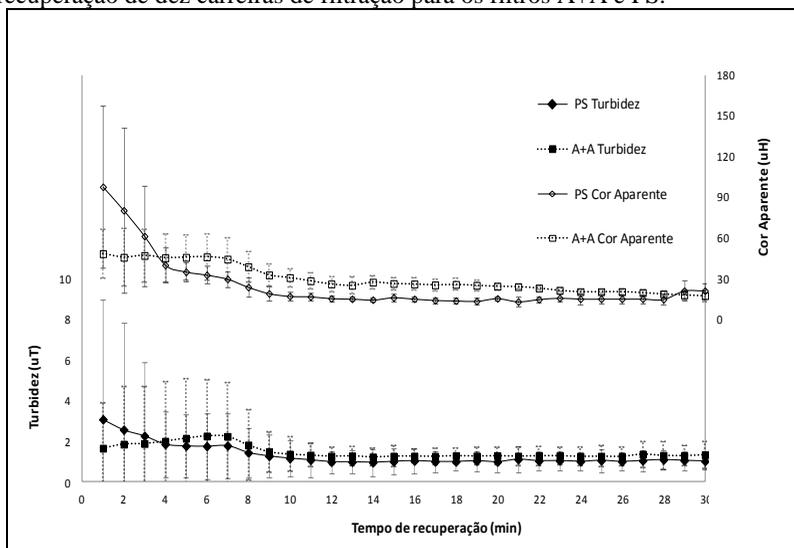
Figura 56 – Média e desvio padrão das perdas de carga do filtro PS e A+A durante carreiras de filtração



Isso ocorre, pois a porosidade do meio das esferas de PS é menor que a porosidade do filtro A+A, visto que, conforme foi verificado, sendo de porosidade inicial de PS igual a 0,387, da Areia 0,55 e do Antracito 0,66 e o CU ser menor que 1,2. Além disso, a grande quantidade de cianobactérias (*cyndrospermopsis raciborskii*) presentes na água da Lagoa do Peri faz com que a penetração (filtração em profundidade) seja baixa, em torno de 40 cm. A presença de dois elementos filtrantes de diâmetros efetivos maiores faz com que as impurezas se espalhem e atinjam maiores profundidades, na casa dos 80 cm. O período de recuperação foi verificado. As médias e desvio padrão da turbidez e cor aparente dos 30 primeiros minutos de filtração são apresentados nas Figura 57.

O período de recuperação é o tempo que o filtro leva para estabilizar as características da água filtrada. Com 95% de confiança, o período de recuperação do filtro PS e do filtro A+A apresentados na Figura 57, são iguais, ou seja, 12 minutos. Foi observado também que a qualidade da água tratada pelo filtro PS é um pouco melhor que a água do filtro A+A, a partir dos 4 minutos iniciais de filtração, chegando a ser equivalente em alguns momentos, até o final dos 30 minutos iniciais.

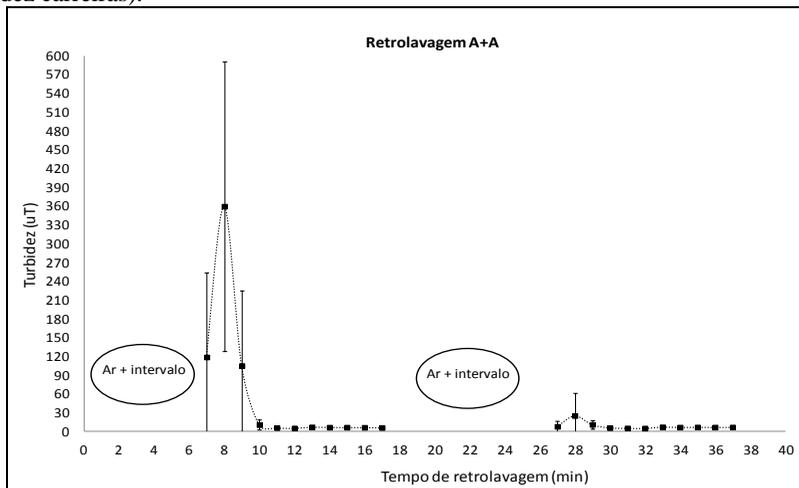
Figura 57 - Média e desvio padrão da Turbidez e Cor Aparente no período de recuperação de dez carreiras de filtração para os filtros A+A e PS.



O processo de retrolavagem foi realizado ao final de cada carreira. Inicialmente, todo o processo de retrolavagem durou 37 min (Ar + Água).

Os resultados para o filtro A+A são apresentados na Figura 58. A turbidez da água de lavagem estabiliza após 3 min de retrolavagem. Esse tempo mostra-se suficiente para uma limpeza eficaz, sem desperdícios da água tratada.

Figura 58 - Curva de turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro de dupla camada de antracito e areia (valores médios e desvio padrão de uma amostra de dez carreiras).



Para o filtro PS observou-se que uma expansão de 40% não seria suficiente para eliminar as partículas de sujeira. A fim de aumentar a força de arrasto, a velocidade superficial da água foi aumentada para 10,8 m/h (0,18 m/min), isto é, expansão de 100 %, após aplicação do ar. Verificou-se que as partículas foram arrastadas com a expansão, mas não o suficiente até a saída do filtro. Assim, a velocidade superficial foi aumentada novamente para 22,8 m/h (0,38 m/min), isto é, expansão de 200%. Apenas essa velocidade superficial de água foi suficiente para remover as partículas coletadas ao longo da filtração, até o ponto de saída do filtro.

O processo de retrolavagem com expansão de 200% foi realizado. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 59. Para essa velocidade o material leva 10 min para atingir esse grau de expansão, o que leva mais tempo para a limpeza do filtro.

Quando o tempo de retrolavagem com água é otimizado, ou seja, 3 min para o filtro A+A e 10 minutos para o filtro PS, os valores da produção efetiva podem ser calculados conforme a Tabela 18:

Tabela 18 - Produção efetiva do filtro de areia e antracito e esferas de poliestireno, valores médio obtidos a partir de cinco carreira de filtração, com otimização dos resultados. Sendo: VF é a velocidade de filtração, m/h; VR é a velocidade de retrolavagem, m/h; tF é a duração da carreira de filtração, h; tR é o tempo de retrolavagem, h; trec é o tempo de recuperação, h; UVCF é o volume durante a carreira; UVR é o volume de retrolavagem do filtro; UVRec é o volume utilizado no período de recuperação; qEF é a taxa de filtração efetiva, m/h.

Filtro A+A					
tF (h)	9,6	VF (m/h)	8,67	UVCF (m ³ /m ²)	83,2
tR (h)	0,05	VR(m/h)	66,7	UVR (m ³ /m ²)	3,3
trec (h)	0,18	Velocidade da recuperação = VF (m/h)	8,67	Uvrec (m ³ /m ²)	1,6
Tempo total (h) (tF + tR+ ar+ interv.)	9,76	UVCF - UVR (m ³)	79,9	qEF (m/h)	8,2
Produção Efetiva (%)					93,8%

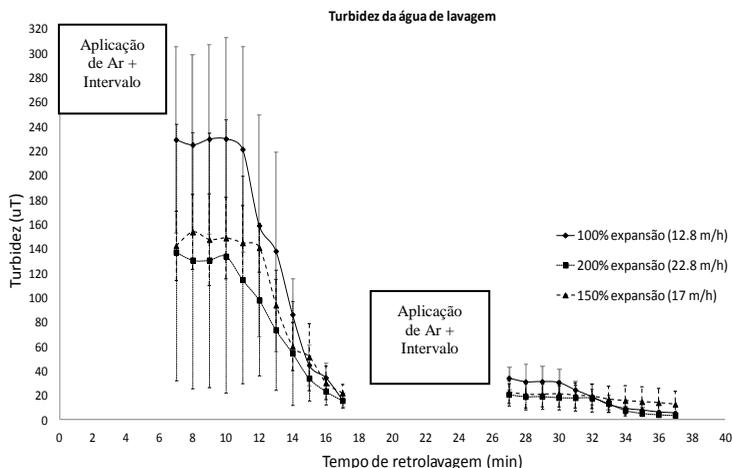
Filtro PS					
tF (h)	5,8	VF (m/h)	8,7	UVCF (m ³ /m ²)	50,3
tR (h)	0,16	VR(m/h)	22,8	UVR (m ³ /m ²)	3,8
trec (h)	0,18	Velocidade da recuperação = VF (m/h)	8,7	Uvrec (m ³ /m ²)	1,6
Tempo total (h) (tF + tR+ ar+ interv.)	6,1	UVCF - UVR (m ³)	46,5	qEF (m/h)	7,6
Produção Efetiva (%)					90%

Apesar do Filtro PS ter uma vazão de retrolavagem menor que a utilizada na retrolavagem do filtro A+A, o tempo de retrolavagem é maior e a carreira de filtração menor, o que torna a produção efetiva menor.

A fim de melhorar os valores de produção efetiva do filtro PS, alterações foram feitas, como a posição do ponto de saída da água de lavagem, além do que outras velocidades de retrolavagem foram testadas. O ponto de saída da água de lavagem foi reduzido a 20 cm acima do ponto de expansão de 100%.

Após a aplicação de outras velocidades de retrolavagem foi extraída a turbidez desta, para diferentes velocidades de expansão, conforme visto na Figura 59 e Tabela 19.

Figura 59 - Curva de turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro com esferas de poliestireno, com expansão de 100, 150 e 200% em 20 minutos de retrolavagem com água, ou seja, 12,8, 17 e 22,8 m/h respectivamente (valores médios e desvio padrão de dez carreiras).

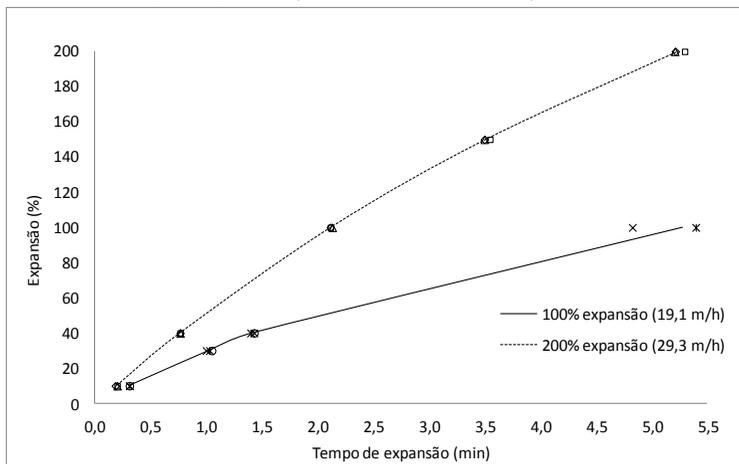


A limpeza foi estendida por 20 min de aplicação de água, contudo observa-se que não há necessidade, podendo ser reduzida para 10 min apenas, visto que, com esses graus de expansão, houve uma boa limpeza.

Outros valores de velocidade menores foram testadas, com 7 m/h, com expansão de 50% em 10 min, porém a limpeza não foi boa, atingindo apenas 49,1 uT ao final da retrolavagem, além do que, flocos ficaram aderidos aos grãos e partículas mais pesadas sedimentaram para o fundo do leito.

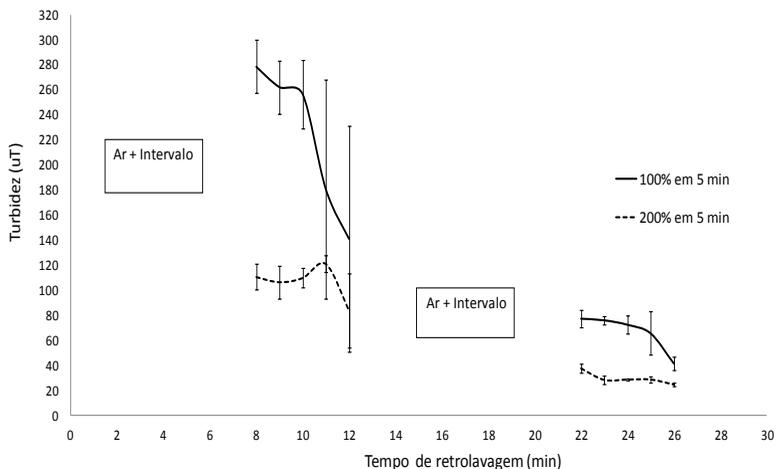
Foi observado que as esferas de poliestireno levam um tempo maior (além do convencional) para atingir um determinado grau de expansão. Isso ocorre devido a sua característica esférica. Contudo, esse tempo maior não é favorável quando deseja-se uma maior produção efetiva. A fim de auxiliar o processo, ajustaram-se as velocidades, de tal forma que o material atingisse os mesmos graus de expansão na metade do tempo, ou seja, em vez de 10 min, utilizou-se 5 min para o mesmo feito, conforme Figura 60.

Figura 60 - Curvas médias de expansão (%) no tempo (min) para de PS para as velocidades de 19,1 e 29,3 m/h (três análises realizadas).



Após as carreiras de filtração, foram realizados os processos de retrolavagem, onde para cada velocidade foram realizados 3 processos. O período de recuperação do filtro foi o mesmo. Os resultados da turbidez da água de retrolavagem, para essas velocidades de expansão são apresentadas na Figura 61.

Figura 61 - Curva de turbidez da água de lavagem do filtro com esferas de poliestireno, com expansão de 100 e 200% em 5 min de retrolavagem com água, ou seja, 19,1 e 29,3 m/h respectivamente. (valores médios e desvio padrão de uma amostra de 3 carreiras).



Para cada velocidade, obteve-se um grau de expansão, em determinado tempo, e um resultado referente a qualidade da retrolavagem e produção efetiva, conforme Tabela 19.

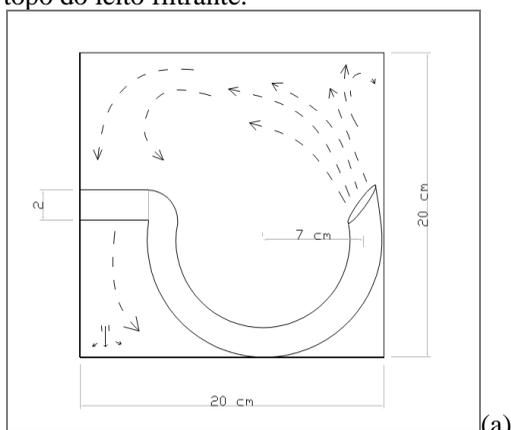
Tabela 19 - Valores médios referentes a cada velocidade de retrolavagem aplicada.

Velocidade de retrolavagem da água (m/h)	Grau de expansão (%)	Tempo de retrolavagem (min)	Duração da carreira (h)	Turbidez de retrolavagem final (uT)	Avaliação qualitativa da limpeza	Produção efetiva (%)
29,3	200	5	6,3	24,5	Boa	89
19,1	100	5	7	14,7	Boa	93
17	150	10	7	21,6	Boa	92,4
12,8	100	10	6,3	15,9	Boa	93
7	50	10	6,6	49,1	Ruim	93,8

De acordo com a Tabela 19, os melhores resultados foram alcançados com as velocidade 19,1 m/h e 12,8 m/h, ou seja, 100% de expansão, com boa limpeza, atingindo índices de turbidez na ordem dos 15 uT e uma produção efetiva de 93%. Se comparado a produção efetiva obtida pelo filtro A+A de 93,8%, esse valor apesar de próximo não é satisfatório, pois não apresenta vantagens quanto a produção efetiva.

Outros sistemas de limpeza foram testados, um utilizando a introdução de água na lateral do filtro, 21 cm abaixo do topo do leito, com auxílio de uma mangueira (Figura 62(a)) propiciando uma turbulência no sentido helicoidal com velocidade da água de aproximadamente 10 m/h, e outra (também a 21 cm abaixo do topo) utilizando um aspersor de água giratório, conforme Figura 62(b). Ambos os sistemas foram instalados e testados individualmente.

Figura 62 - (a) Desenho do sistema de entrada de água lateral; (b) Fotografia do aspersor de água giratório, ambos instalados a 21 cm abaixo do topo do leito filtrante.



O aspersor apresenta diâmetro de 14 cm. Conta com três hélices, cada uma com três orifícios de aproximadamente 1mm cada, e mais um no centro do dispositivo. A velocidade angular estipulada para o funcionamento foi de aproximadamente 1300 rad/min, ou 620 rpm e seu gradiente de velocidade no meio em 536 s^{-1} . Esses sistemas não mostraram vantagens, pois não limpavam adequadamente o filtro.

Para análise do desempenho das esferas PS, decidiu-se reduzir a espessura do leito para 68 cm. As carreiras de filtração tiveram uma duração média de 8,7 h para o filtro PS. As carreiras de filtração foram terminadas quando a perda de carga atingiu 2 m. A retrolavagem ótima do filtro PS obedeceu a seguinte configuração:

3 min de ar; 2 min de intervalo; 3 min de água; 1 min de ar; 2 min de intervalo; 4 min de água, com expansão de 182% em 5 min (856 L/h), perfazendo um total de 15 min de retrolavagem no total, conforme Figuras 63 e 64.

Figura 63 - (a) Curva de expansão em um tempo de 5 minutos, com uma velocidade de 21,4 m/h, no leito de 68 cm (valores médios e desvio padrão de uma amostra de 3 aferições).

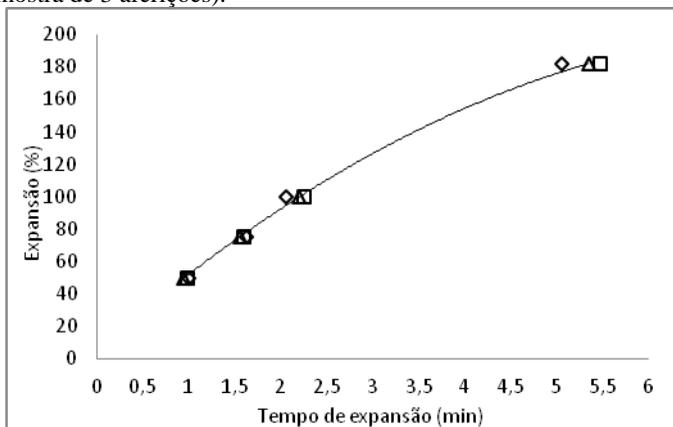
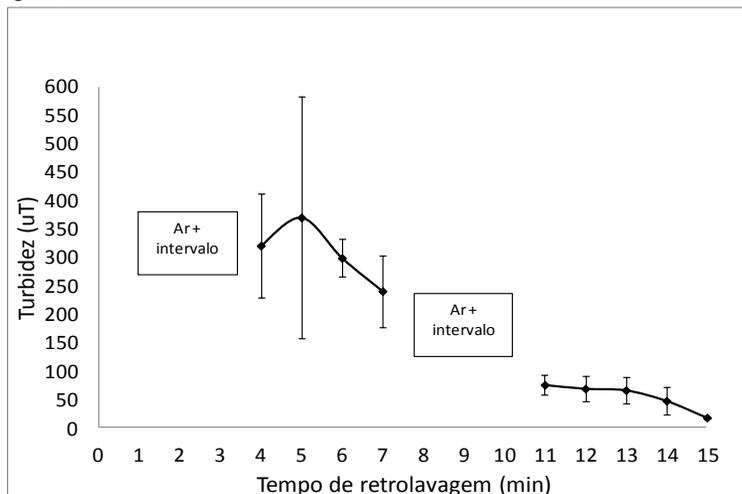


Figura 64 - Turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro com esferas de poliestireno, com expansão de 182% em 5 minutos de retrolavagem com água, ou seja, 21,4 m/h. (valores médios e desvio padrão de uma amostra de 3 lavagens).

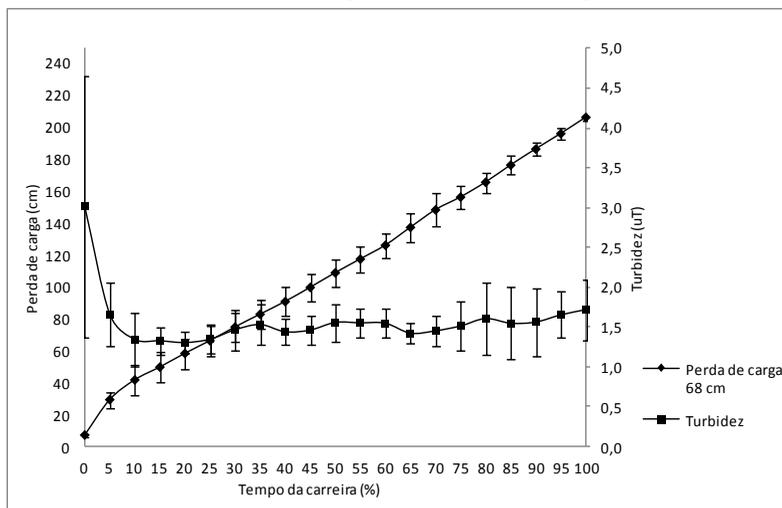


As características da água do filtro PS, com 68 cm de espessura do leito, foram praticamente as mesmas que as com 97 cm de leito, conforme Tabela 20.

Tabela 20 - Características da água filtrada pelos filtros PS com 97 e 68 cm de leito (percentual de remoção médio).

Parâmetros	Filtro de Poliestireno (97 cm)	Filtro de Poliestireno (68 cm)
Remoção de Turbidez (uT) (%)	75	75,9
Remoção de Cor Aparente (uH) (%)	67	70,9
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (Valor médio)	84,0	85,0
Alumínio residual (mg/L) (Valor médio)	0,1	0,12
Remoção de Cianobactérias (<i>cylindrospermopsis raciboskii</i>) (%)	50	53,3

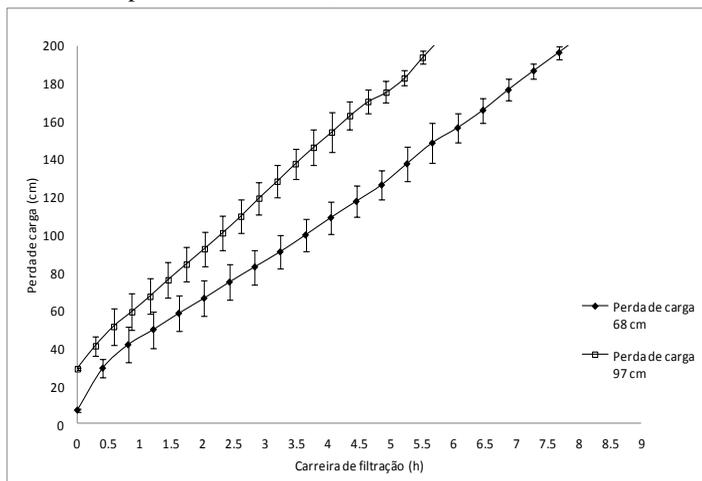
Figura 65 - Comportamento da perda de carga e turbidez da água filtrada pelo filtro PS (com 68 cm) ao longo da carreira de filtração.



Não houve transpasse, conforme observado na Figura 65. Além disso, o tempo de recuperação do filtro PS foi menor, em torno de 6 minutos. Assim, a produção efetiva subiu para 95,2%.

Com a redução da espessura do leito, houve um aumento do tempo de carreira de filtração e elevou-se a produção efetiva, sem a necessidade e incrementos no processo de limpeza. Acredita-se que isso ocorreu, porque a perda de carga inicial foi menor, fazendo com que levasse mais tempo para atingir os 2 m. Isso pode ser observado na Figura 66, pela diferentes perdas de carga iniciais. É importante ressaltar que o material é bastante homogêneo (coeficiente de uniformidade igual 1,36), não sofrendo estratificação pela retrolavagem, como por exemplo a areia ou antracito. Em um filtro convencional de areia e antracito, após sucessivas lavagens, os grãos menores ficam no topo do leito filtrante, isso não ocorre com as esferas de poliestireno (PS).

Figura 66 - Curva da perda de carga ao longo da carreira de filtração, das diferentes espessuras de leito PS, com 97 cm e 68 cm.



Além disso, modificou-se o ponto de saída da água de lavagem para 54 cm acima do topo do leito de 68 cm. Cinco carreiras de filtração e processos de retrolavagem foram rodados nessa configuração. Aplicou-se neste processo de retrolavagem uma expansão de 50% em 5 min. Os resultados podem ser vistos na Figura 67 e 68.

Figura 67 – Expansão de 50% do leito PS (9,7 m/h) em 5 min (valores médios e desvio padrão de 3 aferições).

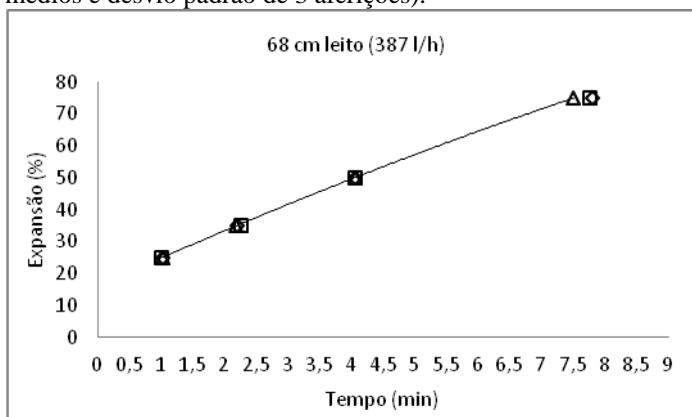
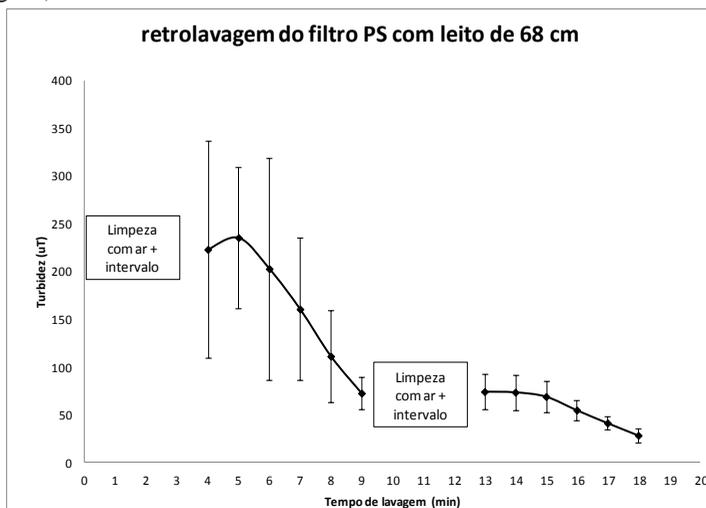


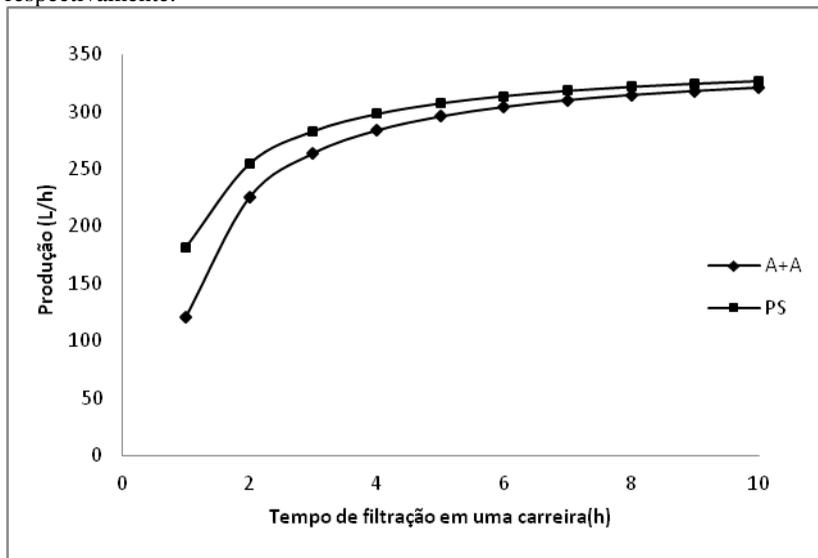
Figura 68 - Turbidez obtida durante a retrolavagem do filtro com esferas de poliestireno, com expansão de 50% em 5 min de retrolavagem com água, ou seja, 9,7 m/h (valores médios e desvio padrão de uma amostra de 5 lavagens).



Para essa configuração, a produção efetiva calculada foi de 96%, desenvolveu-se uma curva de produção dos filtros PS e A+A de acordo com a carreira, conforme Figura 69.

Nota-se que a curva de produção do Filtro PS é pouco maior que a do Filtro A+A, no início da produção, mas com a elevação do tempo de filtração a tendência é a estabilização da produção em um mesmo valor. Contudo, o volume produzido pelo Filtro PS, com 68 cm de espessura, apesar de pouco, é maior.

Figura 69 - Curva de produção L/h de acordo com a carreira de filtração para os filtros A+A e PS, considerando a produção efetiva de 93.8% e 96% respectivamente.



Assim, estimou-se a produção a longo prazo. Em termos reais de volume de produção em um ano, ou 8760 horas de produção, o Filtro PS produz um $70770 \text{ m}^3/\text{m}^2$, enquanto que o Filtro A+A 70.030 m^3 . A diferença é de $740 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Se estimarmos cinco filtros de 25 m^2 , por exemplo, obteríamos uma economia de 18500 m^3 ou R\$ 92.500,00 considerando o custo da água de R\$ 5,00/ m^3 (custo de venda CASAN – tarifa residencial B, consumo até 25 m^3).

De fato, as esferas de poliestireno são mais caras que a areia. O preço das esferas de poliestireno é de aproximadamente \$ 0,92 (dólares americanos), ou aproximadamente 2 reais (cotação do dólar de 02/07/2014), o quilo. Então, para 17 m^3 ($0,68 \text{ m} \times 25 \text{ m}^2$), seriam necessárias 18 toneladas de PS, o que custaria \$ 16.450,00, ou R\$ 36.000,00. Já para a areia, os mesmos 17 m^3 , seriam necessárias 45 toneladas, ou \$ 14.884,60 aproximadamente ou R\$ 32.575,00. Perfazendo uma diferença de \$ 1.565,40 ou R\$ 3.426,00. Ou seja, em menos de 15 dias de uso das esferas de poliestireno, o material se paga.

3. Conclusões

O objetivo desse estudo foi verificar se as esferas de poliestireno,

como um elemento filtrante, apresentam uma redução dos volumes de água empregados na retrolavagem do filtros, por serem leves e assim exigirem menores velocidades para fluidificação do material. Algumas configurações de processos de retrolavagem foram testados e comparados aos processos de retrolavagem do filtro convencional de A+A. Primeiramente, o filtro PS foi retrolavado de maneira igual ao filtro A+A, contudo, não demonstrou vantagens no que diz respeito a produção efetiva, porque apesar de utilizar menores velocidades de lavagem, esse necessita de mais tempo para propiciar o arraste das partículas, além do que a carreira de filtração deste filtro foi consideravelmente menor, na casa das 5,8 horas em média, quando a espessura era de 97 cm.

Outras velocidades e graus de expansão foram testados com tempos menores, porém não demonstraram vantagens.

Com a redução da espessura do leito para 68 cm, a duração da carreira subiu para 8,1 horas, ou seja 40% maior. Alterou-se o ponto de saída da água e o processo de limpeza com ar e água foi aplicado e otimizado, com velocidade de 9,7 m/h e expansão de ~50%, perfazendo um total de 17 min de processo. Além disso, houve uma diminuição do tempo de recuperação do filtro para em média 8 minutos. Com isso, a produção efetiva foi para 96%. A primeira vista, essa vantagem pode parecer pouca, ou quase inexpressiva, não justificando a utilização desse material mais caro. Todavia, estimando a utilização desse material em filtros maiores e a longo prazo, ele pode ser vantajoso. A estimativa é que em 15 dias esse material já cobriria o seu custo e traria um lucro de 0,70% ao ano. Além disso, por ser leve possui outras vantagens, como a construção de reservatórios menos elevados ou a diminuição dos componentes e conexões necessários para a realização da retrolavagem.

Algumas observações devem ser levadas em consideração para a utilização desse material como meio filtrante, como o processo de cisalhamento e o ponto de saída da água de lavagem. O cisalhamento ou despreendimento das partículas aderidas ao meio filtrante deve ser realizado antes da introdução da água de retrolavagem, pois existe o risco de perda do material filtrante durante o processo. O ponto de saída da água de lavagem não deve ficar muito além de 20 cm acima do limite máximo da expansão, para que a água de retrolavagem consiga expulsar as partículas de sujeira. Deve considerar também que essa elevação da expansão não é instantânea devido as características do material filtrante, e para que haja uma maior produção efetiva de água, o tempo de retrolavagem por água deve ser otimizado de acordo com as características do filtro e da água bruta a tratar.

4. Recomendações e Considerações Finais

Para que as esferas de poliestireno possam ser um elemento filtrante vantajoso, é necessário que sejam testados outros tipos de sistemas de limpeza como, por exemplo, dupla injeção de ar em locais diferentes com uma injeção no fundo e outra acima do material filtrante expandido, para agilizar a saída das partículas do filtro, similares aos sistemas de flotação, mas para isso é necessário um sistema de introdução de ar com microbolhas, que formem um cortina, que empurem as partículas rapidamente para o ponto de saída.

Devido às características da água da lagoa do Peri, com grande quantidade de fitoplâncton, o sistema de filtração direta teve o seu desempenho prejudicado. Os filtros poderiam ter resultados mais vantajosos se a água bruta não contasse com a presença deste elemento. Assim, recomenda-se a utilização de outro tipo de água bruta, livre da presença de fitoplâncton.

Recomenda-se também a realização de testes desse material para um sistema convencional de tratamento. Acredita-se que os resultados não só de limpeza dos filtros otimizados, mas como de qualidade da água produzida possam ser melhorados.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com o objetivo de avaliar o desempenho das esferas de poliestireno como elemento filtrante, e se esta representa vantagens no processo de filtração rápida, principalmente no que se refere à produção efetiva, conforme hipótese levantada, inicialmente caracterizou-se o material.

Seguindo os modelos sugeridos por NASEER *et al.* (2011) e TURAN *et al.* (2003), verificou-se que apesar de ser necessária uma baixa velocidade para fluidificação, o que já causaria uma alta turbulência, apresenta uma baixa tensão hidrodinâmica de cisalhamento e dissipação dessa turbulência. Verificou-se que o material exige um suporte a fim de aumentar o cisalhamento, e por isso, aplicou-se o ar.

O coeficiente de permeabilidade do leito filtrante, indicou ser possível a utilização desse material como um elemento filtrante.

Outros mecanismos de filtração foram determinados, como o índice de filtração e a capacidade adsortiva do material, além da ação da profundidade de filtração até o fim da carreira. Devido às características da água bruta proveniente da Lagoa do Peri e utilizando a tecnologia de filtração direta, o filtro com as esferas de poliestireno apresentou uma curta carreira de filtração em média 5,8 horas. Apresentou uma retenção média da perda de carga de 0,517 cm a cada minuto, um índice de remoção de 70% da turbidez e ação da profundidade de filtração ficou em 40 cm aproximadamente.

A remoção da turbidez e os índices de filtração apresentaram-se estáveis durante toda a carreira, com exceção do período de recuperação, que é o tempo para a acomodação dos grãos do elemento filtrante, após a retrolavagem.

As esferas de poliestireno demonstraram uma baixa capacidade adsortiva, com área específica e diâmetro dos poros pequeno, além de ser um material pouco rugoso como foi observado pelas imagens do MEV. Apesar disso, este material consegue reter particulados em sua superfície, dependendo da concentração do adsorvente e dos sítios ativos da superfície do grão, o que pode variar com a temperatura, pH entre outros fatores. De acordo com os resultados obtidos, a adsorção deste material é física, ocorrendo pela ação de forças eletrostáticas e de Van der Waals. Estas forças são fracas e reversíveis, sendo possível a reutilização do material. A adsorção das esferas de poliestireno é melhor enquadrada pela isoterma de Freundlich, ou seja, não prevê uma saturação do adsorvente. Neste caso, há a formação de multicamadas. O processo de adsorção não é espontâneo, sugerindo que a reação de

formação de complexos adsorvente/adsortavo precisa de energia para ocorrer.

Nos parâmetros de qualidade analisados, a água produzida pelo filtro PS mostrou-se bastante similar ao filtro A+A, apesar de algumas diferenças, como por exemplo, o filtro A+A apresentou maior retenção de cianobactérias *cylindrospermopsis raciborskii*, característica na Lagoa do Peri. Contudo, a maior diferença entre os filtros foi a duração da carreira de filtração. A duração da carreira de filtração do filtro PS foi até 1,65 vezes menor que a do filtro A+A. Esse fenômeno ocorre devido a maior porosidade do leito do filtro A+A e o coeficiente de uniformidade é maior que 1,2, o que implica diretamente no cálculo de produção efetiva.

Já para os primeiros processos de retrolavagem, apesar de ser necessária uma baixa velocidade de fluidificação do material, foi preciso um tempo maior para realizá-lo, fazendo com que não houvesse vantagens em termos de produção efetiva, pois a água da retrolavagem precisa ter força de arraste do material particulado até o ponto de saída. A força de arraste está diretamente relacionada com o tamanho das partículas e a velocidade empregada no processo segundo (CRITTENDEN *et al.*, 2011).

A fim de otimizar o tempo de retrolavagem realizaram-se várias configurações dentre velocidades de ar e água intercaladas. Não foi possível a aplicação de ar e água simultaneamente, pois a aplicação conjunta de ar/água causaria a perda do material filtrante.

Quando foram realizados testes de retrolavagem o sistema foi otimizado para o filtro PS, ou seja, a espessura do leito reduzida e o ponto de saída da água de retrolavagem colocado à 20 cm acima do ponto de expansão máxima, a velocidade de retrolavagem foi ajustada para 9,7 m/h, propiciando porosidade do leito expandido da ordem 60%, o que representa uma expansão total de 50%. Com essa configuração houve uma maior carreira de filtração e uma ligeira redução do tempo de retrolavagem, o que implicou em um aumento de 2% na produção efetiva. Contudo, os parâmetros do filtro A+A não foram otimizados.

Também, outras características intrínsecas ao material podem ser exploradas como a menor perda de carga e a facilidade de fluidificação desse material, com a redução dos diâmetros de tubulações/válvulas e redução do tamanho dos reservatórios em cotas menores e/ou bombas de menor potência, o que pode gerar uma economia no sistema. Apesar das vantagens apresentadas, antes da plena recomendação de utilização desse material, outros parâmetros necessitam ser avaliados, como:

- A utilização de testes com outros tipos de água bruta,

pois as características da água da Lagoa do Peri não são adequadas para a tecnologia utilizada, devido a grande presença de fitoplâncton;

- Os sistemas de retrolavagem precisam ser melhor avaliados, em pilotos com diâmetros maiores, respeitando os critérios de relação D/d (diâmetro do filtro/diâmetro médio do material) na ordem de 1000, conforme recomendado por IVES (1970), afim de avaliar com segurança o processo de retrolavagem e caracterizar um aumento de produção efetiva;

- Recomenda-se a realização de testes desse material em um sistema convencional de tratamento de água, de forma a obter-se água com os padrões de potabilidade estabelecidos pela portaria 2.914 do ministério da saúde (SAÚDE, 2011);

- Utilizar um filtro de dupla camada, com outra granulometria em conjunto com materiais de diferentes massas específicas, a fim de aumentar a duração da carreira de filtração e consequentemente a produção efetiva, como por exemplo, PS + Antracito, com maior granulometria de PS;

- Melhorar o sistema de aplicação de ar, a fim de ativar simultaneamente o ar e água durante a retrolavagem e otimizar o sistema, para que haja o cisalhamento durante o processo, sem haver perda de material filtrante;

- Utilizar outros sistemas de retrolavagem auxiliares e subsuperficiais, como agitadores mecânicos, pois devido à baixa massa específica desse material acredita-se que a utilização desses artifícios pode ser interessante, não gerando problemas comuns como a quebra de pás ou hélices devido a deficiência na operação do sistema.

Uma vez avaliadas as características e itens recomendados, e o desempenho das esferas de poliestireno forem satisfatórios é possível a sua utilização em escalas maiores, como em estações de tratamento de água para abastecimento.

REFERÊNCIAS

AHMED, N.; SUNADA, D. Nonlinear flow in porous media. **J. Hydr. Div. ASCE**, v. 95, n. 6, p. 1847–1857, 1969.

AKGIRAY, Ö.; SAATÇI, A. A New look at filter backwash hydraulics. **Water Supply**, v. 1, n. 2, p. 65–72, 2001.

AMIRTHARAJAH, A. Some Theoretical and Conceptual Views of Filtration. **AWWA**, v. Research a, p. 36–46, 1988.

ANDO, T.; NAKAGAWA, K.; GAMO, M.; HIROKAZU, O. **Marimo Cladophora form carbon comprisin.pdf**. , 2009

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 1999. v. 4

ASTM D 543-95. Standard Practices for Evaluating the Resistance of Plastics to Chemical. v. 95, n. December 1995, 2001.

AWWA, A. W. W. A. **water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. (USA, Ed.): McGraw-Hill. , 1999

AZEVEDO, MARIA TERESA DE P.SANT' ANNA, C. L. **Identificação e Contagem de Cianobactérias Planctônicas de Águas Continentais Bras.**, 2006. p. 58

BAYLIS, J. . Variable rates filtration. **Pure Water**, v. XI, n. 5, p. 86–114, 1959.

BERNARDO, L. DI. **Filtração Direta aplicada a pequenas Comunidades**. Prosab 3 ed. São Carlos - SP: Rede Cooperativa de Pesquisas, 2003. p. 480

BERNARDO, L. DI; DANTAS, A. **Método e Técnicas de Tratamento de Água**. 2°. ed. São Carlos - SP: 2005. p. 792p.

BORBA, C. . **Modelagem da remoção de metais pesados em coluna de adsorção de leito fixo**: UNICAMP, 2006.

BRANDÃO, C. C. S.; LACERDA, M. R. .; ABREU, M. . **Influência do tempo de floculação na filtração Direta de águas com baixa turbidez e teor elevado de algas.** . João pessoa, Brasil, 1996

CESTARI, A. R.; VIEIRA, E. F. S.; VIEIRA, G. S.; *et al.* The removal of reactive dyes from aqueous solutions using chemically modified mesoporous silica in the presence of anionic surfactant-the temperature dependence and a thermodynamic multivariate analysis. **Journal of hazardous materials**, v. 161, n. 1, p. 307–16, 15 jan 2009.

CHANG, M.; TRUSSELL, R. .; GUZMAN, V.; MARTINEZ, J.; DELANEY, C. . Laboratory studies on the clean bed headloss of filter media. **Aqua**, v. 48, n. 4, p. 137–145, 1999.

CIDRA, P. **Mineral Hardness Conversion Chart** , 2012

CLEASBY, J. .; FAN, K. . Predicting fluidization and expansion of filter media. **JEED-ASCE**, v. 107, n. EE3, p. 455–471, 1981.

CLEASBY, J. .; LONGSDON, G. **Water Quality and Treatment a Handbook of Community**. 15. ed. MacGrawHill: AWWA, 1999. p. 8.36

CLEASBY, J. .; WOODS, C. . Intermixing of dual media and multimedia granular filters. **AWWA**, v. 67, n. 4, p. 197–203, 1975.

COLPANI, G. **Preparação e caracterização de adsorventes Para a remoção de surfactantes aniônicos em Águas residuárias.** UFSC, 2012.

COTTET, L. **ARGILA MONTMORILONITA E DO CARVÃO DE COCO DE BABAÇU ATIVADO COM ÓXIDO DE FERRO: CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA ADSORÇÃO.** UFSC, 2009.

COUTO, G. **Utilização de Serragem de Eucalyptus sp. na Preparação de Carvões Ativados.** UFLA, 2009.

CRITTENDEN, J. .; TRUSSELL, R. .; HAND, D. .; HOWE, K. .; TCHOBANOGLIOUS, G. **Water Treatment Principles and Design**. 2°. ed. Hoboken, NJ: John Wile & Sons, 2011. p. 880–932

CUSHING, R. S.; LAWLER, D. F. Depth Filtration: Fundamental Investigation through Three-Dimensional Trajectory Analysis. **Environmental Science & Technology**, v. 32, n. 23, p. 3793–3801, dez 1998.

DALSASSO, R. L. **Floculação em meio Granular, Descendente no Tratamento de Água para Abastecimento**. Tese de doutorado - Programa de Pós-graduação em Eng. Ambiental - UFSC: Florianópolis/SC, 2005. p. 254

DALSASSO, R. L.; SENS, M. L. Filtração direta com pré-floculação e coagulação com sulfato de alumínio e hidroxiclreto de alumínio: estudo com água de manancial eutrofizado. **Eng. sanit. ambient.**, v. 11, n. 3, p. 241–249, 2006.

DAVIES, P. D.; WHEATLEY, A. D. Pilot plant study of alternative filter media for rapid gravity filtration. **Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research**, v. 66, n. 12, p. 2779–84, jan 2012.

ELIMELECH, E. Predicting Collision Efficiencies of Colloidal Particles in Porous Media. **Water Research**, v. 26, n. 1, p. 1–8, 1992.

ELIMELECH, M.; O'MELIA, C. R. Kinetics of deposition of colloidal particles in porous media. **Environmental Science & Technology**, v. 24, n. 10, p. 1528–1536, 1990.

ERDEM, M.; YÜKSEL, E.; TAY, T.; CIMEN, Y.; TÜRK, H. Synthesis of novel methacrylate based adsorbents and their sorptive properties towards p-nitrophenol from aqueous solutions. **Journal of colloid and interface science**, v. 333, n. 1, p. 40–8, 1 maio 2009.

ESCUADERO, D.; HEINDEL, T. . Bed height and material density effects on fluidized bed hydrodynamics.pdf. **Chemical Engineering Science**, v. 66, n. 16, p. 3648–3655, 2011.

FABRIS, R.; CHOW, C. W. K.; DRIKAS, M.; EIKEBROKK, B. Comparison of NOM character in selected Australian and Norwegian drinking waters. **Water research**, v. 42, n. 15, p. 4188–96, set 2008.

FARIZOGLU, B.; NUBOGLU, A.; YILDIZ, E.; KESKINLER, B. Performance of pumice as a filter bed material under rapid filter. **Filtration + Separation**, n. Abril, p. 41–46, 2003.

FERNANDES, A. N.; GIOVANELA, M.; ESTEVES, V. I.; GRASSI, M. T. Remoção dos hormônios 17B estradiol e 17Betinilestradiol de solução aquosa empregando turfas decompostas como material adsorvente. **Química Nova**, v. 34, n. 9, p. 1526–1533, 2011.

HARWANTO, D.; OH, S.; JO, J. Comparison of the Nitrification Efficiencies of Three Biofilter Media in a Freshwater System. **Fish Aqua Sci**, v. 14, n. November, p. 363–369, 2011.

HASSAN, S. S. M.; AWWAD, N. S.; ABOTERIKA, A. H. A. Removal of synthetic reactive dyes from textile wastewater by Sorel's cement. **Journal of hazardous materials**, v. 162, n. 2-3, p. 994–9, 15 mar 2009.

HEXIS, C. D. E. T. **Procedimentos de Análise - Espectofotometro DR2010 HACH**, 2004

HSU, B.; HUANG, C.; PAN, J. R. Filtration behaviors of giardia and cryptosporidium ionic strength and ph effects. **Water Research**, v. 35, n. 16, p. 3777–3782, 2001.

IVES, K. Rapid filtration. **Water Research**, v. 4, p. 201–223, 1970.

IVES, K. . A new concept of Filtrability. **Proc. Wat. Technology**, v. 78, n. 5/6, p. 123–137, 1978.

IVES, K. . **Fundamentals Filtration**. Proc. of Sym.on Water Filtration. **Anais...** Antwerp, Belgium: 1982

JIS K 1474, J. I. S. **Test methods for activated carbon.**, 1991

KNUDSEN, P. The effect of media selection on filtration performance. **Process Engineering - Sydney Australia**, v. 8, n. 4, 1980.

LAGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, v. 40, p. 1361–1403, 1918.

LANG, J. .; GIRON, J. .; HANSEN, A. .; *et al.* Investigating filter performance as a function of the ratio of filter size to media size. **AWWA**, v. 85, n. 10, p. 122–130, 1993.

MAGNO, F. **Técnicas de caracterização de polímeros**: Departamento de Engenharia Química - UFPE, 2012

MOHAMMED, R. .; ABUALHAIL, S.; LU., X. W. Fluidization of fine particles and its optimal operation condition in multimedia water filter. **Des. Wat. Treat.**, v. 51, n. 22/24, p. 4768–4778, 2013.

MONDARDO, R. **Avaliação da Filtração em Margem como Pré-Tratamento à Filtração Direta Descendente na remoção de células de Cianobactérias e Saxitoxinas**. Tese de doutorado - Programa de Pós-graduação em Eng. Ambiental - UFSC: 2009. p. 290

NASEER, R.; ALHAIL, A. .; XI-WU, L. Fluidization and Optimum backwashing conditions in multimedia filter. **Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.**, v. 3(11), p. 1302–1307, 2011.

NBR-7181. **Análise Granulométrica**, 1984

NOVA CHEMICALS. **Poliestireno expansível Guia de segurança para armazenamento e manuseio**, 2005

O'MELIA, C. . Particles, pretreatment, and performance in water filtration. **Journal of Environmental Engineering**, v. 111, n. 6, p. 874–890, 1985.

PEARCE, P.; JARVIS, S. Operational experiences with structured plastic media filters: 10 years on. **Water and Environment Journal**, v. 25, n. 2, p. 200–207, 5 jun 2011.

PIZZI, N. G. Six Parameters for Filter Operations. **AWWA**, v. 29, n. 11, p. 15–17, 2003.

RICHARDSON, J. .; ZAKI, W. . SEDIMENTATION AND FLUIDISATION: PART I. **Trans. Instn Chem. ENGRS. ENGRS**, v. 32, p. 82–100, 1954.

SAÚDE, M. DA. **Portaria 2.914 do Ministério da Saúde**. 2011

SCHÖNTAG, J. M.; SENS, M. .; HYNMO, F.; PIZZOLATTI, B. .; JANGADA, V. . Water Quality Produced by Polystyrene Granules as a Media Filter on Rapid Filters. **Journal of Water Process Engineering**, p. 17, 2015.

SCHÖNTAG, J. M.; SENS, M. L. Characterization of polystyrene granules as granular media filters. **Desalination and Water Treatment**, n. June, p. 1–13, 18 jun 2014.

ŠEĆEROV SOKOLOVIĆ, R.; SOKOLOVIĆ, S.; GOVEDARICA, D. Performance of expanded polystyrene particles in deep bed filtration. **Separation and Purification Technology**, v. 68, n. 2, p. 267–272, ago 2009.

SENS, M. . **Floculação em Meio Granular Expandido**. Florianópolis: Departamento de Engenharia sanitária e Ambiental - UFSC. , 1997

SIERRA FILHO, A.; MATTOS, A. .; CALÒ, F. **Meio Filtrante à base de Pomes e tela Termoplástica - Alternativa para a filtração de água potável**, 2005

SISMANOGLU, T.; ERCAG, A.; PURA, S.; ERCAG, E. Kinetics and Isotherms of Dazomet Adsorption on Natural Adsorbents. **Journal Brazilian Chemical Society**, v. 15, n. 5, p. 669–675, 2004.

STREETER, V. .; WYLIE, E. . **Fluid Mechanics**. New York: McGraw-Hill, 1979.

SUGUIO, K. **Introdução à sedimentologia**. São Paulo: Edgard Blücher. , 1973

TOBIASON, J. E.; MELIA, C. R. O. Physicochemical Aspects of Particle Removal in Depth Filtration. **AWWA**, v. 80, n. 12, p. 54–64, 1988.

TOBIASON, J. E.; PH, D.; CLEASBY, J. L. **GRANULAR MEDIA FILTRATION**. 2011. p. 1–107

TORGAS, G. Using backwashing kinetics to evaluate attachment mechanisms and forces during filtration. **AWWA**, v. 75, n. 5, p. 254–260, 1983.

TRUSSELL, R. .; CHANG, M. Review of flow through porous media as a applied to Head loss in water filters. **AWWA**, v. 125, n. 11, p. 998–1006, 1999.

TRUSSELL, R. .; CHANG, M.; LANG, J. .; HODGES, J. Estimating the porosity of a full-scale antracite filter bed. **AWWA**, v. 91, n. 12, p. 54–63, 1999.

TURAN, M. Velocity Gradient in filter Backwashing. **J. Environ. Eng.**, n. 118, p. 776–790, 1992.

TURAN, M.; SABAH, E.; GULSEN, H.; CELIK, M. . Influence of media characteristics on energy dissipation in filter backwashing. **Environ. Sci. Technol.**, v. 37, n. 18, p. 4288–4292, 2003.

WEN, C. .; YU, Y. . **Mechanics of fluidization**. 62. ed.: Chem. Eng. Progress Sym. Series, 1966. p. 100–111

YAO, K. .; HABIBIAN, M. .; O'MELIA, C. . Water and waste water filtration: Concepts and applications. **Environmental Science & Technology**, v. 5, n. 11, p. 1105–1112, 1971.

APENDICE

COMPARAÇÕES ESTATÍSTICAS DA QUALIDADE DA ÁGUA.

Como mencionado anteriormente, no Capítulo de Materiais e Métodos, Os resultados médios de cada filtro foram comparados através do teste estatístico de hipóteses Mamm-Whitney, disponível no programa Minitab 17, assim como o percentual de remoção. Trata-se de um teste não paramétrico, (pois os dados não obedecem a uma distribuição normal) para amostras independentes, analisando com 95% de confiança, se as amostras são estatisticamente iguais, ou não.

A seguir são apresentadas as comparações estatísticas para os itens, turbidez, cor aparente, cor verdadeira, pH, temperatura, Condutividade e sólidos totatis dissolvidos. Todos os demais parâmetros seguiram o mesmo critério de comparação.

O teste de hipóteses utilizado obedeceu ao seguinte critério:

$\alpha =$ Índice de significância utilizados pelo método.

Se $\alpha > 0,05$ PS = A+A

$\alpha < 0,05$ PS \neq A+A

Tabela 21 – Médias dos valores referentes a qualidade da água para o Filtro PS. Valores utilizados para a comparação estatística.

PS (médias)							
Duração da carreira (%)	Cor V. (uH)	Cor A. (uH)	Turbidez (uT)	pH	Temp. (°C)	Cond. (μ S/cm)	STD (mg/L)
0	3,3	25,6	1,9	6,2	19,8	84,0	53,8
5	5,3	26,8	1,7	6,4	19,8	81,5	52,2
10	7,2	26,3	1,5	6,5	19,9	80,7	51,6
15	8,5	25,5	1,4	6,5	20,1	81,5	52,1
20	9,3	24,8	1,3	6,5	20,2	81,5	52,2

25	10,3	23,7	1,3	6,6	20,3	81,6	52,2
30	10,3	22,5	1,2	6,6	20,3	81,5	52,1
35	9,0	23,9	1,2	6,6	20,4	81,5	52,2
40	7,8	18,9	1,2	6,6	20,5	81,7	52,3
45	7,6	20,1	1,3	6,6	20,6	81,8	52,4
50	8,4	21,7	1,3	6,7	20,7	81,6	52,2
55	8,6	22,9	1,3	6,7	20,8	81,5	52,2
60	8,4	23,7	1,4	6,7	20,8	81,4	52,1
65	7,1	22,8	1,4	6,7	20,8	81,2	52,0
70	5,6	23,2	1,3	6,6	20,9	81,3	52,0
75	4,4	21,6	1,2	6,6	21,0	81,5	52,2
80	3,6	19,4	1,2	6,6	21,0	81,5	52,2
85	3,3	22,8	1,3	6,6	21,1	81,0	51,9
90	3,3	22,1	1,2	6,6	21,1	81,0	51,8
95	3,5	20,8	1,3	6,7	21,1	81,0	51,9
100	4,2	19,6	1,2	6,7	21,1	81,3	52,1

Resultados obtidos com o Programa Minitab 17, utilizando o método Mann-Whitney, com 95% de confiança.

Cor verdadeira

N Median

cor v ps 21 7.250

cor v A+A 21 8.133

IGUAL

Point estimate for ETA1-ETA2 is -1.142

95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-2.666,0.258)

W = 388.5

Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 not = ETA2 is significant at 0.1159

The test is significant at 0.1159 (adjusted for ties)

Cor Aparente

N Median

cor A PS 21 22.820

DIFERENTE

Cor A A+A 21 19.710

Point estimate for ETA1-ETA2 is 3.330

95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (1.750,4.820)

W = 596.0

Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 not = ETA2 is significant at 0.0003

Turbidez

N Median

Turbidez PS 21 1.2894

IGUAL

turbidez A+A 21 1.3147

Point estimate for ETA1-ETA2 is 0.0028

99.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-0.1066,0.1037)

W = 453.0

Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 not = ETA2 is significant at 0.9799

pH

N

Median

pH PS 21 6.6346

IGUAL

pH A+A 21 6.6574

Point estimate for ETA1-ETA2 is -0.0282

95.0 Percent CI for ETA1-ETA2 is (-0.0817,0.0197)

W = 402.0

Test of ETA1 = ETA2 vs ETA1 not = ETA2 is significant at 0.2177

temperatura

	N	Mean	StDev	SE Mean	
temp. PS	21	20.58	0.454	0.099	DIFERENTE
temp. A+A	21	21.06	0.696	0.15	

Difference = μ (temp. PS) - μ (temp. A+A)

Estimate for difference: -0.478

95% CI for difference: (-0.847, -0.110)

Test of $\text{ETA1} = \text{ETA2}$ vs $\text{ETA1} \neq \text{ETA2}$ is significant at 0.0268

cond

	N	Median	
cond. PS	21	81.488	IGUAL
cond. A+A	21	81.087	

Point estimate for $\text{ETA1}-\text{ETA2}$ is 0.320

99.0 Percent CI for $\text{ETA1}-\text{ETA2}$ is (-0.138,0.700)

Test of $\text{ETA1} = \text{ETA2}$ vs $\text{ETA1} \neq \text{ETA2}$ is significant at 0.051

TABELAS E PLANILHAS

Granulometria PS

Peneira		Peso da Peneira	Peneira + Material	Material Retido	Percentual retido	Percentual que passa
Nº	# (mm)	(g)	(g)	(g)		
10	2	586,5	586,5	0	0,00%	100,00%
16	1,19	488	488,1	0,1	0,08%	99,92%
30	0,59	463,6	583,5	119,9	99,58%	0,33%
40	0,42	344,9	345	0,1	0,08%	0,25%
50	0,3	317,2	317,4	0,2	0,17%	0,08%
70	0,21	451,8	451,9	0,1	0,08%	0,00%
100	0,15	338,8	338,8	0	0,00%	0,00%
200	0,074	329	329	0	0,00%	0,00%

Peneira		Peso da Peneira	Peneira + Material	Material Retido	Percentual retido	Percentual que passa
Nº	# (mm)	(g)	(g)	(g)		
10	2	387,44	387,44	0	0,00%	100,00%
16	1,19	385,6	385,82	0,22	0,41%	99,59%
30	0,59	348,68	401,47	52,79	99,49%	0,09%
40	0,42	281,35	281,4	0,05	0,09%	0,00%
50	0,3	361,22	361,22	0	0,00%	0,00%
70	0,21	347,78	347,78	0	0,00%	0,00%
100	0,15	329,97	329,97	0	0,00%	0,00%
200	0,074	320,54	320,54	0	0,00%	0,00%

Peneira		Peso da Peneira	Peneira + Material	Material Retido	Percentual retido	Percentual que passa
Nº	# (mm)	(g)	(g)	(g)		
10	2	387,41	387,46	0,05	0,09%	99,91%
16	1,19	380,59	381,24	0,65	1,23%	98,68%
30	0,59	348,69	400,79	52,1	98,60%	0,08%
40	0,42	281,37	281,4	0,03	0,06%	0,02%
50	0,3	361,22	361,23	0,01	0,02%	0,00%
70	0,21	347,75	347,75	0	0,00%	0,00%
100	0,15	329,97	329,97	0	0,00%	0,00%
200	0,074	320,55	320,55	0	0,00%	0,00%

Granulometria Antracito

Peneira		Peso da Peneira	Peneira + Material	Material Retido	Percentual retido	Percentual que passa
Nº	# (mm)	(g)	(g)	(g)		
10	2	387,48	397,76	10,28	2,84%	97,16%
16	1,19	385,82	629,33	243,51	67,36%	29,80%
30	0,59	348,75	453,31	104,56	28,92%	0,87%
40	0,42	281,45	282,96	1,51	0,42%	0,46%
50	0,3	360,99	361,25	0,26	0,07%	0,38%
70	0,21	347,77	347,91	0,14	0,04%	0,35%
100	0,15	330	330,14	0,14	0,04%	0,31%
200	0,074	320	320,85	0,85	0,24%	0,07%
		317,85	318,11	0,26	0,07%	0,00%

Granulometria Areia

Peneira		Peso da Peneira	Peneira + Material	Material Retido	Percentual retido	Percentual que passa
Nº	# (mm)	(g)	(g)	(g)		
10	2	387,49	387,7	0,21	0,03%	99,97%
16	1,19	385,89	390,42	4,53	0,57%	99,40%
30	0,59	348,73	965,85	617,12	77,48%	21,93%
40	0,42	281,46	420,85	139,39	17,50%	4,43%
50	0,3	360,77	382,28	21,51	2,70%	1,73%
70	0,21	347,87	353,91	6,04	0,76%	0,97%
100	0,15	330,02	333,61	3,59	0,45%	0,52%
200	0,074	320,62	323,21	2,59	0,33%	0,19%
		317,84	319,37	1,53	0,19%	0,00%

Densidade e Massa especifica

PS 01		PS02		PS 03	
peso proveta (g)	78,76	peso proveta (g)	78,5	peso proveta (g)	78,8
peso material (g)	99,4	peso material (g)	99,1	peso material (g)	99,5
volume água (ml)	60	volume água (ml)	60,15	volume água (ml)	59,9
peso água + proveta	68,81	peso água + proveta	68,7	peso água + proveta	69
volme água+material	155	volme água+material	155	volme água+material	155
peso agua+proveta +material	168,21	peso agua+proveta +material	168,3	peso agua+proveta +material	168,5
volume vazios	60	volume vazios	60,15	volume vazios	59,9
volume solidos	95	volume solidos	94,85	volume solidos	95,1
densidade material g/cm ³	1,046	densidade material g/cm ³	1,045	densidade material g/cm ³	1,046
porosidade	0,387	porosidade	0,388	porosidade	0,386

Antracito 01		Antracito 02		Antracito 03	
peso proveta (g)	73,81	peso proveta (g)	73,96	peso proveta (g)	73,88
peso material (g)	31,22	peso material (g)	30,61	peso material (g)	39,44
volume água (ml)	50	volume água (ml)	50	volume água (ml)	50
peso água + proveta	123	peso água + proveta	123,42	peso água + proveta	123,59
volme água+material	73	volme água+material	73	volme água+material	79
peso agua+proveta +material	154,52	peso agua+proveta +material	153,98	peso agua+proveta +material	162,89
volume vazios	46		46		58
volume solidos	23	volume solidos	23	volume solidos	29
densidade material g/cm ³	1,36	densidade material g/cm ³	1,33	densidade material g/cm ³	1,36
porosidade	0,63	porosidade	0,63	porosidade	0,73

Porosidade média	0,665	desvio médio	0,02	Dp	0,024
densidade media	1,35	desvio médio	0,013	Dp	0,014

Areia 01		Areia 02		Areia 03	
peso proveta (g)	73,65	peso proveta (g)	73,98	peso proveta (g)	73,96
peso material (g)	48,96	peso material (g)	45,26	peso material (g)	54,45
volume água (ml)	50	volume água (ml)	50	volume água (ml)	50
peso água + proveta	123,09	peso água + proveta	123,35	peso água + proveta	123,34
volme água+material	69	volme água+material	67	volme água+material	71
peso agua+proveta +material	172,02	peso agua+proveta +material	168,59	peso agua+proveta +material	177,86
volume vazios	38		34		42
volume solidos	19	volume solidos	17	volume solidos	21
densidade material g/cm ³	2,58	densidade material g/cm ³	2,66	densidade material g/cm ³	2,59
Porosidade	0,55	Porosidade	0,51	Porosidade	0,59

Porosidade média	0,550	desvio médio	0,027	Dp	0,033
densidade media	2,61	desvio médio	0,033	Dp	0,037

Durezza

	Mean Length	Hardness	HV	HRC
1*	33.5	16.6	16.6	0.00
2	35.3	14.9	14.9	0.00
3	34.1	16.0	16.0	0.00
4	33.5	16.6	16.6	0.00
5	37.3	13.3	13.3	0.00
6	36.3	14.1	14.1	0.00
7	Average	15.2		
8	Max	16.6		
9	Min	13.3		

Ensaio de Expansão

Tempo		Volume	Volume	Vazão		Velocidade		Expansão		P1	P2	Perda de carga	Área da coluna (m²)
(seg)	h	(L)	m³	(l/h)	(m³/s)	m/s	mm/s	cm	(%)	(mm)	(mm)		
60	0,0166	0,006	0,000006	0,36	0,00000010	0,00003571	0,04	0	0	20,4	20,2	0,2	0,0028
60	0,0166	0,015	0,000015	0,90	0,00000025	0,00008929	0,09	0,8	4	20,6	20,3	0,3	
60	0,0166	0,032	0,000032	1,92	0,00000053	0,00019048	0,19	1	5	20,7	20,3	0,4	
30	0,00833	0,049	0,000049	5,88	0,00000163	0,00058333	0,58	2,5	12,5	21,2	20,4	0,8	
30	0,00833	0,057	0,000057	6,84	0,00000190	0,00067857	0,68	2,6	13	21,1	20,4	0,7	
30	0,00833	0,082	0,000082	9,84	0,00000273	0,00097619	0,98	5,00	25	21,1	20,5	0,6	
60	0,0166	0,23	0,00023	13,80	0,00000383	0,00136905	1,37	9,00	45	21,2	20,6	0,6	
60	0,0166	0,30	0,000298	17,88	0,00000497	0,00177381	1,77	11,00	55	21,3	20,7	0,6	
60	0,0166	0,337	0,000337	20,22	0,00000562	0,00200595	2,01	11,50	57,5	21,3	20,7	0,6	
60	0,0166	0,498	0,000498	29,88	0,00000830	0,00296429	2,96	17,50	87,5	21,4	20,8	0,6	

Tempo		Volume	Volume	Vazão		Velocidade		Expansão		P1	P2	Perda de carga	Área da coluna (m ²)
(seg)	h	(L)	m ³	(l/h)	(m ³ /s)	m/s	mm/s	cm	(%)	(mm)	(mm)		
60	0,017	0,0076	0,0000076	0,46	0,00000013	0,00004524	0,05	0	0	20,4	20,2	0,2	0,0028
60	0,017	0,022	0,000022	1,32	0,00000037	0,00013095	0,13	1	5	20,7	20,3	0,4	
60	0,017	0,03	0,00003	1,80	0,00000050	0,00017857	0,18	1,5	7,5	20,8	20,3	0,5	
60	0,017	0,053	0,000053	3,18	0,00000088	0,00031548	0,32	2	10	21	20,4	0,6	
30	0,008	0,064	0,000064	7,68	0,00000213	0,00076190	0,76	3,5	17,5	21,3	20,5	0,8	
60	0,0166	0,18	0,00018	10,80	0,00000300	0,00107143	1,07	7,00	35	21,3	20,5	0,8	
60	0,0166	0,245	0,000245	14,70	0,00000408	0,00145833	1,46	9,30	46,5	21,2	20,5	0,7	
60	0,0166	0,27	0,000265	15,90	0,00000442	0,00157738	1,58	9,50	47,5	21,3	20,6	0,7	
60	0,0166	0,358	0,000358	21,48	0,00000597	0,00213095	2,13	13,00	65	21,4	20,7	0,7	
60	0,0166	0,5	0,0005	30,00	0,00000833	0,00297619	2,98	18,00	90	21,5	20,8	0,7	

Tempo		Volume	Volume	Vazão		Velocidade		Expansão		P1	P2	Perda de carga	Área da coluna (m ²)
(seg)	h	(L)	m ³	(l/h)	(m ³ /s)	m/s	mm/s	cm	(%)	(cm)	(cm)		
60	0,016 6	0,007	0,000007	0,42	0,00000012	0,00004167	0,04	0	0	20,5	20,2	0,3	0,0028
60	0,016 6	0,021	0,000021	1,26	0,00000035	0,00012500	0,13	1	5	20,6	20,2	0,4	
60	0,016 6	0,029	0,000029	1,74	0,00000048	0,00017262	0,17	1,9	9,5	20,7	20,2	0,5	
60	0,016 6	0,051	0,000051	3,06	0,00000085	0,00030357	0,30	2	10	20,9	20,3	0,6	
30	0,008 3	0,062	0,000062	7,44	0,00000207	0,00073810	0,74	3,5	17,5	21,3	20,5	0,8	
60	0,016 6	0,18666	0,00018666	11,20	0,00000311	0,00111107	1,11	7,00	35	21,2	20,5	0,7	
60	0,016 6	0,2633	0,0002633	15,80	0,00000439	0,00156726	1,57	9,50	47,5	21,3	20,6	0,7	
60	0,016 6	0,29	0,00029	17,40	0,00000483	0,00172619	1,73	10,00	50	21,3	20,6	0,7	
60	0,016 6	0,36666	0,00036666	22,00	0,00000611	0,00218250	2,18	13,00	65	21,4	20,7	0,7	

Expansão Média											
Desvio 2	Desvio 1	Velocidade Média	Perda de carga média	Velocidade Desvio Padrão	Perda de Carga Desvio Padrão	Desvio perda 1	Desvio perda 2	Expansão Média	Expansão Desvio	Desvio 1	Desvio 2
0,037	0,045	0,04	0,23	0,004	0,047	0,186	0,280	0,00	0,00	0,00	0,00
0,097	0,133	0,12	0,37	0,018	0,047	0,320	0,414	4,67	0,78	3,88	5,45
0,173	0,188	0,18	0,47	0,007	0,047	0,420	0,514	7,33	2,80	4,54	10,13
0,272	0,530	0,40	0,67	0,129	0,094	0,572	0,761	10,83	1,95	8,88	12,79
0,691	0,761	0,73	0,77	0,035	0,047	0,720	0,814	16,00	3,52	12,48	19,52
0,996	1,109	1,05	0,70	0,057	0,082	0,618	0,782	31,67	7,82	23,85	39,48
1,384	1,546	1,46	0,67	0,081	0,047	0,620	0,714	46,33	1,58	44,76	47,91
1,590	1,795	1,69	0,67	0,102	0,047	0,620	0,714	50,83	5,37	45,46	56,20
2,032	2,181	2,11	0,67	0,074	0,047	0,620	0,714	62,50	5,86	56,64	68,36
2,942	2,976	2,96	0,67	0,017	0,047	0,620	0,714	88,33	1,95	86,38	90,29

Qualidade da água (expansão 200%)

Água bruta

Parâmetros	Água Bruta																				
	0	7,7	15,4	23,1	30,8	38,5	46,2	53,8	61,5	69,2	76,9	84,6	92,3	100,0							
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	06:30							
aproximação cor Ap.	0	5,0	10	15,0	20	25,0	30	35,0	40	45,0	50	55,0	60	65,0	70	75,0	80	85,0	90	95,0	100
Cor Aparente	0	0,0	8,1	25,6	33,0	46,2	70,3	63,6	51,2	38,9	36,0	38,5	49,6	51,7	51,3	59,7	61,8	60,2	62,8	64,4	65,0
aproximação turbidez	0,00	0,00	0,00	1,91	1,71	2,02	3,35	2,99	2,61	2,86	2,86	3,02	4,00	4,12	3,99	4,65	4,94	4,99	5,17	5,00	4,53
Turbidez			2,01	1,51	3,56	2,53	2,92	2,8	4,3	3,89	4,91	4,98	5,25	4,53							
aproximação pH de coagulação	0,00	6,35	6,34	6,32	6,29	6,29	6,33	6,29	6,30	6,57	6,53	6,51	6,58	6,56	6,51	6,54	6,53	6,49	6,50	6,49	6,48
pH de coagulação		6,35	6,32	6,27	6,34	6,24	6,56	6,49	6,6	6,51	6,55	6,49	6,5	6,48							
aproximação pH	0,00	0,00	1,89	5,99	6,38	6,37	6,23	6,36	6,51	6,63	6,59	6,56	6,56	6,55	6,55	6,60	6,61	6,59	6,54	6,53	6,55
pH			6,31	6,42	6,21	6,48	6,62	6,56	6,56	6,54	6,62	6,59	6,52	6,55							
aproximação temperatura	0,00	14,76	22,64	22,51	22,62	22,73	22,79	22,69	22,66	22,86	23,10	23,35	23,54	23,78	24,19	25,80	26,06	26,24	25,46	25,07	25,00
Temperatura		22,7	22,5	22,7	22,8	22,6	22,9	23,3	23,6	24	25,9	26,3	25,1	25							

Parâmetros	Água Bruta																				
	0,0	5,9	11,8	17,6	23,5	29,4	35,3	41,2	47,1	52,9	58,8	64,7	70,6	76,5	82,4	88,2	94,1	100,			
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30			
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
aproximação cor Ap.	63	58,8	58,0	56,4	56,6	59,0	58,8	57,0	57,8	58,0	57,0	55,7	56,0	59,3	47,4	52,8	55,0	52,7	50,6	52,2	53,0
Cor Aparente	63	58	58	55	59	59	57	58	58	56	55	60	46	55	55	50	52	53			
aproximação turbidez	4,77	4,12	3,76	3,99	4,06	3,77	3,84	3,81	3,55	3,91	4,37	4,46	4,23	4,33	3,59	4,19	4,05	3,98	4,12	3,84	3,43
Turbidez	4,77	4	3,65	4,27	3,75	3,84	3,81	3,49	4,13	4,6	4,19	4,37	3,5	4,42	3,8	4,21	3,91	3,43			
aproximação pH de coagulação	6,39	6,52	6,52	6,39	6,36	6,45	6,47	6,52	6,39	6,33	6,51	6,59	6,38	6,31	6,53	6,64	6,62	6,55	6,48	6,41	6,43
pH de coagulacao	6,39	6,54	6,51	6,3	6,45	6,46	6,51	6,36	6,32	6,69	6,4	6,3	6,55	6,67	6,58	6,51	6,41	6,43			
aproximação pH	6,62	6,56	6,56	6,59	6,58	6,55	6,55	6,45	6,44	6,56	6,65	6,66	6,62	6,56	6,59	6,66	6,63	6,58	6,58	6,63	6,55
pH	6,62	6,55	6,57	6,6	6,54	6,56	6,44	6,44	6,62	6,67	6,64	6,56	6,59	6,68	6,6	6,56	6,64	6,55			
aproximação temperatura	23,90	23,65	23,81	24,07	24,32	24,55	24,68	24,51	24,82	25,23	25,20	25,32	25,92	26,01	26,09	26,10	26,22	26,35	26,52	26,80	26,80
Temperatura	23,9	23,6	23,9	24,2	24,5	24,7	24,5	24,9	25,4	25	25,9	26	26,1	26,1	26,3	26,4	26,8	26,8			

Água Bruta																								
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:0	10:3		
	0,0	4,8	9,5	14,3	19,0	23,8	28,6	33,3	38,1	42,9	47,6	52,4	57,1	61,9	66,7	71,4	76,2	81,0	85,7	90,5	95,2	100,0		
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0			
Cor verd. apr.	7,0	7,5	8,2	10,3	11,9	11,4	11,6	13,7	12,6	6,3	4,0	6,1	9,1	12,8	10,5	5,2	5,2	6,8	10,6	14,8	15,0			
Cor Verdadeira	7,0		8,0		12,0		11,0		15,0		3,0		7,0		14,0		4,0		7,0		15,0			
Cor Aparente apr.	80,0	125,3	73,8	72,3	74,2	75,5	75,8	75,8	81,0	78,3	74,5	75,7	80,0	72,9	71,5	79,8	75,6	74,0	82,1	81,1	73,0			
Cor Aparente aproximação	80,0	128,0	74,0	72,0	74,0	75,0	77,0	73,0	81,0	81,0	75,0	74,0	77,0	82,0	68,0	73,0	82,0	74,0	74,0	83,0	81,0	73,0		
turbidez	6,2	6,0	6,0	6,1	5,4	5,5	5,8	6,4	5,9	6,1	6,0	5,4	5,6	6,0	5,5	5,8	6,0	6,6	5,8	5,8	5,9			
Turbidez aproximação	6,2	6,0	6,0	6,3	5,4	5,5	5,4	6,7	5,8	6,0	6,2	5,8	5,0	6,0	6,0	5,2	6,0	6,0	6,7	5,7	5,8	5,9		
pH de coagulação	6,3	6,3	6,5	6,5	6,6	6,4	6,4	6,5	6,6	6,8	6,6	6,5	6,5	6,7	6,7	6,7	6,7	6,5	6,7	6,5	6,5			
pH de coagulacao aproximação	6,3	6,3	6,5	6,5	6,7	6,5	6,4	6,4	6,6	6,7	6,8	6,5	6,5	6,5	6,8	6,6	6,7	6,7	6,5	6,7	6,5	6,5	6,5	
pH	6,8	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	7,0	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	7,0	6,9	6,9			
pH aproximação	6,8	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	7,0	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	7,0	6,9	7,0	6,9	6,9		
aproximação temperatura	17,5	17,5	17,7	17,7	17,8	18,0	18,0	18,1	18,2	18,2	18,4	18,6	18,6	18,6	18,7	19,0	19,1	19,2	19,0	18,7	18,7			
Temperatura	17,5	17,5	17,7	17,7	17,8	18,0	17,9	18,1	18,2	18,2	18,3	18,5	18,7	18,6	18,6	18,8	19,0	19,1	19,2	19,0	18,7	18,7	18,7	
aproximação condutividade	75,8	75,0	74,8	74,6	74,8	75,5	74,7	74,7	74,5	74,4	74,2	74,2	74,2	74,1	74,4	74,3	74,2	74,5	74,3	74,5	74,5			

condutividade	75,8	75,0	74,8	74,6	74,5	75,8	74,6	74,8	74,6	74,4	74,4	74,0	74,3	74,1	74,1	74,5	74,2	74,2	74,5	74,3	74,5	74,5	
Água Bruta																							
	0,0	4,5	9,1	13,6	18,2	22,7	27,3	31,8	36,4	40,9	45,5	50,0	54,5	59,1	63,6	68,2	72,7	77,3	81,8	86,4	90,9	95,5	100
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,		
Cor verd. apr.	5,0	13,8	21,5	24,3	25,8	25,3	23,5	20,7	17,6	14,3	16,0	17,9	16,8	15,4	13,2	11,0	10,4	9,6	9,1	8,5	8,0		
Cor Verdadeira	5		21		26		25		20		14		18		16		12		10		9		8
Cor Aparente apr.	77,0	79,9	80,8	87,1	85,0	91,0	91,0	96,8	87,4	91,2	86,0	87,2	92,8	102,0	86,4	88,5	93,6	90,5	90,6	86,5	16,0		
Cor Aparente	77,0	80	79	88	85	85	97	87	101	84	92	86	87	89	108	88	84	93	94	89	91	86	16
aproximação turbidez	6,0	7,0	7,2	7,6	7,8	7,6	8,0	8,2	7,7	8,1	6,6	7,6	6,4	7,4	7,6	7,9	7,4	7,4	7,7	6,8	7,8		
Turbidez	6,0	7,02	7,14	7,4	8,17	7,27	7,91	8,07	8,29	7,53	8,11	6,58	7,81	6,09	7,49	7,1	8,42	7,43	7,45	7,32	7,77	6,66	7,8
aproximação pH de coagulação	6,5	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,5	6,9	7,0	7,0	6,9	7,0	7,1	7,0	7,0	6,9	6,8	6,8	7,2	7,0	7,3		
pH de coagulação	6,5	6,58	6,58	6,62	6,61	6,57	6,53	6,53	7,05	7,01	6,97	6,92	6,98	7,09	7,01	6,98	6,91	6,97	6,77	6,8	7,25	7,01	7,28
aproximação pH	6,6	6,8	6,8	6,8	6,8	6,9	7,0	7,1	7,3	7,2	7,2	7,2	7,1	7,2	7,3	7,4	7,4	7,5	7,6	7,5	7,4		
pH	6,6	6,84	6,8	6,84	6,84	6,84	6,88	7,03	7,17	7,27	7,18	7,22	7,25	7,13	7,19	7,3	7,42	7,33	7,41	7,5	7,61	7,52	7,38
aproximação temperatura	17,9	18,1	18,1	18,2	18,3	18,4	18,7	19,2	18,9	18,8	19,1	19,1	19,2	19,5	19,0	19,2	19,0	18,7	18,8	18,6	18,7		
Temperatura	17,9	18,1	18,1	18,1	18,4	18,2	18,5	18,8	19,3	18,8	18,8	19,1	19,1	19	19,8	18,9	19,2	19,2	18,8	18,6	18,8	18,6	18,7
aproximação condutividade	75,6	75,3	75,2	74,7	74,8	74,8	75,0	74,7	75,4	74,3	74,8	74,5	74,2	74,0	73,2	73,3	73,6	75,0	75,4	74,2	74,3		
condutividade	75,6	75,3	75,3	74,6	74,8	74,7	74,9	75,1	74,6	75,6	74,2	74,8	74,5	74,2	74,1	73,9	72,2	74,3	73,2	75,8	75,3	74,1	74,3

Água Bruta																					
	0,0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:0
	0,0	5,6	11,1	16,7	22,2	27,8	33,3	38,9	44,4	50,0	55,6	61,1	66,7	72,2	77,8	83,3	88,9	94,4	100		
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100
Cor verd. apr.	8,0	4,8	1,7	3,5	6,6	9,0	10,8	10,3	5,4	1,7	8,0	14,3	14,2	13,3	15,7	19,8	19,2	12,9	8,7	11,9	15,0
Cor Verdadeira	8		1		8		12		1		15		13		22		8		15		
Cor Aparente apr.	84,0	78,6	79,6	84,2	81,8	89,0	94,2	82,5	73,2	78,0	78,0	82,5	81,4	88,7	87,8	89,5	89,2	81,4	81,0	85,3	88,0
Cor Aparente	84	78	80	86	79	99	87	72	78	78	83	81	92	85	94	82	80	85	88		
aproximação turbidez	5,4	5,8	6,5	6,1	5,6	5,7	6,0	6,0	5,6	5,6	7,1	5,8	5,6	7,7	6,9	6,3	6,5	5,8	5,5	6,1	6,8
Turbidez	5,37	5,82	6,72	5,82	5,48	5,88	6,14	5,63	5,48	7,07	5,61	5,57	8,58	5,82	6,76	6,05	5,34	6	6,8		
Aprox.. pH de coagulação	6,9	6,8	6,7	6,7	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,7	6,8	6,7	6,7	6,8	6,9	6,9	6,8	6,8	6,7	6,7
pH de coagulacao	6,94	6,76	6,71	6,76	6,76	6,75	6,75	6,81	6,82	6,73	6,76	6,65	6,77	6,78	7,05	6,78	6,8	6,69	6,71		
aproximação pH	6,9	6,9	6,9	7,0	6,9	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	6,9	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2	7,1	7,1	7,2	7,3	7,4
pH	6,85	6,94	6,93	7	6,89	7,01	7,01	7,01	7,03	6,94	7,08	7,1	7,07	7,18	7,13	7,08	7,2	7,3	7,38		
aproximação temperatura	19,1	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,6	19,5	19,5	19,7	19,5	19,5	19,6	19,8	19,6	19,5	19,8	19,8	19,6	19,6
Temperatura	19,1	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,7	19,5	19,5	19,7	19,5	19,5	19,7	19,9	19,3	19,8	19,8	19,6	19,6		
aproximação condutividade	92,8	78,3	76,1	76,0	75,8	76,0	76,3	76,3	76,2	76,3	76,3	76,1	75,9	75,7	75,6	75,7	75,7	76,2	77,1	76,8	75,6
condutividade	92,8	76,7	76	76	75,7	76,3	76,3	76,2	76,3	76,3	76,1	75,8	75,7	75,6	75,7	75,8	77,2	76,9	75,6		

PS

Esferas de Poliestireno																					
	0	5,0	10	15,0	20	25,0	30	35,0	40	45,0	50	55,0	60	65,0	70	75,0	80	85,0	90	95,0	100
aproximação cor Ap.	67,0	57,5	48,0	38,5	29,0	23,8	18,5	28,3	8,0	14,8	21,5	28,3	35,0	32,0	29,0	26,0	23,0	24,0	25,0	26,0	27,0
Cor Aparente	67	29,0	8	35,0	23	27,0															
aproximação turbidez	4,3	3,5	2,6	1,7	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,0	0,7	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Turbidez	4,34	0,8	0,44	1,2	0,29	0,3															
aproximação pH	5,8	5,8	5,9	5,9	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,3	6,3	6,3	6,4	6,3	6,2	6,2	6,1	6,2	6,3	6,3	6,4
pH	5,84	5,9	6,25	6,4	6,1	6,4															
aproximação temperatura	22,3	22,4	22,4	22,5	22,5	22,6	22,6	22,7	22,7	22,7	22,7	22,6	22,6	22,7	22,9	23,0	23,1	23,1	23,0	23,0	22,9
Temperatura	22,3	22,5	22,7	22,6	23,1	22,9															

Esferas de Poliestireno																					
	0	11,1	22,2	33,3	44,4	55,6	66,7	77,8	88,9	100,0											
	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	6:00								
	0	5,0	10	15,0	20	25,0	30	35,0	40	45,0	50	55,0	60	65,0	70	75,0	80	85,0	90	95,0	100
aproximação cor Ap.	32,0	26,6	21,2	20,0	20,0	19,3	17,9	17,0	17,0	17,1	17,5	18,0	18,0	18,0	17,7	17,3	17,4	18,3	18,8	17,9	17,0

Cor Aparente	32	20	20	17	17	18	18	17	19	17												
aproximação turbidez	2,3	1,9	1,5	1,5	1,6	1,5	1,3	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,1	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	
Turbidez	2,32	1,46	1,61	1,14	1,19	1,33	1,38	0,98	1,13	1,49												
aproximação pH	6,3	6,3	6,4	6,4	6,4	6,5	6,6	6,6	6,5	6,4	6,4	6,4	6,4	6,3	6,2	6,2	6,2	6,3	6,4	6,4		
pH	6,26	6,36	6,43	6,61	6,44	6,36	6,38	6,18	6,27	6,44												
aproximação temperatura	22,2	22,6	23,0	23,3	23,6	23,8	24,0	24,1	24,2	24,3	24,6	24,8	24,8	24,8	2	4,9	25,0	25,0	25,1	25,2	25,3	25,4
Temperatura	22,2	23,1	23,7	24,1	24,3	24,8	24,8	25	25,2	25,4												

Água Filtro esferas de poliestireno																					
	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	6:00	6:30	7:00	7:30	7:45				
	0,0	7,7	15,4	23,1	30,8	38,5	46,2	53,8	61,5	69,2	76,9	84,6	92,3	100,							
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor verd. apr.	6	5,4	4,7	4,1	5,5	7,1	8,7	7,6	6,0	4,4	5,7	8,0	10,3	9,2	6,6	4,0	2,6	2,0	1,3	1,3	2,0
Cor Verdadeira	6		4		9		4		11		3		1	2							
Cor Aparente apr.	10	17,8	18,7	11,6	13,4	16,0	18,6	19,0	19,2	19,9	18,5	17,4	19,2	21,8	22,9	15,8	18,6	26,4	18,6	15,4	16,0
Cor Aparente	10	22	11	15	19	19	20	17	20	24	13	27	15	16							
aproximação turbidez	0,73	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,4	1,8	1,6	1,4	1,2
Turbidez	0,73	0,75	0,87	1,05	1,07	1,05	1,02	1,3	1,36	1,21	1,14	1,76	1,58	1,2							
aproximação pH	6,39	6,5	6,6	6,7	6,6	6,8	6,9	6,9	6,8	6,7	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,7	6,7	6,7	6,8

pH	6,39	6,6	6,68	6,7	6,93	6,81	6,72	6,78	6,85	6,76	6,82	6,66	6,73	6,78							
aproximação temperatura	17,4	17,4	17,4	17,4	17,5	17,5	17,6	17,7	17,7	17,8	18,2	18,5	18,0	18,0	18,0	18,2	18,2	18,3	18,4	18,4	18,5
Temperatura	17,4	17,4	17,4	17,5	17,6	17,7	17,8	18,6	18	18	18,2	18,3	18,4	18,5							
aproximação condutividade	84,2	80,4	79,3	81,4	81,5	81,4	81,1	81,0	81,0	81,5	81,3	80,9	80,5	80,8	81,0	81,2	80,9	80,4	80,6	80,7	80,7
condutividade	84,2	78,3	81,6	81,5	81,1	80,9	81,6	81	80,6	81	81,3	80,4	80,7	80,7							

Água Filtro esferas de poliestireno																					
	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	6:30	7:00	7:30	7:45				
	0,0	6,7	13,3	20,0	26,7	33,3	40,0	46,7	53,3	60,0	66,7	73,3	80,0	86,7	93,3	100,0					
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor verd. apr.	2,0	9,1	16,3	21,3	22,0	22,8	20,5	16,8	13,0	12,3	11,5	10,3	8,0	5,8	4,5	3,8	3,0	2,6	2,3	2,1	2,5
Cor Verdadeira	2		21		23		13		11		5		3		2	2,5					
Cor Aparente apr.	7	18,2	26,0	31,0	34,0	33,3	34,5	34,5	30,0	27,0	27,0	26,8	23,0	21,5	25,0	26,0	17,0	24,5	25,5	21,5	14,0
Cor Aparente	7	22	30	34	33	36	30	26	28	23	21	29	17	27	24	14					
aproximação turbidez	0,94	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,5	1,8	1,8	1,7	1,98	1,61	1,72	1,82	1,36
Turbidez	0,94	1,37	1,55	1,7	1,81	1,78	1,84	1,71	1,72	1,52	1,94	1,6	1,98	1,48	1,97	1,36					
aproximação pH	6,1	6,5	6,7	6,7	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	7,0	7,1	7,1	7,0	6,9	7,0	7,0
pH	6,1	6,65	6,72	6,75	6,77	6,75	6,78	6,94	6,92	6,92	6,92	7,11	7,12	6,9	6,97	6,99					
aproximação temperatura	19,3	18,1	17,8	17,9	18,0	18,1	18,2	18,4	18,6	18,7	18,8	18,9	19,1	19,1	19,1	19,1	19,2	19,3	19,3	19,3	19,3

condutividade	82,8	81,9	82,4	82,5	82,1	83,6	82,7	83,2	82,4	82,9	82,5	82,4	82							
---------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	----	--	--	--	--	--	--	--

A+A

Água Filtro Antracito/Areia																					
	0	7,7	15,4	23,1	30,8	38,5	46,2	53,8	61,5	69,2	76,9	84,6	92,3	100,0							
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	06:30							
	0	5,0	10	15,0	20	25,0	30	35,0	40	45,0	50	55,0	60	65,0	70	75,0	80	85,0	90	95,0	100
aproximação cor Ap.	24,00	14,90	9,70	9,05	16,80	22,75	24,70	26,10	22,20	6,60	2,00	1,45	3,40	3,55	3,60	7,50	11,40	14,95	14,30	16,10	20,00
Cor Aparente	24	10	9	22	25	27	3	1	4	3	9	15	14	20							
aproximação turbidez	4,52	2,06	0,62	0,37	0,30	0,28	0,32	0,31	0,31	0,33	0,37	0,42	0,44	0,52	0,63	0,79	1,04	1,28	1,39	1,38	1,27
Turbidez	4,52	0,73	0,35	0,27	0,32	0,3	0,33	0,41	0,45	0,6	0,89	1,27	1,44	1,27							
aproximação pH	5,45	5,47	5,66	6,04	6,05	6,07	6,14	6,19	6,27	6,40	6,45	6,46	6,42	6,41	6,42	6,45	6,39	6,30	6,37	6,37	6,30
pH	5,45	5,48	6,07	6,04	6,15	6,23	6,43	6,47	6,41	6,41	6,46	6,29	6,4	6,3							
aproximação temperatura	22,2	22,33	22,52	22,78	22,74	22,78	22,97	23,00	23,00	23,00	23,20	23,45	23,64	23,93	24,30	24,95	25,60	26,21	26,34	26,37	26,30
Temperatura	22,2	22,4	22,8	22,7	23	23	23	23,4	23,7	24,2	25,2	26,2	26,4	26,3							

Água Filtro Antracito/Areia																					
	0	5,9	11,8	17,6	23,5	29,4	35,3	41,2	47,1	52,9	58,8	64,7	70,6	76,5	82,4	88,2	94,1	100,0			
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30			
	0	5,0	10	15,0	20	25,0	30	35,0	40	45,0	50	55,0	60	65,0	70	75,0	80	85,0	90	95,0	100
aproximação cor Ap.	22,00	20,30	18,60	16,90	16,40	17,25	17,90	17,05	17,00	17,65	17,50	16,30	15,40	17,20	20,60	17,25	15,40	14,10	14,20	16,85	16,00
Cor Aparente	22	20	18	16	17	18	17	17	18	17	15	17	21	16	15	13	17	16			
aproximação turbidez	2,10	1,44	1,40	1,36	1,27	1,22	1,28	1,61	1,43	1,44	1,49	1,40	1,19	1,13	0,74	1,00	1,13	1,12	1,12	1,19	1,10
Turbidez	2,1	1,32	1,43	1,31	1,21	1,24	1,63	1,38	1,47	1,51	1,2	1,15	0,69	1,11	1,15	1,08	1,2	1,1			
aproximação pH	6,01	6,23	6,45	6,48	6,44	6,40	6,30	6,38	6,24	6,29	6,33	6,32	6,34	6,44	6,48	6,43	6,39	6,39	6,43	6,49	6,42
pH	6,01	6,27	6,52	6,44	6,43	6,29	6,38	6,21	6,34	6,32	6,32	6,44	6,48	6,41	6,38	6,4	6,5	6,42			
aproximação temperatura	22,20	22,97	23,66	23,85	24,04	24,50	24,80	24,80	24,96	25,20	25,40	25,61	25,82	25,90	25,90	25,98	26,06	26,24	26,40	26,27	25,50
Temperatura	22,2	23,1	23,9	23,8	24,4	24,8	24,8	25	25,3	25,5	25,8	25,9	25,9	26	26,1	26,4	26,4	25,5			

Água Filtro Antracito/Areia																					
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00
	0,0	4,8	9,5	14,3	19,0	23,8	28,6	33,3	38,1	42,9	47,6	52,4	57,1	61,9	66,7	71,4	76,2	81,0	85,7	90,5	95,2
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor verd. apr.	3	2,0	1,4	5,6	8,6	6,5	5,3	6,3	7,6	9,2	11,0	13,1	13,1	11,5	9,3	6,6	5,2	4,2	4,4	5,0	5,0
Cor Verdadeira	3		1		9		5		7		10		14		11		6		4		5

Cor Aprarente apr.	5	30,2	15,0	15,6	19,0	19,5	20,7	20,7	20,8	20,8	25,0	24,3	15,4	16,8	20,7	16,5	27,0	18,1	29,5	19,6	18,0
Cor Aprarente	5	31	15	15	19	19	21	20	22	19	23	27	22	11	20	21	15	30	16	31	19
aproximação turbidez	0,41	1,5	1,6	1,3	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6	1,5	1,8	1,8	1,4	1,3	1,6	1,2	1,6	1,8	1,5	1,4	1,6
Turbidez	0,41	1,47	1,65	1,26	1,27	1,27	1,39	1,27	1,83	1,3	1,8	1,79	1,79	1,16	1,4	1,71	1	1,8	1,78	1,45	1,39
aproximação pH	6,39	6,7	6,6	6,7	6,8	6,7	6,8	6,8	6,8	6,9	6,8	6,8	6,8	6,5	6,7	6,7	6,9	6,8	6,9	6,8	6,9
pH	6,39	6,66	6,59	6,64	6,85	6,7	6,78	6,73	6,79	6,87	6,86	6,8	6,83	6,76	6,29	6,83	6,72	6,9	6,82	6,86	6,75
aproximação temperatura	17,5	17,4	17,4	17,4	17,6	17,8	17,7	17,9	18,0	18,0	18,2	18,4	18,5	18,6	18,6	19,0	19,1	19,1	18,9	18,8	18,7
Temperatura	17,5	17,36	17,4	17,4	17,6	17,8	17,7	17,8	18	18	18,1	18,3	18,4	18,5	18,6	18,6	19,1	19,1	19,1	18,9	18,8
aproximação condutividade	113,8	76,1	80,8	79,4	72,9	81,4	81,0	80,6	81,0	79,3	78,8	80,8	80,6	88,0	83,8	81,6	77,8	80,0	80,8	81,1	81,0
condutividade	113,8	75,8	80,8	80,9	70,8	81,5	81,2	80,6	80,6	81,6	76,5	81,2	80,4	80,7	92	80,3	82,1	76,7	80,6	80,8	81,1

Água Filtro Antracito/Areia																					
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00
	0,0	4,5	9,1	13,6	18,2	22,7	27,3	31,8	36,4	40,9	45,5	50,0	54,5	59,1	63,6	68,2	72,7	77,3	81,8	86,4	90,9
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor verd. apr.	2	21,8	19,9	19,4	18,8	18,3	16,5	13,8	11,8	10,2	6,0	2,5	8,0	10,7	5,7	6,5	14,2	13,2	7,1	4,2	2,0
Cor Verdadeira	2		20		19		18		13		10		2		12		3		17		6
Cor Aprarente apr.	7	22,7	37,2	34,3	35,4	34,5	25,8	18,2	25,0	31,5	25,0	14,9	32,2	29,1	21,2	22,5	24,4	21,8	10,4	12,5	85,0
Cor Aprarente	7	21	38	34	35	36	33	21	17	27	32	25	13	32	33	20	23	22	26	20	8

aproximação turbidez	0,98	1,4	1,8	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,6	1,6	1,7	1,4	1,8	1,6
Turbidez	0,98	1,36	1,86	1,72	1,58	1,91	1,73	1,9	1,92	1,92	1,92	1,65	1,69	1,69	1,62	1,41	1,6	1,54	1,72	1,69	1,36
aproximação pH	6,23	6,6	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	7,0	7,0	7,0	7,0	6,9	6,9	7,0	6,9	6,9	7,1	7,1	7,2	7,1	7,1
pH	6,23	6,64	6,69	6,73	6,77	6,69	6,75	6,72	7,08	7,02	6,98	6,97	6,9	6,9	6,93	7,02	6,77	7,07	7,04	7,09	7,29
aproximação temperatura	19,2	17,8	17,8	18,0	18,1	18,4	18,7	18,8	19,0	19,1	19,2	19,3	19,2	19,4	19,9	20,0	19,2	19,0	18,8	18,8	18,6
Temperatura	19,2	17,8	17,8	18	18,1	18,2	18,6	18,8	18,8	19	19,1	19,2	19,3	19,2	19,4	19,3	20,7	19,3	19,2	18,9	18,8
aproximação condutividade	90,3	80,7	80,5	80,4	80,6	81,1	80,8	80,4	80,2	82,8	80,6	80,0	80,6	79,8	92,8	95,8	80,2	80,2	79,6	79,5	79,0
condutividade	90,3	80,7	80,6	80,3	80,5	80,7	81,4	80,4	80,4	80,2	83,1	80,6	79,9	80,7	80	79,2	113,3	78,3	81,4	79,7	79,6

Água Filtro Antracito/Areia

	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00
	0,0	5,6	11,1	16,7	22,2	27,8	33,3	38,9	44,4	50,0	55,6	61,1	66,7	72,2	77,8	83,3	88,9	94,4	100,0		
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor verd. apr.	6	5,1	4,2	4,0	4,0	4,2	4,7	5,0	5,0	5,1	6,5	7,8	8,0	8,0	6,8	5,0	3,8	3,4	3,8	7,4	11,0
Cor Verdadeira	6		4		4		5		5		8		8		4		3		11		
Cor Aparente apr.	17	14,3	26,0	26,9	23,0	21,5	20,4	18,3	19,6	22,0	22,0	23,8	24,8	25,7	23,6	23,0	21,2	18,5	23,0	26,3	20,0
Cor Aparente	17	14	29	26	21	22	18	19	22	22	24	25	26	22	24	17	22	27	20		
aproximação turbidez	0,89	1,2	1,3	1,4	1,3	1,5	1,6	1,3	1,5	1,6	1,7	1,3	1,3	1,3	1,5	0,9	0,8	1,4	1,3	1,5	1,45
Turbidez	0,89	1,24	1,34	1,42	1,18	1,84	1,19	1,47	1,64	1,66	1,22	1,35	1,28	1,58	0,29	1,49	1,27	1,46	1,45		

aproximação pH	6,5	6,8	6,8	6,9	7,0	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,7	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	7,1	7,0	7,0
pH	6,5	6,82	6,8	6,91	6,98	6,89	6,88	6,93	6,95	6,87	6,89	6,68	6,85	6,78	6,86	6,74	7,06	7,06	6,95			
aproximação temperatura	17,9	19,2	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5	19,5	19,4	19,4	19,5	19,6	19,5	19,5	19,7	19,2	18,8	19,4	19,7	19,0	19,2	
Temperatura	17,9	19,3	19,3	19,3	19,5	19,5	19,6	19,4	19,4	19,5	19,6	19,5	19,5	19,8	18,5	19,2	19,9	19	19,2			
aproximação condutividade	95,6	82,9	82,1	82,8	82,5	82,4	82,3	81,9	82,0	82,1	81,9	82,3	82,7	82,1	82,0	82,1	82,2	82,8	83,2	82,2	81,9	
condutividade	95,6	81,5	82,3	83	82,1	82,6	81,8	82	82,1	81,9	82,3	82,8	81,8	82,1	82	82,5	83,5	82,2	81,9			

Qualidade da água (expansão 100%) Água bruta

Bruta																					
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:30	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:0
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	35,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,
Cor Ap. Aproximação	93	96,0	92,0	85,0	85,0	90,0	90,5	95,4	84,0	84,0	98,0	81,0	88,0	86,0	88,0	92,0	86,0	88,0	0,0	91,0	89,0
Cor Aparente	93	96	92	85	85	90	91	93	84	84	98	81	88	86	88	92	86	88		91	89
Turbidez aproximação	7,35	7,9	7,2	7,3	6,3	5,8	5,7	7,9	7,9	5,4	8,4	5,3	5,9	6,7	6,1	7,6	5,9	5,6	7,1	6,2	7,9
Turbidez	7,35	7,88	7,19	7,31	6,29	5,85	5,48	6,56	7,88	5,4	8,42	5,33	5,94	6,72	6,15	7,61	5,93	5,61	7,13	6,19	7,89
pH coagulação aproximação	6,35	6,7	7,0	6,6	6,7	6,8	6,7	6,7	6,5	6,6	6,5	6,6	6,5	6,8	6,4	6,6	6,5	6,4	6,4	6,4	6,4

pH de coagulacao	6,35	6,65	7,02	6,59	6,68	6,83	6,65	6,65	6,46	6,6	6,5	6,63	6,49	6,75	6,42	6,58	6,54	6,45	6,38	6,38	6,39
pH aproximação	6,44	6,6	6,6	6,6	6,7	6,7	6,7	6,4	6,4	6,6	6,5	6,5	6,4	6,5	6,5	6,4	6,4	6,4	6,3	6,3	6,4
pH	6,44	6,58	6,57	6,61	6,66	6,73	6,63	6,52	6,43	6,64	6,52	6,54	6,44	6,53	6,53	6,39	6,36	6,38	6,32	6,3	6,44
Temperatura aproximação	25,3	25,4	25,4	25,6	26,1	24,7	25,2	26,9	26,4	26,9	27,0	27,1	27,2	27,0	27,0	27,1	27,2	27,1	27,0	26,8	26,7
Temperatura	25,3	25,4	25,4	25,6	26,1	24,7	25,6	26,2	26,4	26,9	27		27,2	27	27	27,1	27,2	27,1	27	26,8	26,7

bruta																									
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:0	10:3	11:0	11:3	12:0
	0,0	4,1	8,2	12,2	16,3	20,4	24,5	28,6	32,7	36,7	40,8	44,9	49,0	53,1	57,1	61,2	65,3	69,4	73,5	77,6	81,6	85,7	89,8	93,9	98,0
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,				
Turbidez aproximação	7,37	6,5	5,8	6,1	6,2	6,1	6,0	6,3	6,2	6,9	6,6	6,4	6,4	6,4	7,6	7,4	6,1	7,5	7,1	7,1	6,7				
Turbidez	7,37	6,78	5,6	6,1	6,04	6,19	6,12	5,81	6,36	6,24	6,19	6,93		6,33	6,44	6,38	6,43	7,55	8,09	6,17	6,04	7,8	7,09	7,18	7,07
pH coagulação aproximação	6,19	6,3	6,2	6,3	6,4	6,5	6,4	6,5	6,5	6,3	6,4	6,5	6,4	6,5	6,6	6,6	6,6	6,6	6,5	6,5	6,56				
pH de coagulacao	6,19	6,31	6,22	6,28	6,34	6,41	6,51	6,4	6,34	6,56	6,46	6,32		6,42	6,49	6,34	6,49	6,63	6,61	6,48	6,73	6,58	6,47	6,54	6,54
pH aprox	6,5	6,7	6,6	6,7	6,6	6,7	6,8	7,1	7,1	7,8	7,5	7,1	6,8	6,8	6,7	6,7	6,6	6,5	6,5	6,5	6,6				
pH	6,5	6,7	6,48	6,7	6,68	6,63	6,73	6,78	6,81	7,39	7,02	7,83		7,25	6,92	6,8	6,85	6,71	6,83	6,53	6,64	6,46	6,48	6,53	6,59
Temperatura aproximação	22,2	22,8	23,0	23,1	23,4	23,9	23,9	23,9	23,6	24,1	24,1	24,0	23,9	24,0	24,0	25,0	24,6	23,8	23,6	23,5	23,4				
Temperatura	22,2	22,8	23	23,1	23,1	23,4	23,9	23,9	23,8	23,9	23,5	24,1		24,1	23,9	23,9	24	23,9	24,8	25,4	24	23,7	23,6	23,5	23,6

Parâmetros	bruta																				
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	6:00	06:30	7:00	07:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0	
Cor Aparente aproximação	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor Aparente			50	50	80	130	70	80	80	90	50	90	80	100	80	80	60	90	80	90	
Turbidez aproximação	9,26	5,2	6,6	5,7	7,3	8,2	4,6	6,5	6,8	5,1	4,8	5,6	6,3	4,8	4,5	4,7	5,9	4,5	4,9	5,6	5,4
Turbidez	9,26	5,25	6,6	5,69	7,31	8,24	4,64	6,5	6,76	5,14	4,82	6,33	4,79	4,52	4,7	5,86	4,48	4,92	5,64	5,43	
pH coagulação aproximação	6,24	6,2	6,4	6,4	6,6	6,5	6,4	6,4	6,4	6,5	6,5	6,5	6,6	6,7	6,7	6,5	6,5	6,6	6,4	6,4	6,4
pH de coagulação	6,24	6,24	6,41	6,38	6,6	6,48	6,37	6,37	6,41	6,53	6,5	6,55	6,71	6,7	6,49	6,51	6,56	6,45	6,38	6,37	
pH aproximação	6,5	6,5	6,5	6,4	6,6	6,4	6,5	6,6	6,5	6,5	6,6	6,6	6,6	6,7	6,8	6,6	6,9	6,6	6,7	6,7	6,7
pH	6,5	6,47	6,45	6,42	6,61	6,45	6,46	6,56	6,5	6,47	6,55	6,56	6,68	6,81	6,6	6,93	6,6	6,71	6,68	6,67	
Temperatura aproximação	20,8	21,2	21,9	22,1	22,5	22,0	22,5	22,8	22,8	23,6	23,9	23,7	23,4	23,2	23,2	24,0	23,7	23,1	23,4	22,9	22,7
Temperatura	20,8	21,2	21,9	22,1	22,5	22	22,5	22,8	22,8	23,6	23,9	23,4	23,2	23,2	24	23,7	23,1	23,4	22,9	22,7	

bruta																					
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0

Cor Aparente aproximação	80	90,0	80,0	90,0	90,0	100,0	70,0	100,0	90,0	90,0	100,0	80,0	80,0	80,0	70,0	70,0	100,0	90,0	90,0	100,0	110,0
Cor Aparente	80	90	80	90	90	100	70	100	90	90	100	80	80	80	70	70	100	90	90	100	110
Turbidez aproximação	4,59	5,2	4,8	4,7	4,2	5,8	5,2	4,3	5,1	4,3	5,7	4,9	5,9	4,3	4,6	5,4	5,5	4,8	4,8	5,0	5,0
Turbidez	4,59	5,21	4,81	4,74	4,25	5,81	5,19	4,35	5,05	4,33	5,66	4,9	5,87	4,3	4,61	5,39	5,48	4,81	4,79	4,96	5
pH coagulação aproximação	6,33	6,5	6,5	6,7	6,6	6,6	6,5	6,4	6,6	6,5	6,5	6,5	6,6	6,7	6,6	6,6	6,5	6,6	6,6	6,5	6,6
pH de coagulacao	6,33	6,51	6,52	6,71	6,56	6,61	6,49	6,41	6,58	6,54	6,48	6,54	6,59	6,65	6,58	6,57	6,5	6,59	6,56	6,51	6,55
pH aproximação	6,6	6,6	6,6	6,7	6,8	6,7	6,6	6,7	6,6	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,8	6,9	6,9	6,7	6,9	7,0	6,8
pH	6,6	6,63	6,59	6,66	6,81	6,66	6,56	6,7	6,62	6,66	6,74	6,73	6,72	6,72	6,75	6,85	6,93	6,68	6,9	6,98	6,8
Temperatura aproximação	20,5	20,6	20,6	20,7	21,1	20,9	21,2	21,0	21,0	21,0	21,1	21,3	21,3	21,2	21,1	21,1	21,1	21,0	20,9	20,9	20,8
Temperatura	20,5	20,6	20,6	20,7	21,1	20,9	21,2	21	21	21	21,1	21,3	21,3	21,2	21,1	21,1	21,1	21	20,9	20,9	20,8

bruta																					
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00		
	0,0	5,6	11,1	16,7	22,2	27,8	33,3	38,9	44,4	50,0	55,6	61,1	66,7	72,2	77,8	83,3	88,9	94,4	100,0		
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor Verdadeira aproximação	10	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	11,6	12,8	12,2	20,3	14,0	14,0	10,0	7,6	12,4	15,5	14,2	11,8	9,6	12,4	16,0
Cor Verdadeira	10	10	10	10	10	10	14	10	21	14	14	9	7	16	15	13	9	12	16		

Cor Aparente aproximação	80	94,4	99,2	86,0	80,0	75,5	73,4	76,4	74,6	73,0	73,0	73,9	73,2	70,9	73,6	77,0	76,8	80,1	88,0	72,2	74,0
Cor Aparente	80	96	100	80	80	71	77	75	73	73	74	73	70	76	78	75	92	72	74		
Turbidez aproximação	5,03	5,1	5,1	7,0	6,0	5,0	5,7	6,1	5,2	5,1	7,7	5,7	6,3	6,2	6,3	5,6	5,0	5,4	6,0	5,8	5,8
Turbidez	5,03	5,1	5,15	7,79	4,81	5,24	6,39	5,26	4,76	7,72	5,47	6,54	6,01	6,45	4,84	5,14	6,1	5,8	5,83		
pH coagulação aproximação	6,53	6,5	6,8	6,6	6,6	6,6	6,7	6,8	6,9	7,0	6,9	6,8	6,9	6,9	6,9	6,9	7,0	7,1	7,1	6,9	6,9
pH de coagulação	6,53	6,51	6,82	6,53	6,71	6,56	6,82	6,83	6,97	6,9	6,79	6,91	6,93	6,89	6,93	7,05	7,12	6,95	6,93		
pH aproximação	5,93	6,6	6,7	6,7	6,7	6,8	6,8	6,8	6,9	6,8	6,8	6,8	7,0	6,9	6,7	6,8	7,0	7,1	6,9	6,9	6,9
pH	5,93	6,67	6,76	6,64	6,76	6,86	6,79	6,92	6,84	6,77	6,83	7,02	6,82	6,66	6,9	7,14	6,92	6,9	6,93		
Temperatura aproximação	19,8	20,0	19,9	19,9	19,8	19,9	19,9	20,0	20,0	20,0	20,3	20,4	20,4	20,4	20,3	20,3	20,2	20,2	20,5	20,6	20,6
Temperatura	19,8	20	19,9	19,9	19,8	19,9	20	20	20	20,3	20,4	20,4	20,4	20,3	20,3	20,1	20,5	20,6	20,6		
Condutividade aproximação	75,9	75,6	75,7	75,5	75,3	75,2	75,5	75,9	75,6	75,3	75,5	75,1	74,6	74,7	74,9	75,2	75,2	75,2	75,3	75,1	75,2
condutividade	75,9	75,6	75,7	75,4	75,2	75,2	76	75,7	75,3	75,5	75,1	74,5	74,8	75	75,3	75,1	75,3	75,1	75,2		

PS

Água Filtro esferas de poliestireno																				
0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00								
0,0	9,1	18,2	27,3	36,4	45,5	54,5	63,6	72,7	81,8	90,9	100,0									
0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0

Cor Ap. Aproximação	193	94,0	12,8	11,7	11,6	13,3	14,3	14,9	16,2	17,9	19,0	20,0	20,0	19,7	18,6	17,5	16,4	16,7	17,8	16,2	14,0	
Cor Aparente	193	13	11	14	15	18	20	20	18	16	18	14										
Turbidez aproximação	13,3	6,5	0,9	0,8	0,8	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1	1,2	1,4	1,3	1,2	
Turbidez	13,3	0,88	0,79	0,72	0,94	0,86	1	1,1	0,95	1,13	1,43	1,15										
pH aproximação	0	0,0	0,6	6,4	6,4	6,4	6,5	6,6	6,6	6,6	6,4	6,3	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,3	
pH			6,39	6,46	6,59	6,55	6,34	6,43	6,38	6,46	6,43	6,34										
Temperatura aproximação	0	0,0	2,5	16,6	25,5	25,4	25,4	25,7	25,7	25,6	25,8	26,0	26,2	26,3	26,5	26,7	26,8	26,9	27,0	27,1	27,2	
Temperatura			25,5	25,3	25,7	25,6	26	26,3	26,6	26,8	27	27,2										

Água Filtro esferas de poliestireno																					
	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	07:45				
	0,0	6,5	12,9	19,4	25,8	32,3	38,7	45,2	51,6	58,1	64,5	71,0	77,4	83,9	90,3	96,8	100,0				
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor Aparente																					
Turbidez aproximação	0	1,2	1,6	1,9	2,3	1,6	1,8	2,3	2,9	3,3	2,2	2,1	2,3	2,1	2,0	1,8	1,6	1,5	1,8	1,8	2,3
Turbidez		1,6	1,6	2,4	1,54	1,97	2,83	3,34	1,86	2,39	2,16	2,02		1,44	1,8	1,84	2,32				
pH aproximação	6,37	6,2	6,2	6,3	6,3	6,3	6,3	6,4	6,5	6,5	6,4	6,5	6,5	6,5	7,6	7,4	6,9	6,5	6,5	6,4	6,5
pH	6,37	6,18	6,25	6,33	6,35	6,29	6,45	6,46	6,42	6,56	6,37	7,83		6,47	6,45	6,4	6,49				
Temperatura aproximação	22,4	22,4	22,6	22,8	23,0	23,1	23,3	23,5	23,7	23,9	23,9	24,0	24,1	24,1	24,2	24,2	24,2	24,3	24,9	24,2	24,0

	0,0	7,1	14,3	21,4	28,6	35,7	42,9	50,0	57,1	64,3	71,4	78,6	85,7	92,9	100,0							
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0	
Cor Aparente aproximação	0	14,0	24,0	31,0	38,0	60,0	74,0	53,0	38,0	36,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	40,0	30,0	30,0	30,0	36,0	50,0	
Cor Aparente Turbidez aproximação		20	30	40	80	50	30	50	50	50	50	30	30	30	50							
Turbidez aproximação	0	0,7	0,9	0,9	1,4	1,9	2,3	2,1	1,5	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2	1,3	1,2	1,4	2,0	
Turbidez		0,94	0,84	1,48	2,36	2,02	1,07	1,09	1,23	1,21	1,29	1,22	1,36	1,14	1,99							
pH aproximação	6,22	6,4	6,5	6,5	6,5	6,6	6,7	6,6	6,5	6,5	6,7	6,6	6,5	6,5	6,6	6,5	6,5	6,5	6,6	6,6	6,6	6,7
pH	6,22	6,52	6,47	6,52	6,67	6,6	6,43	6,68	6,53	6,5	6,6	6,51	6,51	6,6	6,68							
Temperatura aproximação	20,8	20,5	20,4	20,4	20,4	20,5	20,6	20,8	20,7	20,7	20,8	20,9	20,9	20,9	21,1	21,2	21,2	21,1	21,1	21,1	21,1	
Temperatura	20,8	20,4	20,4	20,4	20,6	20,8	20,7	20,8	20,9	20,9	21,1	21,2	21,1	21,1	21,1							

Água Filtro esferas de poliestireno																					
	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	07:45				
	0,0	11,1	22,2	33,3	44,4	55,6	66,7	77,8	88,9	100,0											
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor Verdadeira aproximação	6	5,6	5,1	5,4	5,8	6,3	6,7	7,2	7,6	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	6,5	4,3	6,0	12,7	17,1	13,1	9,0
Cor Verdadeira	6	5	6	7	8	8	8	3	18	9											
Cor Aparente aproximação	20	20,0	20,0	20,4	20,8	21,8	23,1	23,4	21,6	20,2	22,0	23,8	21,6	18,9	18,6	19,5	20,2	20,7	21,0	21,0	21,0

Cor Aparente	20	20	21	24	20	24	18	20	21	21												
Turbidez aproximação	2,65	2,0	1,4	1,6	2,0	2,0	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,6	1,9	
Turbidez	2,65	1,29	2,13	1,55	1,6	1,52	1,26	1,19	1,25	1,88												
pH aproximação	6,4	6,4	6,3	6,5	6,6	6,6	6,5	6,5	6,6	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	
pH	6,4	6,32	6,7	6,47	6,67	6,7	6,74	6,75	6,81	6,82												
Temperatura aproximação	19,5	19,6	19,7	19,7	19,8	19,8	19,9	19,9	19,7	19,6	19,7	19,8	19,8	19,9	19,9	19,9	19,9	19,8	19,9	20,0	20,1	
Temperatura	19,5	19,7	19,8	19,9	19,6	19,8	19,9	19,9	19,9	20,1												
Condutividade aproximação	81	81,2	81,4	81,5	81,6	81,7	81,8	82,3	83,5	84,4	82,7	80,7	80,9	81,2	81,3	81,4	81,3	80,9	80,2	77,8	75,5	
condutividade	81	81,4	81,6	81,9	84,6	80,7	81,3	81,4	80,7	75,5												

A+A

Areia e Antracito																					
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor Ap. Aproximação	48	21,0	20,0	23,0	23,0	25,0	29,0	26,0	23,0	22,0	22,0	22,0	22,0	20,0	23,0	22,0	20,0	19,0	18,0	21,0	16,0
Cor Aparente	48	21	20	23	23	25	29	26	23	22	22	22	22	20	23	22	20	19	18	21	16
Turbidez aproximação	2,97	1,6	1,9	1,6	1,9	1,2	1,5	1,5	1,7	1,1	1,5	1,5	1,4	1,5	1,6	1,6	1,4	1,3	1,8	1,5	1,4
Turbidez	2,97	1,62	1,87	1,56	1,9	1,15	1,54	1,5	1,71	1,1	1,45	1,47	1,4	1,47	1,58	1,62	1,42	1,26	1,75	1,52	1,36

pH aproximação	0	0,0	6,3	6,4	6,5	6,8	6,3	6,3	6,3	6,4	6,4	6,4	6,3	6,5	6,4	6,4	6,3	6,3	6,3	6,2	6,5
pH			6,31	6,37	6,5	6,81	6,27	6,34	6,3	6,43	6,38	6,39	6,3	6,45	6,36	6,36	6,26	6,25	6,27	6,22	6,47
Temperatura aproximação	0	0,0	25,5	25,3	25,7	25,4	26,1	26,3	26,5	26,9	27,0	27,3	27,2	27,2	27,1	27,1	27,1	27,0	27,0	26,8	26,7
Temperatura			25,5	25,3	25,7	25,4	26,1	26,3	26,5	26,9	27	27,3	27,2	27,2	27,1	27,1	27,1	27	27	26,8	26,7

Areia e Antracito																								
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:0	10:30	11:0	12:15
	0,0	4,1	8,2	12,2	16,3	20,4	24,5	28,6	32,7	36,7	40,8	44,9	49,0	53,1	57,1	61,2	65,3	69,4	73,5	77,6	81	85,7	89,8	100,0
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,			
Cor Ap.																								
Turb aprox.	0	1,8	2,0	2,0	1,8	2,2	2,0	2,0	2,4	1,8	1,6	1,7	2,0	1,7	1,9	1,9	1,8	1,8	1,8	1,6	1,4			
Turb		1,8	1,9	2,1	1,89	1,98	1,8	2,27	2,1	2	2,05	2,42		1,42	1,86	1,62	2,08	1,71	1,83	2,07	1,7	1,83	1,78	1,41
pH aprox..	5,89	6,2	6,2	6,4	6,3	6,6	6,4	6,5	6,3	6,9	6,6	6,5	6,4	6,5	6,6	6,6	6,5	6,4	6,4	6,4	6,5			
pH	5,89	6,3	5,99	6,46	6,31	6,33	6,64	6,38	6,41	6,63	6,26	6,88		6,48	6,46	6,39	6,48	6,55	6,65	6,44	6,5	6,34	6,39	6,53
Temp aprox	21,9	22,0	22,4	22,8	23,1	23,5	23,8	23,9	24,1	24,2	24,2	24,2	24,1	23,9	24,0	24,0	24,0	23,9	23,7	23,5	23,			
Temp	21,9	22,2	22,7	22,9	23,1	23,4	23,8	23,9	23,9	24,1	23,9	24,2		24,2	24,2	24	23,9	24	23,9	24,2	24	23,9	23,7	23,2

Água Filtro Antracito/Areia																					
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	6:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0	
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor Aparente aproximação	20	10,0	10,0	10,0	15,0	20,0	20,0	20,0	30,0	30,0	10,0	20,0	30,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	30,0	30,0
Cor Aparente	20	10	0	10	0	20	20	20	30	30	10	30	20	20	20	20	20	20	30	30	
Turbidez aproximação	0,45	0,9	0,9	0,9	1,2	1,4	1,4	0,8	1,3	1,1	1,3	1,2	1,2	0,4	0,9	0,6	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2
Turbidez	0,45	0,87	0,85	0,85	1,25	1,38	1,35	0,77	1,35	1,14	1,29	1,16	0,45	0,89	0,64	1,49	1,54	1,19	1,22	1,16	
pH aproximação	6,19	6,2	6,5	6,3	6,6	6,5	6,3	6,6	6,5	6,5	6,4	6,4	6,4	6,6	6,5	6,7	6,5	6,6	6,5	6,5	6,5
pH	6,19	6,15	6,49	6,27	6,56	6,48	6,31	6,63	6,46	6,46	6,42	6,43	6,61	6,51	6,7	6,47	6,6	6,47	6,48	6,46	
Temperatura aproximação	20,2	20,8	22,0	22,3	22,4	22,3	22,5	23,0	23,2	23,6	23,8	23,9	23,9	23,5	23,3	23,7	23,3	23,1	23,1	23,0	22,8
Temperatura	20,2	20,8	22	22,3	22,4	22,3	22,5	23	23,2	23,6	23,8	23,9	23,5	23,3	23,7	23,3	23,1	23,1	23	22,8	
condutivida																					

Água Filtro Antracito/Areia																					
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor Aparente aproximação	0	10,0	40,0	40,0	70,0	60,0	40,0	30,0	30,0	60,0	30,0	40,0	30,0	30,0	20,0	20,0	30,0	50,0	50,0	50,0	40,0

Cor Aparente		10	40	40	70	60	40	30	30	60	30	40	30	30	20	20	30	50	50	50	40
Turbidez aproximação	0	1,0	0,9	1,9	2,7	2,0	0,9	1,1	1,2	1,0	1,5	1,1	1,5	1,1	1,6	1,4	1,5	1,0	1,3	1,3	1,1
Turbidez		1	0,88	1,87	2,69	2,03	0,86	1,14	1,21	0,99	1,52	1,14	1,54	1,1	1,6	1,4	1,52	1	1,27	1,29	1,08
pH aproximação	6,19	6,3	6,4	6,4	6,6	6,6	6,5	6,7	6,5	6,5	6,5	6,5	6,6	6,7	6,6	6,5	6,6	6,6	6,8	6,7	6,7
pH	6,19	6,27	6,37	6,42	6,56	6,59	6,46	6,73	6,5	6,53	6,54	6,53	6,57	6,66	6,61	6,48	6,62	6,64	6,81	6,66	6,66
Temperatura aproximação	21	20,5	20,5	20,5	20,7	20,6	20,6	20,7	20,8	20,8	21,0	21,0	21,1	21,0	21,0	21,0	21,1	20,9	21,0	20,9	20,9
Temperatura	21	20,5	20,5	20,5	20,7	20,6	20,6	20,7	20,8	20,8	21	21	21,1	21	21	21	21,1	20,9	21	20,9	20,9

Água Filtro Antracito/Areia																					
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00		
	0,0	5,6	11,1	16,7	22,2	27,8	33,3	38,9	44,4	50,0	55,6	61,1	66,7	72,2	77,8	83,3	88,9	94,4	100,0		
	0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
Cor Verdadeira aproximação	7	6,1	5,2	5,7	7,8	16,5	15,2	1,7	3,0	10,4	5,0	5,9	5,2	2,9	8,6	10,5	8,0	6,5	4,2	8,8	7,0
Cor Verdadeira	7	6	5	6	9	24	2	1	11	5	6	5	2	13	8	8	3	9	7		
Cor Aparente aproximação	19	19,9	20,0	22,8	21,6	23,5	22,2	15,0	16,8	23,8	22,0	17,5	17,0	17,0	23,0	24,5	22,8	21,9	18,0	21,5	17,0
Cor Aparente	19	20	20	24	20	27	15	15	24	22	17	17	17	27	22	24	17	22	17		
Turbidez aproximação	2,57	1,2	1,1	1,2	1,4	1,5	1,5	1,2	1,3	1,6	1,8	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,5	1,5	1,6	1,2
Turbidez	2,57	1,03	1,12	1,22	1,44	1,64	1,27	1,19	1,61	1,83	1,14	1,32	1,27	1,28	1,24	1,48	1,46	1,62	1,19		
pH aproximação	6,4	6,3	6,5	6,5	6,5	6,6	6,7	6,7	6,7	6,8	6,8	6,7	6,8	6,7	6,6	6,8	7,0	6,9	6,9	6,8	7,0

P4		32,0	43,4	54,8	66,1	77,5	86,5	95,5	104,5	113,5	122,9	132,3	141,6	151,0	158,4	165,8	173,1	180,5	184,5	188,5	192,5	196,5	
P4	53	32	77,5	113,5	151	180,5	196,5																
P5		27,5	39,0	50,5	62,0	73,5	82,5	91,5	100,5	109,5	118,9	128,3	137,6	147,0	154,4	161,8	169,1	176,5	180,3	184,0	187,8	191,5	
P5	37	27,5	73,5	109,5	147	176,5	191,5																
P6		23,5	34,6	45,8	56,9	68,0	77,0	86,0	95,0	104,0	113,4	122,8	132,1	141,5	148,8	156,0	163,3	170,5	174,4	178,3	182,1	186,0	
P6	16	23,5	68	104	141,5	170,5	186																
P7		12,0	11,1	10,3	9,4	8,5	9,4	10,3	11,1	12,0	12,3	12,5	12,8	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	11,9	10,8	9,6	8,5	
P7	1	12	8,5	12	13	13	8,5																
P8	0	0	0	0	0	0	0																

Filtro Antracito/Areia (cm)																						
Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00								
		0,0	8,3	16,7	25,0	33,3	41,7	50,0	58,3	66,7	75,0	83,3	91,7	100,0								
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		16,0	26,2	37,2	49,7	61,8	73,6	82,7	91,6	99,9	109,0	118,5	126,8	135,5	144,9	153,3	161,3	169,5	177,1	183,5	189,2	194,7
P1	145	16	33	53,9	73,6	88,8	102,7	118,5	132,4	148	161,3	175	185,6	194,7								
P2		15,0	24,7	35,4	48,0	60,1	71,9	81,0	89,9	98,2	107,3	116,8	125,1	133,8	143,2	151,6	159,6	167,8	175,4	181,8	187,7	193,4
P2	110	15	31,2	52,2	71,9	87,1	101	116,8	130,7	146,3	159,6	173,3	183,9	193,4								
P3		12,0	21,4	31,9	44,7	56,7	68,4	77,5	86,4	94,7	103,8	113,3	121,6	130,3	139,7	148,1	156,1	164,4	172,1	178,6	184,5	190,2

11° Carreira

Filtro com esferas poliestireno (cm)

Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30								
		0,0	7,7	15,4	23,1	30,8	38,5	46,2	53,8	69,2	76,9	84,6	92,3	100,0								
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		27,7	40,9	51,5	59,2	66,8	74,5	82,4	91,1	99,8	108,2	117,3	125,4	129,5	133,6	138,5	148,2	157,8	166,7	169,5	176,8	187,9
P1	132	27,7	48	59,8	71,5	83,6	97,2	110,1	124,5	137	152	166,5	170,8	187,9								
P2		25,3	37,8	48,1	55,8	63,4	71,1	79,0	87,7	96,4	104,8	113,9	122,0	126,1	130,2	135,1	144,8	154,4	163,3	166,1	173,4	184,5
P2	97	25,3	44,5	56,4	68,1	80,2	93,8	106,7	121,1	133,6	148,6	163,1	167,4	184,5								
P3		22,8	34,6	44,5	52,2	59,8	67,5	75,4	84,1	92,8	101,2	110,3	118,4	122,5	126,6	131,5	141,2	150,8	159,7	162,5	169,8	180,9
P3	83	22,8	41	52,8	64,5	76,6	90,2	103,1	117,5	130	145	159,5	163,8	180,9								
P4		18,2	28,7	37,8	45,5	53,1	60,8	68,7	77,4	86,1	94,5	103,6	111,6	115,7	119,8	124,7	134,3	143,8	152,7	155,4	162,7	173,8
P4	53	18,2	34,3	46,1	57,8	69,9	83,5	96,4	110,7	123,2	138	152,5	156,7	173,8								
P5		14,9	24,9	33,8	41,5	49,1	56,7	64,4	73,0	81,6	89,9	98,8	106,8	110,8	110,2	119,7	129,1	138,5	147,2	149,5	156,4	167,3
P5	37	14,9	30,3	42,1	53,8	65,6	79,1	91,8	105,9	118,2	132,8	147	150,5	167,3								
P6		20,8	24,1	29,0	35,8	42,8	49,9	57,0	64,7	72,2	79,2	86,3	92,5	95,3	94,9	101,5	108,2	114,5	120,3	119,8	124,1	132,4
P6	16	20,8	25,8	36,3	47,1	58,1	70,1	80,8	91,8	100,5	110,7	120,3	119,6	132,4								
P7		1,8	1,2	0,8	0,8	1,1	1,4	1,6	1,7	1,9	2,1	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,5	2,0	2,1	2,6
P7	1	1,8	0,8	0,8	1,3	1,6	1,8	2,1	2,3	2,4	2,5	2,5	1,8	2,6								

P7	13	1,1	4,9	10,9	16,9	22,6	28,2	32,9	37	44,6	45,5	47,4	51	53,1	55,5	57,2	59,5	58	59	60,1	59,6	60,6
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

12° Carreira																						
Filtro com esferas poliestireno (cm)																						
Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30								
		0,0	7,7	15,4	23,1	30,8	38,5	46,2	53,8	69,2	76,9	84,6	92,3	100,0								
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		17,8	32,7	43,9	50,9	58,6	65,7	71,6	78,8	86,6	95,0	102,1	108,1	112,0	116,0	120,5	128,6	136,3	143,6	150,4	158,7	168,4
P1	132	17,8	40,7	51,4	63,4	72,5	84	96,9	107,2	119,3	131,7	143,1	153,5	168,4								
P2		16,8	30,3	40,7	47,3	55,0	62,1	68,0	75,2	83,0	91,8	98,4	104,5	108,4	112,4	116,9	125,0	132,7	140,1	146,8	155,1	164,8
P2	97	16,8	37,6	47,8	59,8	68,9	80,4	93,3	103,6	115,7	128,1	139,5	149,9	164,8								
P3		15,5	27,3	36,9	43,8	51,4	58,5	64,4	71,6	79,4	87,8	94,8	100,9	104,8	108,8	113,3	121,4	129,1	136,4	143,2	151,5	161,2
P3	83	15,5	33,7	44,3	56,2	65,3	76,8	89,7	100	112,1	124,5	135,9	146,3	161,2								
P4		15,0	22,9	30,2	37,0	44,6	51,7	57,6	64,8	72,6	81,0	87,9	93,9	97,8	101,8	106,3	114,3	121,9	129,1	135,9	144,1	153,7
P4	53	15	27,1	37,5	49,4	58,5	70	82,9	93	105,1	117,4	128,6	139	153,7								
P5		14,2	20,1	26,3	33,0	40,6	47,5	53,3	60,4	68,0	76,3	83,2	89,1	92,9	96,7	101,1	108,9	116,2	123,2	129,7	137,6	146,7
P5	37	14,2	23,2	33,5	45,3	54,2	65,5	78,2	88,2	99,9	111,9	122,7	132,7	146,7								
P6		11,6	17,1	22,6	28,1	34,9	41,1	46,3	52,6	59,3	66,3	72,0	76,8	79,7	82,6	86,0	92,2	97,1	101,1	104,8	109,7	115,6

P6		2,0	7,3	13,7	21,4	28,2	36,3	44,0	51,1	58,0	64,6	71,0	78,7	85,5	92,5	97,4	103,8	110,0	116,0	121,5	127,1	133,2
P6	29	2	6,8	12,2	19,8	25,2	32,7	40	46,7	59,3	65,2	71	78,1	84,1	91,3	95,2	100,6	106,9	112	117,7	122,5	127,6
P7		1,0	4,8	10,0	15,7	20,2	25,2	29,9	33,6	36,8	39,7	42,8	45,6	48,0	50,4	51,9	53,8	54,8	55,3	56,0	56,7	58,2
P7	13	1	4,4	8,9	14,6	18,3	23	27,5	31,5	37,4	40	42,8	45,4	47,5	50	51,3	52,9	54,7	54,9	55,4	56,2	56,8
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

13° Carreira																						
Filtro com esferas poliestireno (cm)																						
Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00								
		0,0	8,3	16,7	25,0	33,3	41,7	50,0	58,3	66,7	75,0	83,3	91,7	100,0								
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		15,1	28,4	39,9	47,7	55,9	64,2	72,6	81,3	90,8	100,5	110,3	119,7	129,3	139,3	148,3	156,8	166,9	177,2	187,5	197,3	206,8
P1	132	15,1	37,3	50,3	64,2	78,2	93,9	110,3	125,9	142,7	156,8	173,7	191	206,8								
P2		13,9	25,8	36,4	44,2	52,4	60,7	69,1	77,8	87,3	97,0	106,8	116,2	125,8	135,8	144,8	153,3	163,4	173,7	184,0	193,8	203,3
P2	97	13,9	33,8	46,8	60,7	74,7	90,4	106,8	122,4	139,2	153,3	170,2	187,5	203,3								
P3		12,9	23,5	33,2	41,0	49,2	57,5	65,9	74,6	84,1	93,8	103,6	113,0	122,6	132,6	141,6	150,1	160,2	170,5	180,8	190,6	200,1
P3	83	12,9	30,6	43,6	57,5	71,5	87,2	103,6	119,2	136	150,1	167	184,3	200,1								
P4		12,1	19,7	27,3	35,0	43,2	51,5	59,8	68,5	78,0	87,6	97,4	106,7	116,2	126,2	135,1	143,6	153,7	163,8	174,2	183,9	193,3

P3		25,2	35,9	44,3	42,3	47,9	66,9	80,8	90,4	99,4	108,2	118,0	127,7	135,4	143,3	151,9	162,0	174,1	182,6	189,1	196,5	204,0
P3	83	25,2	44,7	41	75,5	93	109	127	141	156,5	178,5	190,3	204									
P4		19,5	29,7	37,6	35,4	40,8	59,5	73,3	82,9	91,9	100,7	110,3	119,8	127,4	135,3	143,9	153,9	165,7	174,1	180,5	187,9	195,5
P4	53	19,5	38	34	68	85,5	101,5	119,1	133	148,5	170	181,7	195,5									
P5		16,0	25,7	33,3	31,0	36,2	54,6	68,3	77,9	86,7	95,2	104,7	114,0	121,2	128,8	137,0	147,9	161,9	169,0	172,1	178,1	184,7
P5	37	16	33,7	29,5	63	80,5	96	113,3	126,5	141,5	167	172,7	184,7									
P6		11,0	19,9	26,7	23,8	28,4	45,9	58,4	66,8	74,1	80,9	88,0	94,8	98,5	102,7	108,2	114,2	120,6	125,0	128,2	131,5	134,7
P6	16	11	27,2	22	53,8	69,1	81,5	94,5	101,2	111,2	123	128,8	134,7									
P7		0,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P7	1	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0									
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									

Filtro Antracito/Areia (cm)																						
Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		14,7	22,5	28,6	37,5	45,8	53,3	63,3	71,3	79,0	90,4	96,5	109,0	118,8	127,7	137,3	147,0	156,5	166,5	178,0	188,5	199,8
P1	155	14,7	22,5	28,6	37,5	45,8	53,3	63,3	71,3	79	90,4	96,5	109	118,8	127,7	137,3	147	156,5	166,5	178	188,5	199,8
P2		14,2	20,5	26,6	35,7	44,0	51,5	61,5	69,4	77,1	88,5	94,6	107,2	117,0	125,9	135,4	145,1	154,6	164,6	176,1	186,6	197,9

P2	120	14,2	20,5	26,6	35,7	44	51,5	61,5	69,4	77,1	88,5	94,6	107,2	117	125,9	135,4	145,1	154,6	164,6	176,1	186,6	197,9
P3		10,7	16,8	22,9	31,8	40,1	47,6	57,6	65,4	73,0	84,4	90,5	103,0	112,7	121,5	131,0	140,6	150,0	160,0	171,5	181,8	193,1
P3	104	10,7	16,8	22,9	31,8	40,1	47,6	57,6	65,4	73	84,4	90,5	103	112,7	121,5	131	140,6	150	160	171,5	181,8	193,1
P4		6,0	11,1	17,1	25,8	34,0	41,3	51,0	58,8	66,3	77,4	83,3	95,6	105,3	113,9	123,0	132,3	141,3	150,8	161,5	171,0	181,3
P4	74	6	11,1	17,1	25,8	34	41,3	51	58,8	66,3	77,4	83,3	95,6	105,3	113,9	123	132,3	141,3	150,8	161,5	171	181,3
P5		6,0	9,2	15,3	23,8	31,8	39,1	48,8	56,6	63,9	74,9	80,7	92,6	102,0	110,0	118,5	127,3	135,5	144,0	153,5	161,8	170,3
P5	54	6	9,2	15,3	23,8	31,8	39,1	48,8	56,6	63,9	74,9	80,7	92,6	102	110	118,5	127,3	135,5	144	153,5	161,8	170,3
P6		5,0	8,9	14,7	23,0	30,6	37,6	46,5	53,3	59,5	68,5	72,8	81,5	88,4	92,9	98,6	104,0	108,8	113,8	119,5	123,7	128,5
P6	29	5	8,9	14,7	23	30,6	37,6	46,5	53,3	59,5	68,5	72,8	81,5	88,4	92,9	98,6	104	108,8	113,8	119,5	123,7	128,5
P7		1,6	5,9	11,1	17,5	23,4	27,6	32,3	34,6	38,4	42,7	44,0	48,3	52,0	52,7	54,8	57,0	58,3	59,5	61,8	62,5	64,1
P7	13	1,6	5,9	11,1	17,5	23,4	27,6	32,3	34,6	38,4	42,7	44	48,3	52	52,7	54,8	57	58,3	59,5	61,8	62,5	64,1
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5° Carreira

Filtro com esferas poliestireno (cm)

Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:45			
		0,0	5,7	11,4	17,1	22,9	28,6	34,3	40,0	45,7	51,4	57,1	62,9	68,6	74,3	80,0	85,7	91,4	100,0			
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		24,5	38,2	46,9	52,8	60,3	69,2	77,5	85,2	93,3	100,7	111,7	121,1	136,5	149,0	152,8	162,1	171,3	181,7	191,8	196,5	199,0

6ª Carreira

Filtro com esferas poliestireno (cm)

Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:45			
		0,0	8,3	16,7	25,0	33,3	41,7	50,0	58,3	66,7	75,0	83,3	91,7	100,0								
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		30,9	39,3	48,4	59,0	68,7	77,9	85,9	93,2	99,1	110,5	124,7	134,8	143,7	150,1	158,1	166,8	175,0	183,3	191,7	198,3	204,0
P1	132	30,9	44,9	62,5	77,9	91,3	101	124,7	141,5	152,3	166,8	180,5	194,5	204	0	0	0	0	0			
P2		28,3	36,5	45,4	56,0	65,5	74,5	82,5	89,8	95,7	107,1	121,3	131,4	140,3	146,7	154,7	163,4	171,6	179,9	188,3	195,1	201,0
P2	97	28,3	41,9	59,5	74,5	87,9	97,6	121,3	138,1	148,9	163,4	177,1	191,1	201	0	0	0	0	0			
P3		22,3	30,8	40,0	50,9	60,8	70,2	78,3	85,7	91,6	103,2	117,5	127,6	136,4	142,9	150,8	159,5	167,8	176,1	184,5	191,3	197,3
P3	83	22,3	36,4	54,5	70,2	83,7	93,6	117,5	134,3	145	159,5	173,3	187,3	197,3	0	0	0	0	0			
P4		15,8	24,1	33,3	44,2	54,0	63,4	71,4	78,8	84,9	96,5	110,9	120,8	129,5	135,9	143,8	152,5	160,7	168,9	177,2	184,0	190,1
P4	53	15,8	29,7	47,8	63,4	76,8	86,9	110,9	127,4	138	152,5	166,1	180	190,1	0	0	0	0	0			
P5		12,1	20,3	29,3	40,0	49,7	59,1	67,2	74,7	81,0	92,5	106,7	116,4	125,0	131,2	139,0	147,6	155,2	163,0	170,9	177,4	183,0
P5	37	12,1	25,8	43,5	59,1	72,6	83,1	106,7	122,9	133,3	147,6	160,3	173,6	183	0	0	0	0	0			
P6		7,3	15,1	23,8	34,3	43,6	52,4	59,6	65,9	70,5	80,5	93,3	99,7	105,1	108,5	113,2	118,5	123,0	127,4	131,6	135,2	138,4
P6	16	7,3	20,3	37,8	52,4	64,4	72	93,3	104	109,6	118,5	126	133	138,4	0	0	0	0	0			
P7		0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
P7	1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Filtro Antracito/Areia (cm)																						
Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		13,6	25,1	37,3	47,6	56,5	68,1	79,6	88,9	95,7	103,6	112,8	119,0	127,5	141,0	148,0	154,3	162,2	126,0	181,5	187,3	194,5
P1	155	13,6	25,1	37,3	47,6	56,5	68,1	79,6	88,9	95,7	103,6	112,8	119	127,5	141	148	154,3	162,2	126	181,5	187,3	194,5
P2		13,4	23,6	35,8	46,1	55,0	66,6	78,2	87,4	94,1	101,9	111,1	117,3	126,1	139,3	146,2	152,5	160,4	125,0	179,7	185,4	192,7
P2	120	13,4	23,6	35,8	46,1	55	66,6	78,2	87,4	94,1	101,9	111,1	117,3	126,1	139,3	146,2	152,5	160,4	125	179,7	185,4	192,7
P3		13,4	19,6	31,8	42,1	51,0	62,3	74,0	83,1	89,8	97,6	106,6	112,8	121,8	134,6	141,3	147,3	155,2	122,5	174,3	179,9	187,0
P3	104	13,4	19,6	31,8	42,1	51	62,3	74	83,1	89,8	97,6	106,6	112,8	121,8	134,6	141,3	147,3	155,2	122,5	174,3	179,9	187
P4		8,4	16,3	28,3	38,2	46,9	58,3	69,9	78,8	85,1	92,6	101,4	107,3	116,3	128,5	134,6	140,0	146,9	115,7	164,6	168,6	174,3
P4	74	8,4	16,3	28,3	38,2	46,9	58,3	69,9	78,8	85,1	92,6	101,4	107,3	116,3	128,5	134,6	140	146,9	115,7	164,6	168,6	174,3
P5		8,9	11,9	23,9	33,9	42,5	53,6	65,7	74,3	80,4	87,8	96,4	102,2	111,5	122,8	128,4	133,3	139,8	113,2	157,0	160,0	165,4
P5	54	8,9	11,9	23,9	33,9	42,5	53,6	65,7	74,3	80,4	87,8	96,4	102,2	111,5	122,8	128,4	133,3	139,8	113,2	157	160	165,4
P6		4,4	10,0	21,8	31,4	39,8	50,8	62,2	70,1	75,4	81,8	89,1	93,4	101,5	110,3	113,5	117,0	121,9	100,5	134,4	136,3	140,0
P6	29	4,4	10	21,8	31,4	39,8	50,8	62,2	70,1	75,4	81,8	89,1	93,4	101,5	110,3	113,5	117	121,9	100,5	134,4	136,3	140
P7		0,4	8,1	18,9	26,7	32,8	40,4	48,9	53,3	55,5	58,3	62,2	62,5	69,1	72,9	73,6	74,3	76,2	65,0	80,0	81,8	81,6

P7	13	0,4	8,1	18,9	26,7	32,8	40,4	48,9	53,3	55,5	58,3	62,2	62,5	69,1	72,9	73,6	74,3	76,2	65	80	81,8	81,6
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

7ª Carreira																						
Filtro com esferas poliestireno (cm)																						
Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:45			
		0,0	7,1	14,3	21,4	28,6	35,7	42,9	50,0	57,1	64,3	71,4	78,6	85,7	92,9	100,0						
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		26,7	39,5	51,6	62,3	67,4	67,7	67,6	72,0	82,9	94,2	104,6	114,3	124,3	134,4	144,7	152,8	159,1	163,5	174,2	186,2	198,7
P1	132	26,7	45	61,6	68,9	66,4	72,6	89,8	104,6	118,5	132,9	147,7	157,9	164,1	180,9	198,7	0	0	0			
P2		23,6	35,7	47,6	58,4	63,5	63,8	63,7	68,1	79,0	90,4	101,0	110,7	120,7	130,8	141,1	149,2	155,5	159,9	170,6	182,6	195,1
P2	97	23,6	40,9	57,7	65	62,5	68,7	85,9	101	114,9	129,3	144,1	154,3	160,5	177,3	195,1	0	0	0			
P3		20,5	32,3	44,1	54,9	59,6	59,8	60,0	64,6	75,6	87,0	97,6	107,2	117,1	127,2	137,5	145,5	151,8	156,1	166,8	178,9	191,4
P3	83	20,5	37,4	54,2	60,9	58,7	65,3	82,5	97,6	111,3	125,7	140,4	150,6	156,7	173,6	191,4	0	0	0			
P4		15,4	26,6	38,0	48,5	53,2	53,3	53,4	58,2	69,2	80,6	91,2	100,5	110,3	120,4	130,7	138,6	144,8	149,1	159,8	171,8	184,1
P4	53	15,4	31,4	47,8	54,5	52	58,9	76,1	91,2	104,5	118,9	133,6	143,6	149,7	166,5	184,1	0	0	0			
P5		12,3	22,9	34,1	44,7	48,8	48,9	49,2	54,3	65,3	76,6	87,0	96,3	105,9	115,8	125,9	133,7	139,7	143,6	154,2	165,9	177,7
P5	37	12,3	27,5	44,1	50	47,8	55	72,2	87	100,3	114,4	128,8	138,6	144,2	160,8	177,7	0	0	0			
P6		9,1	18,5	28,9	39,0	42,9	42,8	42,9	48,0	58,4	68,9	78,2	85,5	93,0	100,5	107,1	112,0	115,5	117,2	123,9	130,9	137,1

P6	16	9,1	22,5	38,4	44	41,5	48,7	64,9	78,2	88,6	99,5	109	115	117,4	128,3	137,1	0	0	0			
P7		0,9	0,3	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
P7	1	0,9	0	0,2	0	0	0,1	0,1	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0			
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

Filtro Antracito/Areia (cm)																						
Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		15,7	24,6	36,4	41,6	40,4	48,4	59,0	71,7	80,7	90,3	99,7	107,0	13,2	123,5	133,8	143,4	152,5	162,0	171,9	182,0	191,0
P1	155	15,7	24,6	36,4	41,6	40,4	48,4	59	71,7	80,7	90,3	99,7	107	13,2	123,5	133,8	143,4	152,5	162	171,9	182	191
P2		15,3	23,3	34,9	40,1	38,9	46,7	57,3	70,0	79,0	88,6	98,0	105,3	11,5	121,8	132,1	141,7	150,8	160,3	170,2	180,3	189,3
P2	120	15,3	23,3	34,9	40,1	38,9	46,7	57,3	70	79	88,6	98	105,3	11,5	121,8	132,1	141,7	150,8	160,3	170,2	180,3	189,3
P3		14,0	19,3	30,9	35,8	34,6	42,7	53,2	65,9	74,8	84,3	93,7	100,7	6,9	117,2	127,3	136,9	145,9	155,4	165,3	175,1	184,0
P3	104	14	19,3	30,9	35,8	34,6	42,7	53,2	65,9	74,8	84,3	93,7	100,7	6,9	117,2	127,3	136,9	145,9	155,4	165,3	175,1	184
P4		11,5	13,2	24,6	29,1	27,9	36,1	46,5	59,0	67,7	77,0	86,1	92,7	-1,2	108,7	118,8	127,9	136,6	145,7	155,1	164,5	172,8
P4	74	11,5	13,2	24,6	29,1	27,9	36,1	46,5	59	67,7	77	86,1	92,7	-1,2	108,7	118,8	127,9	136,6	145,7	155,1	164,5	172,8
P5		12,2	11,5	22,8	27,2	26,0	34,0	44,5	57,1	65,6	74,8	83,8	90,6	-3,8	106,3	116,0	124,9	133,2	142,0	150,9	159,7	167,5
P5	54	12,2	11,5	22,8	27,2	26	34	44,5	57,1	65,6	74,8	83,8	90,6	-3,8	106,3	116	124,9	133,2	142	150,9	159,7	167,5

P4		24,6	32,0	39,5	50,5	62,6	75,7	89,4	103,2	106,5	112,4	117,4	122,4	128,8	135,3	142,4	149,7	157,3	165,1	172,9	180,8	188,6
P4	53	24,6	41,1	68	98,6	111,8	123	137,5	153,8		188,6											
P5		21,7	28,6	35,6	46,5	58,5	71,6	85,4	96,5	102,1	107,7	112,6	117,6	123,9	130,3	137,4	144,7	152,1	159,9	167,6	175,4	183,1
P5	37	21,7	37,1	63,9	94,6	107,1	118,1	132,5	148,7		183,1											
P6		21,7	26,3	30,9	41,2	53,2	66,0	79,4	90,0	94,9	99,7	103,9	108,1	113,2	118,3	123,8	129,5	135,4	141,6	147,8	154,0	160,2
P6	16	21,7	31,9	58,5	88,4	99,2	108,6	120	132,6		160,2											
P7		14,8	18,5	22,3	22,4	21,4	28,2	41,0	51,8	58,4	64,6	67,6	70,7	75,4	80,3	85,0	89,5	94,1	98,5	103,0	107,4	111,9
P7	1	14,8	23,1	21	49,6	64,3	71	81,9	92,1		111,9											
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0											

Filtro Antracito/Areia (cm)																						
Piezômetro	cm	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00		
		0,0	5,6	11,1	16,7	22,2	27,8	33,3	38,9	44,4	50,0	55,6	61,1	66,7	72,2	77,8	83,3	88,9	94,4	100,0		
		0,0	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	100,0
P1		23,1	34,3	39,6	55,4	66,7	73,8	81,3	89,5	97,8	106,5	115,2	121,8	128,3	137,5	142,8	151,9	155,5	173,1	176,3	186,8	195,7
P1	155	23,1	35,6	40,6	61,8	69,9	77,7	86,7	95,9	0	115,2	122,5	131,3	138,5	147,4	153,2	168,5	175	185,7	195,7		
P2		21,6	32,6	38,4	53,9	64,8	71,9	79,4	87,6	95,9	104,6	113,3	119,9	126,4	135,6	140,9	150,0	154,5	170,9	174,3	184,8	193,7
P2	120	21,6	33,8	39,6	60	68	75,8	84,8	94	0	113,3	120,6	129,4	136,6	145,5	151,9	166,5	173	183,7	193,7		
P3		19,0	28,9	35,3	50,2	60,7	67,8	75,3	83,4	91,7	100,3	108,9	115,5	123,2	130,0	137,5	144,5	153,4	163,7	170,4	180,0	189,0

P3	104	19	30	36,6	56	63,9	71,7	80,6	89,8	0	108,9	116,2	125	132,2	141,1	147,9	161,7	168,3	179	189		
P4		12,2	22,3	29,1	43,4	53,6	60,3	67,5	75,5	83,8	92,1	100,5	107,0	114,3	120,7	128,0	135,4	144,2	153,3	159,9	169,3	177,8
P4	74	12,2	23,4	30,5	48,9	56,7	64	72,8	81,9	0,0	100,5	107,7	115,9	122,8	131,4	139,4	151,4	157,8	168,4	177,8		
P5		12,5	20,9	27,6	42,0	52,5	59,0	65,6	73,4	63,8	90,0	98,5	104,5	112,0	118,3	125,2	132,5	141,3	150,4	156,3	165,4	173,4
P5	54	12,5	21,8	29,1	47,5	55,8	62,2	70,7	79,7	0	98,5	105,2	113,7	120,2	128,6	136,4	148,7	154,2	164,5	173,4		
P6		12,4	26,6	32,4	47,1	57,6	64,0	70,8	78,2	85,8	93,5	101,2	106,9	112,9	117,9	123,5	129,1	136,1	143,4	147,4	154,3	159,8
P6	29	12,4	28,2	33,4	53	60,6	67,5	75,7	84,1	0,0	101,2	107,5	114,3	119,5	126,2	131,9	142,4	145,8	153,7	159,8		
P7		9,0	17,9	24,3	36,7	44,3	48,2	51,8	55,6	59,7	64,1	68,6	71,7	73,6	75,5	79,0	82,6	84,8	86,2	88,2	90,9	92,9
P7	13	9	18,9	25,6	41,4	46,2	50,2	54,3	58,7	0	68,6	72	74	76,1	80,9	84,3	85,6	87,6	90,7	92,9		
P8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

Recuperação PS

1° Carreira		
Filtro Esferas de poliestireno		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	4,34	67
2	3,66	36
3	3,66	36

2° Carreira		
Filtro Esferas de poliestireno		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	6,16	32
2	2,31	25
3	2,18	26

4° Carreira		
Filtro Esferas de poliestireno		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	13,3	193
2	12,3	179
3	8,72	121

5° Carreira		
Filtro Esferas de poliestireno		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	2,3	
2	2,3	
3	2,3	

4	3,66	36
5	3,61	37
6	3,46	33
7	3,52	33
8	2,98	30
9	2,19	23
10	1,77	18
11	1,43	17
12	1,32	15
13	1,29	14
14	1,17	12
15	1,14	12
16	0,96	12
17	1,03	11
18	1,05	10
19	1,08	9
20	0,93	13
21	0,91	12
22	0,88	12

4	2,25	24
5	2,25	24
6	2,15	23
7	2,11	20
8	1,14	12
9	0,89	10
10	1,11	12
11	0,98	12
12	1,07	12
13	1,06	13
14	0,94	15
15	1,29	15
16	1,27	16
17	1,43	17
18	1,23	16
19	1,54	16
20	1,49	17
21	2,16	18
22	1,25	18

4	3,31	59
5	2,21	43
6	2,12	41
7	1,93	35
8	1,48	28
9	1,22	23
10	1,17	20
11	1,09	20
12	0,94	18
13	1,03	17
14	0,89	15
15	0,83	20
16	0,76	16
17	0,78	13
18	0,76	14
19	0,75	14
20	0,76	15
21	0,67	8
22	0,77	13

4	2,6	
5	2,8	
6	2,6	
7	2,6	
8	1,3	
9	0,8	
10	0,7	
11	0,6	
12	0,7	
13	0,7	
14	0,7	
15	1,1	
16	1,1	
17	1,1	
18	1,2	
19	1,3	
20	1,3	
21	1,3	
22	1,5	

23	0,97	11	23	1,29	19	23	0,76	16	23	1,7	
24	0,84	10	24	1,35	21	24	0,75	13	24	1,6	
25	0,86	11	25	1,64	20	25	0,73	13	25	1,7	
26	0,79	11	26	1,4	20	26	0,75	13	26	1,5	
27	0,78	11	27	1,29	20	27	0,71	13	27	1,6	
28	0,86	9	28	1,58	20	28	0,78	14	28	1,5	
29	0,7	32	29	1,35	19	29	0,88	11	29	1,7	
30	0,83	29	30	1,46	20	30	0,88	13	30	1,4	

7° Carreira			8° Carreira			9° Carreira			10° Carreira			11° Carreira		
Filtro Esferas de poliestireno														
Tempo (min)	Turbidez	cor												
1	1,17		1	2,65		1	1,93		1	1,61		1	0,9	
2	1,28		2	2,99		2	1,29		2	1,62		2	0,77	
3	1,46		3	2,76		3	1,23		3	1,42		3	0,86	
4	1,44		4	2,93		4	1,23		4	1,4		4	0,79	
5	1,56		5	2,99		5	1,32		5	1,25		5	0,79	
6	1,93		6	3,44		6	1,35		6	0,87		6	0,75	
7	2,01		7	3,37		7	1,59		7	1,04		7	0,69	

8	2	
9	2,08	
10	1,96	
11	1,56	
12	1,46	
13	1,48	
14	1,46	
15	1,2	
16	1,19	
17	0,98	
18	1,11	
19	0,95	
20	0,97	
21	1,22	
22	1,1	
23	1,13	
24	0,82	
25	0,93	
26	0,87	

8	2,53	
9	1,44	
10	1,04	
11	0,9	
12	1,23	
13	0,92	
14	0,95	
15	0,9	
16	1,28	
17	1,04	
18	1,03	
19	1,21	
20	1,03	
21	1,14	
22	1,07	
23	1,12	
24	1,08	
25	1,28	
26	1,44	

8	1,81	
9	2,42	
10	2,2	
11	2,39	
12	1,49	
13	1,66	
14	1,82	
15	1,69	
16	1,86	
17	1,84	
18	1,43	
19	1,61	
20	1,48	
21	1,4	
22	1,49	
23	1,35	
24	1,3	
25	1,38	
26	1,2	

8	0,63	
9	0,59	
10	0,54	
11	0,49	
12	0,48	
13	0,54	
14	0,37	
15	0,28	
16	0,65	
17	0,8	
18	0,92	
19	0,76	
20	0,76	
21	0,84	
22	0,88	
23	0,89	
24	0,88	
25	0,98	
26	0,85	

8	0,62	
9	0,68	
10	0,71	
11	0,74	
12	0,67	
13	0,69	
14	0,75	
15	0,86	
16	0,79	
17	0,8	
18	0,83	
19	0,83	
20	0,75	
21	0,98	
22	0,79	
23	0,81	
24	0,92	
25	0,79	
26	0,83	

27	0,93	
28	0,9	
29	0,88	
30	0,89	

27	1,13	
28	1,18	
29	1,24	
30	1,29	

27	1,47	
28	1,48	
29	1,38	
30	1,02	

27	0,99	
28	1,38	
29	0,91	
30	1,16	

27	0,84	
28	0,85	
29	0,98	
30	1,05	

11° Carreira		
Filtro Esferas de poliestireno		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	0,9	
2	0,77	
3	0,86	
4	0,79	
5	0,79	
6	0,75	
7	0,69	
8	0,62	
9	0,68	
10	0,71	
11	0,74	

12° Carreira		
Filtro Esferas de poliestireno		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	1,16	
2	1,02	
3	1,16	
4	1,13	
5	0,98	
6	0,86	
7	0,84	
8	0,8	
9	0,93	
10	1,04	
11	0,93	

13° Carreira		
Filtro Esferas de poliestireno		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	1,07	
2	0,87	
3	1,06	
4	1,13	
5	0,94	
6	0,96	
7	1,23	
8	1,49	
9	1,71	
10	1,54	
11	1,52	

12	0,67		12	0,97		12	1,31	
13	0,69		13	1,16		13	1,33	
14	0,75		14	1,22		14	1,43	
15	0,86		15	1,1		15	1,65	
16	0,79		16	1,21		16	1,6	
17	0,8		17	1,2		17	1,05	
18	0,83		18	1,45		18	1,36	
19	0,83		19	1,27		19	1,28	
20	0,75		20	1,44		20	1,32	
21	0,98		21	1,13		21	1,53	
22	0,79		22	1,41		22	1,44	
23	0,81		23	1,37		23	1,37	
24	0,92		24	1,32		24	1,3	
25	0,79		25	1,41		25	1,28	
26	0,83		26	1,31		26	1,11	
27	0,84		27	1,34		27	1,62	
28	0,85		28	1,19		28	1,38	
29	0,98		29	1,36		29	1,27	
30	1,05		30	1,41		30	1,16	

A+A

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	4,52	74
2	4,72	72
3	4,39	66
4	4	60
5	3,81	58
6	3,77	56
7	3,46	52
8	2,79	46
9	1,83	41
10	1,63	39
11	1,3	37
12	1,17	35
13	1,21	35
14	1,22	34

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	2,1	22
2	1,51	13
3	1,56	15
4	1,88	16
5	1,97	18
6	2,01	18
7	1,99	19
8	1,81	20
9	1,62	19
10	1,46	20
11	1,49	19
12	1,52	19
13	1,59	19
14	1,41	20

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	2,97	48
2	5,6	51
3	5,84	59
4	6,35	59
5	6,76	60
6	6,67	63
7	6,66	61
8	4,64	49
9	2,94	37
10	2,71	32
11	2,05	28
12	1,7	23
13	1,7	20
14	1,51	27

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	0,6	
2	0,93	
3	1,56	
4	2,09	
5	2,32	
6	2,58	
7	2,35	
8	1,27	
9	0,9	
10	0,99	
11	1,6	
12	0,97	
13	1,14	
14	1,11	

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	0,45	
2	0,7	
3	0,57	
4	0,48	
5	0,64	
6	1,09	
7	1,42	
8	1,22	
9	1,04	
10	1,08	
11	0,97	
12	1,02	
13	0,83	
14	0,89	

15	1,03	33
16	1,2	33
17	1,26	32
18	1,15	32
19	0,96	31
20	1,04	28
21	0,98	25
22	0,98	24
23	0,9	19
24	0,86	18
25	0,97	18
26	0,9	17
27	0,87	16
28	0,73	16
29	0,79	12
30	0,73	10

15	1,45	21
16	1,47	21
17	1,43	21
18	1,65	21
19	1,42	21
20	1,45	21
21	1,38	21
22	1,33	21
23	1,47	21
24	1,37	20
25	1,29	20
26	1,33	20
27	1,36	20
28	1,43	19
29	1,44	19
30	1,32	20

15	1,65	24
16	1,44	23
17	1,75	22
18	1,55	23
19	1,44	22
20	1,48	23
21	1,53	25
22	1,56	23
23	1,51	23
24	1,36	22
25	1,3	22
26	1,38	23
27	1,34	22
28	1,74	20
29	1,58	22
30	1,62	21

15	1,53	
16	1,27	
17	1,45	
18	1,48	
19	1,47	
20	1,71	
21	1,68	
22	1,66	
23	1,76	
24	1,79	
25	1,92	
26	1,69	
27	2,22	
28	2,26	
29	1,82	
30	1,98	

15	0,96	
16	1,01	
17	0,89	
18	0,95	
19	0,93	
20	1,11	
21	1,06	
22	0,9	
23	1,16	
24	0,92	
25	0,78	
26	0,85	
27	0,93	
28	0,99	
29	0,98	
30	0,87	

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor

1	0,61	
2	0,51	
3	0,4	
4	0,41	
5	1,17	
6	1,91	
7	2,13	
8	2,11	
9	1,88	
10	1,62	
11	1,35	
12	1,35	
13	1,19	
14	1,43	
15	1,28	
16	1,14	
17	1,17	
18	1,01	
19	1,16	

1	2,57	
2	2,65	
3	2,56	
4	2,63	
5	2,59	
6	2,52	
7	2,2	
8	1,23	
9	0,76	
10	0,63	
11	0,68	
12	0,85	
13	0,81	
14	0,77	
15	0,75	
16	0,94	
17	0,99	
18	1,04	
19	0,91	

1	0,44	
2	0,52	
3	0,52	
4	0,36	
5	0,27	
6	0,22	
7	0,28	
8	0,84	
9	1,22	
10	1,15	
11	1,23	
12	1,04	
13	1,33	
14	0,96	
15	1,12	
16	1,38	
17	1,05	
18	1,19	
19	1,17	

1	2,92	
2	2,13	
3	2,06	
4	2,31	
5	2,26	
6	2,22	
7	2,05	
8	1,71	
9	1,36	
10	1,15	
11	1,21	
12	1,15	
13	1,07	
14	1,15	
15	0,97	
16	1,09	
17	1,01	
18	1,04	
19	1,22	

1	0,64	
2	0,46	
3	0,43	
4	0,45	
5	0,51	
6	0,91	
7	1,1	
8	0,98	
9	0,91	
10	0,98	
11	1,17	
12	1,24	
13	1,3	
14	1,12	
15	1,09	
16	1	
17	1,21	
18	1,31	
19	1,24	

20	0,91	
21	1,12	
22	0,97	
23	0,99	
24	1,08	
25	1,02	
26	1,05	
27	0,92	
28	1,01	
29	0,98	
30	1,25	

20	0,95	
21	1,16	
22	1,02	
23	1,04	
24	1,14	
25	0,92	
26	1,18	
27	1,27	
28	1,08	
29	1,21	
30	1,03	

20	1,06	
21	1,08	
22	1,1	
23	1,01	
24	1	
25	1,1	
26	1,08	
27	1,02	
28	0,97	
29	1,01	
30	0,97	

20	1,2	
21	1,06	
22	1,14	
23	1,26	
24	1,14	
25	1,45	
26	0,95	
27	1,59	
28	1,08	
29	1,13	
30	1,16	

20	1,28	
21	0,87	
22	1,38	
23	1,39	
24	1,15	
25	1,22	
26	1,47	
27	1,41	
28	1,34	
29	1,37	
30	2,02	

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	1,13	
2	1,29	
3	1,55	
4	1,63	
5	1,8	

Filtro Antracito/Areia		
Tempo (min)	Turbidez	cor
1	0,62	
2	0,94	
3	0,88	
4	1,11	
5	1,34	

6	1,7	
7	1,7	
8	1,59	
9	1,68	
10	1,32	
11	1,26	
12	1,47	
13	1,41	
14	1,32	
15	1,22	
16	1,45	
17	1,31	
18	1,42	
19	1,74	
20	1,41	
21	1,3	
22	1,4	
23	1,31	
24	1,56	

6	1,17	
7	1,19	
8	1,28	
9	1,34	
10	1,33	
11	1,18	
12	1,38	
13	1,49	
14	1,53	
15	1,84	
16	1,53	
17	1,28	
18	1,35	
19	1,29	
20	1,5	
21	1,69	
22	1,66	
23	1,32	
24	1,38	

26		26		26		26		26		26	
27	21,3	27	5,92	27	4,22	27	11,9	27	8,58	27	5,85
28	89,2	28	33,4	28	16,6	28	31,1	28	26,3	28	21,5
29	19,9	29	14,4	29	10,3	29	12,8	29	6,37	29	10,4
30	11,1	30	7,5	30	4,86	30	5,12	30	4,53	30	4,51
31	9,89	31	6,76	31	4,61	31	5,45	31	3,86	31	3,99
32	9,2	32	7,02	32	4,46	32	4,55	32	3,63	32	3,97
33	8,6	33	6,75	33	4,67	33		33		33	
34	8,29	34	6,18	34	4,1	34		34		34	
35	8,7	35	6,22	35	4,2	35		35		35	
36	8,2	36	6,32	36	4,23	36		36		36	
37	8,58	37	6,4	37	4,08	37		37		37	

8° Carreira	
Filtro de Antracito/Areia	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	

9° Carreira	
Filtro de Antracito/Areia	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	

10° Carreira	
Filtro de Antracito/Areia	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	

11° Carreira	
Filtro de Antracito/Areia	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	

12° Carreira	
Filtro de Antracito/Areia	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	

13° Carreira	
Filtro de Antracito/Areia	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	

Retrolavagem PS (expansão 100%)

5° Carreira	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	315
8	325
9	334
10	335
11	317
12	279
13	238
14	97,7

6° Carreira	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	266
8	238
9	252
10	252
11	247
12	213
13	198
14	109

7° Carreira	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	227
8	219
9	215
10	229
11	234
12	67,6
13	60,6
14	101

8° Carreira	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	109
8	118
9	118
10	104
11	87,4
12	75,7
13	55,2
14	36,2

15	60,7
16	41,1
17	26,9
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	24,8
28	21,6
29	24,7
30	25,8
31	21,8
32	24,8
33	17,9

15	43,3
16	47,6
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	47,3
28	48,3
29	49,2
30	44,9
31	25,8
32	18,8
33	13,2

15	55,1
16	32,7
17	23,9
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	36,3
28	39,6
29	35,3
30	33
31	34
32	21,9
33	10,7

15	19,1
16	15,5
17	12,8
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	27
28	13,9
29	14,8
30	17,4
31	15
32	8,94
33	7,23

34	9,34
35	8,96
36	7,44
37	6,33

34	11,5
35	9,41
36	6,6
37	6,08

34	9,01
35	7,79
36	5,97
37	5,35

34	6,05
35	4,69
36	4,24
37	3,71

Retrolavagem PS (expansão 200%)

9° Carreira	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	59,6
8	53,2

10° Carreira	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	40,3
8	33,3

11° Carreira	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	185
8	194

12° Carreira	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	251
8	256

13° Carreira	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	98
8	92

9	49,2
10	50,1
11	41
12	55
13	33,6
14	21,3
15	14,8
16	11,9
17	9,6
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	15,9

9	35,7
10	33,3
11	33,8
12	30,8
13	35,8
14	40,6
15	27,8
16	20,8
17	13,8
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	25,1

9	192
10	216
11	196
12	132
13	76
14	38
15	32
16	30
17	19
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	18

9	253
10	261
11	190
12	85
13	55
14	39
15	29
16	23
17	16
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	14

9	88,4
10	88
11	96,8
12	126
13	100
14	73,1
15	46,6
16	39,3
17	24
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	35

28	14	28	24,6	28	16	28	12	28	35,3
29	14,4	29	23,5	29	21	29	12	29	34,5
30	15,4	30	21,8	30	15	30	13	30	33,9
31	14,7	31	25,8	31	15	31	12	31	33,5
32	10,9	32	26,7	32	18	32	10	32	34,1
33	6,7	33	20,3	33	13	33	8	33	19,6
34	4,5	34	6,93	34	8	34	5	34	8,48
35	3,9	35	5,33	35	5	35	3,69	35	7,01
36	3,9	36	4,65	36	4	36	2,81	36	4,91
37	2,5	37	3,32	37	3	37	3,9	37	4,09

Retrolavagem PS (expansão 150%)

14ª carreira (150% expansão)	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	

15ª carreira (150% expansão)	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	

16ª carreira (150% expansão)	
Filtro de esferas de poliestireno	
Tempo (min)	Turbidez
0	
1	
2	

3	
4	
5	
6	
7	107
8	121
9	111
10	105
11	102
12	113
13	93
14	82,7
15	95,8
16	52,4
17	33,5
18	
19	
20	
21	

3	
4	
5	
6	
7	134
8	137
9	123
10	142
11	143
12	140
13	124
14	67,9
15	32,2
16	17,8
17	16
18	
19	
20	
21	

3	
4	
5	
6	
7	186
8	203
9	208
10	199
11	189
12	169
13	63,8
14	28,5
15	25,5
16	19,7
17	15,2
18	
19	
20	
21	

22	
23	
24	
25	
26	
27	37,5
28	38,5
29	37,2
30	38,2
31	36,5
32	35,5
33	34,2
34	35,4
35	34,4
36	32,8
37	30

22	
23	
24	
25	
26	
27	13,3
28	12,4
29	12,6
30	12,9
31	12,9
32	10,9
33	8,29
34	5,17
35	4,49
36	3,86
37	3,7

22	
23	
24	
25	
26	
27	16,3
28	10,6
29	11,9
30	11,9
31	9,94
32	10,7
33	7,33
34	5,76
35	4,63
36	4,52
37	3,65

Retrolavagem PS (expansão 200% em 5 min)

Limpeza 200% em 5 min					
Filtro de esferas de poliestireno 01		Filtro de esferas de poliestireno 02		Filtro de esferas de poliestireno 03	
Tempo (min)	Turbidez	Tempo (min)	Turbidez	Tempo (min)	Turbidez
0		0		0	
1		1		1	
2		2		2	
3		3		3	
4		4		4	
5		5		5	
6		6		6	
7	109	7	124	7	98,7
8	119	8	112	8	88,3
9	119	9	111	9	99,5
10	129	10	121	10	113
11	43,7	11	115	11	91,5
12		12		12	
13		13		13	
14		14		14	

15		15		15	
16		16		16	
17		17		17	
18		18		18	
19		19		19	
20		20		20	
21	39,1	21	32,3	21	41
22	25,8	22	25,7	22	33,2
23	27,3	23	28,5	23	29,7
24	27,8	24	26	24	31,8
25	24,3	25	26,4	25	22,9

Retrolavagem PS (expansão 100% em 5 min)

Limpeza 100% em 5 min					
Filtro de esferas de poliestireno 01		Filtro de esferas de poliestireno 02		Filtro de esferas de poliestireno 03	
Tempo (min)	Turbidez	Tempo (min)	Turbidez	Tempo (min)	Turbidez
0		0		0	
1		1		1	

2		2		2	
3		3		3	
4		4		4	
5		5		5	
6		6		6	
7	249	7	298	7	289
8	236	8	263	8	288
9	223	9	257	9	290
10	83	10	163	10	296
11	53	11	105	11	265
12		12		12	
13		13		13	
14		14		14	
15		15		15	
16		16		16	
17		17		17	
18		18		18	
19		19		19	
20		20		20	

21	75	21	70	21	86,5
22	73	22	74	22	80,7
23	77	23	62	23	78
24	64	24	45	24	87,3
25	44	25	34	25	46

Espessura do leito 68 cm Qualidade da água

Parâmetros	bruta																				
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30	10:15
	0	4,9																			0:00
Cor Aparente	83	83	63	74	98	98	106	96	97	97	99	102	97	105	101	102	101	100	99	105	100
Turbidez	5,29	6,97	4,43	5,04	4,8	5,96	2,13	6,4	4,57	4,67	4,77	5,29	5,08	6	4,46	5,11	5,77	5,87	5,09	5,3	5,2
pH de coagulacao	6,68	6,6	6,55	6,58	6,62	6,63	6,67	6,7	6,64	6,59	6,63	6,63	6,61	6,63	6,68	6,63	6,63	6,62	6,65	6,68	6,68
pH	6,86	6,8	6,84	6,83	6,88	6,86	6,9	6,87	6,91	6,83	6,86	6,95	6,92	6,81	6,93	6,93	6,84	6,95	6,96	6,94	6,94
Temperatura	18,5	18,5	18,7	18,6	18,9	19,2	19,3	19,4	19,5	19,7	19,9	20,2	20,2	20,1	20,2	20,2	20,2	20,3	20,2	20,1	20,1
condutividade	85	83	78,5	78,6	78,3	78,5	80,2	78	78,6	79,5	79,4	79,5	79,4	79,6	79,5	79,5	79,2	79,4	79,9	79,3	79,7

	Água Filtro esferas de poliestireno																					
	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:00	08:30	09:00	09:30	10:15	
Cor Aparente	66	27	23	23	42	35	31	44	44	43	39	39	42	41	40	43	42	44	40	41	44	
Turbidez	5,64	1,51	1,46	1,48	1,42	1,49	1,83	1,82	1,51	1,47	1,93	1,52	1,72	1,22	1,62	1,39	1,53	1,73	1,28	1,56	1,88	
pH	6	6,7	6,6	6,75	6,81	6,65	6,82	6,8	6,83	6,83	6,82	6,86	6,87	6,68	6,83	6,87	6,8	6,84	6,84	6,78	6,81	
Temperatura	18,2	18,3	18,6	18,5	18,7	19	18,9	19,2	19,5	19,5	19,8	19,9	19,9	20	19,9	20	20	19,9	20	19,9	19,8	
condutividade	102	92,2	86,4	86	85,8	85,4	84,1	86,7	85,5	84,1	85,7	84,9	84,9	85,1	84,7	84,5	85,1	85,2	85,2	85,1	85	

Parâmetros	bruta																
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:00
	0	4,9															
Cor Aparente	80		81	76	71	73	72	71	72	76	75	78	87	76	79	81	78
Turbidez	5,87		4,51	5,05	6,18	4,44	5,48	5,13	5,81	5,66	4,98	4,97	5,8	7,41	5,16	5,3	5,1
pH de coagulacao	6,82		6,6	6,6	6,61	6,61	6,56	6,79	6,58	6,38	6,52	6,17	6,51	6,57	6,4	6,49	6,39
pH	6,78		6,76	6,76	6,72	6,7	6,69	6,7	6,81	6,81	6,84	6,84	6,83	6,88	6,92	6,88	6,9
Temperatura	18,9		18,2	18,8	17,5	17,4	17,6	18	17,9	18,1	18,7	18,1	18,4	17,9	18	18,3	18
condutividade	77,8		80	85,1	80	79,2	79,1	81,1	79,3	79,6	79,4	79,1	79,2	80,3	84,6	78	79,3

	Água Filtro esferas de poliestireno													
	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30
Cor Aparente	40	14	19	18	22	26	28	25	25	18	31	26	31	31
Turbidez	4,05	0,85	1,09	1,05	1,25	1,36	1,17	1,46	1,21	1,24	1,14	1,1	1,27	1,88
pH	6,34	6,66	6,7	6,67	6,78	6,89	6,77	6,79	6,76	6,83	6,79	6,76	6,83	6,8
Temperatura	18,8	18,3	18,2	18,6	18,6	18,6	18,8	18,8	19,1	19,3	19,6	19,8	20,6	20,6
condutividade	97,8	90,9	84,4	85	84,2	84,5	84,5	84,4	84,3	84,2	84,7	84,3	84,6	84,1

Parâmetros	bruta																
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:30	8:15
Cor Aparente	86	91	88	85	84	86	85	92	91	90	115	88	92	107	92	93	91
Turbidez	5,91	5,92	5,49	5,66	6,29	6,12	6,52	8,43	6,18	9,81	8,14	6,3	6,22	5,72	6,17	7,31	6,52
pH de coagulacao	6,63	6,61	6,6	6,64	6,6	6,65	6,78	6,73	6,66	6,7	6,71	6,75	6,82	6,86	6,77	6,8	6,78
pH	6,76	6,69	6,83	6,86	6,65	6,83	6,89	6,85	6,83	6,88	6,9	6,9	6,97	6,92	6,91	6,84	6,87
Temperatura	19	19,3	19,2	19,3	19,1	19,4	19,6	19,6	19,9	20,1	20,3	20,6	20,9	21,1	21,3	21,5	22,7
condutividade	79,1	79,1	78,9	78,5	78,5	78,5	78,5	78,3	79	78,7	79,3	79,6	79,2	78,7	80,2	78,4	78,2

	Água Filtro esferas de poliestireno																
	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:30	08:15
Cor Aparente	20	14	20	20	22	18	22	21	21	21	25	30	30	39	33	34	39
Turbidez	1,36	1,12	1,03	1,3	1,4	1,21	1,57	1,43	1,63	1,44	1,67	1,56	1,91	2,19	2,07	2,3	1,88
pH	6,39	6,63	6,73	6,76	6,51	6,75	6,84	6,85	6,77	6,78	6,77	6,83	6,9	6,79	6,8	6,7	6,74
Temperatura	19,5	18,8	18,8	18,9	19	19,1	19,3	19,3	19,7	19,9	20,2	20,4	20,7	21,1	21,2	21,3	21,4
condutividade	86,9	83,7	83,9	83,6	84	83,7	83,8	84,1	83,8	84,4	84,5	84,5	84,3	84,3	84,3	83,4	83,5

Parâmetros	bruta															
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
	0	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00	7:20
Cor Aparente	134	104	100	88	99	101	102	98	95	101	98	97	99	97	104	98
Turbidez	10,6	9,3	8,42	8,39	8,08	6,66	7,39	7,72	6,55	7,3	7,28	7,8	6,96	6,62	8,04	6,93
pH de coagulação	6,81	6,75	6,87	6,86	6,79	6,84	6,87	6,84	6,85	6,85	6,82	6,75	6,83	6,88	6,86	6,91
pH	6,9	6,87	6,92	6,9	6,67	6,91	6,89	6,94	6,9	6,86	6,85	6,88	6,94	6,79	6,94	6,91
Temperatura	18,5	18,1	18,5	18,6	18,7	19	19,2	19,1	19,2	19,3	19,4	19,6	19,5	19,6	19,6	19,7
condutividade	84,4	79,5	79,1	79	79	78,8	78,5	78,8	78,4	78,4	78,5	78,2	79,1	78,3	78,8	79

Água Filtro esferas de poliestireno																
	0	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00	06:30	07:00	07:20
Cor Aparente	22	24	20	22	24	27	25	25	25	23	27	26	26	28	28	27
Turbidez	1,4	1,4	1,38	1,44	1,59	1,9	1,65	1,75	1,9	1,77	1,31	1,69	2,2	1,83	1,76	1,99
pH	6,36	6,6	6,77	6,8	6,6	6,81	6,79	6,81	6,79	6,8	6,74	6,8	6,88	6,69	6,81	6,82
Temperatura	18,9	18,1	18,1	18,2	18,7	18,8	18,9	19	19	19,1	19,2	19,3	19,4	19,4	19,5	19,5
condutividade	86,5	84,9	84,5	84,3	84,2	84,3	83,6	84,1	84,3	83,7	83,6	83,7	83,6	83,2	83,6	83,6

Recuperação

Turbidez 1	abs	Turbidez 2	abs	Turbidez 3	abs	Turbidez 4		Turbidez 5		
1	3,47	0,282	3,12	0,068	4,67	1,482	3,16	0,028	1,52	1,668
2	5,76	2,626	3,03	0,104	4,07	0,936	1,24	1,894	1,57	1,564
3	5,61	2,754	2,53	0,326	3,21	0,354	1,4	1,456	1,53	1,326
4	2,69	0,528	2,79	0,628	2,32	0,158	1,56	0,602	1,45	0,712
5	1,91	0,160	2,77	1,020	1,32	0,430	1,26	0,490	1,49	0,260
6	1,70	0,130	2,43	0,860	1,04	0,530	1,37	0,200	1,31	0,260
7	1,72	0,116	2,50	0,896	0,66	0,944	1,65	0,046	1,49	0,114
8	1,66	0,180	2,60	1,120	0,46	1,020	1,56	0,080	1,12	0,360

9	1,67	0,156	2,45	0,936	0,53	0,984	1,72	0,206	1,2	0,314
10	1,48	0,066	2,25	0,836	0,42	0,994	1,49	0,076	1,43	0,016
11	1,65	0,254	2,18	0,784	0,4	0,996	1,4	0,004	1,35	0,046
12	1,34	0,122	2,23	0,768	0,36	1,102	1,93	0,468	1,45	0,012
13	1,39	0,026	2,02	0,656	0,39	0,974	1,62	0,256	1,4	0,036
14	1,46	0,034	2,52	1,094	0,32	1,106	1,39	0,036	1,44	0,014
15	1,32	0,110	1,76	0,550	0,39	0,820	1,2	0,010	1,38	0,170
16	1,34	0,090	1,79	0,540	0,47	0,780	1,27	0,020	1,38	0,130
17	1,75	0,452	1,60	0,302	0,44	0,858	1,35	0,052	1,35	0,052
18	1,71	0,146	2,63	1,066	0,49	1,074	1,39	0,174	1,6	0,036
19	1,51	0,202	1,65	0,342	0,6	0,708	1,37	0,062	1,41	0,102
20	1,98	0,418	1,81	0,248	0,54	1,022	1,52	0,042	1,96	0,398
21	1,59	0,190	1,77	0,370	0,69	0,710	1,46	0,060	1,49	0,090
22	1,91	0,404	2,04	0,534	0,81	0,696	1,37	0,136	1,4	0,106
23	2,08	0,556	1,66	0,136	0,67	0,854	1,32	0,204	1,89	0,366
24	1,60	0,202	1,84	0,442	0,71	0,688	1,13	0,268	1,71	0,312
25	1,50	0,256	1,45	0,206	0,66	0,584	1,36	0,116	1,25	0,006
26	1,68	0,216	1,39	0,074	1,06	0,404	1,58	0,116	1,61	0,146
27	1,76	0,260	1,64	0,140	0,82	0,680	1,64	0,140	1,64	0,140

28	1,75	0,298	1,38	0,072	0,86	0,592	1,72	0,268	1,55	0,098
29	2,04	0,634	1,47	0,064	0,75	0,656	1,39	0,016	1,38	0,026
30	1,97	0,608	1,44	0,078	0,85	0,512	1,18	0,182	1,37	0,008

Retrolavagem

Filtro de esferas de poliestireno 1			abs	Filtro de esferas de poliestireno 2			abs	Filtro de esferas de poliestireno 3			abs	Filtro de esferas de poliestireno 4			abs	Filtro de esferas de poliestireno 5			abs
Tempo (min)	Turbidez			Tempo (min)	Turbidez			Tempo (min)	Turbidez			Tempo (min)	Turbidez			Tempo (min)	Turbidez		
0		AR		0		AR		0		AR		0		AR		0		AR	
1				1				1				1				1			
2				2				2				2				2			
3		intervalo		3		intervalo		3		intervalo		3		intervalo		3		intervalo	
4	402		63,4	4	304		34,6	4	253		85,6	4	358		19,4	4	376		37,4
5	553		192,0	5	274		87,0	5	281		80,0	5	339		22,0	5	358		3,0
6	327		7,8	6	288		31,2	6	279		40,2	6	344		24,8	6	358		38,8
7	296		33,2	7	220		42,8	7	203		59,8	7	287		24,2	7	308		45,2
8		ar		8		ar		8		ar		8		ar	0,0	8		ar	0,0
9				9				9				9			0,0	9			0,0
10				10				10				10			0,0	10			0,0

11	90		12,1	11	70		7,9	11	63,2		14,7	11	80		2,1	11	86,3		8,4
12	88		18,1	12	62		7,9	12	53,1		16,8	12	65		4,9	12	81,4		11,5
13	86		16,9	13	58		11,1	13	50,8		18,3	13	70		0,9	13	80,7		11,6
14	30		20,8	14	65		14,2	14	43,9		6,9	14	48		2,8	14	67,2		16,4
15	19		0,9	15	17		1,1	15	13,8		4,3	15	19		0,9	15	21,8		3,7