UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

THALITA SALGADO FAGUNDES

**Emprego de Filtro de Fibras Flexíveis constituído de Fibras de Algodão Mercerizado e
Poliéster na clarificação de água para abastecimento.**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2015

THALITA SALGADO FAGUNDES

**Emprego de Filtro de Fibras Flexíveis constituído de Fibras de Algodão Mercerizado e
Poliéster na clarificação de água para abastecimento.**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali

São Carlos

2015

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

3365e Salgado Fagundes, Thalita
Emprego de Filtro de Fibras Flexíveis constituído
de Fibras de Algodão Mercerizado e Poliéster na
clarificação de água para abastecimento / Thalita
Salgado Fagundes; orientador Marco Antonio Penalva
Realiz. São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2015.

1. Tratamento de água. 2. Filtro de fibras
flexíveis. 3. Algodão mercerizado. 4. Poliéster. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **THALITA SALGADO FAGUNDES**.

Título da dissertação: "Emprego de filtro de fibras flexíveis constituído de fibras de algodão mercerizado e poliéster na clarificação de água para abastecimento".

Data da defesa: 01/06/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Marco Antonio Penalva Reali (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADA

Prof. Dr. **Bernardo Arantes do Nascimento Teixeira**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Dra. **Lella Jorge Patrizzi**
(Serviço Autônomo de Água e Esgoto/SAAE)

Aprovada

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

*Dedico este trabalho ao meu Tio Reginaldo (in memoriam), e a minha Tia Lucimar
pelos exemplos de amor, força e dignidade.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Marco Antonio Penalva Reali pela paciência, cooperação, inteligência e parceria intelectual durante os dois anos de orientação.

Aos técnicos Bérnago, Alcino e Maria Teresa pela ajuda nas reformas da instalação piloto, e análises em laboratório.

Aos amigos do LATAR, especialmente Gabriel, pelas sugestões e contribuições na pesquisa.

A minha família, especialmente minha mãe Lucia, e amigos pelo companheirismo e apoio emocional.

"Se tens que lidar com a água, consulta primeiro a experiência, depois a razão."

(Leonardo da Vinci)

RESUMO

FAGUNDES, T.S. (2015) Emprego de filtro de fibras flexíveis constituído de fibras de algodão mercerizado e poliéster na clarificação de água para abastecimento. 2015. 214p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os filtros de fibras flexíveis são módulos de filtração direta cujo leito filtrante é formado por micro fibras de poliamida, permitindo altas eficiências de remoção de sólidos suspensos, e aplicação de altas taxas de filtração. O presente estudo avaliou tal configuração de filtro utilizando fibras de algodão mercerizado e poliéster na forma de fios. Foram realizados testes de resistência dos fios a meios com características químicas distintas - alcalino, ácido e com cloro residual. Foi realizada caracterização das fibras estudadas através de Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura. Foram construídos 4 filtros com diâmetro interno de 28 mm, e porosidade 67% (algodão), e 75% (poliéster), sendo 2 filtros constituídos de fibras de algodão mercerizado - comprimento de leito 60 e 100 cm; e 2 filtros constituídos de fibras de poliéster - comprimento de leito 60 e 100 cm. Foi utilizada para alimentação dos filtros água sintética de turbidez $7,7 \pm 0,3$ uT, e cor aparente $97 \pm 5,0$ uC, e realizada coagulação in-line com 22,5mg/L e 15 mg/L (este último valor somente para os filtros de 100 cm) de sulfato de alumínio. Foram avaliadas taxas de filtração de 40, 60, 80, 100 e 120 m/h. Os limites de turbidez estabelecidos para o filtrado foram de 1 e 2 uT. Os filtros de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster de leito 60 cm só conseguiram atingir os limites de turbidez até taxa de 80 m/h. Os filtros de leito 100 cm atingiram os limites satisfatoriamente em todas as taxas de filtração. Os filtros de poliéster obtiveram carreiras de filtração mais longas do que as obtidas pelos filtros de algodão, além de apresentarem perdas de carga menores. Exceto para taxa 40 e 60 m/h para o filtro de algodão mercerizado, todas as outras taxas em ambos os filtros obtiveram desempenhos melhores (carreiras de filtração longas, e filtrado de melhor qualidade) com dosagem menor de coagulante. Esse estudo mostrou potencial no uso das fibras de algodão mercerizado e poliéster nos filtros de fibras flexíveis aplicados em tratamento de água para abastecimento. Sugere-se estudos avançados para aplicação no Brasil de tal tecnologia.

Palavras-chave: tratamento de água; filtração; filtro de fibras flexíveis; algodão mercerizado; poliéster.

ABSTRACT

FAGUNDES, T.S. (2015) Employment of flexible fiber filter made of mercerized cotton and polyester fibers in the clarification of drinking water. 2015. 214p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The flexible fiber filters are direct filtration modules which filter media is made of polyamide micro fibers, obtaining high solids removal efficiency, and high filtration rates. This study evaluated the performance of the filter using mercerized cotton and polyester fibers. Tests of fibers resistance due to alkaline, acid and chlorinated environments were realized at the present research. The fibers were also analyzed by means of Optic and Scanning Electronic Microscopy. Four field-scale filters with an internal diameter of 28mm, porosity of 67% (cotton), and 75% (polyester) were installed; two of them made of mercerized cotton fiber - high of 60 and 100 cm; and two made of polyester fiber - high of 60 and 100 cm. A synthetic water was used as influent - turbidity $7,7 \pm 0,3$ uT, and color $97 \pm 5,0$ uC. In-line coagulation was used with 22,5 mg/L and 15 mg/L (this last value was only applied on 100cm length filters) of aluminium sulfate. The filtration rates studied were 40, 60, 80, 100 e 120 m/h. The turbidity limits were 1 e 2 uT. The 60 cm high flexible fiber filter made of mercerized cotton and polyester only could work under the established turbidity limits until 80 m/h. The 100 cm high flexible fiber filter could work well in all the filtration rates. The flexible fiber filter made of polyester obtained longer filtration times, and lower pressure drop comparing to the flexible fiber filter made of mercerized cotton. Except for filtration rates of 40 e 60 m/h which mercerized cotton filter, in all the rates for both fiber filters, the lower coagulant dosage demonstrated better results - longer filtration times, and better quality in the effluent. This study indicated the potential of using flexible fiber filter made of mercerized cotton and polyester in water treatment. It is suggested advanced studies for this technology application in Brazil.

Keywords: drinking water treatment; filtration; flexible fiber filter; mercerized cotton, polyester.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Variação da perda de carga ao longo do comprimento de filtro, para diferentes tempos de operação, para filtro com ação superficial significativa. FONTE: DI BERNARDO e PREZOTTI (1991).	4
Figura 2-Variação da perda de carga ao longo do comprimento de filtro, para diferentes tempos de operação, para filtro com ação de profundidade. FONTE: DI BERNARDO E PREZOTTI (1991)	4
Figura 3-Eschema de filtro de fibras flexíveis. FONTE: Adaptado de Lee <i>et al</i> (2008a).....	9
Figura 4 - (a) Módulo industrial de um Filtro de Fibras Flexíveis, (b) Leito de fibras de poliamida . FONTE: MAUCHAUFFEE (2010)	9
Figura 5 - Configuração do filtro piloto de fibras flexíveis. FONTE: Adaptado de Lee <i>et al</i> (2006).....	10
Figura 6- Filtro utilizado na pesquisa. (1) Recipiente cilíndrico de aço inoxidável, (2) Fixação das fibras, (3) Tubo perfurado, (4) Câmara de distribuição. FONTE: Adaptado de Jeanmaire et al (2007).	11
Figura 7 - Turbidez efluente com variação das dosagens de PAC. FONTE: Adaptado de Lee <i>et al</i> (2008a).	13
Figura 8 - Variação da carreira de filtração e turbidez de acordo com taxa de filtração. FONTE: Adaptado de Lee <i>et al</i> (2008a).	13
Figura 9 - Intumescimento da fibra. FONTE: Alfieri (2010)	16
Figura 10 - Estrutura da fibra de algodão. FONTE: Alfieri (2010).....	17
Figura 11 - (a) Bass Boy; (b) Prensa compactadora ; (c) Armazenamento dos fardos; (d) Piranha ou Ricardão. FONTE: Embrapa (2003).	19
Figura 12 - Mercerizadeira em Malharia Brandili Ltda. FONTE: KUASNE (2008)	20
Figura 13 - Cortes transversais de fibras de algodão. FONTE: KUASNE, A. (2008)	20
Figura 14 - Solubilidade das fibras. FONTE: modificado de AATCC Technical Manual (2006)	24
Figura 15-Reservatórios de 15m ³ cada para armazenamento da água de estudo, nas dependências do LATAR.	26
Figura 16-Feixes de fios de poliéster e algodão para teste de resistência das fibras.	27
Figura 17-Feixes de fios nos meios citados.....	27
Figura 18-Disposição das amostras de fibras, e Microscópio Eletrônico de Varredura no IFSC/USP... ..	29
Figura 19-Proveta com fibras de poliéster.	30
Figura 20-Gráfico sobre a relação entre quantidade de fios e volume deslocado de água	31
Figura 21-Comparador colorimétrico de disco usado na pesquisa.....	34
Figura 22- Relação entre cor lidam no Colorímetro de disco e absorbância 495nm	35
Figura 23-Eschema geral do sistema de filtros e piezômetro.....	36
Figura 24-Entradas de água e ar para lavagem dos filtros.....	38
Figura 25 - Feixe de fibras de algodão cru	39
Figura 26- Fibras utilizadas na pesquisa na forma adquirida de fios de costura.	40
Figura 27- Sistema de filtros de fibras flexíveis, com fluxos de água coagulada e filtrada.....	41
Figura 28- Leito filtrante de fibras flexíveis em comprimento 0,6 metros.	41
Figura 29-Camada interna de areia na tubulação dos filtros.....	42
Figura 30- Feixe de fibra de poliéster.....	42
Figura 31- - Base do filtro pronta	42
Figura 32- Filtro de fibras flexíveis em escala piloto.....	44
Figura 33-Ângulos diferentes do piezômetro	49
Figura 34 - Detalhe das saídas de água filtrada e de lavagem	51
Figura 35-Coleta de água de lavagem.....	51

Figura 36- Distribuição dos diâmetros dos fios medidos por Microscopia Óptica.....	56
Figura 37 - Imagem de MEV de fio de algodão sem nenhum tratamento com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.....	58
Figura 38 - Imagem de MEV de fios de algodão após 3 meses imersas em água ácida, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.....	59
Figura 39 - Imagem de MEV de fio de algodão após 3 meses imersas em água alcalina, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.....	60
Figura 40 - Imagem de MEV de fio de algodão após 3 meses imersas em água da rede pública de abastecimento, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.	61
Figura 41 - Imagem de MEV de fio de poliéster sem nenhum tratamento, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.....	62
Figura 42 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 3 meses imersas em água ácida, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.....	63
Figura 43 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 3 meses imersas em água alcalina, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.....	64
Figura 44 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 3 meses imersas em água da rede pública de abastecimento, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.	65
Figura 45 – Feixe de fios de algodão após 7 meses de imersão em água ácida.....	66
Figura 46 - Imagem de MEV de fio de algodão após 7 meses imersas em água ácida, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.	67
Figura 47 - Imagem de MEV de fio de algodão (parte escurecida) após 7 meses imersas em água ácida, com aumento de (a) 1500 vezes; (b) 3000 vezes; (c) 5820 vezes.	68
Figura 48 - Imagem de MEV de fio de algodão após 7 meses imersas em água alcalina, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.....	69
Figura 49 - Imagem de MEV de fio de algodão após 7 meses imersas em água da rede pública de abastecimento, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.	70
Figura 50 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 7 meses imersas em água ácida, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.....	71
Figura 51 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 7 meses imersas em água alcalina, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.....	72
Figura 52 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 7 meses imersas em água da rede pública de abastecimento, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.	73
Figura 53- Relação entre número de fios e respectivas porosidades dos leitos filtrantes.....	75
Figura 54 - Diagrama de coagulação em valores de turbidez (uT)	80
Figura 55 - Diagrama de coagulação em valores de cor aparente (uC).....	80
Figura 56- Gráfico do potencial zeta versus pH de coagulação na filtração direta.	81
Figura 57 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 40 m/h.....	84
Figura 58- Perda de carga com filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1.....	84
Figura 59 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 40 m/h.....	85
Figura 60 - Perda de carga com filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1.....	86

Figura 61 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 40 m/h.....	87
Figura 62 - Perda de carga com filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1	87
Figura 63 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 40 m/h.....	88
Figura 64 - Perda de carga com filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1	89
Figura 65 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 60 m/h.....	90
Figura 66 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1	91
Figura 67 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 60 m/h.....	91
Figura 68 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1	92
Figura 69 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 60 m/h.....	93
Figura 70 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1	93
Figura 71 -Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 60 m/h.....	94
Figura 72 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1	95
Figura 73 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 80 m/h.....	96
Figura 74 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1	96
Figura 75 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 80 m/h.....	97
Figura 76 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1	98
Figura 77 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de poliéster 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 80 m/h.....	98
Figura 78 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1	99
Figura 79 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 80 m/h.....	99
Figura 80 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1	100
Figura 81 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 100 m/h.	101
Figura 82 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 1	102

Figura 83 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 100 m/h.....	102
Figura 84 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 1.....	103
Figura 85 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 120 m/h.....	104
Figura 86 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 1.....	105
Figura 87 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 120 m/h.....	105
Figura 88 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 1.....	106
Figura 89-Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 40 m/h.....	110
Figura 90 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1.....	111
Figura 91 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 40 m/h.....	112
Figura 92 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1.....	113
Figura 93 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 60 m/h.....	114
Figura 94 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1.....	114
Figura 95 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 60 m/h.....	115
Figura 96 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1.....	116
Figura 97 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 80 m/h.....	117
Figura 98 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1.....	117
Figura 99 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 80 m/h.....	118
Figura 100 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1.....	119
Figura 101 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 100 m/h.....	120
Figura 102 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 1.....	120
Figura 103 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 100 m/h.....	121
Figura 104 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 1.....	122

Figura 105 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 120 m/h.....	123
Figura 106 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 1	123
Figura 107 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 120 m/h.....	124
Figura 108 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 1	125
Figura 109- Turbidez e cor aparente residuais da repetição da bateria de ensaios de DSA = 22,5 mg/L, taxa: 40 m/h	144
Figura 110- Leitos filtrantes sujos e limpos	146
Figura 111 - Leito filtrante de fibras de poliéster após filtração.....	146
Figura 112 - Leito filtrante de fibras de poliéster aberto	146
Figura 113 - Leito filtrante de fibras de algodão aberto	147
Figura 114 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de algodão 100cm após ensaio de filtração com aumento de 600 vezes	148
Figura 115 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de algodão 100cm após ensaio de filtração com aumento de 1500 vezes	148
Figura 116 - MEV do segundo terço de filtro de fibras de algodão 100cm após ensaio de filtração com aumento de 6000 vezes	149
Figura 117 - MEV do segundo terço de filtro de fibras de algodão 100cm após ensaio de filtração com aumento de 3000 vezes	149
Figura 118 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após ensaio de filtração com aumento de 3000 vezes	150
Figura 119 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após ensaio de filtração com aumento de 6000 vezes	150
Figura 120 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após ensaio de filtração com aumento de 15000 vezes	151
Figura 121 - MEV do segundo terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após ensaio de filtração com aumento de 6000 vezes	151
Figura 122 - MEV do segundo terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após ensaio de filtração com aumento de 3000 vezes	152
Figura 123 - Leitos filtrantes após lavagem.....	153
Figura 124 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de algodão 100cm após lavagem com aumento de 6000 vezes.....	154
Figura 125 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de algodão 100cm após lavagem com aumento de 600 vezes.....	154
Figura 126 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após lavagem com aumento de 1500 vezes.....	154
Figura 127 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após lavagem com aumento de 600 vezes.....	155
Figura 128 - Exemplo de evolução da turbidez residual nos testes dos modos de lavagem.....	156
Figura 129 - Pedacos de fibrilas de poliéster retidas nas membranas de sólidos suspensos totais. ...	158
Figura 130 - Água coagulada, água filtrada e água de lavagem, respectivamente, para filtro de fibras de algodão.....	160

Figura 131 - Turbidez residual no filtro de fibras de algodão 100 cm no último ensaio	161
Figura 132 - Cor residual no filtro de fibras de algodão 100 cm no último ensaio	161
Figura 133 - Turbidez residual no filtro de fibras de poliéster 100 cm no último ensaio	163
Figura 134 - Cor residual no filtro de fibras de poliéster 100 cm no último ensaio	164
Figura 135 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 2.....	174
Figura 136 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 3.....	174
Figura 137 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 2.....	175
Figura 138 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 3.....	175
Figura 139 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 2.....	176
Figura 140 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 3.....	176
Figura 141 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 2.....	177
Figura 142 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 3.....	177
Figura 143 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 2.....	178
Figura 144 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 3.....	178
Figura 145 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 2.....	179
Figura 146 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 3.....	179
Figura 147 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 2.....	180
Figura 148 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 3.....	180
Figura 149 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 2.....	181
Figura 150 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 3.....	181
Figura 151 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 2.....	182
Figura 152 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 3.....	182
Figura 153 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 2.....	183
Figura 154 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 3.....	183

Figura 155 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h;	
Ensaio 2	184
Figura 156 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h;	
Ensaio 3	184
Figura 157 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h;	
Ensaio 2	185
Figura 158 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h;	
Ensaio 3	185
Figura 159 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h;	
Ensaio 2	186
Figura 160 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h;	
Ensaio 3	186
Figura 161 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h;	
Ensaio 2	187
Figura 162 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h;	
Ensaio 3	187
Figura 163 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h;	
Ensaio 2	188
Figura 164 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h;	
Ensaio 3	188
Figura 165 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h;	
Ensaio 2	189
Figura 166 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h;	
Ensaio 3	189
Figura 167 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h;	
Ensaio 2	190
Figura 168 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h;	
Ensaio 3	190
Figura 169 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h;	
Ensaio 2	191
Figura 170 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h;	
Ensaio 3	191
Figura 171 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h;	
Ensaio 2	192
Figura 172 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h;	
Ensaio 3	192
Figura 173 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h;	
Ensaio 2	193
Figura 174 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h;	
Ensaio 3	193
Figura 175 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h;	
Ensaio 2	194
Figura 176 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h;	
Ensaio 3	194

Figura 177 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 2.....	195
Figura 178 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 3.....	195
Figura 179 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 2.....	196
Figura 180 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 3.....	196
Figura 181 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 2.....	197
Figura 182 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 3.....	197
Figura 183 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 2.....	198
Figura 184 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 3.....	198
Figura 185 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 2.....	199
Figura 186 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 3.....	199
Figura 187 - Valores de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de poliéster - Modo 1.	200
Figura 188 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de poliéster - Modo 2	201
Figura 189 - Variação de turbidez no ensaio 1 de lavagem em filtro de fibras de poliéster - Modo 3	201
Figura 190 - Variação de turbidez no ensaio 2 de lavagem em filtro de fibras de poliéster - Modo 3	202
Figura 191 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de poliéster - Modo 4	202
Figura 192 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 1	203
Figura 193 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 2	204
Figura 194 - Variação de turbidez no ensaio 1 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 3	204
Figura 195 - Variação de turbidez no ensaio 2 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 3	205
Figura 196 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 4	205
Figura 197 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 5	206
Figura 198 - Variação de turbidez no ensaio 1 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 6	206
Figura 199 - Variação de turbidez no ensaio 2 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 6	207
Figura 200 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 7	207
Figura 201 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 8	208
Figura 202 - Variação de turbidez no ensaio 1 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 9	208
Figura 203 - Variação de turbidez no ensaio 2 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 9	209
Figura 204 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 10	209

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Grade de ensaios executada na pesquisa.	45
Tabela 2-Monitoramento realizado na pesquisa.	47
Tabela 3- Grade dos métodos de lavagem testados.....	54
Tabela 4 - Diâmetros dos fios estudados.	56
Tabela 5- Perda de massa dos fios após 3 meses de imersão.....	57
Tabela 6 - Perda de massa os fios após 7 meses de imersão.....	66
Tabela 7-Dados para cálculo da porosidade dos filtros	74
Tabela 8- Porosidade calculada pelo Método do Volume Deslocado.....	75
Tabela 9-Área transversal e porosidade dos filtros.	76
Tabela 10-Porosidade pela concentração mássica.	77
Tabela 11-Superfície de contato dos filtros.	77
Tabela 12 - Número de Reynolds	79
Tabela 13- Caracterização água bruta para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h.....	83
Tabela 14 - Caracterização água coagulada para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h	83
Tabela 15 - Caracterização água bruta para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 60 m/h....	89
Tabela 16 - Caracterização água coagulada para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 60 m/h	90
Tabela 17 - Caracterização água bruta para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 80 m/h....	95
Tabela 18 - Caracterização água coagulada para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 80 m/h	95
Tabela 19 - Caracterização água bruta para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 100 m/h	101
Tabela 20 - Caracterização água coagulada para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 100 m/h.....	101
Tabela 21 - Caracterização água bruta para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 120 m/h	103
Tabela 22 - Caracterização água coagulada para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 120 m/h.....	104
Tabela 23 - Amostras compostas com carreira de filtração encerrada em turbidez 1 uT	107
Tabela 24 - Amostras compostas com carreira de filtração encerrada em turbidez 2 uT	108
Tabela 25 - Caracterização água bruta para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h.....	110
Tabela 26 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h	110
Tabela 27 - Caracterização água bruta para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 60 m/h.....	113
Tabela 28 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 60 m/h	113
Tabela 29 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 80 m/h	116
Tabela 30 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 80 m/h	116
Tabela 31 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 100 m/h	119
Tabela 32 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 100 m/h	119

Tabela 33 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 120 m/h	122
Tabela 34 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 120 m/h	122
Tabela 35 - Amostras compostas para DSA 15mg/L com carreira de filtração encerrada em turbidez 1 uT	126
Tabela 36 - Amostras compostas para DSA 15mg/L com carreira de filtração encerrada em turbidez 2 uT	127
Tabela 37 - Carreiras de filtração e volumes filtrados para DSA 22,5 mg/L, e limite de turbidez 0,5 uT	129
Tabela 38 - Carreiras de filtração e volumes filtrados para DSA 22,5 mg/L, e limite de turbidez 1,0 uT	130
Tabela 39 - Carreiras de filtração e volumes filtrados para DSA 15 mg/L, e limite de turbidez 0,5 uT	131
Tabela 40 - Carreiras de filtração e volumes filtrados para DSA 15 mg/L, e limite de turbidez 1,0 uT	132
Tabela 41 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5mg/L	133
Tabela 42 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5mg/L.....	134
Tabela 43 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5mg/L	135
Tabela 44 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5mg/L.....	135
Tabela 45 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15mg/L	136
Tabela 46 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15mg/L	137
Tabela 47 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5mg/L ..	139
Tabela 48 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5mg/L	140
Tabela 49 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de poliéster 60cm; DSA: 22,5mg/L.	140
Tabela 50 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5mg/L	141
Tabela 51 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15mg/L ...	142
Tabela 52 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15mg/L..	143
Tabela 53 - Caracterização água bruta para repetição do ensaio de dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h.....	144
Tabela 54 - Caracterização água coagulada para repetição do ensaio de dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h.....	144
Tabela 55 - Resultado dos testes de lavagem no filtro de fibras de poliéster 100 cm.....	157
Tabela 56 - Resultado dos testes de lavagem no filtro de fibras de algodão 100 cm	158
Tabela 57 - Resultados das análises das amostras compostas para filtro de fibras de algodão 100 cm	162
Tabela 58 - Perda de carga inicial no filtro de fibras de algodão 100 cm.....	162
Tabela 59 - Carreiras de filtração no filtro de fibras de algodão (min)	162

Tabela 60 - Resultados das análises das amostras compostas para filtro de fibras de poliéster 100 cm	164
Tabela 61 - Perda de carga inicial no filtro de fibras de poliéster 100 cm	164
Tabela 62 - Carreiras de filtração no filtro de fibras de poliéster (min)	165

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FFF ou 3F	Filtro de fibras flexíveis
IFSC	Instituto de Física de São Carlos
IFF	Índice de Funcionamento do Filtro
IFI	Índice de Filtrabilidade de Ives
LATAR	Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PAC	Cloreto de polialumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
SHS	Departamento de Hidráulica e Saneamento
USP	Universidade de São Paulo
WAC HB	Clorossulfato de alumínio altamente básico

LISTA DE SÍMBOLOS

AATCC	American Association of Textile Chemists and Colorists.
$\text{Área}_{\text{tfios}}$	Área da seção transversal total dos fios
$\text{Área}_{\text{filtro}}$	Área da seção transversal do filtro
Abs	Absorbância
t	Duração da carreira de filtração ou tempo considerado
λ	Eficiência da filtração
H_f	Perda de carga no instante considerado
T_{afl}	Valor médio da turbidez do afluente
T_{efl}	Valor médio da turbidez do efluente
V_{apr}	Velocidade de aproximação ou taxa de aplicação
SDI_{10}	<i>silty density index</i>
HCl	Ácido clorídrico
NaOH	Hidróxido de sódio
d_{fio}	Diâmetro médio dos fios
S_{fio}	Superfície de contato de 1 fio
S_{total}	Superfície de contato de todo o leito filtrante
DSA	Dosagem de sulfato de alumínio
$Q_{\text{bomba dosadora}}$	Vazão ajustada na bomba dosadora
Q_{filtron}	Vazão de alimentação de cada um dos 4 filtros (n varia de 1 a 4)
$C_{\text{solução}}$	Concentração da solução mãe de coagulante
SST	Sólidos Suspensos Totais
C_{SR}	Concentração de sólidos suspensos totais retidos no filtro
C_{SC}	Concentração de sólidos suspensos totais na água coagulada
C_{SF}	Concentração de sólidos suspensos totais na água filtrada
C_{SL}	Concentração de sólidos suspensos totais na água de lavagem
m_{SR}	Massa de sólidos suspensos totais retidos no filtro
m_{SL}	Massa de sólidos suspensos totais na água de lavagem
V_{AL}	Volume de água utilizado no processo de lavagem
E_L	Eficiência do processo de lavagem.
P (%)	Porcentagem da água usada na lavagem
n	Número de fios no leito filtrante
D	Diâmetro do filtro
Rey	Número de Reynolds
γ	Viscosidade cinemática (m^2/s)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivo geral.....	2
2.2 Objetivos específicos:	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Filtração – considerações iniciais	3
3.1.1 Filtração por ação de profundidade e superficial.....	3
3.1.2 Carreira de filtração	5
3.1.3 Fatores que influenciam o processo de filtração.....	5
3.1.4 Índices de filtrabilidade	6
3.2 Filtros de Fibras Flexíveis	7
3.2.1. Estudos envolvendo Filtro de Fibras Flexíveis.....	9
3.3 Lavagem dos Filtros de Fibras Flexíveis	14
3.4 Fibras têxteis	15
3.4.1 Celulose	16
3.4.2 Fibras de algodão.....	17
3.4.3 Fibras de Poliéster	22
4. MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 Considerações iniciais	25
4.2 Água de estudo	25
4.3 Etapa I: Caracterização das fibras de algodão mercerizado e poliéster	26
4.3.1 Testes de resistência das fibras a meios agressivos	26
4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	28
4.3.3 Microscopia Óptica.....	29
4.3.4. Cálculo da porosidade dos filtros	29
4.3.5 Cálculo da superfície de contato de cada filtro.....	33
4.4. Etapa II: Ensaios para obtenção dos parâmetros de coagulação	33
4.4.1 Relação cor e absorbância 495nm	34
4.5 Etapa III: Ensaios de filtração direta em filtros de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster.	35
4.5.1 Instalação piloto.....	35
4.5.2 Planejamento dos ensaios	45
4.5.3 Monitoramento dos ensaios	47

4.6 Estabelecimento de protocolo adequado para lavagem do leite de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster	50
4.7 Avaliação do desempenho dos filtros de fibras flexíveis	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1 Etapa I - Caracterização das fibras de algodão mercerizado e poliéster	56
5.1.1 Microscopia Óptica	56
5.1.2 Testes de resistência das fibras a meios agressivos	57
5.1.3 Cálculo da porosidade do filtro de fibras flexíveis	74
5.1.4 Cálculo da superfície de contato de cada filtro	77
5.1.5 Cálculo do número de Reynolds	78
5.2 Etapa II: Ensaios para obtenção dos parâmetros de coagulação	79
Também foi avaliado potencial zeta de cada par dosagem de coagulante e pH de coagulação, resultados estes expresso na Figura 56. Nota-se que as concentrações de 10 e 20 mg/L obtiveram potencial zeta próximo de zero para pH entre 6,3 e 6,5. Com linhas de tendência entre os pontos de mesma concentração nota-se que a faixa de pH cujo potencial zeta se aproxima do zero é de 6,3 a 6,5, faixa esta mantida nos ensaios de filtração direta da Etapa III.	
82	
5.3 Etapa III: Ensaios de filtração direta em filtros de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster	82
5.3.1 Parte 1: Filtração com filtros de fibras flexíveis, aplicando-se 22,5 mg/L de sulfato de alumínio	83
5.3.2 Parte 2: filtração com filtros de fibras flexíveis, aplicando-se 15 mg/L de sulfato de alumínio	109
5.3.3 Comparação dos resultados das baterias de ensaios de filtração direta dos filtros de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster	128
5.4 Etapa IV: Estabelecimento de protocolo adequado para lavagem do leite de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster	155
5.4.1 Filtro de fibras flexíveis de poliéster	157
5.4.2 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado	158
5.5 Ensaio final para verificação da repetibilidade da carreira de filtração após protocolo de lavagem estabelecido na etapa IV	160
5.5.1 Filtro de fibras de algodão mercerizado	160
5.5.2 Filtro de fibras de poliéster	163
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	166
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	170
ANEXOS	174

1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico vem avançando no Brasil nos últimos anos com a ampliação das redes de distribuição de água, coleta e tratamento de esgoto, obras de macrodrenagem urbana e disposição de resíduos sólidos. Porém, muito ainda há de ser feito a fim de que toda a população brasileira tenha acesso a todos esses serviços.

A crescente demanda por água está gerando consequências negativas para a qualidade desta distribuída à população, visto que as Estações de Tratamento de Água muitas vezes são mal operadas e/ou projetadas, não suportando satisfatoriamente o aumento da demanda.

O tratamento de água convencional – coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção – está começando a ser adaptado aos custos e tecnologias disponíveis em cada localidade. Tecnologias consolidadas como alternativa a esse modelo de tratamento já estão em uso no Brasil e no mundo, como flotação por ar dissolvido, dupla filtração, filtração direta ascendente ou descendente, e filtração por múltiplas etapas.

Um estudo recente realizado na Coreia do Sul trouxe uma outra alternativa ao tratamento de água, efluentes domésticos e industriais – o Filtro de Fibras Flexíveis. Usado no país inicialmente para tratamento terciário de esgoto doméstico, possui diversas aplicações: remoção de algas nos reservatórios e nos lagos, pré-tratamento para osmose reversa para dessalinização de água marinha, tratamento de água para reúso, e tratamento de água com aplicação de coagulante – filtração direta. (LEE *et al*, 2006).

Os filtros de Fibras Flexíveis utilizados na Coreia do Sul são constituídos de microfibras unifilar de náilon, o que permite altas eficiências de remoções de sólidos devido a alta superfície de contato. Pesquisas utilizando os Filtros de Fibras Flexíveis para clarificação de água de abastecimento e residuárias já estão sendo desenvolvidas na EESC/USP, iniciadas por MORITA (2013), a qual avaliou fibras unifilares de sisal e polipropileno como meio

filtrante. Nessa linha, o presente estudo surgiu no intuito de avaliar o uso de fios multifilares de algodão mercerizado e de poliéster nos Filtros de Fibras Flexíveis na clarificação de água para abastecimento.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho na clarificação de água para abastecimento público dos Filtros de Fibras Flexíveis constituídos de fios multifilares de algodão mercerizado e de poliéster.

2.2 Objetivos específicos:

Avaliar a influência das taxas de filtração na clarificação de água para abastecimento através de Filtros de Fibras Flexíveis estudados;

Avaliar a influência do comprimento do leito do filtro na clarificação de água para abastecimento através de Filtros de Fibras Flexíveis;

Comparar a eficiência do tipo de fibra (algodão mercerizado e poliéster) como meio filtrante nos Filtros de Fibras Flexíveis na clarificação da água de estudo para abastecimento através de Filtros de Fibras Flexíveis;

Avaliar um protocolo de lavagem eficiente para os Filtros de Fibras Flexíveis do presente projeto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Filtração – considerações iniciais

A filtração de águas para abastecimento é um dos processos finais de remoção física das impurezas da água no tratamento desta. Arboleda (1973) cita diferentes formas do processo de filtração em meio granular: com baixa carga superficial (filtros lentos) ou com alta carga superficial (filtros rápidos); com fluxo ascendente ou descendente; operados a pressão ou por gravidade. A filtração rápida em meio granular é a técnica comumente usada em Estações de Tratamento de Água de ciclo completo, com taxas de filtração na faixa de 120 a 600 m³/m²d, gerando uma economia de área em relação aos filtros lentos, cujas taxas variam de 2 a 6 m³/m²d. Outras configurações econômicas neste quesito também se encontram em campo, como a filtração direta, onde os floculadores são dispensados e a água coagulada segue direto para os filtros.

3.1.1 Filtração por ação de profundidade e superficial

A filtração pode se dar por ação de profundidade – onde as impurezas são retidas ao longo do meio filtrante; ou por ação superficial – onde a retenção acontece substancialmente no começo do meio filtrante (DI BERNARDO e SABOGAL-PAZ, 2009).

As figuras 1 e 2 mostram as curvas de perda de carga para diferentes tempos de operação de dois filtros piloto com meio filtrante granular (DI BERNARDO e PREZOTTI, 1991). Tais curvas representam o caminhamento da frente de impurezas ao longo do meio filtrante.

Figura 1-Varição da perda de carga ao longo do comprimento de filtro, para diferentes tempos de operação, para filtro com ação superficial significativa. FONTE: DI BERNARDO e PREZOTTI (1991).

Figura 2-Varição da perda de carga ao longo do comprimento de filtro, para diferentes tempos de operação, para filtro com ação de profundidade. FONTE: DI BERNARDO E PREZOTTI (1991)

Como pode ser observado na Figura 1, a retenção de impurezas ocorreu nos primeiros 0,15 m da camada filtrante, caracterizando a ação superficial. A Figura 2, no entanto, mostra penetração de impurezas até 0,8 m de profundidade, caracterizando ação de profundidade.

A filtração com ação de profundidade é o resultado de estágios sequenciais relativos à colmatagem das subcamadas que compõem o meio filtrante. A primeira subcamada retém partículas até um momento em que as forças de cisalhamento superam as forças que mantêm as partículas aderidas aos grãos do meio filtrante, arrastando-as para a subcamada subsequente, e assim por diante, até que todas as subcamadas sejam saturadas (DI BERNARDO e SABOGAL-PAZ, 2009).

3.1.2 Carreira de filtração

A carreira de filtração é definida como o tempo de início de operação e o momento da retirada do filtro para lavagem. Sua interrupção ocorre por dois motivos: i) transpasse da turbidez limite, imposta por normas; ii) igualdade entre perda de carga e carga hidráulica disponível. O ideal é que o início do transpasse e a perda de carga limite no meio filtrante ocorram simultaneamente.

Segundo DI BERNARDO e SABOGAL-PAZ (2009), a carreira de filtração também pode ser dividida em três etapas: i) etapa inicial, quando a água filtrada pode apresentar qualidade insatisfatória, creditada principalmente à lavagem; ii) etapa intermediária, durante a qual há produção de água com qualidade desejável; e iii) etapa do transpasse, caracterizada pelo aumento contínuo da turbidez da água filtrada. O estudo do amadurecimento do filtro - fase em que a água inicial efluente deste possui frações remanescentes de partículas decorrentes da lavagem – estima o tempo para que a água filtrada seja de qualidade desejável.

3.1.3 Fatores que influenciam o processo de filtração

Arboleda (1973) destaca alguns fatores de importância na filtração:

a) Tipo de meio filtrante

A forma do material filtrante influencia tanto o aspecto hidráulico - perda de carga inicial, como a relação superfície e volume. Por esse motivo, a eficiência de filtração (λ) é assumida como inversamente proporcional ao diâmetro (d) das partículas, como descrito na equação 1:

$$\lambda \propto \frac{1}{d^n} \quad \text{Equação 1}$$

em que n varia de 1 a 3, segundo Arboleda (1973).

Outras características relativas ao meio filtrante são citadas no item 3.1.4.

b) Taxa de filtração

A taxa de filtração (v) é inversamente proporcional à eficiência de filtração (λ):

$$\lambda \propto \frac{1}{v^n} \quad \text{Equação 2}$$

em que n varia de 0,7 a 1, segundo Arboleda (1973).

c) Tipo de suspensão

As características físicas e químicas da suspensão possuem grande influência no desempenho dos filtros. Dentre as características físicas, destacam-se o volume, densidade e tamanho dos flocos, os quais influem no tempo de evolução da perda de carga nos filtros, já que interferem no preenchimento dos poros do meio filtrante, e na adesividade dos flocos, e consequentemente na resistência destes ao desprendimento. Dentre as características químicas, destacam-se o pH e o potencial zeta, que interferem nas forças de atração ou repulsão entre as partículas e o meio filtrante.

d) Temperatura

A temperatura interfere nos mecanismos físicos e químicos da suspensão, influenciando na evolução da perda de carga ou remoção dos flocos.

3.1.4 Índices de filtrabilidade

Em razão da complexidade de serem analisados todos os fatores intervenientes na filtração, foram propostos índices por diferentes pesquisadores, com o fim de quantificar a filtrabilidade de uma suspensão em um determinado meio filtrante.

Gamet e Rademacher (1959 *apud* ARBOLEDA, 1973) propuseram o Índice de Funcionamento do Filtro (IFF), visto na equação 3:

$$\text{IFF} = \frac{v \cdot t}{\Delta P} \quad \text{Equação 3}$$

em que v é a velocidade ou taxa de filtração (m/h) , t é a duração da carreira de filtração (h) e ΔP é a perda de carga no final da carreira de filtração (mH₂O).

Porém, tal índice não considera a turbidez no efluente, como é o caso do Índice de filtrabilidade de Ives (1978 *apud* DIBERNARDO e DANTAS, 2005), definido pela equação 4:

$$IFI = \frac{H_f T_{efl}}{T_{afl} \cdot t \cdot V_{apr}} \quad \text{Equação 4}$$

H_f : perda de carga no instante considerado (cm)

t : tempo considerado (min)

T_{afl} : valor médio da turbidez do afluente (uT)

T_{efl} : valor médio da turbidez do efluente (uT)

V_{apr} : velocidade de aproximação ou taxa de aplicação (cm/min)

Segundo Ives (1978 *apud* DI BERNARDO E DANTAS, 2005), quanto menor o valor de IFI, maior será a eficiência da filtração, já que são desejáveis baixos valores de H_f e T_{efl}

3.2 Filtros de Fibras Flexíveis

Uma tecnologia já estabelecida na Coréia do Sul, o Filtro de Fibras Flexíveis (FFF ou 3F) é amplamente utilizado em tratamento terciário de efluentes domésticos em indústrias e Estações de Tratamento de Esgoto do país - cerca de 2 milhões de metros cúbicos diários (Lee *et al*, 2006).

IVES, K. J. A new concept of filterability. Prog. Wat. Tech., v.78, n. 5/6, p. 123-137, 1978.

Gamet, M. B., and J. M. Rademacher. "Measuring filter performance." *Water Works Engineering* 112 (1959): 117-118.

O tipo de leito utilizado no filtro de fibras flexíveis combina grandes superfícies específicas e altas porosidades (da ordem de 90%), atingindo altas eficiências de remoção e baixas perdas de carga, apesar do emprego de altas taxas de filtração, segundo Lee *et al.* (2006).

Sendo um processo de filtração direta e de alta taxa, o FFF demonstra várias vantagens em relação aos filtros convencionais de areia: menor área de construção, menores dosagens de coagulante - já que não são necessários flocos grandes, menor tempo de detenção hidráulica, cerca de 100 vezes menor que o sistema convencional de floculação + sedimentação; uso de taxas de filtração 20 vezes mais altas.

Basicamente, o filtro de fibras flexíveis consiste em um recipiente preenchido por fibras, as quais são empacotadas ao longo do seu comprimento, dispostas longitudinalmente e na mesma direção do fluxo. No caso coreano, as fibras são de poliamida (náilon) e possuem cerca de 30 μ m de diâmetro, estão presas na parte inferior do filtro (entrada) e soltas na parte superior (saída). O escoamento deste tipo de filtro é ascendente, assim como sua lavagem. O fluxo de água passa por toda a extensão do filtro, fazendo com que a filtração seja por ação de profundidade. Um esquema da configuração usada atualmente na Coreia do Sul é mostrado na Figura 3.

Figura 3-Esquema de filtro de fibras flexíveis. FONTE: Adaptado de Lee *et al* (2008a)

Os tipos de filtro comercializados por empresas coreanas e europeias possuem diâmetro, altura de leito, porosidade e comprimento de acordo com a qualidade do efluente requerida, bem como da qualidade do afluente.

Figura 4 - (a) Módulo industrial de um Filtro de Fibras Flexíveis, (b) Leito de fibras de poliamida . FONTE: MAUCHAUFFEE (2010)

3.2.1. Estudos envolvendo Filtro de Fibras Flexíveis

Lee, *et al* (2006) utilizou Filtro de Fibras Flexíveis para tratar água fluvial utilizando coagulação in-line. O filtro, em escala piloto, possuía diâmetro de 114 mm, altura de 1500 mm, fibras de náilon de 30 micrômetros, e porosidade de 93%, e pode ser observado na Figura 5. A turbidez da água afluente era entre 8 e 11,5 NTU, e concentração de clorofila-a de 25µg/L. As

taxas estudadas foram 80, 120 e 150 m/h, e os coagulantes utilizados foram sulfato de alumínio, PAC, e polissulfato orgânico de magnésio e alumínio, dosagens de 0 a 20 mg/L. A lavagem do filtro era realizada com aplicações alternadas de água e ar, variando de 3 a 4 minutos. O estudo concluiu que dosagens menores (1 mg/L) dos coagulantes poliméricos obtiveram carreiras de filtração mais longas. A taxa de 120 m/h foi considerada taxa ótima para esta configuração de filtro, e para 1 mg/L de PAC. Com estes dois parâmetros, as carreiras de filtração foram capazes de manter um efluente com 0,5 NTU de turbidez, com carreiras de filtração de 35 minutos para 120 m/h, e 45 minutos para 80 m/h.

Figura 5 - Configuração do filtro piloto de fibras flexíveis. FONTE: Adaptado de Lee *et al* (2006).

Lee *et al* (2007) estudaram a eficiência do FFF, variando comprimento do leito – 400, 600, 800 e 1000mm, densidade de empacotamento - 50, 65 e 80 kg/m³ (relacionada diretamente com a porosidade), e taxa de filtração - 20, 40 e 80 m/h. Foi utilizada água sintética de turbidez 20 uT, fibras de poliamida de 30 µm de diâmetro, e fluxo ascendente. Os autores concluíram que a taxa de filtração teve maior influência nas remoções de turbidez dentre os parâmetros testados: quanto maior a taxa, menor a eficiência de remoção e maior a perda de carga. Para taxas de filtração 20 e 40 m/h, partículas menores que 5 µm foram retidas. Verificou-se também

que quanto maior a densidade de empacotamento (menor porosidade), maior era a remoção de partículas e mais rapidamente se dava a perda de carga. Tais comportamentos são similares aos filtros de material granular. Os autores ainda observaram que mesmo a zona de entrada retendo a maior parte das partículas, estas ainda eram encontradas na parte superior do filtro, o que mostra maior ação de profundidade no processo de filtração utilizando FFF do que em filtros convencionais de areia.

JEANMAIRE, et al (2007) estudaram uso do Filtro de Fibras Flexíveis para filtração de água do mar (turbidez entre 0,5 e 5 NTU), objetivando obter efluente com turbidez 0,1 NTU, e poucas partículas de tamanho maior que $5\mu\text{m}$. O filtro utilizado possuía diâmetro 200 mm, altura de 1200mm, porosidade de 49%, e era constituído de fibras de poliamida. Neste artigo, o filtro possuía tubo perfurado no seu interior para coletar a água filtrada, e assim aproveitar toda a superfície de contato das fibras do filtro, como mostra Figura 6.

Figura 6- Filtro utilizado na pesquisa. (1) Recipiente cilíndrico de aço inoxidável, (2) Fixação das fibras, (3) Tubo perfurado, (4) Câmara de distribuição. FONTE: Adaptado de Jeanmaire et al (2007).

As taxas testadas foram de 50 a 200 m/h, com coagulantes Cloreto Férrico e WAC HB (clorossulfato de alumínio altamente básico). Os autores concluíram: para afluentes com 1 NTU, taxa de 100 m/h, 5 ppm de Cloreto Férrico ou WAC HB, pode-se utilizar o 3F para remoção de 98% de partículas maiores que 5 μm ; para afluentes com 4-5 NTU, taxa de 100 m/h, utilizando 5 a 10 ppm de coagulante, a remoção foi de 93% de partículas maiores que 5 μm .

É notável a influência da turbidez do afluente, da velocidade de filtração e dosagem de coagulante na qualidade do efluente, e na duração da carreira de filtração. Afluentes com turbidez de 0,5 a 5 NTU tiveram carreiras de filtração de 1 a 10 horas, todos avaliados na taxa de 100 m/h. Neste estudo, o período de amadurecimento do filtro foi de 10 a 15 minutos. A lavagem era realizada com aplicações alternadas de ar e água.

Lee *et al* (2008a) trataram água fluvial na Coreia do Sul em Filtro de Fibras Flexíveis, de diâmetro 650 mm, comprimento de leito de 1500 mm, fibras de náilon de diâmetro 30 micrometros, e porosidade do leito filtrante de 93%. Neste estudo foi adotado configuração do filtro mostrado na Figura 3, com movimento da água radial, e coleta da água filtrada através de um tubo perfurado no interior das fibras. A turbidez afluente estava entre 6,5 e 11,5 uT, e foi estabelecido limite de turbidez no efluente igual a 1 uT. Foi utilizado coagulação in-line com PAC (11% DE Al_2O_3). Os autores variaram as dosagens de PAC de 1 a 3 mg/L, fixando taxa de filtração de 80m/h, e turbidez como parâmetro de monitoramento para tal etapa do estudo, como visto na Figura 7.

Figura 7 - Turbidez efluente com variação das dosagens de PAC. FONTE: Adaptado de Lee *et al* (2008a).

Os autores também testaram a influência das taxas de filtração na eficiência de remoção de turbidez e duração da carreira de filtração, como observados na Figura 8.

Figura 8 - Variação da carreira de filtração e turbidez de acordo com taxa de filtração. FONTE: Adaptado de Lee *et al* (2008a).

Com dosagem de 1 mg/L de PAC, os autores alcançaram carreiras de filtração de 180 minutos para taxa de filtração de 60 m/h, e 50 minutos para taxa de filtração de 100 m/h, com remoções de sólidos suspensos da ordem de 90%. Com este estudo, foi possível concluir que os processos de coagulação, floculação e sedimentação podem ser substituídos pelo sistema 3F, com tempos de detenção hidráulica e dosagens muito mais baixas que o sistema convencional.

Lee, *et al* (2010) usou o Filtro de Fibras como pré-tratamento para osmose reversa de água marinha. O filtro possuía comprimento de leito de 1000 mm, diâmetro de 30mm, e densidade de empacotamento de 115 e 105 kg/m³. A turbidez do afluente testada foi de 0,5 a 3

NTU, e pH cerca de 8. A coagulação era in-line com cloreto férrico (1 mg/L); e as taxas de filtração testadas foram 40 e 60 m/h. Os autores concluíram, a partir de remoções de SDI₁₀, de distribuição de peso molecular, turbidez, e perda de carga, que o Filtro de fibras pode ser usado como pré-tratamento para osmose reserva, removendo moléculas da ordem de até 730 a 960 Da.

MORITA (2013) também estudou o Filtro de Fibras Flexíveis com fibras de polipropileno e sisal para clarificação de água para abastecimento, com água sintética de turbidez aproximadamente 8 uT. Os filtros estudados pela autora possuíam diâmetro de 28 mm, comprimento de leito de 250, 600 e 1000 mm, e porosidade de 93 e 85%. O coagulante aplicado in-line foi o sulfato de alumínio, e as taxas estudadas variaram de filtro a filtro numa faixa de 5 a 80m/h. A autora concluiu que ambos os filtros atingiram resultados esperados (efluente com turbidez menor que 1 uT), dependendo da configuração. Os filtros constituídos de sisal somente alcançaram os resultados esperados com comprimento de leito de 1000 mm, porosidade de 85% e taxas de até 40 m/h. Já os filtros constituídos de polipropileno, e porosidade de 93% alcançaram os resultados esperados para todos os comprimentos estudados com taxa de 20 m/h, e para os comprimentos de 600 e 1000 mm para o caso da aplicação de taxas de 40 e 80 m/h. MORITA (2013) também avaliou os índices de filtrabilidade (IFF e IFI) – mencionados anteriormente, os quais foram mais promissores para o filtro de sisal 1000 mm, porosidade 85%. Já analisando a porcentagem de água utilizada na lavagem, o desempenho mais vantajoso foi aquele do polipropileno 1000 mm, porosidade 93%.

3.3 Lavagem dos Filtros de Fibras Flexíveis

Como dito anteriormente, quando atingida a turbidez limite, ou igualada a perda de carga com a carga hidráulica disponível, o filtro deve ser paralisado para lavagem. As pesquisas envolvendo os Filtros de Fibras Flexíveis utilizam injeção de ar e água alternados e em sequência, o que possibilita a recuperação da capacidade de retenção do filtro.

Lee *et al.* (2008b) testaram diferentes tempos de aplicação de ar e sequências de ar/água na lavagem dos filtros de fibras flexíveis, e concluíram que a injeção de ar e o número de estágios da lavagem eram os fatores que mais influenciavam a eficiência do processo. Foi utilizado água do rio Nak-dong, com turbidez de 6,5 a 11,5 uT, filtro com 93% de porosidade e diâmetro 650mm, com fibras de poliamida de 30µm de diâmetro, e 1500 mm de comprimento. A taxa usada para tal estudo foi de 60 m/h, e o processo de lavagem era realizado quando turbidez efluente atingisse 1 NTU. O processo de lavagem que demonstrou melhor desempenho (remoção de 99% dos sólidos suspensos retidos no filtro) teve aplicação de 7 segundos de ar seguidos de 15 segundos de água, com repetição de 14 vezes. O volume da água de lavagem no estudo foi apenas 3% do volume filtrado no período, demonstrando o efetivo sucesso do processo de lavagem do filtro.

MORITA (2013) também estudou diferentes sequências e tempos de aplicações de ar para FFF de sisal e polipropileno, obtendo diferentes resultados de acordo com o tipo de fibra utilizada. O volume de água para lavagem do filtro de fibra de sisal foi cerca de 3,5% do volume filtrado, enquanto o filtro de fibra de polipropileno utilizou 1,7% do volume filtrado.

Com tais estudos, observa-se, que mesmo necessitando de uma frequência maior de lavagens do que filtros de areia convencionais, o volume de água de lavagem foi pequeno em relação ao filtrado produzido, comprovando mais uma característica positiva dos filtros 3F.

3.4 Fibras têxteis

As fibras podem ser classificadas de acordo com sua origem:

a) natural: produzidas pela natureza, aptas ao processamento têxtil: a.1) de origem vegetal, como o algodão, linho, sisal; a.2) de origem animal, como lã e seda; a.3) de origem mineral, como amianto.

b) não natural: obtidas por processos industriais, a partir de polímeros naturais ou obtidos por síntese química. Exemplos: poliamida, poliéster, vidro, carbono.

3.4.1 Celulose

A celulose é um carboidrato constituído por uma cadeia linear de milhares de unidades de β -glicose. As cadeias celulósicas não são dispostas ordenadamente no interior das fibras, pois há um alternar de regiões organizadas chamadas "cristalinas", e regiões desorganizadas denominadas "amorfas". Para a celulose, quanto maior o número de moléculas alinhadas ao eixo longitudinal, maior a resistência da fibra (Alfieri, 2010).

A absorção de água é um fenômeno comandado pelas regiões amorfas, onde as moléculas estão orientadas ao acaso, e conseqüentemente existem menos ligações entre as macromoléculas, e maiores interstícios moleculares. Como resultado desta absorção temos o intumescimento transversal da fibra, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Intumescimento da fibra. FONTE: Alfieri (2010)

3.4.1.1 Degradação da celulose

A degradação da fibra celulósica pode ocorrer de diversas maneiras. A hidrólise ocorre em presença de ácidos orgânicos e inorgânicos a altas temperaturas, diminuindo o grau de polimerização da fibra e enfraquecendo as propriedades dinamométricas desta. A oxidação, por

sua vez, acontece quando há contato com reagentes oxidantes (originando produtos denominados oxixelulosos) ou longa exposição ao vapor.

As fibras celulósicas são resistentes aos solventes orgânicos, como benzeno e álcool; como também aos álcalis a temperatura ambiente. Se o teor de umidade das fibras é superior a 9% e a umidade relativa do ar é acima de 80%, algumas bactérias e fungos podem causar deterioração na fibra, provocando hidrólise e posteriormente a fermentação dos produtos desta (Alfieri 2010).

3.4.2 Fibras de algodão

A fibra de algodão é uma fibra branca ou esbranquiçada obtida dos frutos de algumas espécies do gênero *Gossypium*, encontrada na África, América e Ásia. É constituída de 90 a 95% de celulose, e o restante de ceras, gorduras e minerais. As fibras de algodão são muito resistentes aos álcalis, e a temperaturas de até 200°C. São compostas por uma cutícula externa, uma parede primária, uma parede secundária e um canal central chamado lúmen, conforme observado na Figura 10.

Figura 10 - Estrutura da fibra de algodão. FONTE: Alfieri (2010).

A cutícula é o revestimento externo, formada por celulose mais resistente aos solventes comuns e uma quantidade mínima de cera.. A celulose na parede primária aparece no estado desorientado, formando uma rede de fibrilas de grossura de 1 a 4 décimos de micron. Já a parede secundária, representando 90% do peso da fibra, é composta por deposições internas de camadas concêntricas de celulose. No contexto da pesquisa, a fibra de algodão aparece como uma

tecnologia local, e alternativa aos leitos filtrantes de fibras flexíveis constituídos de poliamida, visto que o Brasil está entre os 5 maiores produtores mundiais de algodão, chegando a 1,7 milhão de toneladas de pluma produzidas nas últimas três safras (Associação Brasileira dos Produtores de Algodão).

3.4.2.1 Colheita do algodão

A colheita da fibra de algodão é realizada em larga escala através de colheitadeiras automotrizes. Quando a colheitadeira está com o cesto cheio de algodão, deve esvaziá-lo em um reboque especial chamado Bass Boy (vide Figura 11), o qual transporta o algodão até uma prensa compactadora. A prensa compactadora, por sua vez, realiza formação de fardões, que serão transportados por caminhões próprios até a área de beneficiamento.

3.4.2.2. Beneficiamento do algodão

Etapa prévia para a sua industrialização, consiste na separação da fibra das sementes por processos mecânicos. O fardo passa por um equipamento denominado vulgarmente de Piranha ou Ricardão, para desmanchá-lo através de eixos batedores de pinos que abrem, e limpam parte do algodão. O processo de separação da fibra da semente é realizado por descaroçadores de serras circulares que são apresentados em diferentes modelos, número de serras, capacidade de trabalho e fabricantes. Através de processos eletrônicos é possível regular o peso médio dos fardos a serem compactados e amarrados ao final do processo, além da retirada automática de amostras para análise.

Figura 11 - (a) Bass Boy; (b) Prensa compactadora ; (c) Armazenamento dos fardos; (d) Piranha ou Ricardão. FONTE: Embrapa (2003).

O algodão é vendido através de plumas para o próximo processo: a fiação, conjunto de processos que transforma as fibras têxteis em fios. Depois de preparada, a matéria-prima (fibras) é reduzida à finura requerida, sofrendo torção no próprio eixo do fio a fim de aumentar a coesão entre as fibras, e consequentemente a resistência do fio. A finura das fibras têxteis é expressa pelo título, medida que relaciona peso e comprimento da fibra têxtil. O título expresso em TEX, por exemplo, relaciona o peso em gramas da fibra em 1000 metros de comprimento do material.

3.4.2.3 Mercerização

Denomina-se mercerização o conjunto de procedimentos que produzem nas fibras celulósicas uma mudança em sua estrutura interna e morfológica que se traduz externamente em um aumento de brilho e mudanças de suas dimensões, e internamente em um aumento de sua reatividade frente a determinados compostos químicos e aos corantes (CEGARRA, 1997). É um processo físico-químico que trata o algodão com uma solução alcalina concentrada (hidróxido de sódio a 28 a 320Bé), sob tensão a frio, para evitar seu encolhimento, em uma máquina chamada Mercerizadeira - vide Figura 12, e em seguida o lava e o neutraliza também sob tensão.

Figura 12 - Mercerizadeira em Malharia Brandili Ltda. FONTE: KUASNE (2008)

Em resumo, a soda cáustica penetra a celulose pelas suas zonas amorfas, e a presença de Na^+ produz a ruptura de algumas pontes de hidrogênio existentes entre os grupos $-\text{OH}$ das cadeias da celulose, facilitando a passagem das soluções e originando uma maior quantidade de grupos $-\text{OH}$ acessíveis aos reagentes químicos (CEGARRA, 1997). A celulose mercerizada é conhecida como celulose II. A fibra de algodão incha e a forma do corte transversal passa para uma forma arredondada, como observado na Figura 13.

Figura 13 - Cortes transversais de fibras de algodão. FONTE: KUASNE, A. (2008)

Embora a mercerização seja um processo benéfico para a indústria têxtil, já que aumenta a adsorção dos corantes ao tecido, é um processo com passivos ambientais. Segundo Peres e Abrahão (1998), o efluente da mercerizadeira tem baixa Demanda Bioquímica de Oxigênio e baixos níveis de Sólidos Totais, mas é extremamente alcalino.

Nesse aspecto, CETESB (2009) recomenda ações de Produção mais Limpa a fim de reduzir os impactos gerados nesta etapa:

- ✓ utilização de diversas lavagens com volume reduzido de água, ao invés de única lavagem com maior quantidade;
- ✓ reutilização das águas de lavagem de mercerização nas lavagens do material têxtil após operações de desengomagem;
- ✓ reutilização das águas de lavagem, provenientes das operações de alvejamento, nas lavagens do material têxtil após operações de tratamento alcalino;
- ✓ recuperação e reciclagem da soda cáustica utilizada.

3.4.2.4. Produção da linha de costura de algodão gazado/mercerizado

Resumidamente, a produção do fio penteado de algodão consiste nos seguintes processos:

a) Linha de Abertura / Limpeza dos fardos de algodão: para retirada de impurezas advindas do processo de colheita, os fardos são abertos e limpos, através de máquinas especiais, como as *abre-fardos*, *limpadores-batedores*, etc;

b) Cardagem: etapa de complementação da limpeza, iniciando processo de separação e orientação, homogeneização e uniformização das fibras. Realizada em máquinas denominadas *cardas* tendo como produto final uma fita de carda, levemente estirada e torcida;

c) Passador de 1ª passagem: a função dos passadores é efetuar a mistura das fitas de carda em uma só, com posterior estiramento e torção a fim de gerar uma fita uniforme;

d) Reunideira /Laminadeira e Penteadeira: processos responsáveis pela homogeneização do material, através de estiragem e paralelização das fibras, e pela melhoria na limpeza, resultando em fitas de penteadeiras, com comprimentos uniformes;

e) Passador de 2ª passagem: recebem as fitas de penteadeiras para uma maior uniformização através de processos de estiragens;

f) Maçaroqueira: transformação das fitas em fios (pavios), através de estiragem e torção;

g) Filatório de Anel/ Conicaleira acoplada: na fiação anel, vários fio são produzidos simultaneamente, sendo cada unidade de fiação conhecida como *fuso*, situados ao longo da máquina; depois são dispostos em cones com massa de fio maior;

h) Binadeira e Retorcedeira: a binadeira recebe as bobinas de fio simples da conicaleira e duplica-os, colocando o novo fio, paralelo e sem torção em um novo cone; a retorcedeira recebe as bobinas de fios duplos e aplica torção em sentido contrário ao da torção do fio simples. A maior característica desse novo fio é a resistência e uniformidade;

i) Processo de Gazar e Mercerizar: o processo de gazar realiza a queima da pilosidade (penugem) dos fios de algodão, a mercerização é a aplicação de soda cáustica, como descrito anteriormente;

j) Conicaleira: os fios gazados e mercerizados são dispostos em cones para venda.

3.4.3 Fibras de Poliéster

A vulnerabilidade da produção de fibras naturais aos eventos climáticos impulsionou a fabricação de fibras sintéticas. Dentre estas, as de poliéster estão entre as fibras sintéticas de maior importância para a indústria têxtil.

Sua base química é o Poli (tereftalato de etileno), um policondensado termoplástico linear, obtido a partir da policondensação do ácido teraftálico (derivado do petróleo) e o etileno glicol, sob vácuo e a alta temperatura. A fiação é realizada por extrusão do polímero no estado fundido. (VICUNHA Fibra). As fibras de poliéster são elásticas e muito resistentes à tração e à fricção. São muito estáveis à luz, aos ácidos, aos oxidantes e aos solventes.

O processo de obtenção de fibras de poliéster ocorre por extrusão via fusão. Tal método de fiação consiste em duas operações: extrusão e estiramento. Na extrusão, o polímero é aquecido até a temperatura de fusão, 260 °C, e o fundido transportado mediante bomba através de pequenos orifícios da fieira. Os filamentos provenientes desta solidificam através do contato com corrente de ar frio. O processo seguinte, estiramento, processa os filamentos a fim de orientar as moléculas ao longo do eixo da fibra, definindo seu diâmetro final.

Os aspectos ambientais relacionados ao uso das fibras de poliéster giram em torno da origem do material: petróleo. Nesse tema, é conveniente citar que a produção de poliéster advinda de reciclagem de garrafas PET é comum, e muito utilizada na indústria. Segundo os dados da ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET, a cadeia têxtil é a maior usuária de PET reciclado - 38% (ABIPET, 2013)

3.4.3.1 Produção da linha de costura de 100% poliéster de alta tenacidade

Assim como descrito para produção da linha de costura 100% algodão gazado e mercerizado no item 3.4.2.4, a fiação das linhas poliéster seguem os processos abaixo, já explicados no item supracitado:

- a) Linha de abertura;
- b) Carda;
- c) Passador de 1ª passagem;
- d) Passador de 2ª passagem;
- e) Maçaroqueira;
- f) Filatório de Anel / Conicaleira acoplada;
- g) Binadeira e Retorcedeira;
- h) Conicaleira e venda.

Por fim, a figura 14 mostra a solubilidade de diversas fibras em variados solventes, segundo AATCC Technical Manual (2006). Como não há testes de solubilidade de fibras visando seu uso em filtração para abastecimento público, utilizou-se tais dados para discussão posterior dessa variável.

	acetic acid	acetone	sodium hypochlorite	hydrochloric acid	formic acid	1,4 dioxane	m-xylene	cyclohexanone	dimethyl formamide	sulfuric acid	sulfuric acid	m-cresol	hydrofluoric acid
Concentration (%)	100	100	5	20	85	100	100	100	100	59.5	70	100	50
Temperature (°C)	20	20	20	20	20	101	139	156	90	20	38	139	50
Time (minutes)	5	5	20	10	5	5	5	5	10	20	20	5	20
acetate	S	S	I	I	S	S	I	S	S	S	S	S	I
acrylic	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
anidex	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
aramid	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
azlon	I	I	S	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
cotton & flax	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	S	I	I
glass	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	S
modacrylic	I	SE	I	I	I	SP	I	S	SP*	I	I	P	I
novoloid	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	†
nylon	I	I	I	S	S	I	I	I	N	S	S	S	I
nylon	I	I	I	I	I	I	I	S	S	I	I	SP	I
olefin	I	I	I	I	I	I	S	S	I	I	I	I	I
polyester	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	S	I
rayon	I	I	I	I	I	I	I	I	I	S	S	I	I
saran	I	I	I	I	I	S	S	S	S	I	I	I	I
silk	I	I	S	I	I	I	I	I	I	S	S	I	I
spandex	I	I	I	I	I	I	I	I	S	SP	SP	SP	I
teflon	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
vinal	I	I	I	S	S	I	I	I	I	S	S	I	I
vinyon	I	S	I	I	I	S	S	S	S	I	I	S	I
wool	I	I	S	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I

S = Soluble	SE = Soluble except for one modacrylic fiber characterized by low flammability and liquid inclusions visible in cross-section.
I = Insoluble	N = Nylon 6 is soluble, nylon 6,6 is insoluble.
P = Forms plastic mass	* = Soluble at 20°C without plastic mass.
SP = Soluble or forms plastic mass	† = Novoloid turns red

Figura 14 - Solubilidade das fibras. FONTE: modificado de AATCC Technical Manual (2006)

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Considerações iniciais

A pesquisa foi realizada nas dependências do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas - LATAR, situado na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O estudo foi dividido em quatro etapas: I) Caracterização das fibras utilizadas; II) Ensaio para obtenção dos parâmetros de coagulação; III) Ensaio de filtração, utilizando filtros de fibras flexíveis; IV) Estabelecimento do protocolo adequado para lavagem do leito filtrante. O detalhamento de cada etapa é descrito posteriormente.

4.2 Água de estudo

A água de alimentação dos filtros de fibras flexíveis era sintética, de turbidez média de 7,5 uT, e cor aparente de 101 uC, preparada com adição de 15g de ácido húmico comercial (Aldrich Chemical 675-2) e 127,5g de caulinita marca Sigma-Aldrich (K7375-USA) a 15m³ de água proveniente de poço existente no campus 1 da USP São Carlos, resultando em solução de 1,0 mg/L de ácido húmico e 8,5 mg/L de caulinita. A turbidez média da água sintética era de 7,7 uT, e cor aparente de 97 uC.

A água resultante era armazenada em reservatório mostrado na Figura 15 na instalação piloto do laboratório supracitado. Os produtos químicos eram adicionados por volta das 18 horas do dia anterior ao ensaio, e homogeneizados até o final dos experimentos através de misturador. O pH da água bruta era verificado minutos antes do início dos ensaios, e carbonato de sódio (barrilha) era adicionado caso a correção daquele fosse necessária.

Figura 15-Reservatórios de 15m³ cada para armazenamento da água de estudo, nas dependências do LATAR.

4.3 Etapa I: Caracterização das fibras de algodão mercerizado e poliéster

As fibras de algodão e poliéster foram caracterizadas nos parâmetros de interesse do projeto, como exposto a seguir. É importante ressaltar que foram utilizados na pesquisa fios de costura constituídos de microfibras entrelaçadas (ou de algodão mercerizado ou de poliéster).

4.3.1 Testes de resistência das fibras a meios agressivos

Foram realizados testes empíricos a fim de avaliar a resistência das fibras de algodão e poliéster quando imersas em diferentes condições. Feixes de ambas os fios foram formados utilizando pequena quantidade de éster de cianoacrilato em uma das extremidades para fixação. Salienta-se que os feixes possuíam comprimentos diferentes a fim de avaliar a resistência destes aos meios agressivos com 3 e 7 meses de imersão, como visto na Figura 16.

Figura 16-Feixes de fios de poliéster e algodão para teste de resistência das fibras.

Os feixes foram lavados com água deionizada por 5 minutos, 3 vezes, secos em estufa $110 \pm 5^\circ\text{C}$ por 12 horas, e pesados em balança analítica (massa m_1). Foram então colocados em seus respectivos ambientes agressivos, em recipientes plásticos contendo: 250 mL de água da torneira - para analisar possíveis efeitos adversos do cloro residual da rede pública de abastecimento; água ácida (pH de $4,7 \pm 0,3$) - decorrente da adição de HCl 0,1N à 250 mL de água do poço da USP; água alcalina (pH de $9 \pm 0,3$) - decorrente da adição de NaOH 0,9701N à 250 mL de água do poço da USP. Os recipientes são mostrados na Figura 17.

Figura 17-Feixes de fios nos meios citados.

As soluções em que os fios ficaram imersos foram renovadas 2 vezes por semana para manutenção de pH.

Decorridos 3 e 7 meses de imersão, os feixes foram lavados com água deionizada até pH se apresentar próximo da neutralidade, secos em estufa por 12 horas, e pesados em balança analítica, obtendo-se massa designada m_2 . Foi então calculada perda de massa. Também foram realizadas análises em Microscopia de Varredura Eletrônica, detalhadas no item 4.3.2.

4.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

A fim de caracterizar visualmente a superfície das fibras em diferentes condições, foi realizada Microscopia Eletrônica de Varredura, com a cooperação do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo (IFSC/USP).

Os fios foram previamente lavados em água deionizada até que o pH desta permanecesse próximo da neutralidade, e secas em estufa $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ por 14 horas. Para melhor resolução das imagens, os fios cortados (cerca de 1,5cm) receberam película de carbono.

Foram realizadas micrografias para os fios de algodão e poliéster em 6 situações: a) sem qualquer tratamento, antes da operação como meio filtrante; b) sem qualquer tratamento, após sua operação por aproximadamente 6 meses como meio filtrante nas seguintes situações: b.1) filtro de 100 cm sujo, após atingir turbidez 2uT, com amostra de fio coletada no primeiro 1/3 (um terço) do leito; b.2) filtro de 100 cm sujo, após atingir turbidez 2uT, com amostra de fio coletada no 2/3 (segundo terço) do leito; b.3) filtro de 100 cm após lavagem, com amostra de fio coletada no primeiro 1/3 (um terço) do leito; c) sem qualquer tratamento, após 3 meses de testes de resistência; d) sem qualquer tratamento, após 7 meses de testes de resistência;

O equipamento utilizado pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18-Disposição das amostras de fibras, e Microscópio Eletrônico de Varredura no IFSC/USP.

4.3.3 Microscopia Óptica

As análises de microscopia óptica foram feitas no LATAR, a fim de estabelecer uma avaliação estatística do diâmetro médio dos fios. Mesmo os fios de algodão e poliéster sendo industrialmente fabricados, podem ocorrer variações deste parâmetro, visto que não é uma exigência na indústria têxtil.

Como o algodão tem caráter hidrofílico, foram medidos os diâmetros úmidos dos fios, imergindo pedaços destes (poliéster e de algodão mercerizado) de aproximadamente 5 cm cada em água do poço da USP São Carlos por 12 horas. Foram então observadas em microscópio 50 diferentes fios de algodão e 50 diferentes fios de poliéster com auxílio de régua acoplada para determinação dos diâmetros médios e desvio-padrão. Com o valor do diâmetro médio, foram calculadas as superfícies de contato de cada filtro.

4.3.4. Cálculo da porosidade dos filtros

Há 3 (três) maneiras de calcular a porosidade do filtro de fibra flexível: pelo deslocamento de volume de água, quando uma determinada massa é imersa no líquido; pelos

cálculos de áreas transversais dos fios e do filtro, através do diâmetro médio calculado na microscopia óptica; e pela massa específica e concentração mássica de cada material. Para todas as 3 maneiras, o volume do filtro foi calculado com seu diâmetro de 28mm, e altura de 1 metro para os itens 4.3.6.1 e 4.3.6.2, e 0,6 metros no item 4.3.6.3.

A porosidade foi calculada seguindo protocolo dos 3 (três) métodos citados, e será detalhada a seguir.

4.3.4.1 Cálculo da porosidade dos filtros através do Método do Volume Deslocado

Foram construídos feixes de comprimento de 1 metro, com 250 fios cada um para ambas as fibras. Os feixes foram imersos na água por 24 horas, e deixados escorrer por 15 minutos, a fim de calcular o deslocamento do volume dos fios úmidos. Foram, em seguida, imersos um a um em provetas com volume inicial de água deionizada conhecido; e bem compactados, como observado na Figura 19, obtendo assim seu volume deslocado.

Figura 19-Proveta com fibras de poliéster.

Foram imersas de 250 a 3000 fios, e as medidas foram plotadas em um gráfico, expresso na Figura 20.

Figura 20-Gráfico sobre a relação entre quantidade de fios e volume deslocado de água

Com o volume dos fios, e o volume do filtro, calculou-se a porosidade pela equação 5:

$$Porosidade (\%) = 100 * \left(1 - \left(\frac{Volume_{fios}}{Volume_{filtro}} \right) \right) \quad \text{Equação 5}$$

Esse método tem como vantagem a relação direta entre número de fios e volume ocupado por estes no meio filtrante, facilitando a construção dos filtros a partir de porosidades pré-estabelecidas. Porém, o fato de pequenas bolhas de ar poderem adsorver na superfície das fibras pode alterar o real volume ocupado pelos fios, dando falsos resultados.

4.3.4.2 Cálculo da porosidade dos filtros através da área transversal

Calculado o diâmetro médio úmido dos fios de algodão e poliéster no item 4.3.5, calculou-se a área transversal de cada e de todos os fios, como mostrado nas equações 6 e 7:

$$Área transversal de cada fio = \frac{\pi * D_{fios}^2}{4} \quad \text{Equação 6}$$

$$Área transversal total = n * Área transversal de cada fio \quad \text{Equação 7}$$

em que n = número de fios no leito filtrante.

Sendo assim, calculou-se a porosidade segundo equação 8:

$$Porosidade (\%) = 100 * (1 - (\frac{Área_{t_{fios}}}{Área_{t_{filtro}}})) \quad \text{Equação 8}$$

Neste método também foi possível relacionar diretamente a porosidade com o número de fios.

4.3.4.3 Cálculo da porosidade dos filtros através da concentração mássica

Este método foi realizado somente para filtro de 0,6 metros, visto que o de 1 metro já estava em operação. Foram pesados em balança analítica o leito filtrante seco de algodão e poliéster, e relacionados com o volume do filtro piloto, cujo diâmetro é de 28 mm, obtendo-se a concentração mássica expressa na equação abaixo:

$$Concentração\ mássica\ (\frac{kg}{m^3}) = \frac{massa\ seca\ do\ leito\ filtrante}{Volume\ do\ filtro} \quad \text{Equação 9}$$

Para o cálculo da massa específica, foram pesados feixes de fios de algodão e poliéster separadamente em balança analítica, e os mesmos feixes foram imersos secos em etanol para aferição do volume deslocado, como mostrado na equação 10:

$$Massa\ específica\ (\frac{kg}{m^3}) = \frac{massa\ seca\ do\ feixe\ de\ fios}{Volume\ deslocado\ em\ etanol\ pelo\ feixe\ de\ fios} \quad \text{Equação 10}$$

A porosidade é calculada pela equação abaixo:

$$Porosidade (\%) = 100 * (1 - (\frac{Concentração\ mássica}{Massa\ específica})) \quad \text{Equação 11}$$

4.3.5 Cálculo da superfície de contato de cada filtro

Com o diâmetro médio calculado no item 4.3.5, foram calculadas as superfícies de contato (S) dos filtros de comprimento de leito de 100 cm, conforme equações abaixo:

$$S_{fio} = \pi * D_{fio} * L \quad \text{Equação 12}$$

$$S_{total} = n * (\pi * D_{fio} * L) \quad \text{Equação 13}$$

onde,

D_{fio} = diâmetro médio dos fios de algodão ou poliéster

n = número de fios no leito filtrante

L = comprimento do leito filtrante

4.4. Etapa II: Ensaios para obtenção dos parâmetros de coagulação

A fim de visualizar a influência das dosagens de coagulante e pH de coagulação, foram realizados ensaios de mistura rápida e filtração direta, utilizando a água de estudo, descrita no item 4.2, em equipamento Jarteste, com monitoramento do pH de coagulação, potencial zeta, remoção de cor aparente e de turbidez. Foi utilizado sulfato de alumínio PA como coagulante, e as dosagens variadas de 5,0 mg/L até 50mg/L, de 5 em 5 mg/L. Para variação do pH de coagulação foram utilizados barrilha ou ácido sulfúrico (ambos com concentração igual a 20g/L), proporcionando varredura de valores de pH entre 5,5 e 7,0.

Durante os ensaios, foram mantidos fixos os parâmetros: gradiente médio (900 s^{-1}) e tempo de mistura rápida (20 s). A temperatura foi de $25^{\circ}\text{C} \pm 1$. Finalizada a mistura rápida, fez-se a filtração direta de cada amostra em papel de filtro quantitativo 640W-faixa preta da marca Macherey-Nagel.

Através dos resultados de remoção de cor aparente e turbidez em todas as faixas de concentração e pH testadas, foi construído diagrama de coagulação, utilizado na etapa III para escolha das dosagens a serem adotadas.

4.4.1 Relação cor e absorbância 495nm

Para análise de remoção de cor, foi construída curva de relação entre esta e leitura de absorbância em comprimento de onda 495nm. Maia (2010) realizou estudos prévios sobre comprimentos de ondas e absorbância do ácido húmico utilizado nas pesquisas do LATAR, nos equipamentos disponíveis no laboratório, obtendo 495nm como melhor resultado.

Para construção da curva citada, foram feitas soluções de ácido húmico de concentrações variando de 0,0 a 6,0 mg/L, lidas suas respectivas absorbâncias 495nm em equipamento DR4000, cubeta quartzo de 10 cm, e observadas pela autora deste trabalho suas cores em Comparador Colorimétrico com discos, conforme Figura 21.

Figura 21-Comparador colorimétrico de disco usado na pesquisa.

A partir destas medidas, foi construído o gráfico, e obtida equação expressa na Figura 22.

Figura 22- Relação entre cor lida no Colorímetro de disco e absorbância 495nm

Assim, para as análises de remoção de cor, foram realizadas medidas de absorbância 495nm, e convertidas em unidades de cor através da equação expressa na Figura 22.

4.5 Etapa III: Ensaios de filtração direta em filtros de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster.

4.5.1 Instalação piloto

A instalação piloto localiza-se nas dependências externas do LATAR, e é composta pelo reservatório de armazenamento da água de estudo, como citado no item 4.2, sistema de dosagem de coagulante, sistema de limpeza dos filtros, e filtros de fibras flexíveis em escala piloto.

4.5.1.1 Funcionamento geral da instalação piloto

A água de estudo é preparada sinteticamente, como citado no item 4.2, e armazenada em reservatório de 15m³. Essa água bruta é então bombeada para uma caixa de nível constante com altura de aproximadamente 3 metros. Optou-se por utilizar essa caixa de nível constante para que a alimentação dos filtros fosse por gravidade, e interferências como

influência da carga hidráulica do reservatório, e ar nas tubulações fossem minimizadas.

A água bruta seguia então, por gravidade ao sistema de filtros em tubulação de 1 polegada, recebia aplicação de coagulante *in-line*, passava pelo misturador rápido tubular, e alimentava os 4 filtros estudados. O sistema de filtros é visualizado na Figura 23.

Figura 23-Esquema geral do sistema de filtros e piezômetro.

4.5.1.2 Sistema de dosagem de coagulante

O coagulante utilizado foi o sulfato de alumínio hidratado PA da marca Vetec. Era preparada solução mãe de 1,5 a 3 g/L a partir de água do poço da USP São Carlos, em container de 250L, com agitadores automatizados. A solução mãe tinha sua concentração variada de acordo com o número de filtros em funcionamento, visto que foi observada menor variação da vazão da bomba dosadora para vazões altas.

A dosagem era realizada com auxílio de bomba dosadora, e vazão variando de acordo com a taxa de filtração estudada, de acordo com equação 14:

$$Q_{bomba\ dosadora} = \sum_{n=1}^{n=4} \frac{DSA.Q\ filtro_n}{C_{solução}} \quad \text{Equação 14}$$

em que

$Q_{bomba\ dosadora}$ = vazão ajustada na bomba dosadora;

DSA = dosagem estudada de sulfato de alumínio;

$Q\ filtro_n$ = vazão de alimentação de cada um dos 4 filtros (n varia de 1 a 4);

$C_{solução}$ = concentração da solução de coagulante utilizada, variando de 1,5 a 3g/L nesta pesquisa.

Como será comentado posteriormente, os ensaios eram realizados com os 4 filtros simultaneamente (ou 2 filtros no caso da menor dosagem de coagulante), e com a mesma taxa de filtração para facilitar a manutenção dos parâmetros durante os ensaios.

A dosagem de coagulante foi feita na tubulação a montante dos registros de agulha dos filtros, e a jusante da caixa de nível. Há nessa tubulação chapas metálicas com formato helicoidal para promover mistura rápida entre a água bruta e coagulante dosado pela bomba dosadora (misturador rápido tubular)..

4.5.1.3 Sistema de limpeza dos filtros

A lavagem dos filtros era efetuada alternando-se aplicações de água e ar comprimido ao leito filtrante. Na pesquisa, esse método foi investigado (com variações de tempos de injeção de ar e de água) para ambas as fibras estudadas, assim como métodos novos foram testados, segundo metodologia explicada no item 4.6.

Para o sistema de ar, era utilizado compressor de ar. Para lavagem com água, foi utilizada rede pública de abastecimento, visto que a pressão era grande suficiente para alcançar vazões altas, sem necessidade de novas mudanças na configuração da instalação

piloto. Para aferir ambas as vazões, a instalação piloto possui rotâmetros acoplados, sendo que o rotâmetro responsável pela medição da água proveniente da torneira possuía registro de agulha para melhor ajuste de vazão.

Figura 24-Entradas de água e ar para lavagem dos filtros.

4.5.1.4 Fibras utilizadas

O LATAR vem desenvolvendo pesquisas em filtro de fibras flexíveis, como citado na revisão bibliográfica. A fim de continuar a linha de investigação utilizando fibras naturais, o algodão foi escolhido considerando sua alta oferta e produção no país. Como é usado majoritariamente na indústria têxtil, os fios de algodão possuem padrões físico-químicos melhor definidos, como o diâmetro relativamente regular.

Durante os 2 (dois) primeiros meses da presente pesquisa, foram investigadas tipos de fibras, analisando-se facilidade na compra, custo, e características físicas compatíveis com o princípio do filtro de fibra flexível.

Primeiramente, foi testado o fio de algodão cru, mais comum no Brasil. A dificuldade no uso deste fio foi sua tendência a enrolar quando disposto em feixes, como observada na Figura 25. Tal fato deve-se ao modo de produção destes fios - a torção, onde as fibras de algodão são enroladas entre si em máquinas têxteis.

Figura 25 - Feixe de fibras de algodão cru

A partir desta observação, foi descartado o uso do fio de algodão cru, já que o paralelismo entre os fios não era possível, o que dificultaria a passagem da água, e principalmente a limpeza do leito filtrante.

Recorreu-se então ao processo de mercerização da fibra de algodão cru, também comentado na revisão bibliográfica. Tentativas de banho dos fios de algodão cru em soda cáustica em altas concentrações foram realizadas pela autora, mas foi observada falta de padronização nos resultados, visto que não havia aparelhagem própria para aplicação de tensão constante aos fios durante o banho e neutralização. Decidiu-se então, adquirir fios de algodão previamente mercerizados devido à padronização destes.

A título de comparação dos resultados com fibras sintéticas, adotou-se o poliéster, considerando facilidade de compra, preço atrativo, e larga escala de produção no Brasil. Por fim, as fibras escolhidas e utilizadas nesta pesquisa foram Linhas/fios de costura 100% algodão gazado e mercerizado TEX 40, e Linhas/fios de costura 100% poliéster TEX 38, ambas da indústria têxtil Sancris, vide Figura 26.

Figura 26- Fibras utilizadas na pesquisa na forma adquirida de fios de costura.

O TEX escolhido era equivalente ao menor diâmetro do fio de algodão mercerizado facilmente encontrado no mercado, facilitando possíveis reproduções deste estudo. O TEX do poliéster foi escolhido por ser o valor comercial mais próximo do fio de algodão, a título de comparações entre suas eficiências.

4.5.1.5 Sistema de filtros de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster

O sistema de filtros em escala piloto desta pesquisa é constituído por 4 filtros retos, paralelos entre si, e de fluxo ascendente. Os filtros, construídos com tubulação de PVC, possuem todos 28 mm de diâmetro interno, e interior recheado com o leito filtrante de fios flexíveis, presos na parte inferior e soltos na parte superior. Os comprimentos dos leitos dos filtros são de 60 e 100 cm para ambas as fibras. A Figura 27 mostra o caminho da água coagulada e da água filtrada no sistema de filtros. A Figura 28 mostra os leitos filtrantes de algodão mercerizado e poliéster no comprimento 0,6 metros.

Figura 27- Sistema de filtros de fibras flexíveis, com fluxos de água coagulada e filtrada.

Figura 28- Leito filtrante de fibras flexíveis em comprimento 0,6 metros.

A fim de evitar caminhos preferenciais pela água, foi colocada camada interna de areia nos tubos dos filtros, como mostra Figura 29. Salienta-se que estudos aprofundados para confirmar a efetividade desta camada de areia não foram realizados.

Figura 29-Camada interna de areia na tubulação dos filtros.

Os fios foram fixados em um módulo de PVC rígido na parte inferior do filtro. Para isso, foram montados 11 feixes de igual quantidade de fios envoltos em pedaços de 1,5cm de canudos de plástico, como o mostrado na Figura 30.

Figura 30- Feixe de fibra de poliéster.

Tais feixes foram alternados com 6 canudos vazios de igual comprimento, para possibilitar a entrada e distribuição uniforme de água entre todos os filtros com menor perda de carga localizada possível, além de distribuir o ar na lavagem do leito filtrante. Os fios foram colados entre si para formação dos feixes com éster de cianoacrilato. A base do filtro pode ser observada na figura 31.

Figura 31- - Base do filtro pronta

Salienta-se que antes da colocação do leito filtrante de fios dentro do tubo de PVC de

28mm de diâmetro, os fios foram penteados para desmanche de possíveis nós, a fim de manter o máximo de paralelismo possível.

O fluxo dos filtros é ascendente, assim como sua lavagem. Foram instalados dispositivos para controle de vazão da água a ser filtrada – rotâmetros e registro agulha; e subdivisões e registros na entrada e saída do filtro. Para lavagem, com água da rede pública de abastecimento e ar, também foram implantados registros. Uma ilustração do filtro de leito 100cm, mas com tubo de comprimento 120 cm é mostrado na Figura (sem escala) a seguir.

Figura 32- Filtro de fibras flexíveis em escala piloto.

Como observado na Figura 32, foram instaladas ao longo do comprimento de cada filtro tomadas de pressão conectadas a piezômetro. Estas tomadas foram instaladas com a finalidade de acompanhar a perda de carga em cada trecho dos diferentes filtros, permitindo a avaliação do caminhamento da frente de impurezas. Para o filtro de 100 cm foram instaladas tomadas de pressão nas alturas: 0, 16, 33, 66 cm; e para os filtros de 60 cm: 0, 20, 40 cm. Também foi colocada tomada de pressão logo antes da saída do filtrado em todos os filtros.

4.5.2 Planejamento dos ensaios

Para avaliação da eficiência do processo de filtração direta foram estudados 2 tipos de fibras – poliéster e algodão mercerizado; em 2 comprimentos de leito filtrante – 60 e 100cm; e cada filtro com 5 taxas de filtração e 2 dosagens de coagulante diferentes. A porosidade estudada foi de 67% para filtro de fibras de algodão, e 75% para filtro de fibras de poliéster (esses valores serão explicados nos resultados). Os ensaios de filtração foram feitos todos em triplicata.

A Tabela 1 mostra a grade de ensaios realizada nesta pesquisa.

Tabela 1- Grade de ensaios executada na pesquisa.

Tipo de fibra	Comprimento do leito (cm)	Dosagem de coagulante (mg/L)	Taxa de filtração (m/h)
Algodão	60	22,5	40
			60
			80
	100	22,5	40
			60
			80
			100
			120
		15	40
			60
			80

Poliéster			100
			120
	60	22,5	40
			60
			80
	100	22,5	40
			60
			80
			100
			120
		15	40
			60
			80
			100
			120

Durante os ensaios foram estabelecidos limite de turbidez igual a 2 uT, e perda de carga de 2,4 mca, valor máximo de carga hidráulica disponível para filtração resultante dos aspectos construtivos da instalação piloto. Estabeleceu-se limite de turbidez igual a 2uT para encerramento da carreira de filtração considerando possíveis usos dos filtros de fibras flexíveis como pré-filtros, caso sua eficiência para turbidez 0,5 e 1uT não fosse satisfatória.

Atingido perda de carga máxima admitida ou valor limite de turbidez, a carreira de filtração era encerrada, e a limpeza do leito filtrante era realizada. Ressalta-se que a lavagem era realizada com aplicações alternadas de água e ar, porém em excesso até perda de carga atingir valor medido antes do início da carreira de filtração. O estudo de um protocolo adequado de lavagem foi realizado em etapa posterior do projeto com a condição ótima de filtração. Depois da lavagem dos filtros, era realizado novo ensaio, seguindo a grade da Tabela 1.

As carreiras de filtração foram consideradas encerradas quando sua turbidez atingiu o valor de 2uT, porém foram divididas em 2 estágios: limite máximo de 1uT, e limite máximo de 2

uT. Devido ao grande número de amostras, como observado nos resultados, foram realizadas amostras denominadas Compostas para análises de mais parâmetros.

Para compor a amostra Composta, foram coletadas pequenas amostras de igual volume de cada amostra de água filtrada, bruta ou coagulada referentes aos tempos de coleta ao longo da carreira de filtração. Ou seja, se o filtro de 100 cm de poliéster obteve carreira de filtração igual a 210 minutos, considerando 1uT de limite, igual volume de cada amostra coletada a cada 15 minutos até 210 minutos foi misturada para formação da amostra Composta. E assim por diante, para todos os filtros, para os 2 valores de limites de turbidez estabelecidos, assim como para a água coagulada e bruta.

4.5.3 Monitoramento dos ensaios

Para a avaliação da eficiência no processo de clarificação de água para abastecimento dos filtros de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster, foram coletadas amostras com frequência previamente estabelecida, e analisados os parâmetros de acordo com a Tabela 2. Ressalta-se que tal frequência não pôde ser maior, devido a sua aplicabilidade, já que os pontos de coleta de água filtrada, coagulada e bruta eram distantes entre si, e a autora realizava os ensaios sozinha.

Tabela 2-Monitoramento realizado na pesquisa.

Amostra	Variável	Frequência
-	Verificação da vazão da bomba dosadora	A cada 20 minutos.
-	Leitura dos rotâmetros dos filtros	
-	Leitura da perda de carga	
Água bruta	pH	A cada 30 minutos
	Potencial zeta	
	Temperatura	

Água coagulada	pH	A cada 15 minutos
	Potencial zeta	
	Temperatura	
Água filtrada dos filtros em operação	Abs 495nm	Nos tempos 0 e 5 minutos; e depois, a cada 15 minutos
	Turbidez	
Composta da água bruta	Sólidos Suspensos Totais	-
	Abs 495nm	
	Turbidez	
	Alcalinidade	
	Abs 254nm	
	Condutividade	
Composta da água coagulada	Abs 495nm	-
	Turbidez	
	Abs 254nm	
Composta da água filtrada de cada filtro, com limite máximo de turbidez de 1 uT	Abs 495nm	-
	Turbidez	
	Abs 254nm	
Composta da água filtrada de cada filtro, com limite máximo de turbidez de 2 uT	Abs 495nm	-
	Turbidez	
	Abs 254nm	

A perda de carga era lida em piezômetro instalado ao lado do sistema de filtro, como observado na Figura 33.

Figura 33-Ângulos diferentes do piezômetro

A temperatura dos ensaios de filtração era controlada, quando necessário, por aquecedor a gás em circuito com o reservatório. Ressalta-se que os ensaios realizados em dias muito quentes não eram passíveis de controle de temperatura, visto que as instalações ainda não possuíam resfriador do porte dos reservatórios. A vazão dos filtros era controlada através dos rotâmetros acoplados a estes, e ajustadas pelos registros agulha, quando necessário, utilizando-se proveta graduada de vidro e cronômetro.

A absorbância 495 nm das amostras foi lida sem filtração para análise de remoção de cor aparente, como explicado no item 4.4.1. A temperatura foi medida juntamente com pH, através de termômetro acoplado ao pHmetro utilizado da marca Digimed. O potencial zeta da amostra foi lido em zetâmetro da marca Malvern, modelo Nano-ZS90.

Para leitura de absorbância 254nm, e Sólidos Suspensos Totais foi utilizada membrana de fibra de vidro AP40 de porosidade 0,7 μm e 47 mm de diâmetro. Tal escolha levou em consideração recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2009), e custo de membranas alternativas. Para análise de absorbância 254 e 495 nm foram utilizadas cubetas de quartzo de 5 e 10 cm, em DR 5000 e DR4000, respectivamente.

4.6 Estabelecimento de protocolo adequado para lavagem do leito de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster

Como dito anteriormente, a lavagem adequada do leito filtrante tem de ser realizada após finalização da carreira de filtração. O protocolo de lavagem deste tipo de filtro consiste em injeções em curtos intervalos de tempos distintos de água e ar comprimido, e já tem sido objeto de estudos, como comentado na Revisão Bibliográfica. Como as fibras de algodão mercerizado e poliéster ainda não foram estudadas como fibras flexíveis para filtração, foi necessário realizar tal etapa investigativa no presente estudo.

O estabelecimento de protocolo adequado para lavagem do leito de fibras flexíveis foi realizado utilizando os filtros de 100 cm de algodão e poliéster, visto que o comprimento do leito é maior, e portanto mais difícil de limpar; além de demonstrar melhor eficiência em relação aos filtros de 60 cm, como será mostrado nos resultados. A taxa de filtração escolhida para os testes de lavagem foi de 100 m/h, já que produziu maior volume filtrado com folga na perda de carga de ambas as fibras, como também será discutido nos Resultados e Discussões.

A fim de não perder sólidos suspensos da água de lavagem, as tomadas de pressão ao longo do leito filtrante foram fechadas para essa etapa da pesquisa. A saída de água filtrada era fechada, e a saída de água de lavagem aberta. A água de lavagem era coletada em galões de 10 litros, através de mangueiras direcionadas a estes, como observado na Figura 34 e 35.

Figura 34 - Detalhe das saídas de água filtrada e de lavagem

Figura 35-Coleta de água de lavagem.

A eficiência do processo de lavagem foi avaliada segundo:

- a) recuperação da perda de carga inicial após processo de lavagem;

b) recuperação de sólidos retidos durante a operação do filtro.

O método que melhor conseguisse esse resultado, consumindo menor volume de água seria considerado o melhor método de lavagem.

Para análise de recuperação de sólidos retidos no filtro, foram realizadas análises de sólidos suspensos totais da água coagulada e filtrada logo antes de iniciar o processo de lavagem. Depois de cada método executado, foi analisado SST da água de lavagem, e os cálculos foram feitos segundo equações abaixo:

$$C_{SR} = C_{SC} - C_{SF} \quad \text{Equação 15}$$

$$m_{SR} = C_{SR} * T_{filt} * A * t \quad \text{Equação 16}$$

$$m_{SL} = C_{SL} * V_{AL} \quad \text{Equação 17}$$

$$E_L(\%) = \frac{m_{SL}}{m_{SR}} * 100 \quad \text{Equação 18}$$

em que,

C_{SR} = concentração de sólidos suspensos totais retidos no filtro (mg/L)

C_{SC} = concentração de sólidos suspensos totais na água coagulada (mg/L)

C_{SF} = concentração de sólidos suspensos totais na água filtrada (mg/L)

C_{SL} = concentração de sólidos suspensos totais na água de lavagem (mg/L)

m_{SR} = massa de sólidos suspensos totais retidos no filtro (mg/L)

m_{SL} = massa de sólidos suspensos totais na água de lavagem (mg/L)

T_{filt} = Taxa de filtração (m/h)

A = Área do filtro (m^2)

t = carreira de filtração do filtro (min)

V_{AL} = volume de água utilizado no processo de lavagem (L)

E_L = eficiência do processo de lavagem.

A perda de carga medida após métodos de lavagem foi comparada à perda de carga do início da operação de taxa 100 m/h. A escolha da grade de ensaios para estabelecimento do protocolo de lavagem dos filtros foi realizada tentando não ultrapassar o limite de 5% de água usada para lavagem de filtros em Estações de Tratamento de Água. A taxa de aplicação de ar aplicada foi a menor quantificável pelo rotâmetro existente na instalação piloto.

A fim de estabelecer um método mais econômico de lavagem, foi estudado primeiramente aplicação de ar conjuntamente com a água, para reduzir o tempo de aplicação e gasto com água. A grade completa de ensaios pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3- Grade dos métodos de lavagem testados

Lavagem Filtro de Algodão 100 cm								
Condições de lavagem: aplicação de ar em conjunto com água								
Modos de lavagem	Vazão de água (L/h)	Taxa de água de lavagem aproximada (m/h)	Tempo de aplicação de água (s)	Tempo de aplicação de ar (s)	Repetições	Tempo total de aplicação de água (s)	Tempo total de aplicação de ar (s)	Tempo total de lavagem (s)
1	200	325	80	50	1	80	50	130
2	200	325	85	60	1	85	60	145
3	100	162	60	30	1	60	30	90
4	100	162	60	40	1	60	40	100
5	100	162	80	50	1	80	50	130
6	100	162	85	60	1	85	60	145
Lavagem Filtro de Algodão 100 cm								
Condições de lavagem: aplicações de ar e água alternadas e com repetições								
Modos de lavagem	Vazão de água (L/h)	Taxa de água de lavagem aproximada (m/h)	Tempo de aplicação de água (s)	Tempo de aplicação de ar (s)	Repetições	Tempo total de aplicação de água (s)	Tempo total de aplicação de ar (s)	Tempo total de lavagem (s)
7	200	325	20	10	3	60	30	90
8	150	244	20	10	3	60	30	90
9	400	649	15	7	5	75	35	110
10	300	487	10	10	3	30	30	60
Lavagem Filtro de Poliéster 100 cm								
Condições de lavagem: aplicação de ar em conjunto com água								
Modos de lavagem	Vazão de água (L/h)	Taxa de água de lavagem aproximada (m/h)	Tempo de aplicação de água (s)	Tempo de aplicação de ar (s)	Repetições	Tempo total de aplicação de água (s)	Tempo total de aplicação de ar (s)	Tempo total de lavagem (s)
1	250	406	60	30	1	60	30	90
2	200	325	70	40	1	70	40	110
3	180	292	60	30	1	60	30	90
4	120	195	60	30	1	60	30	90

4.7 Avaliação do desempenho dos filtros de fibras flexíveis

Como dito anteriormente, a carreira de filtração de cada filtro testado foi finalizada quando turbidez do efluente ultrapassasse de 2 uT ou a perda de carga igualasse ou superasse o valor da máxima carga hidráulica disponível.

Foi então realizada comparação do desempenho de cada filtro considerando:

- Carreira de filtração (h ou min);
- Perda de carga no final da carreira (mca);
- Volume produzido por carreira de filtração (L);
- Volume produzido em 24 horas (L);
- Valores de turbidez do efluente - água filtrada (uT).

De posse destes valores, foram calculados os Índices de Filtrabilidade citados no item 3.1.5: Índice de Funcionamento do Filtro e Índice de Filtrabilidade de Ives.

Para análises do processo de lavagem, foi calculado a produtividade do filtro, que relaciona a porcentagem de água filtrada gasta na lavagem, observado na Equação 19:

$$P (\%) = 100 * \frac{V_{AL}}{V_{AF}} \quad \text{Equação 19}$$

em que

P(%): porcentagem da água usada na lavagem;

V_{AL}: Volume de água gasto na lavagem (L);

V_{AF}: Volume de água filtrada produzido (L).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Etapa I - Caracterização das fibras de algodão mercerizado e poliéster

5.1.1 Microscopia Óptica

A microscopia óptica foi realizada no Laboratório LATAR/SHS/EESC/USP. A Tabela 4 apresenta os valores médios, máximos e mínimos encontrados para cada fio. A Figura 36 apresenta a distribuição dos diâmetros medidos.

Tabela 4 - Diâmetros dos fios estudados.

Parâmetro	Valor	
	Algodão	Poliéster
Diâmetro médio (μm)	315,9	321,8
Diâmetro máximo (μm)	370	400
Diâmetro mínimo (μm)	260	250
Desvio padrão	26,85	35

Figura 36- Distribuição dos diâmetros dos fios medidos por Microscopia Óptica

Pelas médias dos diâmetros de ambas os tipos de fios, pôde-se assumir que a superfície de contato dos filtros das diferentes fibras era parecida, possibilitando comparação da influência do tipo de fibra na filtração de água para abastecimento em filtros de fibras flexíveis. Como será observado nas fotos do MEV, os fios usados na pesquisa são constituídos de microfibrilas torcidas entre si (multifilares). Também é válido ressaltar que os

fios estudados possuem diâmetros médios cerca de 10 vezes maior que o diâmetro das fibras unifilares de náilon do leito filtrante estudado por Lee *et al* (2006, 2007, 2008a, 2008b), o que, se fossem considerados como unidades unifilares, apresentariam menor superfície de contato disponível do filtro em comparação aos leitos comercializados. .

5.1.2 Testes de resistência das fibras a meios agressivos

Como exposto no item 4.3.3, os fios foram imersos em diferentes meios a fim de avaliar alterações em sua superfície e respectiva perda de massa.

5.1.2.1 Após 3 meses de imersão

5.1.2.1.1 Perda de massa

Foram calculadas as perdas de massa dos fios em porcentagem após 3 meses de imersão nos ambientes supracitados, como mostra Tabela 5.

Tabela 5- Perda de massa dos fios após 3 meses de imersão.

Caracterização mássica dos fios						
Ambientes	Algodão			Poliéster		
	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (%)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (%)
Água ácida pH $4,7 \pm 0,3$	3,1918	3,0982	2,93	3,1469	3,1407	0,19
Água alcalina pH $9 \pm 0,3$	3,3288	3,2339	2,85	3,4484	3,1810	7,75
Água da rede pública de abastecimento	3,2255	3,1525	2,26	3,4299	3,4132	0,48

Nota-se que em ambas as fibras, as perdas mássicas dos 3 ambientes estudados foram parecidas, o que indica possibilidade de tais perdas representarem impurezas e contaminações advindas da própria fabricação, retiradas nos processos de lavagem em água deionizada realizados pela autora como preparação desta etapa. A perda de massa de 7% para poliéster pode

também estar relacionada com ruptura de algum fio do feixe ou erro experimental, já que este comportamento não foi observado na análise depois de 7 meses de imersão em água de igual pH.

5.1.2.1.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Como citado no item 4.3.4, foi realizada Microscopia Eletrônica de Varredura nos fios de algodão e poliéster antes e após imersão nos ambientes agressivos testados. As medidas localizadas no canto inferior esquerdo de todas as fotos de MEV deste item são: (a) 20 μ m; (b) 10 μ m; (c) 10 μ m; (d) 2 μ m.

a) Fios de algodão mercerizado

a.1) *MEV em fios de algodão mercerizado sem nenhum tratamento*: a figura 37 representa o fio de algodão utilizada nos leitos filtrantes após lavagem em água deionizada com diferentes aumentos.

Figura 37 - Imagem de MEV de fio de algodão sem nenhum tratamento com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

É importante observar as fibrilas entrelaçadas formando o fio de algodão mercerizado utilizado na filtração, e as pequenas ranhuras inerentes à fibra de algodão.

a.2) MEV em fios de algodão mercerizado após imersão de 3 meses em água ácida.

Figura 38 - Imagem de MEV de fios de algodão após 3 meses imersas em água ácida, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

Nota-se que não houve mudanças significativas na estrutura das fibrilas, demonstrando que os fios de algodão não são sensíveis à ação de água com pH ácido por 3 meses.

a.3) MEV em fios de algodão mercerizado após imersão de 3 meses em água alcalina.

Figura 39 - Imagem de MEV de fio de algodão após 3 meses imersas em água alcalina, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

Apesar da Figura 14, onde é mostrada solubilidade de diversas fibras têxteis, mostrar que o algodão é insolúvel em alguns solventes alcalinos, a Figura 39 mostra a superfície das fibrilas de algodão mercerizado afetada depois de 3 meses imersas em água alcalina. Porém, não houve perda de massa significativa neste caso, o que sugere somente uma reação na superfície das fibrilas.

b) Fios de poliéster

b.1) MEV em fios de poliéster sem nenhum tratamento.

Figura 41 - Imagem de MEV de fio de poliéster sem nenhum tratamento, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

Nota-se que o fio de poliéster também é constituído de fibrilas menores, e que suas fibrilas possuem superfície mais lisa que as fibrilas de algodão.

b.2) MEV em fios de poliéster após imersão de 3 meses em água ácida.

Figura 42 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 3 meses imersas em água ácida, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

Pode-se observar que não houve alterações nas superfícies das fibrilas após imersão em água ácida.

b.3) MEV em fios de poliéster após imersão de 3 meses em água alcalina.

Figura 43 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 3 meses imersas em água alcalina, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

A tabela 5 indica perda de massa de 7% neste caso, mas observando a MEV da Figura 43, nota-se que não houve alterações nas superfícies das fibrilas, o que reforça hipótese de erro experimental na medida de perda de massa.

b.4) MEV em fios de poliéster após imersão de 3 meses em água da rede pública de abastecimento.

Figura 44 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 3 meses imersas em água da rede pública de abastecimento, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

A Figura 44 mostra que não houve alterações na estrutura das fibrilas após imersão em água de rede pública de abastecimento.

5.1.4.2 Após 7 meses de imersão

5.1.4.2.1 Perda de massa

Foram calculadas as perdas de massa em porcentagem dos fios após 7 meses de imersão nos ambientes supracitados, como mostra Tabela 6.

Tabela 6 - Perda de massa os fios após 7 meses de imersão.

Caracterização mássica dos fios - 7meses						
Ambientes	Algodão			Poliéster		
	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (%)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (%)
Água ácida pH $4,7 \pm 0,3$	3,2135	3,1473	2,06	3,4837	3,4838	0,00
Água alcalina pH $9 \pm 0,3$	3,28	3,2468	1,01	3,1747	3,1746	0,00
Água da rede pública de abastecimento	3,3625	3,2542	3,22	3,1109	3,0818	0,94

Nota-se também que as porcentagens de perda de massa dos fios são muito baixas, demonstrando insolubilidade significativa das fibras estudadas aos ambientes citados. É importante observar que a fibra de poliéster não apresentou perda de massa em água alcalina, como observado nos resultados de imersão por 3 meses, o que reforça hipótese de erro experimental naquela situação. O feixe de fios de algodão imersa em água ácida apresentou coloração escura em uma de suas extremidades, como pode ser visualizado na Figura 45.

Figura 45 – Feixe de fios de algodão após 7 meses de imersão em água ácida.

5.1.4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Em todas as Figuras de MEV desse item, exceto item *a.1.1*, as medidas localizadas no canto inferior esquerdo são: (a) 20 μm ; (b) 10 μm ; (c) 10 μm ; (d) 2 μm .

a) Fios de algodão mercerizado

a.1) MEV em fios de algodão mercerizado após 7 meses de imersão em água ácida

Figura 46 - Imagem de MEV de fio de algodão após 7 meses imersas em água ácida, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

A Figura 46 mostra leves ranhuras na superfície das fibrilas, porém sem perda de massa significativa, como observado na Tabela 6.

a.1.1) MEV em fios de algodão mercerizado escurecidas, como observado na Figura 53

Figura 47 - Imagem de MEV de fio de algodão (parte escurecida) após 7 meses imersas em água ácida, com aumento de (a) 1500 vezes; (b) 3000 vezes; (c) 5820 vezes.

As medidas localizadas no canto inferior esquerdo são: (a) 10µm; (b) 10 µm; (c) 2 µm. A parte escurecida do feixe de fios de algodão, visualizada na Figura 45, pode ser alguma colônia de microrganismos (fungo ou bactérias, por exemplo) adaptada a ambientes acidificados. Porém, tal hipótese não foi confirmada na MEV já que a preparação das amostras para tal análise necessitou de estufa por 12 horas, o que provavelmente matou os possíveis organismos vivos existentes na fibra. A figura 47 mostra as fibrilas com ranhuras, e com substâncias parecidas com sujeira, impossibilitando a afirmação de que se trata de um organismo morto pela exposição prolongada a altas temperaturas.

a.2) MEV em fios de algodão mercerizado após 7 meses de imersão em água alcalina

Figura 48 - Imagem de MEV de fio de algodão após 7 meses imersas em água alcalina, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

Nota-se que não houve alterações significativas na estrutura das fibrilas.

a.3) MEV em fios de algodão mercerizado após 7 meses de imersão em água de rede de abastecimento público

Figura 49 - Imagem de MEV de fio de algodão após 7 meses imersas em água da rede pública de abastecimento, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

A Figura 49 mostra poucas alterações na superfície das fibrilas, porém um pouco mais visíveis do que em outros ambientes.

b) Fios de poliéster

b.1) MEV em fios de poliéster após 7 meses de imersão em água ácida

Figura 50 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 7 meses imersas em água ácida, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

Pela observação da Figura 50, não houve alterações significativas na superfície das fibrilas. A figura 50-c mostra pequenas impurezas, provavelmente advindas de ambiente externo ou fabricação do próprio fio.

b.2) MEV em fios de poliéster após 7 meses de imersão em água alcalina

Figura 51 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 7 meses imersas em água alcalina, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

Também não houve alterações nas fibrilas imersas neste ambiente.

b.3) MEV em fios de poliéster após 7 meses de imersão em água de rede de abastecimento público

Figura 52 - Imagem de MEV de fio de poliéster após 7 meses imersas em água da rede pública de abastecimento, com aumento de (a) 600 vezes; (b) 1500 vezes; (c) 3000 vezes; (d) 6000 vezes.

Não houve alterações na superfície das fibrilas. No geral, com as análises de MEV e perda de massa após imersão em diferentes ambientes, é possível afirmar que as fibras de algodão são muito pouco solúveis, e as de poliéster são praticamente insolúveis quando submetidos a imersão em água de caráter fortemente ácido ou alcalino, como já citado na Revisão Bibliográfica. São necessárias, porém, investigações adicionais relativas ao surgimento de microrganismos nas fibras de algodão em ambientes ácidos, para responder ao aparecimento da mancha preta, mostrada na Figura 45.

5.1.3 Cálculo da porosidade do filtro de fibras flexíveis

Como previamente citado na Revisão Bibliográfica, a diminuição da porosidade proporciona melhorias na retenção de partículas, devido ao aumento da superfície de contato. Partindo desse pressuposto, a autora utilizou, para montagem dos filtros, o limite físico máximo de fios dentro dos tubos plásticos (canudos), respeitando a distribuição de canudos vazios e recheados de fios, como descrito no item 4.5.1.5. Portanto, a porosidade foi calculada em função do número de fios já inseridos em cada leito - 2420 fios, sendo 220 em cada canudo de plástico.

5.1.3.1 Porosidade pelo Método do Volume Deslocado

Como explicado no item 4.3.6.1, feixes com número conhecido de fios - de 250 a 3000 fios - de 1 metro de comprimento foram imersos em proveta graduada com volume conhecido de água. Com o volume deslocado de cada feixe de fios, foi plotada curva. A partir da equação 5, e tendo valores da tabela 7, foi construído relação entre porosidade do leito e número de fios do leito filtrante, mostrada na Figura 53.

Tabela 7-Dados para cálculo da porosidade dos filtros

Diâmetro do filtro (m)	0,028
Altura do filtro (m)	1
Volume do filtro (m ³)	0,000616
Volume do filtro (mL)	615,7521

Figura 53- Relação entre número de fios e respectivas porosidades dos leitos filtrantes.

A partir das equações expressas na Figura 53, e da quantidade de fios colocados no filtro, foram calculadas as porosidades de cada filtro, expressas abaixo:

Tabela 8- Porosidade calculada pelo Método do Volume Deslocado

Porosidade (%)	
2420 fios	2332 fios
Algodão	Poliéster
66,8	74,9

5.1.3.2 Porosidade calculada pela área transversal

Utilizando das equações 6, 7 e 8 - expressas no item 4.3.4.2, calcularam-se as áreas transversais e porosidade de cada filtro com 2420 fios, como expresso na Tabela abaixo:

Tabela 9-Área transversal e porosidade dos filtros.

Área da seção transversal de cada fio (m ²)		Área da seção transversal total (m ²)		Porosidade (%)	
Algodão	Poliéster	Algodão	Poliéster	Algodão	Poliéster
7,84E-08	8,1332E-08	0,00019	0,000197	69	68

Esse método de cálculo da porosidade considera cada fio como fio unifilar, sendo que na realidade os fios são constituídos por múltiplas fibras entrelaçadas e torcidas entre si. Ou seja, neste método, diferente do método anterior, não são considerados os pequenos espaços existentes entre as fibrilas torcidas.

Utilizando o método 2 para cálculo da porosidade, seria necessário igualar as porosidades dos filtros aumentando a do poliéster (retirando fios até porosidade atingir 69%), ou diminuindo a do algodão (inserindo fios até porosidade atingir 68%). Pela facilidade do processo, visto que os filtros já estavam construídos, retirou-se alguns fios do filtro de poliéster, igualando as porosidades dos filtros em 69%. Para tal cálculo, dividiu-se a área da seção transversal total dos fios do filtro de algodão pela área da seção transversal do fio de poliéster, obtendo o número de fios que deveria existir no filtro de poliéster para que ambas as áreas (e consequentemente, ambas as porosidades) fossem iguais. Logo, foram retirados 88 fios do filtro de poliéster para ajuste de porosidade. Porém, após análise em imagens MEV, onde nitidamente observa-se que os espaços entre as microfibras também retém impurezas, adotou-se valores de porosidade do método 1.

5.1.3.3 Porosidade calculada pela concentração mássica

Neste item, calculou-se a concentração em massa de fios no leito, utilizando para cálculo de volume do filtro comprimento = 0,6 metros, como já explicado anteriormente. A partir das Equações 9, 10 e 11, pode-se calcular os dados da Tabela 10:

Tabela 10-Porosidade pela concentração mássica.

Concentração mássica (Kg/m ³)		Massa específica (kg/m ³)		Porosidade	
Algodão	Poliéster	Algodão	Poliéster	Algodão	Poliéster
124,6	173,3	1535,4	1362,3	91,9	87,3

5.1.3.4 Escolha do método de cálculo da porosidade

Como não era possível no início da pesquisa afirmar que o espaço entre as fibrilas também atuava na filtração, ou que a lavagem dos filtros adotada era eficaz na limpeza das impurezas retidas entre as microfibras, considerou-se que cada fio possuía características de fibra única de diâmetro médio encontrado na Microscopia Óptica, e assim foi adotado, primeiramente, como método de cálculo da porosidade o método 2 - pela área da seção transversal de cada fio.

As medidas de deslocamento de volume do método 1 estão suscetíveis a erros, devido à eventual presença de bolhas de ar adsorvidas nas fibras, porém são mais exatas que o método 2, já que consideram os vazios entre as fibrilas. Portanto, mesmo que mudanças estruturais no filtro de poliéster tenham sido realizadas considerando método 2 para cálculo de porosidade, as porosidades dos filtros são aproximadamente de 67% para filtro de fibras de algodão, e 75% para filtro de fibras de poliéster, como mostra Método 1.

5.1.4 Cálculo da superfície de contato de cada filtro

Utilizando o diâmetro médio obtido pela Microscopia Óptica, considerando comprimento de 1 metro (filtro de 100 cm, por exemplo), e as equações 12 e 13, calculou-se a superfície de contatos dos filtros, mostrada na Tabela 11.

Tabela 11-Superfície de contato dos filtros.

Superfície de contato de cada fio (m ²)		Superfície de contato de todos os fios no filtro de 100 cm (m ²)	
Algodão	Poliéster	Algodão	Poliéster
0,000992	0,00101096	2,401678	2,357645169

5.1.5 Cálculo do número de Reynolds

A fim de caracterizar o comportamento hidráulico do filtro de fibras flexíveis, foi calculado Número de Reynolds para todas as taxas de filtração estudadas em ambos os leitos filtrantes. A fórmula utilizada para cálculo de Reynolds foi:

$$Re_y = \frac{V * L_c}{\gamma}$$

onde

V = velocidade intersticial, aqui considerado taxa de filtração dividida pela porosidade do leito filtrante de 69%;

$$L_c = \text{igual a } \frac{4 * \text{Área molhada}}{\text{Perímetro molhado}} = \frac{\frac{\pi D^2}{4} - n \pi \frac{d_{fio}^2}{4}}{\pi D + n \pi d_{fio}} = \frac{D^2 - n d_{fio}^2}{D + n d_{fio}}$$

γ = viscosidade cinemática (m²/s)

D = diâmetro do filtro (28 mm)

d_{fio} = diâmetro médio do fio (algodão mercerizado ou poliéster);

n = número de fibras no leito filtrante (2420 para filtro de algodão e 2332 para filtro de poliéster).

Os resultados para ambas as fibras, e variando temperatura entre 15 e 30 °C estão expressos na Tabela 12. Importante citar que para cálculo da velocidade intersticial, foi considerado que as linhas de costura fossem fibras unifilares, e não tranças de micro fibrilas.

Tabela 12 - Número de Reynolds

Taxa de filtração (m/h)	Velocidade intersticial (m/s)	Temperatura (°C)	Viscosidade cinemática (*10 ⁻⁷ m ² /s)	Número de Reynolds filtro de fibras de algodão	Número de Reynolds filtro de fibras de poliéster
40	0,01610306	15	11,4	9,67	9,84
		20	10,03	10,99	11,19
		25	8,93	12,34	12,57
		30	8,01	13,76	14,01
60	0,02415459	15	11,4	14,5	14,77
		20	10,03	16,49	16,78
		25	8,93	18,52	18,85
		30	8,01	20,64	21,02
80	0,03220612	15	11,4	19,34	19,69
		20	10,03	21,98	22,38
		25	8,93	24,69	25,13
		30	8,01	27,52	28,02
100	0,04025765	15	11,4	24,17	24,61
		20	10,03	27,48	27,97
		25	8,93	30,86	31,42
		30	8,01	34,41	35,03
120	0,04830918	15	11,4	29,01	29,53
		20	10,03	32,97	33,57
		25	8,93	37,03	37,7
		30	8,01	41,29	42,03

Nota-se que os números de Reynolds para todas as condições mostram comportamento do filtro de fibras flexíveis de Regime de Forchheimer, assim como filtração em meios porosos, com número de Reynolds variando de 1 a 100 (BOTARIA E DI BERNARDO, 2009; e TRUSSEL E CHANG, 1999). Tal regime caracteriza-se por fluxo laminar e crescente influência inercial.

5.2 Etapa II: Ensaios para obtenção dos parâmetros de coagulação

Como exposto no item 4.4, foi construído diagrama de coagulação considerando remoção de turbidez e cor aparente para filtração direta. O diagrama para turbidez é mostrado com demarcações para valores de 0,5; 1,0 e 2,0 uT, considerando padrões antigos e atuais de

potabilidade para filtração rápida, e possível uso do filtro de fibras flexíveis como pré-filtro. Os diagramas são mostrados nas Figuras 54 e 55. As variáveis da água bruta no dia da realização do diagrama foram: turbidez: 6,7 uT, cor aparente: 52 uC, temperatura: $25,5 \pm 0,5$ °C.

Figura 54 - Diagrama de coagulação em valores de turbidez (uT)

Figura 55 - Diagrama de coagulação em valores de cor aparente (uC)

É importante ressaltar que as membranas utilizadas na filtração direta estão relacionadas aos poros médios dos leitos granulares, cujos mecanismos diferem um pouco da filtração dos filtros de fibras flexíveis. Portanto, os diagramas deste item foram utilizados apenas de parâmetro inicial para escolha e análise de algumas dosagens e pH de coagulação.

Observa-se pelo diagrama de coagulação que é possível obter diversos pares de dosagem de coagulante e pH, cujas eficiências de remoção de turbidez e cor sejam altas. Considerando os estudos sobre filtração direta em Filtros de Fibras Flexíveis, é preferível o uso de dosagens mais baixas, obtidas com auxílio dos diagramas de coagulação, que forneçam a eficiência desejada na etapa de filtração, já que menores dosagens conduzem à formação de menores concentrações de precipitados de hidróxido de alumínio/ferro, proporcionando carreiras de filtração mais longas. Tais considerações foram essenciais para escolha da dosagem de sulfato de alumínio (inicial 22,5 mg/L, e posteriormente 15 mg/L), e manutenção da faixa de pH. A dosagem exata de 22,5 mg/L foi escolhida também em função de estudos prévios de filtro 3F no grupo de pesquisa.

Figura 56- Gráfico do potencial zeta versus pH de coagulação na filtração direta.

Também foi avaliado potencial zeta de cada par dosagem de coagulante e pH de coagulação, resultados estes expresso na Figura 56. Nota-se que as concentrações de 10 e 20 mg/L obtiveram potencial zeta próximo de zero para pH entre 6,3 e 6,5. Com linhas de tendência entre os pontos de mesma concentração nota-se que a faixa de pH cujo potencial zeta se aproxima do zero é de 6,3 a 6,5, faixa esta mantida nos ensaios de filtração direta da Etapa III.

5.3 Etapa III: Ensaios de filtração direta em filtros de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster

Como exposto na Tabela 1 do item 4.5.2, foram testados dois comprimentos de leito diferentes, dois tipos de fibras, cinco taxas de filtração e duas dosagens de sulfato de alumínio como coagulante. É importante lembrar que as faixas de pH de coagulação, potencial zeta e temperatura eram mantidas. Os resultados são expressos a seguir. Os parâmetros analisados obedecem a Tabela 2 do item 4.5.3. Em todos os gráficos de turbidez e cor aparente da água filtrada ao longo da carreira de filtração, foi colocado um fator de correlação entre as curvas das triplicatas no canto superior esquerdo. Tal correlação expressa a similaridade média entre as curvas, e quanto mais próximo de 1, maior essa similaridade.

Nos subitens de cada dosagem de coagulante serão expostos os gráficos de turbidez e cor aparente da água filtrada de acordo com a taxa de filtração estudada, para avaliação visual da tendência de comportamento dos diferentes filtros. Ao final de cada bloco de resultados referentes a cada dosagem investigada, são expostas tabelas com o resumo das variáveis analisadas na filtração direta dos filtros de fibras flexíveis. Tal exposição de resultados foi adotada devido ao grande número de gráficos e dados, facilitando comparação e análise do leitor. Também para facilitar leitura do trabalho, os valores de perda de carga das triplicatas dos ensaios estão apresentados no Anexo I.

5.3.1 Parte 1: Filtração com filtros de fibras flexíveis, aplicando-se 22,5 mg/L de sulfato de alumínio.

Salienta-se novamente que a água sintética usada como afluente possuía turbidez média de 7,7 uT, e cor aparente média de 97 uC.

5.3.1.1 Taxa de 40 m/h

As características da água bruta e coagulada para os ensaios de filtração com taxa 40 m/h estão expressas nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13- Caracterização água bruta para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h

	Características água bruta						
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Cor verdadeira (uC)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)
Ensaio 1 e 2	26 ± 0,6	7,12 ± 0,06	-21,7 ± 0,9	55,46	13,2 ± 0,28	27,7	49,21
Ensaio 3	28 ± 0,4	6,9 ± 0,06	-25	56,54	6,8 ± 0,3	26,8	53,22

Tabela 14 - Caracterização água coagulada para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h

	Características água coagulada		
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	26 ± 0,4	6,47 ± 0,04	0,83 ± 2,1
Ensaio 2	27 ± 0,3	6,48 ± 0,05	-1,24 ± 2
Ensaio 3	28 ± 0,4	6,41 ± 0,04	-0,29 ± 1,9

5.3.1.1.1 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 60 cm

Figura 57 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 40 m/h.

Alguns ensaios apresentam pontos ligeiramente fora do comportamento esperado da curva de evolução dos valores de turbidez e cor aparente, provavelmente devido a erros experimentais. Mesmo assim neste caso, a correlação apresentou valor alto. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $17,5 \pm 1,5$ minutos. As perdas de carga dos ensaios podem ser visualizadas na figura a seguir e no Anexo I.

Figura 58- Perda de carga com filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1

A partir do Figura 58 acima é possível perceber que houve utilização majoritária dos 20 a 30 primeiros centímetros do filtro, caracterizada pelo acúmulo grande de perda de carga nesse primeiro trecho do leito.

5.3.1.1.2 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 59 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 40 m/h.

A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $164,4 \pm 45,2$ minutos, bem superior ao filtro de 60 cm e mesma taxa. As perdas de carga desse item são mostradas na Figura a seguir e no anexo I.

Figura 60 - Perda de carga com filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1

A Figura 60 também mostra a utilização mais intensa dos primeiros 30 centímetros do filtro na filtração, sendo os 70 cm restantes responsáveis por retenção de menor quantidade de impurezas. Tal fato demonstra que o aumento do comprimento do leito de 60cm para 100cm contribui para aumento da carreira de filtração, mas com distribuição de perda de carga não uniforme e mais significativa na parte inicial do leito.

5.3.1.1.3 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 60 cm

Figura 61 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 40 m/h.

Aqui também há ocorrência de um ponto fora da tendência observado ao longo da carreira de filtração, embora correlação esteja com valor alto. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $36,2 \pm 5,6$ minutos. As perdas de carga dos ensaios são mostradas a seguir e no Anexo I.

Figura 62 - Perda de carga com filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1

Aqui se observa que, para taxa de 40 m/h, o leito filtrante com fibras de poliéster de 60 cm foi aproveitado de forma um pouco mais uniforme que nos ensaios de mesma taxa no filtro

de algodão mercerizado de mesmo comprimento de leito. Ainda assim, verificou-se maior retenção de impurezas nos primeiros 20 cm de leito.

5.3.1.1.4 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 63 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 40 m/h.

Aqui também nota-se um ponto fora da curva, além do ensaio 3 possuir carreira de filtração claramente maior que as demais. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $145,4 \pm 27,3$ minutos. As perdas de carga são expostas a seguir e no Anexo I.

Figura 64 - Perda de carga com filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1

A Figura 64 mostra que o filtro de poliéster, operando a taxa de 40 m/h e comparado ao filtro de fibras de algodão na mesma taxa, obteve distribuição de perda de carga mais uniforme ao longo do comprimento do leito durante a carreira de filtração, visto o menor "paralelismo" da curva de perda de carga ao final da carreira em relação à curva do início da operação, situação em que o filtro se encontrava limpo.

5.3.1.2 Taxa 60 m/h

As características da água bruta e coagulada para os ensaios de filtração com taxa 60 m/h estão expressas nas Tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Caracterização água bruta para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 60 m/h

	Características água bruta						
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Cor verdadeira (uC)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)
Ensaio 1	28 ± 0,1	7,11 ± 0,05	-23,4	56,54	6,8 ± 0,3	26,8	53,22
Ensaio 2 e 3	27,7 ± 0,2	7,09 ± 0,03	-25,3	62,58	10,1 ± 1,7	23,1	64,9

Tabela 16 - Caracterização água coagulada para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 60 m/h

	Características água coagulada		
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	27,9 ± 0,2	6,45 ± 0,03	-0,56 ± 1,6
Ensaio 2	27 ± 0,3	6,38 ± 0,02	3,26 ± 0,73
Ensaio 3	27,5 ± 0,2	6,47 ± 0,02	-0,17 ± 1,15

5.3.1.2.1 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 60 cm

Figura 65 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 60 m/h.

Nenhum ensaio atingiu valores de turbidez menores que o limite imposto (1 uT) para filtro de algodão de leito igual a 60cm e taxa de 60 m/h. As perdas de carga dos ensaios são expressas na figura a seguir e no Anexo I

Figura 66 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1

Verifica-se que nos ensaios realizados com filtros de fibras de algodão de leito 60cm, a taxa de 60 m/h, a retenção de impurezas ocorreu preponderantemente nos primeiros 20 a 30 cm do leito. Ou seja, o filtro mostrou comportamento semelhante ao ensaio com taxa de 40 m/h, onde aproveitamento mais efetivo se deu na primeira metade do filtro.

5.3.1.2.2 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 67 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 60 m/h.

O coeficiente de correlação (como já mencionado, exposto à esquerda superior dos gráficos) mostra alta correlação das curvas, mesmo as carreiras de filtração mostrando

variabilidade. É interessante analisar também as condições de coagulação de cada ensaio expressos nas tabelas iniciais. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $84,7 \pm 35,3$ minutos. As perdas de carga dos ensaios nesta condição estão expressas na figura a seguir e no Anexo I

Figura 68 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1

Na taxa de 60 m/h, o filtro de fibras de algodão de comprimento 100cm mostrou menor paralelismo das curvas de perda de carga final em relação à inicial, mas ainda aproveitando principalmente os primeiros 50 cm do leito para retenção de impurezas.

5.3.1.2.3 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 60 cm

Figura 69 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 60 m/h.

Aqui também houve um ponto fora da tendência no ensaio 1, além deste apresentar carreira de filtração menor. Ainda assim, as curvas apresentaram comportamento parecido entre as triplicatas para esta específica condição. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $32,3 \pm 5,9$ minutos. As perdas de carga estão expressas a seguir e no Anexo I.

Figura 70 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1

Assim como na taxa de 40 m/h, aqui também o filtro de fibras de poliéster mostrou retenção maior de impurezas nos primeiros 20-30 cm do leito.

5.3.1.2.4 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 71 -Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 60 m/h.

Nesta bateria de ensaios, nota-se no ensaio 3 que o primeiro valor de turbidez está acima de 1uT, provavelmente devido à lavagem realizada de maneira ineficiente. É interessante observar que o amadurecimento do filtro ocorre em menos de 5 minutos, como pode mostrado nos gráficos da Figura 79. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $81,9 \pm 27,9$ minutos. As perdas de carga são expressas na figura a seguir e no Anexo I

Figura 72 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1

Aqui novamente nota-se o aproveitamento dos primeiros 40 cm do leito filtrante, e maior uniformidade na distribuição da perda de carga.

5.3.1.3 Taxa 80 m/h

As características da água bruta e coagulada para os ensaios de filtração com taxa 80 m/h estão expressas nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17 - Caracterização água bruta para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 80 m/h

	Características água bruta						
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Cor verdadeira (uC)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)
Ensaio 1 ao 3	26,7 ± 0,3	7,15 ± 0,05	-23,4 ± 1,4	65,08	3,5 ± 0,4	24,2	65,74

Tabela 18 - Caracterização água coagulada para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 80 m/h

	Características água coagulada		
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	26 ± 0,3	6,46 ± 0,03	-1,11 ± 1,8
Ensaio 2	26,6 ± 0,3	6,52 ± 0,01	-1,84 ± 1,02
Ensaio 3	26,7 ± 0,1	6,53 ± 0,02	-1,83 ± 0,8

5.3.1.3.1 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 60 cm

Figura 73 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 80 m/h.

Nota-se que na taxa de 80 m/h, o filtro de algodão mercerizado de 60 cm de leito não produziu filtrado com turbidez menor que o limite estabelecido (1 uT), caracterizando a ocorrência de traspasse precoce no leito para taxa de 80 m/h. As perdas de carga estão expressas a seguir e no Anexo I.

Figura 74 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1

Nota-se que mesmo em taxas mais altas, o filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado de leito 60cm, utilizou predominantemente os primeiros 20 cm do leito.

5.3.1.3.2 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 75 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 80 m/h.

No ensaio 2, pode-se notar que há um ponto fugindo da tendência das curvas. Aqui o valor de correlação entre as curvas é um pouco menor, mas ainda assim considerado satisfatório. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $52,9 \pm 19,6$ minutos. As perdas de carga são mostradas a seguir e no Anexo I.

Figura 76 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1

Na taxa 80 m/h, já é possível observar diminuição da relação perda de carga final/perda de carga inicial, fato decorrente de altas taxas, devido a melhor distribuição das impurezas ao longo do filtro, comparada às taxas baixas. Aqui também, é aproveitado os primeiros 40-45 cm do leito na retenção das impurezas.

5.3.1.3.3 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 60 cm

Figura 77 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de poliéster 60cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 80 m/h.

Observa-se a bom índice de correlação e comportamento parecidos dos três ensaios. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $18,7 \pm 6,8$ minutos. As perdas de carga são expostas a seguir e no Anexo I.

Figura 78 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1

Como nas demais taxas para o filtro de poliéster de comprimento de 60 cm, há predominância da retenção de partículas nos primeiros 20 cm do leito.

5.3.1.3.4 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 79 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 80 m/h.

A correlação destes ensaios possui valor elevado, embora o ensaio 2 tenha mostrado carreira de filtração maior. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $63,2 \pm 2,1$ minutos. As perdas de carga são expostas a seguir e no Anexo I.

Figura 80 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1

É importante ressaltar aqui que os filtros de 60 cm (tanto poliéster quanto de algodão mercerizado) obtiveram carreiras de filtração (considerando limite de turbidez igual a 1uT) de no máximo 25 minutos, não mostrando vantagem para testes com taxas de filtração maiores, ao contrário dos filtros de comprimento de leito de 100 cm. Portanto, para taxas de 100 e 120 m/h, foram testados somente os filtros de fibras de algodão e poliéster de comprimento de leito de 100 cm.

5.3.1.4 Taxa 100m/h

As características da água bruta e coagulada para os ensaios de filtração com taxa 100 m/h estão expressas nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Caracterização água bruta para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 100 m/h

	Características água bruta					
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)
Ensaio 1 ao 3	26,5 ± 0,2	7,08 ± 0,01	-27,8 ± 1,3	68,13	12,5 ± 8,1	27,7
						63,6

Tabela 20 - Caracterização água coagulada para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 100 m/h

	Características água coagulada		
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	26 ± 0,1	6,47 ± 0,04	1,96 ± 3,2
Ensaio 2	26,4 ± 0,4	6,54 ± 0,01	-1,3 ± 1,6
Ensaio 3	26,5 ± 0,1	6,56 ± 0,03	-1,71 ± 0,2

5.3.1.4.1 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 81 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 100 m/h.

Apesar do ensaio 2 mostrar carreira de filtração menor que os demais ensaios nesta bateria, a correlação mostrou valores altos para ambos os parâmetros (cor e turbidez). A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $31,7 \pm 4,0$ minutos. As perdas de carga são expostas a seguir e no Anexo I

Figura 82 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 1

Aqui também pode ser observado variação menor da perda de carga final em relação à inicial, porém ainda há uso predominante dos primeiros 40 cm para retenção das impurezas.

5.3.1.4.2 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 83 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 100 m/h.

Nota-se que as curvas mostraram comportamento semelhantes nos 3 ensaios de filtração direta, com ligeira variação do ensaio 1. O fator de correlação, no entanto, mostra excelente similaridade entre as curvas. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $57,9 \pm 5,7$ minutos. As perdas de carga são mostradas a seguir e no Anexo I

Figura 84 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 1

Apesar do comportamento atípico da curva aos 7 minutos, houve comportamento parecido do filtro de 100 cm na taxa 100 m/h com as taxas anteriores no quesito aproveitamento do leito: 40 primeiros centímetros.

5.3.1.5 Taxa 120 m/h

As características da água bruta e coagulada para os ensaios de filtração com taxa 120 m/h estão expressas nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - Caracterização água bruta para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 120 m/h

	Características água bruta						
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Cor verdadeira (uC)	Alcalinidade (mg CaCO3/L)
Ensaio 1 ao 3	28,5 ± 0,2	7,03 ± 0,03	-24,5 ± 2	58,14	7,25 ± 2,1	29,1	63,4

Tabela 22 - Caracterização água coagulada para dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 120 m/h

	Características água coagulada		
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	27,1 ± 0,2	6,43 ± 0,06	0,69 ± 0,83
Ensaio 2	28,3 ± 0,3	6,5 ± 0,01	-1,73 ± 0,9
Ensaio 3	28,2 ± 0,3	6,5 ± 0,03	-1,81 ± 0,28

5.3.1.5.1 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 85 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 120 m/h.

As triplicatas obtiveram comportamento parecidos entre elas, e carreiras de filtração próximas. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de 22,9 ± 3,5 minutos. As perdas de carga são expressas a seguir e no Anexo I.

Figura 86 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 1

Nota-se que a evolução da perda de carga ao longo da carreira de filtração foi pequena, em relação `perda de carga inicial, possivelmente devido a alta taxa de filtração.

5.3.1.5.2 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 87 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5 mg/L; e taxa 120 m/h.

Nota-se comportamento parecido das curvas de turbidez e cor aparente residual entre as triplicatas. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $42 \pm 5,3$ minutos. As perdas de carga são expostas a seguir e no Anexo I

Figura 88 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 1

Não foram testadas taxas maiores devido à alta perda de carga atingida na taxa de 120 m/h nos filtros de algodão mercerizado, como pode ser observado nos gráficos.

No geral, pelos gráficos de perda de carga observa-se que na maioria dos ensaios houve maior concentração da perda de carga nos 50 a 60% do comprimento do leito filtrante. Também é interessante observar que as taxas maiores mostraram perdas de carga iniciais superiores a taxas menores (como era de se esperar), porém evolução menos acentuada ao longo do tempo, indicando que há maior aproveitamento do leito filtrante, devido a alta velocidade da água a qual distribui as impurezas ao longo do leito.

5.3.1.6 Análises das amostras compostas para DSA 22,5 mg/L

Como foi explicado no item 4.5.2, foram realizadas amostras compostas para dois limites de turbidez: 1 e 2uT. As análises destas são expostas nas Tabelas 23 e 24. Os valores das variáveis estão expressos em médias e desvio padrão já que os ensaios foram todos realizados em triplicata. As siglas A60, A100, P60 e P100 representam respectivamente Filtro de algodão 60 cm; filtro de algodão 100cm; filtro de poliéster 60cm, e filtro de poliéster 100cm.

Tabela 23 - Amostras compostas com carreira de filtração encerrada em turbidez 1 uT

Análises das compostas até turbidez 1 uT					
Dosagem (mg/L)	Taxa (m/h)	Composta	Abs 254nm	Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)
22,5	40	Bruta	$0,199 \pm 0,028$	$7,523 \pm 0,18$	$90,5 \pm 1,3$
		Coagulada	$0,037 \pm 0,007$	$8,477 \pm 1,505$	$97,9 \pm 21,1$
		Filtrada A60	$0,016 \pm 0,003$	$0,698 \pm 0,107$	$11,4 \pm 1,3$
		Filtrada A100	$0,012 \pm 0,002$	$0,278 \pm 0,028$	$3,8 \pm 0,2$
		Filtrada P60	$0,02 \pm 0,008$	$0,621 \pm 0,091$	$9,9 \pm 1,8$
		Filtrada P100	$0,012 \pm 0,002$	$0,368 \pm 0,132$	$5,2 \pm 1,1$
	60	Bruta	$0,229 \pm 0,007$	$7,573 \pm 0,414$	$94,3 \pm 6,0$
		Coagulada	$0,035 \pm 0,002$	$9,153 \pm 0,142$	$107,6 \pm 5,2$
		Filtrada A60	*	*	*
		Filtrada A100	$0,015 \pm 0,003$	$0,391 \pm 0,112$	$4,3 \pm 0,4$
		Filtrada P60	$0,014 \pm 0,003$	$0,528 \pm 0,027$	$7,8 \pm 0,0$
		Filtrada P100	$0,015 \pm 0,002$	$0,416 \pm 0,087$	$5,3 \pm 0,9$
	80	Bruta	$0,244 \pm 0,0$	$7,34 \pm 0,052$	$92 \pm 0,6$
		Coagulada	$0,031 \pm 0,003$	$10,017 \pm 1,494$	$97,1 \pm 11,9$
		Filtrada A60	*	*	*
		Filtrada A100	$0,015 \pm 0,003$	$0,297 \pm 0,059$	$2,0 \pm 0,8$
		Filtrada P60	$0,015 \pm 0,003$	$0,607 \pm 0,068$	$6,6 \pm 1,1$
		Filtrada P100	$0,014 \pm 0,004$	$0,323 \pm 0,035$	$2,0 \pm 0,4$
	100	Bruta	$0,212 \pm 0,001$	$7,56 \pm 0,33$	$91,3 \pm 3,1$
		Coagulada	$0,032 \pm 0,003$	$8,9 \pm 1,32$	$102,7 \pm 3,3$
		Filtrada A100	$0,017 \pm 0,002$	$0,425 \pm 0,037$	$5,3 \pm 1,4$
		Filtrada P100	$0,017 \pm 0,002$	$0,325 \pm 0,018$	$3,9 \pm 1,2$
	120	Bruta	$0,233 \pm 0,001$	$7,66 \pm 0,001$	$96,6 \pm 0,5$
		Coagulada	$0,04 \pm 0,006$	$9,057 \pm 0,078$	$108,7 \pm 2,5$
		Filtrada A100	$0,019 \pm 0,004$	$0,391 \pm 0,049$	$4,6 \pm 0,9$
		Filtrada P100	$0,019 \pm 0,004$	$0,300 \pm 0,049$	$3,3 \pm 0,5$

* não obteve amostras nos tempos de coleta abaixo do limite de 1uT

Tabela 24 - Amostras compostas com carreira de filtração encerrada em turbidez 2 uT

Análises das compostas até turbidez 2 uT					
Dosagem (mg/L)	Taxa (m/h)	Composta	Abs 254nm	Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)
22,5	40	Bruta	$0,199 \pm 0,028$	$7,523 \pm 0,18$	$90,5 \pm 1,3$
		Coagulada	$0,037 \pm 0,007$	$8,477 \pm 1,505$	$97,9 \pm 21,1$
		Filtrada A60	$0,019 \pm 0,002$	$1,047 \pm 0,182$	$14,2 \pm 2,6$
		Filtrada A100	$0,016 \pm 0,002$	$0,414 \pm 0,076$	$5,6 \pm 1,0$
		Filtrada P60	$0,022 \pm 0,007$	$0,952 \pm 0,076$	$13,4 \pm 2,1$
		Filtrada P100	$0,015 \pm 0,001$	$0,641 \pm 0,104$	$7,8 \pm 1,9$
	60	Bruta	$0,229 \pm 0,007$	$7,573 \pm 0,414$	$94,3 \pm 6,0$
		Coagulada	$0,035 \pm 0,002$	$9,153 \pm 0,142$	$107,6 \pm 5,2$
		Filtrada A60	$0,025 \pm 0,005$	$1,627 \pm 0,17$	$20,5 \pm 2,4$
		Filtrada A100	$0,019 \pm 0,001$	$0,651 \pm 0,197$	$7,7 \pm 0,9$
		Filtrada P60	$0,017 \pm 0,002$	$0,84 \pm 0,182$	$11,6 \pm 1,1$
		Filtrada P100	$0,019 \pm 0,004$	$0,725 \pm 0,158$	$9,0 \pm 1,5$
	80	Bruta	$0,244 \pm 0,0$	$7,34 \pm 0,052$	$92 \pm 0,6$
		Coagulada	$0,031 \pm 0,003$	$10,017 \pm 1,494$	$97,1 \pm 11,9$
		Filtrada A60	*	*	*
		Filtrada A100	$0,022 \pm 0,008$	$0,663 \pm 0,127$	$5,6 \pm 0,4$
		Filtrada P60	$0,021 \pm 0,002$	$0,887 \pm 0,172$	$9,0 \pm 2,0$
		Filtrada P100	$0,019 \pm 0,003$	$0,575 \pm 0,1$	$4,7 \pm 1,1$
	100	Bruta	$0,212 \pm 0,001$	$7,56 \pm 0,33$	$91,3 \pm 3,1$
		Coagulada	$0,032 \pm 0,003$	$8,9 \pm 1,32$	$102,7 \pm 3,3$
		Filtrada A100	$0,021 \pm 0,001$	$0,688 \pm 0,044$	$9,2 \pm 2,5$
		Filtrada P100	$0,017 \pm 0,002$	$0,472 \pm 0,041$	$5,1 \pm 0,8$
	120	Bruta	$0,233 \pm 0,001$	$7,66 \pm 0,001$	$96,6 \pm 0,5$
		Coagulada	$0,04 \pm 0,006$	$9,057 \pm 0,078$	$108,7 \pm 2,5$
		Filtrada A100	$0,029 \pm 0,012$	$0,668 \pm 0,085$	$7,8 \pm 0,9$
		Filtrada P100	$0,022 \pm 0,006$	$0,492 \pm 0,022$	$5,4 \pm 0,5$

* não obteve amostras nos tempos de coleta abaixo do limite de 2uT

Analisando as duas tabelas, é possível perceber que a remoção de abs 254nm é melhor nos filtros de comprimento de 100 cm, mas parecido entre as fibras de algodão mercerizado e poliéster; na taxa 60 m/h, é possível observar maior remoção de abs 254nm do filtro de fibras de poliéster 60cm em relação ao filtro de fibras de algodão 60cm. Nas taxas de 100 e 120 m/h, com

limite de turbidez de 2 uT, o filtro de fibras de poliéster obteve remoções ligeiramente maiores que o de fibras de algodão.

Em relação à remoção de turbidez, todas as taxas mostraram remoções maiores para os filtros de comprimento de 100 cm, mas valores parecidos entre as fibras. Com limite de turbidez 2 uT, e taxas de 100 e 120 m/h, o filtro de poliéster 100 cm obteve maiores eficiências de remoções em relação ao filtro de fibras de algodão.

A remoção de cor aparente foi maior nos filtros de comprimento de 100 cm, e parecidos entre as fibras quando o limite de turbidez era 1 uT. Para limite de turbidez 2uT, na taxa de 40m/h o filtro de algodão obteve maiores remoções, mas com taxas de 100 e 120 m/h, o filtro de poliéster obteve desempenho melhor.

No geral, pode-se afirmar que os filtros de maior comprimento possuem desempenho melhor na filtração direta em filtros de fibras flexíveis, obtendo carreiras de filtração mais longas, e remoções maiores dos parâmetros analisados e acima expostos. Sendo assim, na etapa 2 - onde foi testado o comportamento dos filtros face `diminuição da dosagem de 22,5 mg/L para 15 mg/L de coagulante - foram estudados somente os filtros de comprimento de 100 cm.

5.3.2 Parte 2: filtração com filtros de fibras flexíveis, aplicando-se 15 mg/L de sulfato de alumínio

Salienta-se novamente que a água sintética usada como afluente possuía turbidez média de 7,7 uT, e cor aparente média de 97 uC.

5.3.2.1 Taxa de 40 m/h

As características da água bruta e coagulada para os ensaios de filtração com taxa 40 m/h estão expressas nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 25 - Caracterização água bruta para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h

Características água bruta							
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Cor verdadeira (uC)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)
Ensaio 1 e 2	27 ± 0,4	6,79 ± 0,05	-23,3 ± 1,2	49,18	8,87 ± 1,7	23,4	49,6
Ensaio 3	30,6 ± 0,3	7,03 ± 0,06	-22,5 ± 2,4	50,21	8,87 ± 1,7	23,4	49,6

Tabela 26 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h

Características água coagulada			
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	26,5 ± 0,4	6,4 ± 0,03	-2,4 ± 1,5
Ensaio 2	28,5 ± 0,6	6,45 ± 0,03	-0,78 ± 1,57
Ensaio 3	31 ± 0,5	6,5 ± 0,02	-3,8 ± 1,21

5.3.2.1.1 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 89-Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 40 m/h.

Nota-se que o ensaio 1 obteve um ponto fora da tendência da reta, além de mostrar carreira de filtração maior. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1

uT) foi de $80,9 \pm 24,8$ minutos, duas vezes menor se comparado ao teste de mesma taxa, mesmo comprimento de leito, mas DSA de 22,5 mg/L. As perdas de carga são mostradas nas figuras a seguir e no Anexo I.

Figura 90 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1

Aqui, assim como na DSA = 22,5 mg/L, foram aproveitados majoritariamente os primeiros 40 cm do leito para retenção das impurezas, e mostro comportamento similar entre os tempos de coleta dos dados.

5.3.2.1.2 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 91 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 40 m/h.

A taxa de 40 m/h para DSA = 15 mg/L não mostrou excelente similaridade entre os comportamentos dos ensaios. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $182,1 \pm 26,7$ minutos, 1,3 vezes maior se comparado ao teste de mesma taxa, mesmo comprimento de leito, mas DSA de 22,5 mg/L. As perdas de cargas são mostradas a seguir e no Anexo I.

Figura 92 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 1

Nota-se menor paralelismo entre as curvas de perda de carga para esta taxa no filtro de poliéster, indicando uso dos primeiros 50-60 cm do leito filtrante na retenção de impurezas.

5.3.2.2 Taxa de 60 m/h

As características da água bruta e coagulada para os ensaios de filtração com taxa 60 m/h estão expressas nas Tabelas 27 e 28..

Tabela 27 - Caracterização água bruta para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 60 m/h

	Características água bruta						
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Cor verdadeira (uC)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)
Ensaio 1 ao 3	29,7 ± 0,5	6,78 ± 0,05	-20,2 ± 1,2	49,01	4,8 ± 0,7	24,4	48,63

Tabela 28 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 60 m/h

	Características água coagulada		
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	28,9 ± 0,5	6,4 ± 0,05	-0,9 ± 2,1
Ensaio 2	31,2 ± 0,6	6,51 ± 0,03	-5,3 ± 1,2
Ensaio 3	30,2 ± 0,4	6,4 ± 0,04	-1,87 ± 1,6

5.3.2.2.1 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 93 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 60 m/h.

Houve aqui também comportamento semelhante entre as triplicatas da bateria de ensaios. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $68,2 \pm 14,4$ minutos, 1,2 vezes menor se comparado ao teste de mesma taxa, mesmo comprimento de leito, mas DSA de 22,5 mg/L.. As perdas de carga são mostrada a seguir e no Anexo I.

Figura 94 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1

Nesta taxa, foram aproveitados somente os primeiros 30-40 cm do leito.

5.3.2.2.2 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 95 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 60 m/h.

Nota-se que a correlação também é alta, e o ensaio 1 obteve comportamento diferente dos demais. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $149,5 \pm 25,1$ minutos, 1,8 vezes maior se comparado ao teste de mesma taxa, mesmo comprimento de leito, mas DSA de 22,5 mg/L. As perdas de carga são mostradas a seguir e no Anexo I.

Figura 96 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 1

No entanto, pela Figura 96, nota-se que houve predominância do uso dos primeiro 35 - 40 cm do leito na retenção de impurezas.

5.3.2.3 Taxa de 80 m/h: As características da água bruta e coagulada para os ensaios de filtração com taxa 80 m/h estão expressas nas Tabelas 29 e 30.

Tabela 29 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 80 m/h

	Características água bruta						
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Cor verdadeira (uC)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)
Ensaio 1 ao 3	28,2 ± 0,3	6,98 ± 0,05	-22,3 ± 0,6	49,94	5,5 ± 0,9	26,5	48,65

Tabela 30 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 80 m/h

	Características água coagulada		
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	28,1 ± 0,3	6,5 ± 0,01	-6,59 ± 0,6
Ensaio 2	27,8 ± 0,3	6,32 ± 0,04	2,11 ± 1,6
Ensaio 3	27,9 ± 0,1	6,43 ± 0,03	-3,08 ± 1,4

5.3.2.3.1 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 97 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 80 m/h.

Os comportamentos das carreiras de filtração foram muito parecidos entre os ensaios, como observado na Figura acima. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $40 \pm 3,6$ minutos, 1,3 vezes menor se comparado ao teste de mesma taxa, mesmo comprimento de leito, mas DSA de 22,5 mg/L. As perdas de carga são mostradas a seguir e no Anexo I.

Figura 98 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1

Houve aproveitamento dos 35 primeiros centímetros do leito na retenção de impurezas.

5.3.2.3.2 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 99 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 80 m/h.

As curvas demonstram tendências parecidas. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $120,9 \pm 6,9$ minutos, 1,9 vezes maior se comparado ao teste de mesma taxa, mesmo comprimento de leito, mas DSA de 22,5 mg/L. As perdas de carga são mostradas a seguir e no Anexo I.

Figura 100 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 1

Houve um uso dos primeiros 60 cm do leito, notado pela diminuição do paralelismo entre as curvas de perda de carga em relação à inicial.

5.3.2.4 Taxa de 100 m/h

As características da água bruta e coagulada para os ensaios de filtração com taxa 100 m/h estão expressas nas Tabelas 31 e 32.

Tabela 31 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 100 m/h

	Características água bruta						
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Cor verdadeira (uC)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)
Ensaio 1 ao 3	28,4 ± 0,2	6,92 ± 0,01	-21,9 ± 0,8	54,86	5,2 ± 1,3	32,6	49,2

Tabela 32 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 100 m/h

	Características água coagulada		
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	27 ± 0,5	6,4 ± 0,04	1,92 ± 1,5
Ensaio 2	28,5 ± 0,2	6,41 ± 0,03	-1,68 ± 1,2
Ensaio 3	28 ± 0,4	6,52 ± 0,02	-5,57 ± 0,9

5.3.2.4.1 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 101 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 100 m/h.

O comportamento entre as triplicatas foi parecido segundo turbidez e cor aparente residual do filtrado. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $40,9 \pm 0,7$ minutos, 1,3 vezes maior se comparado ao teste de mesma taxa, mesmo comprimento de leito, mas DSA de 22,5 mg/L. As perdas de carga dos ensaios são mostradas a seguir e no Anexo I.

Figura 102 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 1

Nota-se que a perda de carga inicial é elevada, porém a evolução desta ao longa da carreira de filtração não é acentuada. Há melhor aproveitamento dos primeiro 35 cm do leito filtrante, como observado na maioria dos outros ensaios (em diferentes taxas e dosagens de coagulante).

5.3.2.4.2 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 103 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada para filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 100 m/h.

Nota-se que as curvas tem tendência parecidas de comportamento, com ligeira diferenciação do Ensaio 2. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $95,3 \pm 12,9$ minutos, 1,6 vezes maior se comparado ao teste de mesma taxa, mesmo comprimento de leito, mas DSA de 22,5 mg/L. As perdas de carga podem ser observadas a seguir e no Anexo I.

Figura 104 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 1

Nesta condição, também houve maior uso dos primeiros 40-45 cm do leito filtrante na retenção de impurezas.

5.3.2.5 Taxa de 120 m/h

As características da água bruta e coagulada para os ensaios de filtração com taxa 120 m/h estão expressas nas Tabelas 33 e 34.

Tabela 33 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 120 m/h

	Características água bruta						
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Cor verdadeira (uC)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)
Ensaio 1 ao 3	27 ± 0,4	6,8 ± 0,01	-22,7 ± 1,2	53,23	6,3 ± 0,3	20,6	48,82

Tabela 34 - Caracterização água coagulada para dosagem de 15 mg/L de coagulante, e taxa 120 m/h

	Características água coagulada		
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	26,3 ± 0,1	6,4 ± 0,03	1,4 ± 1,9
Ensaio 2	27,4 ± 0,1	6,46 ± 0,02	-1,3 ± 1,03
Ensaio 3	28,3 ± 0,1	6,5 ± 0,01	-4,59 ± 0,66

5.3.2.5.1 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 105 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 120 m/h.

Houve comportamento semelhante entre os ensaios nesta etapa do estudo. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $32,2 \pm 5,3$ minutos, 1,4 vezes maior se comparado ao teste de mesma taxa, mesmo comprimento de leito, mas DSA de 22,5 mg/L. As perdas de carga são observadas a seguir e no Anexo I.

Figura 106 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 1

Houve utilização dos primeiros 30 cm do leito na retenção de impurezas, e baixa relação entre perda de carga no final da carreira de filtração/perda de carga inicial.

5.3.2.5.2 Bateria de ensaios com Filtro de fibras flexíveis de poliéster com comprimento de leito igual a 100 cm

Figura 107 - Valores de turbidez e cor aparente da água filtrada com filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15 mg/L; e taxa 120 m/h.

Apesar do ensaio 3 ter carreira de filtração mais curta, o comportamento dos 3 ensaios é parecido, comprovado pelo alto valor de correlação. A carreira de filtração média (considerando turbidez limite de 1 uT) foi de $88,7 \pm 10$ minutos, 2,1 vezes maior se comparado ao teste de mesma taxa, mesmo comprimento de leito, mas DSA de 22,5 mg/L. As perdas de carga são mostradas abaixo.

Figura 108 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 1

No geral, observando os gráficos de perda de carga, nota-se que o filtro de fibras de poliéster utilizou melhor o comprimento de seu leito filtrante do que o filtro de fibras de algodão mercerizado. É importante notar que as triplicatas mostram melhor valor de correlação nas taxas maiores, indicando, provavelmente, que esse tipo de filtro alimentado com águas parecidas a do estudo é capaz de operar muito bem com taxas bastante elevadas, desde que seja adotado comprimento de leito adequado (maiores ou iguais a 100 cm) para garantir a qualidade da água filtrada.

5.3.2.6 Análises das compostas para DSA 15 mg/L

As análises das amostras compostas são expostas nas Tabelas 35 e 36. Os valores das variáveis estão expressos em médias e desvio padrão, assim como comentado previamente. As siglas A100, P100 significam, respectivamente, filtro de algodão 100cm, e filtro de poliéster 100 cm.

Tabela 35 - Amostras compostas para DSA 15mg/L com carreira de filtração encerrada em turbidez 1 uT

Análises das compostas até turbidez 1 uT DSA = 15mg/L					
Dosagem (mg/L)	Taxa (m/h)	Composta	Abs 254nm	Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)
15	40	Bruta	$0,187 \pm 0,01$	$8,063 \pm 0,306$	$101,7 \pm 1,6$
		Coagulada	$0,032 \pm 0,006$	$8,903 \pm 0,071$	$101,1 \pm 6,9$
		Filtrada A100	$0,025 \pm 0,009$	$0,518 \pm 0,115$	$5,9 \pm 1,1$
		Filtrada P100	$0,019 \pm 0,005$	$0,34 \pm 0,127$	$3,9 \pm 2,8$
	60	Bruta	$0,197 \pm 0,003$	$8,29 \pm 0,131$	$104,1 \pm 3,4$
		Coagulada	$0,037 \pm 0,01$	$8,507 \pm 0,132$	$103 \pm 2,2$
		Filtrada A100	$0,018 \pm 0,003$	$0,426 \pm 0,073$	$4,5 \pm 1,3$
		Filtrada P100	$0,016 \pm 0,001$	$0,251 \pm 0,03$	$2,7 \pm 0,2$
	80	Bruta	$0,210 \pm 0,018$	$8,05 \pm 0,017$	$101,8 \pm 0,4$
		Coagulada	$0,032 \pm 0,004$	$8,553 \pm 0,271$	$101,8 \pm 3,4$
		Filtrada A100	$0,018 \pm 0,003$	$0,422 \pm 0,129$	$5,1 \pm 1,6$
		Filtrada P100	$0,016 \pm 0,001$	$0,297 \pm 0,092$	$3,4 \pm 1,7$
	100	Bruta	$0,248 \pm 0,0$	$7,33 \pm 0,211$	$101,3 \pm 1,2$
		Coagulada	$0,035 \pm 0,006$	$7,787 \pm 0,325$	$98,8 \pm 2,7$
		Filtrada A100	$0,015 \pm 0,001$	$0,383 \pm 0,009$	$5,3 \pm 0,4$
		Filtrada P100	$0,016 \pm 0,001$	$0,276 \pm 0,04$	$4,1 \pm 0,5$
	120	Bruta	$0,181 \pm 0,003$	$7,9 \pm 0,431$	$97,3 \pm 4,2$
		Coagulada	$0,035 \pm 0,005$	$7,503 \pm 1,349$	$88,2 \pm 5,3$
		Filtrada A100	$0,016 \pm 0,001$	$0,412 \pm 0,057$	$3,8 \pm 0,7$
		Filtrada P100	$0,014 \pm 0,002$	$0,317 \pm 0,066$	$2,3 \pm 1,1$

Tabela 36 - Amostras compostas para DSA 15mg/L com carreira de filtração encerrada em turbidez 2 uT

Análises das compostas até turbidez 2 uT					
Dosagem (mg/L)	Taxa (m/h)	Composta	Abs 254nm	Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)
15	40	Bruta	$0,187 \pm 0,01$	$8,063 \pm 0,306$	$101,7 \pm 1,6$
		Coagulada	$0,032 \pm 0,006$	$8,903 \pm 0,071$	$101,1 \pm 6,9$
		Filtrada A100	$0,028 \pm 0,008$	$0,832 \pm 0,191$	$8,9 \pm 0,9$
		Filtrada P100	$0,022 \pm 0,005$	$0,502 \pm 0,122$	$5,6 \pm 3,0$
	60	Bruta	$0,197 \pm 0,003$	$8,29 \pm 0,131$	$104,1 \pm 3,4$
		Coagulada	$0,037 \pm 0,01$	$8,507 \pm 0,132$	$103 \pm 2,2$
		Filtrada A100	$0,02 \pm 0,003$	$0,884 \pm 0,05$	$8,4 \pm 2,2$
		Filtrada P100	$0,018 \pm 0,002$	$0,459 \pm 0,024$	$5,1 \pm 0,9$
	80	Bruta	$0,210 \pm 0,018$	$8,05 \pm 0,017$	$101,8 \pm 0,4$
		Coagulada	$0,032 \pm 0,004$	$8,553 \pm 0,271$	$101,8 \pm 3,4$
		Filtrada A100	$0,021 \pm 0,004$	$0,959 \pm 0,105$	$11,0 \pm 1,3$
		Filtrada P100	$0,017 \pm 0,001$	$0,476 \pm 0,098$	$5,8 \pm 1,5$
	100	Bruta	$0,248 \pm 0,0$	$7,33 \pm 0,211$	$101,3 \pm 1,2$
		Coagulada	$0,035 \pm 0,006$	$7,787 \pm 0,32$	$98,8 \pm 2,7$
		Filtrada A100	$0,016 \pm 0,002$	$0,708 \pm 0,057$	$9,7 \pm 1,1$
		Filtrada P100	$0,017 \pm 0,001$	$0,519 \pm 0,034$	$7,3 \pm 0,5$
	120	Bruta	$0,181 \pm 0,003$	$7,9 \pm 0,431$	$97,3 \pm 4,2$
		Coagulada	$0,035 \pm 0,005$	$7,503 \pm 1,349$	$88,2 \pm 5,3$
		Filtrada A100	$0,021 \pm 0,004$	$0,765 \pm 0,151$	$8,2 \pm 2,0$
		Filtrada P100	$0,018 \pm 0,001$	$0,494 \pm 0,184$	$4,6 \pm 2,3$

A remoção de abs 254nm mostrou-se ligeiramente melhor nos filtros de fibras de poliéster, mas não muito diferente se comparadas as diferentes taxas de filtração. A remoção de turbidez e cor aparente também mostrou melhores resultados nos filtros de poliéster em ambos os limites de turbidez.

5.3.3 Comparação dos resultados das baterias de ensaios de filtração direta dos filtros de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster

Neste item, serão expostos os resultados de forma objetiva a fim de facilitar a análise da eficiência do processo de filtração direta ocorrido nesses filtros. Os resultados estão expressos em índices de filtrabilidade, volumes filtrados, entre outras variáveis.

5.3.3.1 Volume filtrado e produção diária

As tabelas 37 a 40 mostram as médias e desvio padrão das triplicatas dos ensaios das seguintes variáveis: carreira de filtração, volume filtrado por carreira, número de carreiras de filtração em 24 horas, e o volume filtrado em 24 horas. O volume filtrado em 24 horas foi calculado considerando lavagem de 1 minuto para cada carreira de filtração.

As siglas A60, A100, P60 e P100 significam, respectivamente, filtro de fibras de algodão 60 cm, filtro de fibras de algodão 100cm, filtro de fibras de poliéster 60 cm, filtro de fibras de poliéster 100cm.

5.3.3.1.1 Dosagem de sulfato de alumínio de 22,5 mg/L

Foram considerados dois limites de turbidez para cálculos dos volumes filtrados (0,5 e 1,0 uT), considerando antiga e atual norma brasileira de Potabilidade (Portaria MS 518/2004 E 2914/2011).

5.3.3.1.1.1 Considerando turbidez limite de 0,5 uT

Tabela 37 - Carreiras de filtração e volumes filtrados para DSA 22,5 mg/L, e limite de turbidez 0,5 uT

Taxa (m/h)	DAS: 22,5mg/L Turbidez limite: 0,5 uT	Carreira de filtração (min)	Volume filtrado por carreira de filtração (L)	Número de carreiras de filtração em 24 horas	Volume filtrado em 24 horas (L)
40	A60*	5,8	2,4	211,8	504,4
	A100	142,4 ± 47,9	58,5 ± 19,7	10,9 ± 4,1	586,9 ± 1,7
	P60*	14,7	6	91,7	553,7
	P100	116,3 ± 24,2	47,8 ± 9,9	12,6 ± 2,6	586,2 ± 1,1
60	A60	**	**	**	**
	A100	63,3 ± 29,4	39,0 ± 18,1	25,9 ± 11,9	871,1 ± 7,3
	P60	13,3 ± 6,3	8,2 ± 3,9	120,6 ± 68,9	812,7 ± 42,4
	P100	53,8 ± 20,9	33,1 ± 12,9	29,2 ± 11,7	869,1 ± 7,2
80	A60	**	**	**	**
	A100	38,1 ± 14,6	31,3 ± 12	41,2 ± 17,8	1148,9 ± 14,6
	P60	16,8	13,8	80,9	1116,3
	P100	47,0 ± 2,6	38,6 ± 2,1	30 ± 1,6	1158 ± 1,3
100	A100	19,2 ± 2,0	19,7 ± 2,1	71,6 ± 7,1	1404,9 ± 7,2
	P100	42,2 ± 2,7	43,3 ± 2,8	33,4 ± 2,0	1444,1 ± 2,1
120	A100	13,6 ± 2,2	16,8 ± 2,7	100,3 ± 16,4	1650,6 ± 20,1
	P100	32,2 ± 5,0	39,7 ± 6,2	44,0 ± 6,3	1719,9 ± 7,7

*somente 1 ensaio possuiu amostras com turbidez inferior ao limite estabelecido.

**Nenhum ensaio obteve turbidez inferior ao limite estabelecido.

5.3.3.1.2 Considerando turbidez limite de 1,0 uT

Tabela 38 - Carreiras de filtração e volumes filtrados para DSA 22,5 mg/L, e limite de turbidez 1,0 uT

Taxa (m/h)	DAS: 22,5mg/L Turbidez limite: 1,0 uT	Carreira de filtração (min)	Volume filtrado por carreira de filtração (L)	Número de carreiras de filtração em 24 horas	Volume filtrado em 24 horas (L)
40	A60	17,5 ± 1,5	7,2 ± 0,6	78 ± 6,1	559,3 ± 2,5
	A100	164,4 ± 45,2	67,5 ± 18,6	9,2 ± 2,7	587,6 ± 1,1
	P60	36,2 ± 5,6	14,9 ± 2,3	39,3 ± 6,3	575,2 ± 2,6
	P100	145,4 ± 27,3	59,7 ± 11,2	10,1 ± 1,9	587,2 ± 0,8
60	A60	**	**	**	**
	A100	84,7 ± 35,3	52,2 ± 21,8	18,9 ± 7,9	875,4 ± 4,9
	P60	32,3 ± 5,9	19,9 ± 3,7	44,3 ± 8,5	859,8 ± 5,2
	P100	81,9 ± 27,9	50,5 ± 17,2	18,9 ± 6,7	875,4 ± 4,2
80	A60	**	**	**	**
	A100	52,9 ± 19,6	43,4 ± 16,1	29,1 ± 10,2	1158,8 ± 8,4
	P60	18,7 ± 6,8	15,4 ± 5,6	78,8 ± 25,7	1118 ± 21,1
	P100	63,2 ± 2,1	51,9 ± 1,7	22,4 ± 0,7	1164,3 ± 0,6
100	A100	31,7 ± 4,0	32,5 ± 4,1	44,6 ± 5,8	1432,7 ± 6,0
	P100	57,9 ± 5,7	59,4 ± 5,9	24,6 ± 2,3	1453,1 ± 2,3
120	A100	22,9 ± 3,5	28,2 ± 4,3	61,1 ± 8,5	1698,8 ± 10,5
	P100	42 ± 5,3	51,8 ± 6,5	33,8 ± 3,9	1732,5 ± 4,8

**Nenhum ensaio obteve turbidez inferior ao limite estabelecido.

Pode-se observar que exceto nas taxas de 40 e 60 m/h, os filtros de fibras de poliéster possuem carreiras de filtração e consequentemente, volumes filtrados maiores que os filtros de fibras de algodão (Ex: taxa de 100 m/h, filtro de poliéster filtrou 1453 litros/dia, contra 1433litros/dia do filtro de algodão). Nota-se que os filtros de comprimento de 100 cm obtiveram carreiras de filtração e volumes filtrados maiores que os filtros de 60 cm para ambas as fibras (Ex: taxa de 40 m/h, filtro de algodão 60 cm filtrou 559 litros/dia, contra 588 litros dia do filtro de algodão 100cm, e mesma taxa) . Como dito anteriormente, é importante analisar os dados da filtração direta através do filtro de fibras flexíveis qualitativamente também. Por exemplo, o filtro consegue excelente quantidade volume filtrado dentro dos limites de turbidez da legislação

por dia de operação às custas de relativas baixas perdas de carga (como será mostrado detalhadamente nos índices de filtrabilidade).

5.3.3.1.2 Dosagem de sulfato de alumínio de 15 mg/L:

5.3.3.1.2.1 Considerando turbidez limite de 0,5 uT

Tabela 39 - Carreiras de filtração e volumes filtrados para DSA 15 mg/L, e limite de turbidez 0,5 uT

Taxa (m/h)	DAS: 15mg/L Turbidez limite: 0,5 uT	Carreira de filtração (min)	Volume filtrado por carreira de filtração (L)	Número de carreiras de filtração em 24 horas	Volume filtrado em 24 horas (L)
40	A100	49,2 ± 19,7	20,2 ± 8,1	32,3 ± 14,2	578,1 ± 5,8
	P100	139,2 ± 41,4	57,2 ± 17	11 ± 3,8	586,8 ± 1,5
60	A100	39,8 ± 18,3	24,5 ± 11,3	40,5 ± 17,9	862,1 ± 11
	P100	118,6 ± 20	73,1 ± 12,3	12,2 ± 1,9	879,5 ± 1,2
80	A100	21,6 ± 6,3	17,7 ± 5,2	66,7 ± 16,1	1127,9 ± 13,2
	P100	93,6 ± 15,8	76,9 ± 12,9	15,5 ± 2,6	1169,9 ± 2,1
100	A100	25,3 ± 4,9	26,0 ± 5,0	55,8 ± 9,4	1421,1 ± 9,7
	P100	72,1 ± 6,3	74,1 ± 6,4	19,8 ± 1,7	1458,1 ± 1,7
120	A100	16,6 ± 2,6	20,4 ± 3,2	83,2 ± 12,4	1671,6 ± 15,3
	P100	69,9 ± 19,3	86,2 ± 23,8	21,5 ± 6,9	1747,5 ± 8,6

5.3.3.1.2.2 Considerando turbidez limite de 1,0 uT

Tabela 40 - Carreiras de filtração e volumes filtrados para DSA 15 mg/L, e limite de turbidez 1,0 uT

Taxa (m/h)	DAS: 15mg/L Turbidez limite: 1,0 uT	Carreira de filtração (min)	Volume filtrado por carreira de filtração (L)	Número de carreiras de filtração em 24 horas	Volume filtrado em 24 horas (L)
40	A100	80,9 ± 24,8	33,3 ± 10,2	18,6 ± 5,3	583,7 ± 2,2
	P100	182,1 ± 26,7	74,8 ± 11	7,9 ± 1,2	588,1 ± 0,5
60	A100	68,2 ± 14,4	42 ± 8,9	21,5 ± 4,8	873,8 ± 2,9
	P100	149,5 ± 25,1	92,1 ± 15,5	9,7 ± 1,5	881 ± 0,9
80	A100	40 ± 3,6	32,9 ± 2,9	35,3 ± 3,2	1153,7 ± 2,7
	P100	120,9 ± 6,9	99,3 ± 5,7	11,8 ± 0,7	1172,9 ± 0,5
100	A100	40,9 ± 0,7	42,0 ± 0,7	34,3 ± 0,6	1443,1 ± 0,6
	P100	95,3 ± 12,9	97,8 ± 13,3	15,2 ± 2,2	1462,8 ± 2,3
120	A100	32,2 ± 5,3	39,7 ± 6,5	44,1 ± 7,7	1719,7 ± 9,4
	P100	88,7 ± 19,4	109,3 ± 23,9	16,6 ± 4,1	1753,6 ± 5,1

Pode-se observar o mesmo comportamento da dosagem anterior de coagulante: os filtros de fibras de poliéster possuem carreiras de filtração e consequentemente, volumes filtrados maiores que os filtros de fibras de algodão, mas desta vez em todas as taxas de filtração. É interessante notar que os volumes filtrados para dosagem de sulfato de alumínio igual a 15 mg/L são ligeiramente maiores aos da dosagem de 22,5 mg/L (Exemplo: taxa de 100 m/h, limite de 0,5 uT; filtro de poliéster filtrou 1458 litros/dia para DSA = 15mg/L; e 1444litros/dia para DSA = 22,5mg/L).

5.3.3.2 Índices de filtrabilidade

5.3.3.2.1 Índice de Funcionamento do Filtro (IFF)

Como explicado na Revisão Bibliográfica (item 3.1.5), o IFF relaciona o volume filtrado e a perda de carga ao final da carreira de filtração; sendo assim, quanto maior seu valor, melhor

(devido a altos valores de volume filtrado e baixos valores de perda de carga). A carreira de filtração neste índice foi considerada encerrada quando turbidez de 1 uT fosse atingida.

5.3.3.2.1.1 IFF para dosagem de sulfato de alumínio igual 22,5 mg/L

Aqui são expostas tabelas para DSA = 22,5 mg/L para todas as taxas e todos os tipos de filtro (de fibras de algodão mercerizado, e de poliéster, em ambos comprimentos de leito - 60 e 100 cm). O intuito é facilitar a análise comparativa do leitor entre os índices de filtros de mesma fibra e comprimento de leito diferente, assim como mesma taxa e comprimento de leito, mas tipo de fibras diferentes.

5.3.3.2.1.1.1 Filtro de fibras de algodão 60 cm

O Índice de Funcionamento do Filtro médio e desvio-padrão para filtro de fibras de algodão mercerizado de comprimento de leito igual a 60cm é mostrada abaixo.

Tabela 41 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5mg/L

Índice de Funcionamento do Filtro (IFF)- ALGODÃO 60 cm – DSA: 22,5 mg/L						
Ensaio	Taxa (m/h)	Carreira de filtração (h)	Perda de carga (m H ₂ O)	IFF	IFF médio	Desvio padrão IFF
1	40	0,288	0,373	30,9	31,9	5,1
2		0,270	0,395	27,3		
3		0,318	0,34	37,5		

5.3.3.2.1.1.2 Filtro de fibras de algodão 100 cm

O Índice de Funcionamento do Filtro médio e desvio-padrão para filtro de fibras de algodão mercerizado de comprimento de leito igual a 100cm é mostrada abaixo.

Tabela 42 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5mg/L

Índice de Funcionamento do Filtro (IFF)- ALGODÃO 100 cm - DSA: 22,5 mg/L						
Ensaio	Taxa (m/h)	Carreira de filtração (h)	Perda de carga (m H ₂ O)	IFF	IFF médio	Desvio padrão IFF
1	40	3,5	0,95	146,9	132,5	12,9
2		2,8	0,91	122,1		
3		2,0	0,61	128,6		
1	60	1,3	0,98	82,3	88,1	31,6
2		2,0	1,00	122,3		
3		0,9	0,86	59,9		
1	80	0,8	1,42	46,4	52,4	19,1
2		1,2	1,34	73,7		
3		0,6	1,27	36,9		
1	100	0,6	1,85	30,1	29,0	3,6
2		0,5	1,80	25,1		
3		0,6	1,80	31,9		
1	120	0,4	2,16	24,8	21,5	2,9
2		0,4	2,13	20,6		
3		0,3	2,08	19,2		

Nota-se que o filtro de algodão 60 cm não obteve filtrado com turbidez abaixo de 1uT para taxas de 60 m/h em diante. Comparando a taxa de 40 m/h, o filtro de comprimento de 100 cm tem IFF quatro vezes maior que o de 60cm.

5.3.3.2.1.1.3 Filtro de fibras de poliéster 60 cm

O Índice de Funcionamento do Filtro médio e desvio-padrão para filtro de fibras de poliéster de comprimento de leito igual a 60cm é mostrada abaixo.

Tabela 43 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5mg/L

Índice de Funcionamento do Filtro (IFF)- POLIÉSTER 60 cm - DSA: 22,5 mg/L						
Ensaio	Taxa (m/h)	Carreira de filtração (h)	Perda de carga (m H ₂ O)	IFF	IFF médio	Desvio padrão IFF
1	40	0,50	0,37	54,8	61,6	7,7
2		0,68	0,46	59,9		
3		0,63	0,36	70,0		
1	60	0,63	0,68	55,3	50,6	4,8
2		0,43	0,57	45,7		
3		0,56	0,66	50,8		
1	80	0,29	0,91	25,1	27,7	9,0
2		0,21	0,84	20,4		
3		0,44	0,93	37,7		

5.3.3.2.1.1.4 Filtro de fibras de poliéster 100 cm: O Índice de Funcionamento do Filtro médio e desvio-padrão para filtro de fibras de poliéster de comprimento de leito igual a 100cm é mostrada abaixo.

Tabela 44 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5mg/L

Índice de Funcionamento do Filtro (IFF)- POLIÉSTER 100 cm - DSA: 22,5 mg/L						
Ensaio	Taxa (m/h)	Carreira de filtração (h)	Perda de carga (m H ₂ O)	IFF	IFF médio	Desvio padrão IFF
1	40	2,43	0,58	166,2	179,2	23,3
2		2,88	0,56	206,1		
3		1,97	0,48	165,3		
1	60	1,83	0,67	162,6	129,0	32,5
2		0,90	0,55	97,6		
3		1,37	0,65	126,9		
1	80	1,09	1,08	80,4	79,0	2,0
2		1,06	1,10	76,8		
3		1,02	1,02	79,8		
1	100	1,08	1,44	74,8	68,0	5,9
2		0,91	1,43	63,7		
3		0,91	1,39	65,4		

1	120	0,66	1,55	50,9	53,0	6,2
2		0,80	1,60	60,0		
3		0,64	1,60	48,2		

Novamente, os filtros de 100cm de comprimento tem IFF maior que os de 60cm de leito em todas as taxas. Na taxa de 40 m/h, por exemplo, o filtro de poliéster de comprimento 100 cm obteve IFF 2,9 vezes maior que o filtro de poliéster de 60 cm. Comparando as diferentes fibras, o filtro de fibras de poliéster mostrou índices maiores em relação ao filtro de algodão em todas as taxas estudadas.

5.3.3.2.1.2 IFF para dosagem de sulfato de alumínio igual 15 mg/L

Aqui são expostas tabelas para DSA = 15 mg/L para todas as taxas, porém somente para os filtros de comprimento de leito igual a 100cm, já que somente estes foram testados com essa dosagem de coagulante.

5.3.3.2.1.2.1 Filtro de fibras de algodão 100 cm

O Índice de Funcionamento do Filtro médio e desvio-padrão para filtro de fibras de algodão mercerizado de comprimento de leito igual a 100cm é mostrada abaixo.

Tabela 45 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15mg/L

Índice de Funcionamento do Filtro (IFF)- ALGODÃO 100 cm – DSA: 15 mg/L						
Ensaio	Taxa (m/h)	Carreira de filtração (h)	Perda de carga (m H ₂ O)	IFF	IFF médio	Desvio padrão IFF
1	40	1,80	0,69	103,8	84,8	17,5
2		0,99	0,57	69,3		
3		1,25	0,62	81,2		
1	60	1,17	0,94	75,3	69,5	9,9
2		1,36	1,09	75,0		
3		0,88	0,91	58,0		
1	80	0,60	1,31	36,7	39,4	2,4

2		0,70	1,38	40,2		
3		0,71	1,37	41,3		
1		0,69	1,87	37,1		
2	100	0,68	1,86	36,7	36,3	1,1
3		0,67	1,91	35,0		
1		0,60	2,21	32,6		
2	120	0,44	2,12	24,7	30,2	4,8
3		0,58	2,07	33,3		

5.3.3.2.1.2.2 Filtro de fibras de poliéster 100 cm

O Índice de Funcionamento do Filtro médio e desvio-padrão para filtro de fibras de poliéster de comprimento de leito igual a 100cm é mostrada abaixo.

Tabela 46 - Índice de Funcionamento do Filtro (IFF); Filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15mg/L

Índice de Funcionamento do Filtro (IFF)- POLIÉSTER 100 cm – DSA: 15 mg/L						
Ensaio	Taxa (m/h)	Carreira de filtração (h)	Perda de carga (m H ₂ O)	IFF	IFF médio	Desvio padrão IFF
1	40	2,61	0,59	177,0	193,6	15,5
2		3,50	0,67	207,7		
3		3,00	0,61	196,1		
1	60	2,98	0,89	201,5	173,9	27,4
2		2,25	0,92	146,6		
3		2,25	0,78	173,7		
1	80	2,15	1,17	146,6	151,3	5,0
2		1,96	1,00	156,6		
3		1,94	1,03	150,8		
1	100	1,73	1,44	119,6	110,8	11,1
2		1,34	1,36	98,4		
3		1,70	1,49	114,4		
1	120	1,67	1,90	105,3	99,0	15,5
2		1,67	1,81	110,3		
3		1,11	1,63	81,3		

Mesmo com perdas de carga maiores, os filtros de comprimento de 100 cm para ambas as fibras possuem IFF maiores que os filtros de 60 cm, já que suas carreiras de filtração foram mais longas. É interessante notar que os valores do IFF são maiores para as taxas de filtração menores, já que as carreiras de filtração neste caso são maiores, e as perdas de carga menores que nas taxas mais altas. Portanto, é importante analisar qualitativamente o índice, pois embora possuam valores maiores nas taxas menores, não significa que o filtro não opere satisfatoriamente a altas taxas de filtração.

Na dosagem de coagulante de 22,5 mg/L, nota-se que o filtro de poliéster 60 cm tem melhor desempenho que o de fibras de algodão de mesmo comprimento. Para todas as taxas de filtração e dosagens, o filtro de fibras de poliéster de comprimento 100 cm mostra IFF maior que o de fibras de algodão, devido a sua carreira de filtração mais longa em quase todos os ensaios, e à perda de carga menor que a inerente ao filtro de fibras de algodão. Também é possível comparar os índices de filtro da mesma fibra, porém em dosagens de coagulante diferentes: para o filtro de fibras de poliéster, os IFF foram maiores na DSA = 15 mg/L em todas as taxas; já para o filtro de fibras de algodão o IFF foi maior nas taxas de 100 e 120 m/h. Tal fato demonstra que os filtros estudados na filtração direta da água de estudo operam melhor com dosagens mais baixas de sulfato de alumínio.

Em resumo, o filtro de fibras flexíveis de poliéster com DSA=15 mg/L e taxa de 40 m/h apresentou o maior valor de IFF, demonstrando, sob esse aspecto de análise, ser a melhor das configurações. É importante lembrar que as taxas mais altas ainda assim possuem elevado valor de IFF, mostrando a real possibilidade do uso do filtro de fibras flexíveis para altas taxas.

5.3.3.2.2 Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI)

No IFI, a eficiência da clarificação é considerada. A perda de carga e carreira de filtração exatas foram calculadas através de interpolação no software *Matlab* a partir das curvas de perda

de carga e turbidez exibidas no começo da etapa II. A turbidez *afluente* do índice é a turbidez da água bruta, e a turbidez *efluente* do índice é a da composta do ensaio de limite de turbidez igual a 1uT.

5.3.3.2.2.1 IFI para dosagem de sulfato de alumínio igual 22,5 mg/L

Aqui são expostas tabelas para DSA = 22,5 mg/L para todas as taxas e todos os tipos de filtro (de fibras de algodão mercerizado, e de poliéster, em ambos comprimentos de leito - 60 e 100 cm). O intuito é facilitar a análise comparativa do leitor entre os índices de filtros de mesma fibra e comprimento de leito diferente, assim como mesma taxa e comprimento de leito, mas tipo de fibras diferentes.

5.3.3.2.2.1.1 Filtro de fibras de algodão 60 cm: O Índice de Filtrabilidade de Ives médio e desvio-padrão para filtro de fibras de algodão mercerizado é mostrado abaixo.

Tabela 47 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de algodão 60cm; DSA: 22,5mg/L

Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI)- ALGODÃO 60 cm – DSA: 22,5 mg/L								
Ensaio	Taxa (cm/min)	Carreira de filtração (min)	Perda de carga (cm H ₂ O)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente (uT)	IFI	IFI médio (.10 ⁻⁴)	Desvio padrão IFF
1	40	17,3	37,3	7,53	0,723	0,005175	49,8	13,8
2		16,2	39,5	7,7	0,79	0,006254		
3		19,1	34	7,34	0,581	0,003523		

5.3.3.2.2.1.2 Filtro de fibras de algodão 100 cm: O Índice de Filtrabilidade de Ives médio e desvio-padrão para filtro de fibras de algodão mercerizado mostrada a seguir.

Tabela 48 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 22,5mg/L

Ensaio	Taxa (cm/min)	Carreira de filtração (min)	Perda de carga (cm H ₂ O)	Turbidez afluyente (uT)	Turbidez efluente (uT)	IFI	IFI médio (.10-4)	Desvio padrão IFF
1	40	208,5	94,6	7,53	0,254	0,000383	4,7	0,8
2		166,6	91	7,7	0,27	0,000479		
3		118,1	61,2	7,34	0,309	0,000545		
1	60	80,7	98,1	7,67	0,317	0,000837	11,0	6,3
2		121,8	99,6	7,12	0,336	0,000643		
3		51,5	86	7,93	0,52	0,001825		
1	80	49,4	141,9	7,4	0,307	0,00149	14,6	7,2
2		74	133,8	7,31	0,234	0,000723		
3		35,3	127,4	7,31	0,35	0,00216		
1	100	33,4	184,8	7,56	0,464	0,003396	32,5	3,0
2		27,1	180,3	7,56	0,391	0,003441		
3		34,5	180	7,56	0,421	0,002905		
1	120	26,8	216,3	7,66	0,363	0,003187	40,2	9,5
2		21,9	213	7,66	0,362	0,00383		
3		20	207,9	7,66	0,447	0,005055		

5.3.3.2.2.1.3 Filtro de fibras de poliéster 60 cm:O Índice de Filtrabilidade de Ives

médio e desvio-padrão para filtro de fibras de poliéster é mostrada a seguir.

Tabela 49 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de poliéster 60cm; DSA: 22,5mg/L

Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI)- POLIÉSTER 60 cm – DSA: 22,5 mg/L								
Ensaio	Taxa (cm/min)	Carreira de filtração (min)	Perda de carga (cm H ₂ O)	Turbidez afluyente (uT)	Turbidez efluente (uT)	IFI	IFI médio (.10-4)	Desvio padrão IFF
1	40	30,1	36,6	7,53	0,618	0,002495	22,4	2,9
2		41	45,6	7,7	0,532	0,001921		
3		37,6	35,8	7,34	0,714	0,002315		
1	60	37,6	68	7,67	0,514	0,00202	23,2	3,0
2		25,8	56,5	7,12	0,512	0,002625		
3		33,5	66	7,93	0,559	0,002315		
1	80	17,2	91,4	7,4	0,64	0,005745	54,1	20,7
2		12,8	83,8	7,31	0,652	0,007299		
3		26,2	92,6	7,31	0,528	0,003191		

5.3.3.2.2.1.4 Filtro de fibras de poliéster 100cm:O Índice de Filtrabilidade de Ives médio e desvio-padrão para filtro de fibras de poliéster de comprimento de leito igual a 100cm é mostrada abaixo.

Tabela 50 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 22,5mg/L

Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI)- POLIÉSTER 100 cm – DSA: 22,5 mg/L								
Ensaio	Taxa (cm/min)	Carreira de filtração (min)	Perda de carga (cm H ₂ O)	Turbidez afluyente (uT)	Turbidez efluente (uT)	IFI	IFI médio (.10 ⁻⁴)	Desvio padrão IFF
1	40	145,6	58,4	7,53	0,502	0,000668	4,7	2,1
2		172,5	55,8	7,7	0,239	0,000251		
3		118	47,6	7,34	0,364	0,0005		
1	60	109,6	67,4	7,67	0,396	0,000529	7,3	1,7
2		53,9	55,2	7,12	0,34	0,000815		
3		82,2	64,8	7,93	0,511	0,000847		
1	80	65,1	107,9	7,4	0,339	0,000949	9,3	0,8
2		63,5	110,3	7,31	0,283	0,000841		
3		61	101,9	7,31	0,347	0,000991		
1	100	64,5	143,8	7,56	0,343	0,001012	10,6	0,4
2		54,6	142,8	7,56	0,308	0,001066		
3		54,5	138,8	7,56	0,323	0,001088		
1	120	39,4	154,8	7,66	0,367	0,001569	12,5	3,3
2		48,1	160,4	7,66	0,253	0,000918		
3		38,6	160,2	7,66	0,28	0,001264		

Ao contrário do IFF, no IFI quanto menor o valor, maior o desempenho do filtro. A partir da análise das tabelas acima, nota-se que o IFI é menor para os comprimentos de leito de 100 cm quando comparados aos de 60cm na mesma taxa e dosagem de coagulante, confirmando influência da altura do leito filtrante na filtração por filtro de fibras flexíveis.

5.3.3.2.2.2 IFI para dosagem de sulfato de alumínio igual 15 mg/L

Aqui são expostas tabelas para DSA = 15 mg/L para todas as taxas, porém filtros de comprimento de leito 100 cm.

5.3.3.2.2.1 Filtro de fibras de algodão 100 cm

O Índice de Filtrabilidade de Ives médio e desvio-padrão para filtro de fibras de algodão mercerizado de comprimento de leito igual a 100cm é mostrada abaixo.

Tabela 51 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de algodão 100cm; DSA: 15mg/L

Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI)- ALGODÃO 100 cm – DSA: 15 mg/L								
Ensaio	Taxa (cm/min)	Carreira de filtração (min)	Perda de carga (cm H ₂ O)	Turbidez afluyente (uT)	Turbidez efluente (uT)	IFI	IFI médio (. 10 ⁻⁴)	Desvio padrão IFF
1	40	108,1	69,4	7,71	0,452	0,000941	13,2	5,1
2		59,5	57,2	8,24	0,651	0,001899		
3		75	61,6	8,24	0,451	0,001124		
1	60	70,4	93,5	8,29	0,503	0,001343	12,3	1,2
2		81,4	108,5	8,29	0,415	0,001112		
3		52,7	90,8	8,29	0,359	0,001244		
1	80	35,9	130,6	8,07	0,536	0,00302	22,5	8,0
2		41,7	138,3	8,04	0,448	0,00231		
3		42,4	137	8,04	0,282	0,001417		
1	100	41,6	187	7,33	0,393	0,00241	24,0	0,4
2		41	186,4	7,33	0,381	0,002363		
3		40,2	191,3	7,33	0,375	0,002435		
1	120	36	221,1	7,9	0,473	0,003064	29,0	3,1
2		26,2	212,1	7,9	0,361	0,003083		
3		34,5	207,1	7,9	0,402	0,002546		

5.3.3.2.2.2 Filtro de fibras de poliéster 100 cm

O Índice de Filtrabilidade de Ives médio e desvio-padrão para filtro de fibras de poliéster de comprimento de leito igual a 100cm é mostrada a seguir.

Tabela 52 - Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI); Filtro de fibras de poliéster 100cm; DSA: 15mg/L

Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI)- POLIÉSTER 100 cm – DSA: 15 mg/L								
Ensaio	Taxa (cm/min)	Carreira de filtração (min)	Perda de carga (cm H ₂ O)	Turbidez afluente (uT)	Turbidez efluente (uT)	IFI	IFI médio (. 10 ⁻⁴)	Desvio padrão IFF
1	40	156,4	58,9	7,71	0,48	0,000586	3,8	1,9
2		210	67,4	8,24	0,232	0,000226		
3		180	61,2	8,24	0,309	0,000319		
1	60	178,5	88,6	8,29	0,221	0,000221	3,0	0,8
2		135	92,1	8,29	0,281	0,000385		
3		135	77,7	8,29	0,251	0,00029		
1	80	128,9	117,2	8,07	0,237	0,000334	4,0	1,1
2		117,3	99,9	8,04	0,403	0,000534		
3		116,5	103	8,04	0,251	0,000345		
1	100	103,5	144,2	7,33	0,308	0,000585	5,7	1,1
2		80,4	136,2	7,33	0,29	0,00067		
3		102	148,6	7,33	0,231	0,000459		
1	120	100	189,9	7,9	0,288	0,000577	7,0	2,7
2		99,9	181,1	7,9	0,27	0,000516		
3		66,3	163,1	7,9	0,393	0,00102		

Comparando os IFIs dos filtros de leito igual a 100cm, nota-se que em todas as taxas e dosagens, o filtro de fibras de poliéster apresentou índices menores, ou seja, melhor desempenho na filtração direta. Mesmo na taxa de 40 e 60 m/h na DSA=22,5 mg/L, onde o filtro de algodão possui carreiras de filtração mais longas, os IFIs foram menores para os filtro de poliéster, devido a sua baixa perda de carga . Comparando as duas dosagens de coagulante, nota-se que a DSA=15 mg/L obteve IFIs menores para todas as taxas no filtro de poliéster, e para taxas de 100 e 120 m/h no caso do filtro de fibras de algodão. O filtro de poliéster de 100 cm de comprimento, taxa de 60 m/h, e DSA = 15mg/L obteve o menor IFI, apesar dos IFIs não variarem significativamente no caso dos filtros de fibras de poliéster com DSA = 15 mg/L, o que demonstra viabilidade do uso de filtro de fibras flexíveis de poliéster na filtração direta para altas taxas.

Observando que apenas nas taxas de 40 e 60 m/h da primeira dosagem de sulfato de alumínio (22,5 mg/L), o filtro de fibras de algodão mercerizado mostrou-se mais eficiente que o filtro de fibras de poliéster, foi realizado novo ensaio com os mesmos parâmetros para verificar se a fibra de algodão altera sua eficiência de filtração direta com o passar do tempo. Os resultados são mostrados a seguir:

Tabela 53 - Caracterização água bruta para repetição do ensaio de dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h

	Características água bruta						
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)	Condutividade (μS/cm)	SST (mg/L)	Cor verdadeira (uC)	Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)
Ensaio 1 ao 3	27,1 ± 0,6	7,0 ± 0,3	-23,3	68,56	9,5 ± 1,2	30,5	59,9

Tabela 54 - Caracterização água coagulada para repetição do ensaio de dosagem de 22,5 mg/L de coagulante, e taxa 40 m/h

	Características água coagulada		
	Temperatura (°C)	pH	Potencial zeta (mV)
Ensaio 1	26,6 ± 0,2	6,4 ± 0,04	5,3 ± 1,5
Ensaio 2	27,9 ± 0,5	6,46 ± 0,04	0,32 ± 1,6
Ensaio 3	28 ± 0,4	6,5 ± 0,01	2,4 ± 0,6

Os gráficos com os valores de turbidez e cor aparente residual são mostrados a seguir, assim como as carreiras de filtração.

Figura 109- Turbidez e cor aparente residuais da repetição da bateria de ensaios de DSA = 22,5 mg/L, taxa: 40 m/h

A carreira de filtração foi de $46,4 \pm 1,6$ minutos para essa bateria de ensaios. Comparando com a primeira bateria de ensaios, onde a carreira de filtração do filtro de fibras de algodão 100 cm, para taxa 40 m/h e DSA = 22,5 mg/L, foi de $164,4 \pm 45,2$ minutos, nota-se que a repetição da bateria de ensaios mostrou-se cerca de 3,8 vezes menos eficiente que a primeira bateria, o que demonstra que a fibra de algodão tem sua eficiência de filtração direta afetada negativamente pelo tempo. Como explicado na Revisão Bibliográfica, a fibra de celulose se oxida quando em contato com vapor, e ambientes úmidos a altas temperaturas. Os filtros de fibras flexíveis permaneciam imersos em água do poço entre os ensaios a fim de evitar a oxidação das fibras, porém, nota-se pelos resultados acima que tal medida não foi suficiente para garantir a plena operação do filtro de fibras de algodão, indicando necessidade de pesquisas mais aprofundadas para prevenção deste processo.

5.3.3.3 Leitos do filtro de fibras flexíveis após operação e após lavagem

5.3.3.3.1 Leito filtrante após filtração

A fim de visualizar a retenção das impurezas no leito filtrante, foi realizado ensaio com as seguintes condições: temperatura: $26 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$; pH de coagulação $6,43 \pm 0,03$; taxa de filtração: 100 m/h; DSA: 15 mg/L, turbidez limite: 2uT. O ensaio foi realizado somente nos filtros de comprimento 100 cm, a fim de compará-los com os leitos já limpos no dia da visualização (comprimento de 60 cm).

A figura 110 mostra os leitos filtrantes: os dois primeiros - indicados no canto direito pela letra 'A' - são de fibras de algodão, e os dois últimos - indicados pela letra 'P' - são os de fibras de poliéster. Lembrando que os filtros de 60 cm estão limpos, nota-se que a fibra de algodão possui coloração mais amarelada que a fibra de poliéster.

Figura 110- Leitos filtrantes sujos e limpos

É nítido no filtro de poliéster de comprimento 100 cm que a retenção das impurezas é mais intensa na primeira metade do filtro, fato que pode ser comprovado pelo comportamento da frente de impurezas, observa nos gráficos de perda de carga expostos anteriormente e no anexo I. A figura 111 mostra mais nitidamente o filtro de fibras flexíveis de poliéster.

Figura 111 - Leito filtrante de fibras de poliéster após filtração.

No filtro de fibras de algodão, observando a Figura 110, tem-se a ideia de que o leito é melhor aproveitado, porém tal fato não foi confirmado em nenhum ensaio de filtração. O filtro de algodão também aproveita mais sua primeira metade como leito filtrante, como visto nos gráficos de evolução da perda de carga.

Abrindo o leito filtrante, como mostrado nas Figuras 112 e 113, foi observado o não aproveitamento do interior do leito, sugerindo caminho preferencial nas paredes do filtro, mesmo com a camada interna de areia colada na parede interna do tubo de PVC onde o leito de fios foi alojado (comentada no capítulo Materiais e Métodos).

Figura 112 - Leito filtrante de fibras de poliéster aberto

Figura 113 - Leito filtrante de fibras de algodão aberto

Tal observação explica o fato de LEE *et al* (2008a, 2008b) adotar fluxo radial e coleta da água filtrada por tubo perfurado localizado no interior do feixe de fibras na nova concepção dos filtros de fibras flexíveis. Os autores não explicitam o motivo de tal decisão nos artigos, mas citam que mudanças foram feitas a fim de melhor aproveitamento do leito.

5.3.3.3.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos leitos após filtração

A fim de verificar microscopicamente a adsorção das impurezas nas fibras ao longo do comprimento do leito, foram realizadas microscopia eletrônica de varredura em 3 momentos: (a) no primeiro terço do leito filtrante após carreira de filtração, ou seja, com o leito sujo; (b) no segundo terço do leito filtrante após carreira de filtração, ou seja, com o leito sujo; (c) no primeiro terço do leito filtrante após lavagem, ou seja, com o leito limpo. As fotos da MEV do leito filtrante sujo estão expostas a seguir.

5.3.3.3.1.1 Primeiro terço do leito de fibras de algodão mercerizado

Figura 114 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de algodão 100cm após ensaio de filtração com aumento de 600 vezes

Figura 115 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de algodão 100cm após ensaio de filtração com aumento de 1500 vezes

5.3.3.3.1.2 Segundo terço do leito de fibras de algodão mercerizado

Figura 116 - MEV do segundo terço de filtro de fibras de algodão 100cm após ensaio de filtração com aumento de 6000 vezes

Figura 117 - MEV do segundo terço de filtro de fibras de algodão 100cm após ensaio de filtração com aumento de 3000 vezes

Nota-se que no primeiro terço de leito filtrante a concentração de impurezas retidas na fibras é maior em relação ao segundo terço. Mesmo assim, houve retenção de impurezas no segundo terço, mostrando certo aproveitamento dessa parte do leito filtrante. Na Figura 117, é colocada medida de uma das fibrilas, a fim de salientar que o espaço entre as fibrilas também é usado na filtração direta nos filtros de fibras flexíveis estudados nesta pesquisa.

5.3.3.3.1.3 Primeiro terço do leito de fibras de poliéster

Figura 118 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após ensaio de filtração com aumento de 3000 vezes

Figura 119 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após ensaio de filtração com aumento de 6000 vezes

Figura 120 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após ensaio de filtração com aumento de 15000 vezes

5.3.3.3.1.4 Segundo terço do leito de fibras de poliéster

Figura 121 - MEV do segundo terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após ensaio de filtração com aumento de 6000 vezes

Figura 122 - MEV do segundo terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após ensaio de filtração com aumento de 3000 vezes

A partir das figuras acima, pode-se afirmar que o filtro de fibras de poliéster usa predominantemente o primeiro terço do filtro no processo de filtração direta, ou como observado nos gráficos de perda de carga e fotos do leito, a primeira metade do leito. Também é interessante notar que o fio de poliéster usado na pesquisa utiliza também o espaço entre as fibrilas que o compõe, tendo, portanto, superfície específica maior do que a calculada previamente pela autora, já que o diâmetro das fibrilas, como observado na Figura 119, está na faixa de 10-16 μm .

Não foi calculada nova porosidade e superfície específica devido a não realização de contagem do número de fibrilas por fio estatisticamente confiável.

5.3.3.3.2 Leitos filtrantes após lavagem

A fim de visualizar o efeito a eficiência da lavagem, os leitos filtrantes foram recolocados no filtro e lavados exageradamente (15 repetições de 20s de água a taxa 500 m/h alternadas de 10 s de ar a 1Nm³/h). A figura 123 mostra os leitos após lavagem - 'P' para fibras de poliéster, e 'A' para fibras de algodão.

Figura 123 - Leitos filtrantes após lavagem

Nota-se que os leitos foram bem limpos, se comparado com as figuras anteriores quando estavam cobertos de impurezas da água de estudo. É importante ressaltar que o filtro de algodão formou nós devido à dificuldade da autora em recolocar o leito nos tubos dos filtros sem embarçar as fibras, o que levou a não completa limpeza nas pontas deste leito filtrante, como observado na Figura acima. Pode-se afirmar que tal situação não ocorreu durante os testes de filtração, já que as perdas de carga iniciais das carreiras eram sempre quase iguais entre si, indicando limpeza eficiente do leito entre os ensaios de filtração. Logo, pela observação dos leitos como um todo, e dados das perdas de carga ao longo dos ensaios de filtração direta, pode-se afirmar que o método de lavagem com injeções alternadas de água e ar é adequado para esse tipo de leito filtrante. Ainda cabe citar que pelo aspecto visual, o leito de fios de poliéster apresentou limpeza mais efetiva que o leito de fios de algodão mercerizado, ou seja, durante a lavagem, as impurezas foram mais facilmente removidas do leito de fibras de poliéster.

5.3.3.3.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após lavagem

Como indicado anteriormente, foi realizado MEV após lavagem exagerada do filtro a fim de verificar se houve limpeza entre as fibrilas do fio de fibras de algodão mercerizado e poliéster. As fotos são mostradas a seguir nas Figuras 124 a 127. Lembrando que foi realizada MEV no primeiro terço do filtro, já que este terço adsorveu maior quantidade de impurezas.

5.3.3.3.2.1.1 Primeiro terço do leito de fibras de algodão mercerizado

Figura 124 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de algodão 100cm após lavagem com aumento de 6000 vezes

Figura 125 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de algodão 100cm após lavagem com aumento de 600 vezes

5.3.3.3.2.1.2 Primeiro terço do leito de fibras de poliéster

Figura 126 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após lavagem com aumento de 1500 vezes

Figura 127 - MEV do primeiro terço de filtro de fibras de poliéster 100cm após lavagem com aumento de 600 vezes

Como observado nas figuras 123 a 127, houve retirada das impurezas do leito filtrante, inclusive nos espaços entre as microfibras, em ambos os leitos filtrantes. Pode ser observada uma impureza ou outra remanescente, mas não prejudicial ao funcionamento do filtro de fibras flexíveis em ambos os tipos de fibras, haja vista curto período de amadurecimento do filtro, como observado na Etapa III e IV (a seguir).

5.4 Etapa IV: Estabelecimento de protocolo adequado para lavagem do leito de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster

Depois da etapa de testes de clarificação de água para abastecimento público, pode-se observar que o comprimento de leito de 100 cm para ambas as fibras obteve melhores remoções de cor aparente, turbidez e absorbância 254nm, além de carreiras de filtração mais longas. O volume filtrado aumenta conforme aumento da taxa de filtração, sendo máximo em 120 m/h, mas a custo de uma perda de carga elevada (221 cm) para o filtro de fibras de algodão mercerizado. Considerando tais resultados, e salientado que operacionalmente, adotar as mesmas condições de filtração para ambos os filtros produz resultados mais confiáveis, os testes de lavagem foram realizados com os seguintes parâmetros fixos: taxa de 100 m/h, DSA = 15 mg/L, filtros de 100 cm de comprimento.

A vazão de água de lavagem e de ar era ajustada por rotâmetros e registros agulha. A vazão de ar mínima lida pelo rotâmetro instalado na instalação piloto dos filtros era de 1 Nm³/h, logo, foi adotada constante vazão de ar comprimido de 1,2 Nm³/h. A fim de maximizar a economia de água na lavagem, foi estudado primeiramente método de lavagem com aplicação simultânea de água e ar para ambas as fibras.

A carreira de filtração era encerrada quando turbidez atingisse 1 uT; sendo em seguida testado um dos modos de lavagem propostos. Após lavagem, nova carreira de filtração (sempre nas mesmas condições) era iniciada a fim de verificar perda de carga inicial, e amadurecimento do filtro depois do modo de lavagem testado. Depois de 10 minutos da segunda carreira de filtração, o filtro era lavado exageradamente, e todo o processo era novamente iniciado testando o modo de lavagem seguinte.

Os ensaios de procedimentos de lavagem foram realizados em duplicata. Os dados de turbidez e cor aparente de cada ensaio para os modos de lavagem são exibidos no Anexo II. É importante observar no Anexo II, exemplificado pela Figura 128, que em todos os modos de lavagem testados, os filtros de fibras de algodão mercerizado e poliéster recuperavam a qualidade do filtrado em 5 minutos, mostrando rápido amadurecimento dos filtros de fibras flexíveis.

Figura 128 - Exemplo de evolução da turbidez residual nos testes dos modos de lavagem

5.4.1 Filtro de fibras flexíveis de poliéster

Os resultados dos testes de lavagem para o filtro de 100 cm de fibras de poliéster são exibidos na Tabela 55.

Tabela 55 - Resultado dos testes de lavagem no filtro de fibras de poliéster 100 cm

Filtro de fibras de poliéster 100 cm								
Modo de lavagem	Ensaio	Perda de carga no início da carreira de filtração (cm)	Perda de carga no início da segunda carreira de filtração após lavagem (cm)	Massa de SST retida no filtro (mg)	Massa de SST na água de lavagem (mg)	Eficiência da lavagem (%)	Volume de água de lavagem (L)	Produtividade do filtro(%)
1	1	102,3	100	1059,58	1855,56	*	4,2	4,5
	2	101,6	105	1845,1	2261,1	*	4,2	4,5
2	1	102,5	111	716,98	1845,9	*	3,88	4,2
	2	102,4	128	1852,4	1801,8	97,3	3,88	4,2
3	1	102,4	112	1110,34	1800	*	3	3,2
	2	101,9	111	439,3	1620	*	3	3,2
4	1	102,6	127	736,5	1490,7	*	2	2,2
	2	102	137	917,6	1317,3	*	2	2,2

*Massa de SST da água de lavagem superiores à massa de SST retidas no filtro

Como observado na Tabela 55, o modo de lavagem 1 obteve as melhores recuperações de perda de carga inicial. Porém, a eficiência da lavagem foi superior a 100% em todos os ensaios, exceto ensaio 2 do modo de lavagem 2. Tal resultado mostra que a água de lavagem possuía quantidade superior de sólidos suspensos totais do que a massa destes retida no interior do filtro. A explicação pode ser visualizada na Figura 129. Foi observada na água de lavagem presença de pequenas fibrilas, provavelmente devido aos jatos de ar comprimido, e ao fato do fio de poliéster ser constituído de diversas microfibras.

Figura 129 - Pedacos de fibrilas de poliéster retidas nas membranas de sólidos suspensos totais.

Portanto, visto que o balanço de massa nunca se fecharia, devido a ruptura de tais fibrilas, optou-se por testar maior número de métodos de lavagem apenas no filtro de fibras de algodão.

5.4.2 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado

Os resultados dos testes de lavagem para o filtro de 100 cm de fibras de algodão são exibidos na Tabela 56. Nos ensaios com o filtro de fibras de algodão não foi observado liberação de fibrilas como nos ensaios com o filtro de fibras de poliéster, provavelmente porque o fio de algodão é gazado antes de mercerizado, processo que tira as penugens das fibras antes de formar o fio têxtil. Sendo assim, para o filtro de fibras de algodão foram testados 10 modos de lavagem, com aplicações simultâneas ou não de água e ar.

Tabela 56 - Resultado dos testes de lavagem no filtro de fibras de algodão 100 cm

Filtro de fibras de algodão mercerizado								
Modo de lavagem	Ensaio	Perda de carga no início da carreira (cm)	Perda de carga no início da segunda carreira após lavagem (cm)	Massa de SST retida no filtro (mg)	Massa de SST na água de lavagem (mg)	Eficiência da lavagem (%)	Volume de água de lavagem (L)	Produtividade do filtro (%)
1	1	175,1	192,5	378,4	244,7	64,6	4,4	14,4
	2	173,5	182,5	989,8	228,9	23,1	4,4	14,4
2	1	174,5	192,5	498,9	125,9	25,2	4,7	15,3
	2	176,3	202,5	593,5	148,4	25	4,7	15,3
3	1	175,5	221,5	475,9	113,7	23,8	1,7	5,4
	2	176,5	194,5	514,4	88,3	17,2	1,7	5,4
4	1	176,5	195,5	731,8	111,9	15,3	1,7	5,4
	2	172,5	197,5	210,5	75,8	36	1,7	5,4

5	1	176,3	202,5	415,8	74,1	17,8	2,2	7,2
	2	173,5	207,5	402,5	94,6	23,5	2,2	7,2
6	1	175,5	201	1390,4	83	6	2,4	7,6
	2	176,5	176,7	376,5	82	21,8	2,4	7,6
7	1	176	182,5	527	592,2	*	3,3	10,8
	2	176,5	195	628,3	504,4	80,2	3,3	10,8
8	1	175,3	192,4	799,1	567,5	71	2,5	8,1
	2	174,9	192,3	679,1	577,5	85	2,5	8,1
9	1	175,5	192,6	316,2	455,6	*	8,3	27
	2	174,5	195,5	371,5	575	*	8,3	27
10	1	172,5	173,5	483,1	539,2	*	2,5	8,1
	2	177,5	172,6	671,6	595	89	2,5	8,1

*Massa de SST da água de lavagem superiores à massa de SST retidas no filtro

Os modos de lavagem de 1 a 6 aplicavam ar e água simultaneamente. Nota-se que a eficiência da lavagem na retirada dos sólidos suspensos retidos no filtro foi baixíssima em quase todos os ensaios, alcançando valor máximo de 64, 6% uma única vez no modo 1 de lavagem. Já nos métodos 7 a 10, onde eram aplicados ar e água ALTERNADAMENTE, a eficiência da lavagem na retirada dos sólidos suspensos totais retidos no filtro foram superiores a 80%. Lembrando que a análise de sólidos suspensos totais é uma análise sujeita a erros, o que acarretou a alguns valores superiores a 100 %, já que nos ensaios de lavagem dos filtros de algodão não foram observadas ruptura de fibrilas. Neste caso, foi importante a verificação da recuperação da perda de carga para escolha do modo de lavagem que se mostrou mais eficiente.

Portanto, o modo 10 (taxa de água de lavagem : 487 m/h; tempo de água de lavagem: 10 segundos; tempo de ar: 10 segundos, 3 repetições) foi o mais eficiente considerando recuperação dos sólidos suspensos totais retidos no filtro, e recuperação da perda de carga inicial. Porém, observa-se que, no caso da filtração em filtros de fibras de algodão (cuja carreira de filtração para turbidez 1 uT é em média 30 minutos), tal modo de lavagem consome 8,1 % de água filtrada nas condições estudadas. Caso haja necessidade de gastos de água de lavagem menores que 8,1% da água produzida, serão necessários novos estudos sobre métodos de lavagem de

leitos de fibras flexíveis de algodão mercerizado. Uma foto exemplificando as águas coagulada, filtrada e de lavagem está na Figura 130.

Figura 130 - Água coagulada, água filtrada e água de lavagem, respectivamente, para filtro de fibras de algodão

5.5 Ensaio final para verificação da repetibilidade da carreira de filtração após protocolo de lavagem estabelecido na etapa IV

Após estabelecido método de lavagem considerado eficiente, foi realizado último ensaio em triplicata a fim de verificar a repetibilidade da carreira de filtração após lavagem otimizada. Os parâmetros fixos foram: Taxa de 100 m/h; dosagem de 15 mg/L de sulfato de alumínio; limite turbidez nas compostas de 2 uT; modo de lavagem 10 testado (obtido através de testes apenas no filtro de fibras de algodão). Os resultados estão expressos a seguir:

5.5.1 Filtro de fibras de algodão mercerizado

Os resultados das três carreiras de filtração seguidas estão expostas nas Figuras 131 e 132. O modo de lavagem entre elas foi o modo 10, como já mencionado anteriormente. As linhas verticais mostradas nos gráficos nos tempos 41 e 82 min correspondem ao tempo 0 (zero) da segunda e terceira carreiras de filtração, respectivamente. Os pontos azuis coincidentes com essas linhas correspondem às primeiras medidas de turbidez/cor aparente de cada carreira de

filtração (t_0). As linhas pontilhadas horizontais no gráfico de turbidez residual mostram os limites de 0,5 e 1,0 uT, para melhor visualização da duração das carreiras de filtração dos ensaios.

Figura 131 - Turbidez residual no filtro de fibras de algodão 100 cm no último ensaio

Figura 132 - Cor residual no filtro de fibras de algodão 100 cm no último ensaio

As figuras 131 e 132 mostram comportamento semelhante das carreiras de filtração, com ligeiro desvio no último ensaio da triplicata. A tabela 57 mostra as amostras compostas com limite de turbidez de 2 uT.

Tabela 57 - Resultados das análises das amostras compostas para filtro de fibras de algodão 100 cm

Análise das amostras compostas até turbidez 2 uT			
Amostra	Abs 254nm	Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)
Coagulada	$0,033 \pm 0,014$	$8,717 \pm 0,049$	$106,3 \pm 0,7$
Bruta	0,273	8,44	107,3
Filtrada A100 até 2uT	$0,021 \pm 0,002$	$1,112 \pm 0,444$	$13,1 \pm 5,7$

Tabela 58 - Perda de carga inicial no filtro de fibras de algodão 100 cm

Filtro de fibras de algodão 100 cm		
Perda de carga no início das carreiras de filtração (cm)		
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
177,5	189,5	179,5

Tabela 59 - Carreiras de filtração no filtro de fibras de algodão (min)

Filtro de fibras de algodão 100 cm		
Carreiras de filtração (min)		
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
30	34,8	30

Como pode ser observado nas tabelas e figuras acima, o comportamento do filtro depois do modo de lavagem 10 foi semelhante ao filtro limpo de maneira exagerada. Mesmo a perda de carga na segunda carreira de filtração ser maior que na primeira, os filtros mantiveram carreira de filtração praticamente constante. É importante observar que a medida de turbidez no tempo 0 da segunda e terceira carreira de filtração mostra resquícios da água de lavagem, porém o

amadurecimento do filtro se dá em menos de 5 minutos como já havia sido observado em todos os testes de lavagem no Anexo II.

5.5.2 Filtro de fibras de poliéster

Os resultados dos três ensaios finais de filtração em filtro de fibras flexíveis com fios multifilares de poliéster realizados sequencialmente estão expostas nas Figuras 133 e 134. O modo de lavagem entre elas foi o modo 10, obtido a partir dos testes com filtro de fibras de algodão. As linhas verticais mostradas nos gráficos nos tempos 91 e 152 min correspondem ao tempo 0 (zero) da segunda e terceira carreiras de filtração. Os pontos coincidentes com essas linhas correspondem as primeiras medidas de turbidez/cor aparente de cada carreira de filtração (t0). As linhas pontilhadas horizontais no gráfico de turbidez residual mostram os limites de 0,5 e 1,0 uT, para melhor visualização da duração das carreiras de filtração dos ensaios.

Figura 133 - Turbidez residual no filtro de fibras de poliéster 100 cm no último ensaio

Figura 134 - Cor residual no filtro de fibras de poliéster 100 cm no último ensaio

As figuras 133 e 134 mostram o comportamento semelhante dos ensaios. A tabela 60 mostra o resultado das análises das amostras compostas.

Tabela 60 - Resultados das análises das amostras compostas para filtro de fibras de poliéster 100 cm

Análise das amostras compostas até turbidez 2 uT			
Amostra	Abs 254nm	Turbidez (uT)	Cor aparente (uC)
Coagulada	0,030 ± 0,003	8,917 ± 0,161	108,4 ± 1,4
Bruta	0,234	7,49	97,7
Filtrada P100 até 2uT	0,017 ± 0,001	0,575 ± 0,251	8,4 ± 3,4

Tabela 61 - Perda de carga inicial no filtro de fibras de poliéster 100 cm

Filtro de fibras de poliéster 100 cm		
Perda de carga no início das carreiras de filtração (cm)		
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
102,5	104,5	111,5

Tabela 62 - Carreiras de filtração no filtro de fibras de poliéster (min)

Filtro de fibras de poliéster 100 cm		
Carreiras de filtração (min)		
Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
85	46,9	85,9

Como pode ser observado nas tabelas e figuras anteriormente apresentadas (Figuras 133 e 134, e Tabelas 60 a 62), a tendência comportamental do filtro depois do modo de lavagem 10 foi semelhante, porém a segunda carreira de filtração foi menor. Aqui também a medida de turbidez no tempo 0 da segunda e terceira carreira de filtração mostra resquícios da água de lavagem, mas o amadurecimento do filtro se dá em menos de 5 minutos como já havia sido observado em todos os testes de lavagem no Anexo II.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos estudos e experimentos realizados, expõe-se a seguir as conclusões do trabalho de pesquisa:

a) Ambas as fibras estudadas (algodão gazado e mercerizado, e poliéster) possuem resistência às águas com larga faixa de pH, como observado pelas fotografias de Microscopia Eletrônica de Varredura, e perda de massa após imersão em diferentes ambientes. Portanto, água superficiais cujo pH esteja na faixa estudada - 4,4 a 9,3 - podem ser filtradas pelos filtros estudados sem grandes preocupações com solubilidade das fibras. As águas pré-cloradas devem ser foco de estudos mais aprofundados sobre solubilidade das fibras, especialmente de algodão mercerizado.

b) Para água sintética de turbidez 7,7 uT, e cor aparente 97 uC, ambos os filtros de fibras flexíveis com leito de porosidade igual a 67% para filtro de algodão, e 75% para filtro de poliéster, operaram satisfatoriamente até atingir os valores limites de turbidez impostos (0,5; 1,0 e 2,0 uT). Porém, o filtro de 60 cm de fibras de algodão só foi capaz de produzir água filtrada com turbidez menor que 1,0 uT para taxa de 40 m/h. O filtro de poliéster de 60 cm só foi capaz de produzir água filtrada com turbidez abaixo do limite de 1,0 uT para taxas 40, 60 e 80 m/h. Já os filtros de 100cm de leito para ambas as fibras obtiveram carreiras de filtração mais longas para todos os limites de turbidez e todas as taxas de filtração. Observando os índices de filtrabilidade, o melhor resultado foi para filtro de fibras de poliéster 100 cm, DSA= 15 mg/L, taxa =60 m/h. É importante ressaltar que tais valores tem como base a água sintética específica do estudo, e coagulante sulfato de alumínio. É importante lembrar que mesmo a fibra de poliéster sendo sintética, ela é proveniente de reciclagem de garrafas PET (vide Revisão Bibliográfica), colaborando para a diminuição da disposição de resíduos sólidos.

c) Os filtros de fibras flexíveis de algodão mercerizado e poliéster de 100 cm de leito obtiverem desempenho melhor que os filtros de 60 cm, confirmando estudos anteriores de que o crescimento do comprimento do filtro afeta positivamente o desempenho dessa configuração na filtração. Essa afirmação é comprovada pelos índices de filtrabilidade, carreiras de filtração e volumes filtrado.

d) Ambos os filtros - algodão e poliéster - tiveram carreiras mais longas e índices de filtrabilidade melhores com dosagem menor de sulfato de alumínio (comparando DSA = 22,5 mg/L e DSA = 15 mg/L). Para taxa 100 m/h: Filtro de fibras de algodão 100 cm obteve carreira de filtração $31,7 \pm 4,0$ minutos, e IFI = $32,47 \pm 2,97$, para DSA = 22,5 mg/L, ao passo que para DSA = 15mg/L, carreira de filtração foi de $40,9 \pm 0,7$ minutos, e IFI = $24,03 \pm 0,36$ para. Para filtro de fibras de poliéster, operando com taxa de 100 m/h: carreira de filtração $57,9 \pm 5,7$ minutos, e IFI = $10,55 \pm 0,39$, para DSA = 22,5 mg/L e carreira de filtração de $95,3 \pm 12,9$ minutos, e IFI = $5,72 \pm 1,06$ para DSA = 15mg/L;

e) Ambos os filtros de 100 cm operam satisfatoriamente a taxas tão altas quanto 120 m/h, e com baixas perdas de carga. Porém, o filtro de fibras de poliéster possui carreiras de filtração e qualidade de efluente muito superiores aos do filtro de fibras de algodão mercerizado, mesmo apresentando igual superfície de contato total. O filtro de fibras de poliéster também apresentou valores de perda de carga menor que as lidas no filtro de fibras de algodão (para DSA = 15 mg/L, e taxa 100 m/h, perda de carga final do filtro de fibras de algodão foi de 1,88 mca, enquanto que o filtro de fibras de poliéster apresentou valor de perda de carga de 1,43 mca). Os índices de filtrabilidade também apresentaram valores mais vantajosos para os filtros de poliéster.

f) O filtro de fibras de algodão mostrou pioras no desempenho da filtração direta com o tempo, como pode ser observado na repetição da condição: 40 m/h, DSA = 22,5 mg/L, onde a carreira de filtração foi 3,6 vezes menor que no primeiro ensaio.

g) Pelos resultados (gráficos) de perda de carga, pelas fotografias dos leitos sujos, e pelas análises de Microscopia Eletrônica de Varredura dos leitos filtrantes após filtração, pode-se concluir que no filtro de 100 cm, operando com taxa 100 m/h, e DSA = 15 mg/L, há maior utilização da primeira metade do leito filtrante.

h) Através de análises de MEV, conclui-se que é utilizado na filtração os espaços entre as fibrilas do fio de poliéster e de algodão mercerizado. Portanto, a superfície específica real é maior que a teórica calculada no trabalho.

i) A lavagem com aplicações simultâneas de ar e água não promove eficiente retirada dos sólidos suspensos totais retidos no filtro de fibras de algodão mercerizado. Para o filtro de poliéster houve um modo eficiente com essas condições, porém foi observado ruptura e liberação de microfibrilas na água de lavagem, o que impediu comprovação do melhor método de lavagem via balanço de massa. Essa perda de fibrilas do leito durante o processo de lavagem tem implicação direta na vida útil do leito de fios multifilares de poliéster, merecendo pesquisas adicionais.

j) O método de lavagem com aplicações alternadas de ar e água, testado somente no filtro de fibras de algodão, mostrou-se mais eficiente do que os métodos de aplicações conjuntas de ar e água. Os parâmetros de comparação foram: retirada dos sólidos suspensos totais retidos no filtro, e recuperação da perda de carga inicial dos filtros. O modo mais eficiente foi o modo 10 (taxa de água de lavagem : 487 m/h; tempo de água de lavagem: 10 segundos; tempo de ar: 10 segundos, 3 repetições) com eficiência de 95% na recuperação de sólidos suspensos totais

retidos no filtro, recuperação total da perda de carga inicial, e gasto de 8,1 % de água filtrada para lavagem para os leitos de fios de algodão mercerizado.

k) Ambos os filtros de fibras de 100 cm apresentaram períodos de amadurecimento (quando a turbidez inicial da carreira de filtração era acima do valor limite imposto pela legislação e presente pesquisa) inferior a 5 minutos.

Como recomendações para futuros estudos sobre sugere-se:

a) Cálculo da porosidade dos filtros através do método 3 (item 4.3.4.3); para tal, é necessário realizar curva relacionando massa seca das fibras e número destas, e depois massa seca e porosidade do filtro.

b) Estudos aprofundados sobre a degradação de fibras de celulose em meio aquoso, e os efeitos desse método de lavagem (aplicações de água e ar comprimido) nas fibras naturais;

c) Estudos de dosagens menores de sulfato de alumínio, e principalmente outros coagulantes já estudados por Lee *et al* (2006, 2007, 2008a, 2008b), como PAC.

d) Estudos de distribuição do tamanho de partículas no filtrado dos filtros de poliéster e algodão, a fim de verificar a eficiência na retenção de microrganismos microscópicos, como por exemplo oocistos e cistos de protozoários.

e) Estudos hidrodinâmicos sobre a inserção de tubo perfurado no interior do feixe de fibras, tornando o fluxo do filtrado radial;

f) Estudos adicionais para aprofundamento do conhecimento dos protocolos de lavagem dos filtros de fibras flexíveis;

h) Parceria com a Engenharia de Materiais para aprimoramento da fibra de poliéster a fim de evitar liberação das fibrilas durante processo de lavagem.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AATCC - AMERICAN ASSOCIATION OF TEXTILE CHEMISTS AND COLORISTS.

AATCC Technical Manual. Vol. 81. 2006.

ABIPET - Associação Brasileira da Indústria do PET. 2013. 9º Censo da Reciclagem de PET

- Brasil, O Ano de 2012. Junho de 2013. Disponível em

<<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>> Acesso

02 de fevereiro de 2015.

ALFIERI, P. Apostila Fibras têxteis I - Fibras Naturais e Artificiais. 2010. Centro

Universitário da FEI. São Paulo/SP. 199p.

ARAUJO, C.J. (2010) Influência da velocidade Cross-Flow na câmara de flotação na

eficiência de unidades de flotação por ar dissolvido tratando água para abastecimento.

Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ARAÚJO, M.; MELO E CASTRO, E.M. Manual de Engenharia têxtil. Fundação Calouste

Gulbenkian. Vol 1. Lisboa. 1986.

ARBOLEDA, J (1973) Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Organización

Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud.

Associação Brasileira dos Produtores de Algodão. O Algodão no Brasil. Disponível em <

<http://www.abrapa.com.br/estatisticas/Paginas/Algodao-no-Brasil.aspx> >. Acesso em 03 de

fevereiro de 2015.

BOTARI, A.; DI BERNARDO, L. Modelação da perda de carga na filtração direta ascendente

em meio granular de areia grossa e pedregulho. Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 14, n

2, p. 245-256, abr/jun 2009.

BRASIL (2004) Ministério da Saúde. Portaria n°518, 24 de março de 2004.

BRASIL (2011) Ministério da Saúde. Portaria n° 2914, 12 de dezembro de 2011.

CEGARRA, J. Fundamentos y Tecnología del Blanqueo de Materiais Textiles. Universidade Politècnica de Catalunya: 1997.

Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Guia técnico ambiental da indústria têxtil. São Paulo: CETESB, 2009, 85p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. (2005) Métodos e técnicas de tratamento de água. São Carlos: RiMa.

DI BERNARDO; Prezotti, J.C.S. (1991). Caminhamento da frente de impurezas em Meios Granulares de Filtros Operados com Taxa Constante. 16° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Goiânia/GO. Set. Brasil.

DI BERNARDO, L. Sabogal-Paz, L.P. Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água, Editora LDiBe / Editora Cubo, 2009.

EMBRAPA. Sistema de Produção, versão eletrônica. Jan/2003. Disponível em < <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Algodao/AlgodaoCerrado/colheita.htm> > Acesso em 10 de outubro de 2013.

FONSECA, R.G. Hidrofilidade em fibras de algodão branco e naturalmente colorido. V Congresso Brasileiro de Algodão. Embrapa. 2005.

JEANMAIRE, J.P.; SUTY, H.; MARTELI, P.; BREANT, P.; PEDENAUD, P. (2007) Application of the flexible fiber filter modelu (3FM) filter to sea water filtration. Water Science and Technology: Vol. 56, n. 10, 157-165.

KUASNE, A. Curso Têxtil em Malharia e Confecção 2ºmódulo - Fibras Têxteis. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. 2008.

LEE, J.J.; JEONG, M.K.; IM, J.H.; BENAÏM, R.; LEE, S.H.; OH, J.E.; WOO, H.J.; KIM, C.W. (2006) Enhancing flexible fiber filter (3FM) performance using in-line coagulation. *Water Science and Technology*: Vol. 53, n. 7, 59-66.

LEE, J.J.; IM, J.H.; KIM, J.R.; KIM, Y.J.; POO, K.M.; KIM, C.W. (2007) Better understanding of the filtration characteristics in the flexible fibre filter module (3FM). *Water Science and Technology*: Vol. 55, n. 1-2, 77-83.

LEE, J.J.; CHA, J.H.; BENAÏM, R.; HAN, K.B.; KIM, C.W. (2008a) Fiber filter as an alternative to the process of flocculation-sedimentation for water treatment. *Desalination* 231, 323-331.

LEE, J.J.; CHA, J.H.; BENAÏM, R.; HAN, K.B.; KIM, C.W. (2008b) Toward an Optimization of the backwashing process in the flexible fiber filter. *Separation Science and Technology*, 43, 1667- 1676.

LEE, J.J.; JOHIR, M.A.H.; CHINU, K.H.; SHON, H.K.; VIGNESWARAN, S.; KANDASAMY, J.; KIM, C.W.; SHAW, K. (2010). Novel pre-treatment method for seawater reverse osmosis: fibre media filtration. *Desalination*, 250, 557-561.

MAIA, K.A. Influência da velocidade de entrada na zona de contato na eficiência de clarificação de unidades retangulares de flotação por ar dissolvido aplicado no tratamento de água para abastecimento. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

MAUCHAUFFEE, S. (2010) Application of 3FM technology to pulp and paper waste water filtration. Disponível em: < <http://www.aquafit4use.eu/userdata/file/Mid-term%20Conference/Session%203%20Advanced%20Treatments/Application%20of%203FM%20to%20pulp%20paper%20ww%20filtration.pdf> > Acesso: 18 de outubro de 2013.

MORITA, A.K. M. Emprego de filtro de fibra flexível constituído de sisal e de polipropileno na clarificação de água para abastecimento. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2013.

PERES, C.S.; ABRAHÃO, A.J. Características e sistemas de tratamento de águas residuais das indústrias têxteis. Revista Química Têxtil, V.21, p. 22–39, 1998.

TRUSSELL, R.R.; CHANG, M. Review of flow through porous media as applied to headloss in water filters. Journal of Environmental Engineering, v. 125. n. 11, p. 998-1006, nov. 1999.

VICUNHA FIBRA. Manual Técnico de Poliéster. Disponível em <<http://www.abqct.com.br/artigost/Manual%20de%20Poliester.pdf>> Acesso 05 de janeiro de 2015.

ANEXOS

ANEXO I - Perdas de carga das triplicatas dos ensaios de clarificação através de filtração direta usando filtros de fibras flexíveis.

1) Dosagem de sulfato de alumínio (DSA) = 22,5 mg/L

1.1 Taxa de filtração de 40 m/h

1.1.1 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 60 cm

Figura 135 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 2

Figura 136 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 3

1.1.2 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 100 cm

Figura 137 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 2

Figura 138 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 3

1.1.3 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 60 cm

Figura 139 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 2

Figura 140 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 3

1.1.4 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 100 cm

Figura 141 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 2

Figura 142 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 3

1.2 Taxa de filtração de 60 m/h

1.2.1 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 60 cm

Figura 143 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 2

Figura 144 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 3

1.2.2 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 100 cm

Figura 145 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 2

Figura 146 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 3

1.2.3 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 60 cm

Figura 147 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 2

Figura 148 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 3

1.2.4 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 100 cm

Figura 149 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 2

Figura 150 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 3

1.3 Taxa de filtração de 80 m/h

1.3.1 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 60 cm

Figura 151 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 2

Figura 152 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 3

1.3.2 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 100 cm

Figura 153 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 2

Figura 154 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 3

1.3.3 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 60 cm

Figura 155 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 2

Figura 156 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 60 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 3

1.3.4 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 100 cm

Figura 157 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 2

Figura 158 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 3

1.4 Taxa de filtração de 100 m/h

1.4.1 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 100 cm

Figura 159 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 2

Figura 160 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 3

1.4.2 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 100 cm

Figura 161 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 2

Figura 162 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 3

1.5 Taxa de filtração de 120 m/h

1.5.1 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 100 cm

Figura 163 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 2

Figura 164 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 3

1.4.2 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 100 cm

Figura 165 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 2

Figura 166 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 22,5mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 3

2) Dosagem de sulfato de alumínio (DSA) = 15 mg/L

2.1 Taxa de filtração de 40 m/h

2.1.1 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 100 cm

Figura 167 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 2

Figura 168 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 3

2.1.2 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 100 cm

Figura 169 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 2

Figura 170 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 40 m/h; Ensaio 3

2.2 Taxa de filtração de 60 m/h

2.2.1 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 100 cm

Figura 171 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 2

Figura 172 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 3

2.2.2 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 100 cm

Figura 173 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 2

Figura 174 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 60 m/h; Ensaio 3

2.3 Taxa de filtração de 80 m/h

2.3.1 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 100 cm

Figura 175 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 2

Figura 176 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 3

2.3.2 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 100 cm

Figura 177 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 2

Figura 178 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 80 m/h; Ensaio 3

2.4 Taxa de filtração de 100 m/h

2.4.1 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 100 cm

Figura 179 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 2

Figura 180 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 3

2.4.2 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 100 cm

Figura 181 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 2

Figura 182 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 100 m/h; Ensaio 3

2.5 Taxa de filtração de 120 m/h

2.5.1 Filtro de fibras flexíveis de algodão mercerizado 100 cm

Figura 183 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 2

Figura 184 - Perda de carga para filtro de fibras de algodão 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 3

2.5.2 Filtro de fibras flexíveis de poliéster 100 cm

Figura 185 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 2

Figura 186 - Perda de carga para filtro de fibras de poliéster 100 cm; DSA = 15mg/L; taxa 120 m/h; Ensaio 3

ANEXO II - Análises de turbidez nos testes de lavagem

1) Filtro de fibras de Poliéster 100 cm

1.1 Modo de lavagem 1

Figura 187 - Valores de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de poliéster - Modo 1

1.2 Modo de lavagem 2

Figura 188 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de poliéster - Modo 2

1.3 Modo de lavagem 3

Figura 189 - Variação de turbidez no ensaio 1 de lavagem em filtro de fibras de poliéster - Modo 3

Figura 190 - Variação de turbidez no ensaio 2 de lavagem em filtro de fibras de poliéster - Modo 3

1.4 Modo de lavagem 4

Figura 191 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de poliéster - Modo 4

2) Filtro de fibras flexíveis de Algodão mercerizado

2.1 Modo de lavagem 1

Figura 192 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 1

2.2 Modo de lavagem 2

Figura 193 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 2

2.3 Modo de lavagem 3

Figura 194 - Variação de turbidez no ensaio 1 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 3

Figura 195 - Variação de turbidez no ensaio 2 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 3

2.4 Modo de lavagem 4

Figura 196 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 4

2.5 Modo de lavagem 5

Figura 197 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 5

2.6 Modo de lavagem 6

Figura 198 - Variação de turbidez no ensaio 1 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 6

Figura 199 - Variação de turbidez no ensaio 2 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 6

2.7 Modo de lavagem 7

Figura 200 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 7

2.8 Modo de lavagem 8

Figura 201 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 8

2.9 Modo de lavagem 9

Figura 202 - Variação de turbidez no ensaio 1 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 9

Figura 203 - Variação de turbidez no ensaio 2 de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 9

2.10 Modo de lavagem 10

Figura 204 - Variação de turbidez nos ensaios de lavagem em filtro de fibras de algodão - Modo 10