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

ALINE BEATRIZ CARVALHO DE SÁ

**Influência da porosidade do leito e do diâmetro das fibras na eficiência da filtração com
filtro de fibras flexíveis aplicado ao tratamento de água**

Versão corrigida

SÃO CARLOS – SÃO PAULO

2016

ALINE BEATRIZ CARVALHO DE SÁ

Influência da porosidade do leito e do diâmetro das fibras na eficiência da filtração com filtro de fibras flexíveis aplicado ao tratamento de água

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: Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio
Penalva Reali

SÃO CARLOS – SÃO PAULO

2016

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

D111i de Sá, Aline Beatriz Carvalho
Influência da porosidade do leito e do diâmetro das fibras na eficiência da filtração com filtro de fibras flexíveis aplicado ao tratamento de água / Aline Beatriz Carvalho de Sá; orientador Marco Antonio Penalva Reali. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. tratamento de água para abastecimento. 2. filtração. 3. filtro de fibras flexíveis. 4. poliamida. 5. fundo de filtro. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ALINE BEATRIZ CARVALHO DE SÁ.**

Título da dissertação: "Influência da porosidade do leito e do diâmetro das fibras na eficiência da filtração com filtro de fibras flexíveis aplicado ao tratamento de água."

Data da defesa: 07/10/2016.

Comissão Julgadora:

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

Prof. Dr. **Erich Kellner**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **Ronan Cleber Contrera**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Resultado:

APROVADA

APROVADA

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 **Luis Fernando Costa Alberto**

*Dedico esta dissertação aos meus pais, fonte
inesgotável de amor e inspiração*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial aos meus pais, por todo apoio e amor que sempre me deram.

Às minhas irmãs, pelo apoio e energias positivas durante todo o caminho.

Ao Vinícius, por estar sempre ao meu lado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali, pela orientação, compreensão, paciência e dedicação ao longo de toda minha pesquisa de mestrado.

À técnica Maria Teresa, pela dedicação e auxílio em todas as análises.

Aos técnicos Alcino e Bérnago por toda ajuda com a montagem do experimento.

Aos amigos do LATAR pela ajuda com ideias e companhia durante toda a pesquisa: Thalita, Eloá, Gabriel, Rodrigo, Paulo, Dayane, Fernanda, Juliana, Gabriela, Priscila, Bárbara, Rafael, Ulisses Tadeu e Ana Paula.

À todos os amigos de São Carlos, em especial à Marjolly, Leandro, Nathe, Dayse, Martins, Patrick, Janaína, Drica, Philipe, Rafael, Marina, Denise e Camila pela amizade e os bons momentos compartilhados.

RESUMO

de SÁ, A.B.C. (2016) **Influência da porosidade do leito e do diâmetro das fibras na eficiência da filtração com filtro de fibras flexíveis aplicado ao tratamento de água.** 2016.132p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os filtros de fibras flexíveis são unidades de filtração direta, compostos por leito de microfibras. São operados com altas taxas de filtração, garantindo alta eficiência de remoção de sólidos suspensos. Neste estudo avaliou-se a influência dos diâmetros das fibras, da porosidade do leito e da taxa de filtração na eficiência de clarificação de uma água sintética, utilizando filtro de fibras de poliamida. Foram construídos três filtros com diâmetro interno de 28mm e porosidade de 84%, cada um com leito de 100 cm de comprimento e diâmetro de fibra de 0,03, 0,11 e 0,32 mm e um filtro de mesmo diâmetro e comprimento, composto por fibras de 0,03 mm e porosidade 93%. A distribuição de água na entrada do filtro foi composta por 4 orifícios periféricos de 3,5 mm e um orifício central de 8 mm (Fundo de filtro Tipo 1 – F_{Tipo1}). Essa mesma entrada foi utilizada para a distribuição de água e ar na lavagem. Em um segundo momento, avaliou-se outra distribuição de água na entrada do filtro, com apenas quatro orifícios periféricos (Fundo de filtro Tipo 2 – F_{Tipo2}). Nessa nova configuração de filtro, foram avaliados os filtros de fibras de 0,03 mm, em duas porosidades: 84% e 93%. A água sintética possuía turbidez de $9,51 \pm 0,22$ uT e cor aparente de $86,4 \pm 4,5$ uC. A coagulação foi realizada *in-line* com sulfato de alumínio na dosagem de $22,5 \text{ mg.L}^{-1}$. Em todos os filtros foram avaliadas três taxas de filtração: 60, 80 e 100 m h^{-1} e estabeleceu-se os limites de turbidez na água filtrada de 0,5 e 2,0 uT para o final da carreira de filtração. A distribuição de água na entrada do filtro mostrou-se de extrema importância para o bom funcionamento do mesmo, pois, dependendo da sua configuração, podem ocorrer emaranhamentos das fibras, comprometendo a eficiência de remoção de cor e turbidez. O filtro com fundo F_{Tipo1} apresentou qualidade satisfatória para o filtro de fibras com diâmetro 0,11 mm, produzindo água filtrada com turbidez abaixo de 2,0 uT. O filtro de fibras de 0,03 mm de diâmetro conseguiu produzir qualidade dentro do limite estabelecido em alguns ensaios, entretanto não houve repetibilidade devido ao emaranhamento ocorrido no leito. Já o filtro de fibras de diâmetro 0,32 mm não atingiu turbidez satisfatória. Os dois filtros de fibras com fundo F_{Tipo2} e porosidades 93% e 84%, respectivamente, conseguiram atingir os valores impostos para a turbidez da água filtrada em todas as taxas estudadas ($60, 80$ e 100 m h^{-1}), com exceção do filtro de 93% de porosidade que não atingiu a turbidez mínima de 0,5 uT quando operado uma taxa de 100 m h^{-1} . Ao final estimou-se os volumes de água filtrada produzidos no intervalo de um dia (24h) para cada filtro que atingiu os limites de turbidez pré-estabelecidos. Dentre as variações testadas em F_{Tipo1} e F_{Tipo2} , concluiu-se que o volume diário de água produzida aumenta proporcionalmente ao aumento da taxa de filtração. Esse estudo demonstrou que o diâmetro da fibra, a porosidade e o fundo do filtro são características essenciais para o bom funcionamento do filtro, influenciando na eficiência de remoção de turbidez e cor aparente da água afluente.

Palavra-chave: tratamento de água para abastecimento; filtração; filtro de fibras flexíveis; poliamida; fundo de filtro.

ABSTRACT

de SÁ, A.B.C. (2016) **Influence of the porosity and diameter of the fibers in filtration efficiency with flexible fibers filter applied to water treatment.** 2016.132p. Dissertation (Master's Degree). Engineering School of São Carlos, University of São Paulo.

The flexible fiber filters are direct filtration module, made of microfibers filter media. They are operated with high filtration rates ensuring high solids removal efficiency. This study evaluated the influence of diameters of fibers, porosity and filtration rates in the clarification efficiency of synthetic water. Three filters have been constructed with internal diameter of 28 mm and porosity of 84%, each with a filter medium of 100 cm length and fiber diameter of 0.03, 0.11 and 0.32 mm, and a filter of the same diameter and length, comprises fibers of 0.03 mm and porosity of 93%. The water distribution at the filter inlet was composed by four peripheral holes of 3.5 mm and a central hole of 8 mm (filter bottom Type 1 - F_{Type1}). That same input was used for water and air distribution in the wash. In a second step, was evaluated other water distribution in the filter inlet, with only four peripheral holes (filter bottom Type 2 - F_{Type2}). In this new filter configuration were evaluated 0.03 mm fiber filters with two porosity values: 84% and 93%. The synthetic water had turbidity of 9.51 ± 0.22 NTU and apparent color of 86.4 ± 4.5 uC. The coagulation was performed in-line with aluminum sulfate at a dosage of 22.5 mg.L^{-1} . In all three filters were evaluated three filtration rates: 60, 80 and $100 \text{ m} / \text{h}$ and fixed the limits of the filtered water turbidity of 0.5 and 2.0 NTU at the end of the career filter. The water distribution in the filter inlet proved to be extremely important for the proper functioning of the same, because, depending on your configuration, entanglements can occur, compromising the color and turbidity removal efficiency. The bottom filter F_{Type1} presented a satisfactory quality for the fiber filter diameter 0.11 mm, producing filtered water with turbidity below 2.0 NTU. The filter of 0.03 mm diameter fibers could produce water quality within the limit in some tests, however there was no repeatability due to entanglement occurred in the bed. Other way, the 0.32 mm diameter fiber filter has not reached satisfactory turbidity. The two fibers filters F_{Type2} and porosity 93% and 84%, respectively, were able to achieve values imposed to the turbidity of the filtered water in all studied rates (60, 80 and 100 m.h^{-1}), except 93% porosity filter witch not reached the minimum turbidity of 0.5 NTU when operated a 100 m.h^{-1} rate. At the end was estimated the volumes of the filtered water produced within one day (24h) for each filter that has reached the limits of predetermined turbidity. Among the variations tested F_{Type1} and F_{Type2} , can be concluded that the daily water volume produced increases with the filtration rate increasing. This study demonstrated that the fiber diameter, porosity and filter bottom characteristics are essential for the proper functioning of the filter, influencing the apparent color and turbidity removal efficiency of influent water.

Keyword: water treatment for supply; filtration; Filter flexible fibers; polyamide; bottom filter

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Leito de fibras flexíveis de poliamida.....	29
Figura 2 – Esquema de uma planta de filtro de fibras flexíveis em escala piloto	30
Figura 3 – Filtro de Fibras Flexíveis com tubo perfurado	33
Figura 4 – Variação da turbidez e da carreira de filtração de acordo com a taxa de filtração .	34
Figura 5 – Esquema da área transversal dos fundos de filtro F_{Tipo1} e F_{Tipo2}	41
Figura 6 – Esquema da instalação piloto	43
Figura 7 – Esquema do filtro de fibras flexíveis	46
Figura 8 – Fotografia dos três filtros de fibras flexíveis instalados no sistema	47
Figura 9 – Fotografia da estrutura do sistema de filtros de fibra flexíveis.....	48
Figura 10 – Equipamento utilizado para confecção dos leitos filtrantes.....	55
Figura 11 – Construção do leito filtrante.....	56
Figura 12 – Leito filtrante após fixação em base rígida de PVC.....	57
Figura 13 – Fotografias dos leitos de porosidade 84%: a) leito de fibras de 0,11 mm; b) leito de fibras de 0,32mm ; e , c) leito de fibras de 0,03mm	57
Figura 14 – Curva de correlação entre Sólidos Suspensos Totais e Turbidez.....	60
Figura 15 – Fotografia das amostras de fibras: a) fibra $D_{0,03mm}$ com ampliação de 400 vezes o tamanho real; b) amostra da fibra $D_{0,11mm}$ com ampliação de 100 vezes o tamanho real e c) amostra da fibra $D_{0,32mm}$ com ampliação de 40 vezes o tamanho real.	66
Figura 16 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1-T_{80}-E_1$, $R_2-T_{80}-E_2$ e $R_3-T_{80}-E_3$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,03\text{ mm}}/F_{Tipo1}]$	70
Figura 17 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1-T_{100}-E_4$, $R_2-T_{100}-E_5$ e $R_3-T_{100}-E_6$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$	71
Figura 18 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1-T_{80}-E_1$, $R_2-T_{80}-E_2$, $R_3-T_{80}-E_3$, $R_4-T_{80}-E_7$ e $R_5-T_{80}-E_8$; Filtro $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$	72
Figura 19 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1-T_{60}-E_{10}$, $R_2-T_{60}-E_{11}$; Filtro $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$	73
Figura 20 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1-T_{80}-E_1$, $R_2-T_{80}-E_2$, $R_3-T_{80}-E_3$, $R_4-T_{80}-E_7$, $R_5-T_{80}-E_8$ e $R_6-T_{80}-E_{12}$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/Tipo1]$	74
Figura 21 – Fotografia do leito do filtro $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/Tipo1]$, após ensaio $R_6-T_{80}-E_{12}$: a) parte externa do leito e b) parte interna do leito	75
Figura 22 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_7-T_{80}-E_{14}$, $R_8-T_{80}-E_{17}$ e $R_9-T_{80}-E_{20}$, filtro $[P_{84\%}/D_{0,03\text{ mm}}/F_{Tipo1}]$	75
Figura 23 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_4-T_{100}-E_{15}$, $R_5-T_{100}-E_{18}$ e $R_6-T_{100}-E_{21}$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$	76
Figura 24 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_3-T_{60}-E_{16}$, $R_4-T_{60}-E_{19}$ e $R_5-T_{60}-E_{22}$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,03\text{ mm}}/F_{Tipo1}]$	77
Figura 25 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1-T_{80}-E_1$, $R_2-T_{80}-E_3$, $R_3-T_{80}-E_7$ e $R_4-T_{80}-E_8$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{Tipo1}]$	78
Figura 26 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1-T_{100}-E_5$, $R_2-T_{100}-E_6$ e $R_3-T_{100}-E_9$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{Tipo1}]$	79
Figura 27 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1-T_{60}-E_1$, $R_2-T_{60}-E_{11}$ e $R_3-T_{60}-E_{13}$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{Tipo1}]$	79

Figura 28 – Fotografias do leito retirado do filtro $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ após a realização do ensaio R ₃ -T ₆₀ -E ₁₃ : a) fotografia do trecho de leito entre 40 e 50 cm de altura; b) fotografia do trecho de leito entre 50 e 60 cm; e , c) fotografia do trecho de leito entre 70 e 80 cm de altura.	80
Figura 29 – Valores de perda de carga referentes ao ensaio R ₃ -T ₆₀ -E ₁₃ ; Filtro $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$	81
Figura 30 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₁ -T ₈₀ -E ₁	82
Figura 31 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₂ -T ₈₀ -E ₃	82
Figura 32 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₁ -T ₁₀₀ -E ₅	83
Figura 33 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₂ -T ₁₀₀ -E ₆	83
Figura 34 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₃ -T ₈₀ -E ₇	83
Figura 35 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₄ -T ₈₀ -E ₈	83
Figura 36 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₃ -T ₁₀₀ -E ₉	84
Figura 37 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₁ -T ₆₀ -E ₁₀	84
Figura 38 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₂ -T ₆₀ -E ₁₁	84
Figura 39 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₃ -T ₆₀ -E ₁₃	84
Figura 40 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R ₅ -T ₈₀ -E ₁₄ , R ₆ -T ₈₀ -E ₁₇ e R ₇ -T ₈₀ -E ₂₀ ; filtro $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$	85
Figura 41 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R ₄ -T ₁₀₀ -E ₁₅ e R ₅ -T ₁₀₀ -E ₂₁ ; filtro $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$	86
Figura 42 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R ₄ -T ₆₀ -E ₁₆ , R ₅ -T ₆₀ -E ₁₉ e R ₆ -T ₆₀ -E ₂₂ ; filtro $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$	87
Figura 43 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₅ -T ₈₀ -E ₁₄	87
Figura 44 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₄ -T ₁₀₀ -E ₁₅	87
Figura 45 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₄ -T ₆₀ -E ₁₆	88
Figura 46 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₆ -T ₈₀ -E ₁₇	88
Figura 47 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₅ -T ₆₀ -E ₁₉	88
Figura 48 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₇ -T ₈₀ -E ₂₀	88
Figura 49 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ – Ensaio R ₅ -T ₁₀₀ -E ₂₁	89

Figura 50 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,11mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₆ -T ₆₀ -E ₂₂	89
Figura 51 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R ₁ -T ₆₀ -E ₁₀ e R ₂ -T ₆₀ -E ₁₁ ; filtro [P _{84%} /D _{0,32mm} /F _{Tipo1}].	91
Figura 52 – Valores de perda de carga por trecho referentes ao ensaio R ₁ -T ₆₀ -E ₁₀ ; filtro [P _{84%} /D _{0,32mm} /F _{Tipo1}].....	92
Figura 53 – Valores de perda de carga por trecho referentes ao ensaio R ₂ -T ₆₀ -E ₁₁ ; filtro [P _{84%} /D _{0,32mm} /F _{Tipo1}].....	92
Figura 54 – Valores de turbidez e cor da água filtrada em filtros de fibras, referentes aos ensaios R ₁ -T ₈₀ -E ₇ e R ₂ -T ₈₀ -E ₈ ; [P _{84%} /D _{0,32mm} /F _{Tipo1}].	92
Figura 55 – Valores de perda de carga por trecho, referentes ao ensaio R ₁ -T ₈₀ -E ₇ ; filtro [P _{84%} /D _{0,32 mm} /F _{Tipo1}].	93
Figura 56 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R ₁ -T ₁₀₀ -E ₆ e R ₂ -T ₁₀₀ -E ₉ ; [P _{84%} /D _{0,32mm} /F _{Tipo1}]	94
Figura 57 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,11mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₁ -T ₁₀₀ -E ₆	94
Figura 58 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,11mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₂ -T ₁₀₀ -E ₉	94
Figura 59 – Valores turbidez e cor da água filtrada referentes à média dos ensaios de cada uma das taxas de filtração (60, 80 e 100 m.h ⁻¹) em filtro de fibras [P _{84%} /D _{0,32mm} /F _{Tipo1}].	95
Figura 60 – Valores de turbidez e cor da água filtrada em filtros de fibras, referentes aos ensaios R ₁ -T ₆₀ -E ₁ , R ₁ -T ₈₀ -E ₂ e R ₁ -T ₁₀₀ -E ₃ ; filtro [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo1}].	98
Figura 61 – Leito emaranhado após ensaios – filtro [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo1}].	99
Figura 62 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo1}] – Ensaio R ₁ -T ₆₀ -E ₁	100
Figura 63 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo1}] – Ensaio R ₁ -T ₈₀ -E ₂	100
Figura 64 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo1}] – Ensaio R ₁ -T ₁₀₀ -E ₃	100
Figura 65 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R ₁ -T ₆₀ -E ₁ e R ₂ -T ₆₀ -E ₇ ; filtro [P _{93%} /D _{0,03 mm} /F _{Tipo2}].	103
Figura 66 – Comparação entre as curvas de turbidez obtidas nos filtros F _{Tipo1} e F _{Tipo2} , operados com taxa de 60 m.h ⁻¹	104
Figura 67 – Valores de turbidez e cor da água filtrada em filtros de fibras referentes aos ensaios R ₁ -T ₈₀ -E ₃ e R ₂ -T ₈₀ -E ₅ ; filtro [P _{93%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo2}],	105
Figura 68 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R ₁ -T ₁₀₀ -E ₂ e R ₂ -T ₁₀₀ -E ₄ ; filtro [P _{93%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo2}].	106
Figura 69 – Valores médios de turbidez dos ensaios realizados para cada taxa (60, 80 e 100 m.h ⁻¹); filtro [P _{93%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo2}]	106
Figura 70 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₁ -T ₆₀ -E ₁	107
Figura 71 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₂ -T ₆₀ -E ₇	107
Figura 72 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₁ -T ₈₀ -E ₃	107
Figura 73 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₂ -T ₈₀ -E ₅	107

Figura 74 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₁ -T ₁₀₀ -E ₂	108
Figura 75 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{93%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₂ -T ₁₀₀ -E ₄	108
Figura 76 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R ₁ -T ₈₀ -E ₃ e R ₂ -T ₈₀ -E ₅ ; filtro [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo2}].	108
Figura 77 – Valores de turbidez para os ensaios com taxa de 80 m.h ⁻¹ em filtros P84% e fundo de filtro F _{Tipo1} e F _{Tipo2}	109
Figura 78 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R ₁ -T ₆₀ -E ₆ e R ₂ -T ₆₀ -E ₇ ; filtro [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo2}].	110
Figura 79 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R ₁ -T ₁₀₀ -E ₂ e R ₂ -T ₁₀₀ -E ₄ ; filtro [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo2}].	110
Figura 80 – Valores médios de turbidez dos ensaios realizados para cada taxa (60, 80 e 100 m.h ⁻¹).	111
Figura 81 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₁ -T ₆₀ -E ₆	112
Figura 82 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₂ -T ₆₀ -E ₇	112
Figura 83 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₁ -T ₈₀ -E ₃	113
Figura 84 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₂ -T ₈₀ -E ₅	113
Figura 85 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₁ -T ₁₀₀ -E ₂	113
Figura 86 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipo2}] – Ensaio R ₂ -T ₁₀₀ -E ₄	113
Figura 87 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₁ -T ₈₀ -E ₁	127
Figura 88 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₂ -T ₈₀ -E ₂	127
Figura 89 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₃ -T ₈₀ -E ₃	127
Figura 90 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₁ -T ₁₀₀ -E ₄	127
Figura 91 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03m} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₂ -T ₁₀₀ -E ₅	128
Figura 92 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,031mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₃ -T ₁₀₀ -E ₆	128
Figura 93 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₄ -T ₈₀ -E ₇	128
Figura 94 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₅ -T ₈₀ -E ₈	128
Figura 95 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₁ -T ₆₀ -E ₁₀	129
Figura 96 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₂ -T ₆₀ -E ₁₁	129

Figura 97 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₆ -T ₈₀ -E ₁₂	129
Figura 98 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₇ -T ₈₀ -E ₁₄	129
Figura 99 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₄ -T ₁₀₀ -E ₁₅	130
Figura 100 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₃ -T ₆₀ -E ₁₆	130
Figura 101 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₈ -T ₈₀ -E ₁₇	130
Figura 102 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₅ -T ₁₀₀ -E ₁₈	130
Figura 103 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₄ -T ₆₀ -E ₁₉	131
Figura 104 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₉ -T ₈₀ -E ₂₀	131
Figura 105 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₆ -T ₁₀₀ -E ₂₁	131
Figura 106 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₆ -T ₆₀ -E ₂₂	131
Figura 107 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P _{84%} /D _{0,11mm} /F _{Tipo1}] – Ensaio R ₁ -T ₁₀₀ -E ₅	132

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1– Produtividade do filtro de acordo com a taxa de filtração.....	34
Quadro 2 – Resistência química da poliamida	39
Quadro 3 – Variáveis de controle e frequência de amostragem	59
Tabela 1- Características dos leitos nas etapas 2, 3 e 4.	42
Tabela 2- Número e massa de fibras para cada leito	52
Tabela 3- Número de Reynolds para cada filtro em cada uma das taxas de filtração estudadas (60, 80 e 100 m/h), considerando as temperaturas de 20, 25 e 30 °C.....	54
Tabela 4 – Medidas (em mm) referentes ao diâmetro real dos fios de nylon dos leitos filtrantes	65
Tabela 5 – Ordem dos ensaios realizados na Etapa 2;.....	68
Tabela 6 – Características da água bruta para os ensaios realizados na Etapa 2	69
Tabela 7 – Características da água coagulada para os ensaios realizados na Etapa 1	69
Tabela 8 – Água coagulada para os ensaios da taxa de 100 m.h ⁻¹ ; Filtro [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo1}].	71
Tabela 9 – Porcentagem da perda de carga total até turbidez igual a 2,0 uT.	90
Tabela 10 – Média dos valores de turbidez, Condutividade, Abs ₂₅₄ , COT e SST das amostras compostas (turbidez até 2,0 uT), referentes aos ensaios no filtro [P _{84%} /D _{0,11mm} /F _{Tipo1}]	96
Tabela 11 – Ordem dos ensaios realizados na Etapa 3.....	97
Tabela 12 – Características da água coagulada para os ensaios realizados na Etapa 3	97
Tabela 13 – Características da água bruta para os ensaios realizados na Etapa 3	97
Tabela 14 – Ordem dos ensaios da Etapa 4	102
Tabela 15 – Características da água bruta para os ensaios realizados na Etapa 4	102
Tabela 16 – Características da água coagulada para os ensaios realizados na Etapa 4	103
Tabela 17 – Média dos valores de turbidez, Condutividade, Abs ₂₅₄ , COT e SST das amostras compostas por taxa e porosidade; Filtro F _{Tipo2}	114
Tabela 18 – Volume diário de produção estimado por extrapolação (V _{ext-24h}) e valor da porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P) por ensaio considerando turbidez na água filtrada igual a 0,5 uT.....	117
Tabela 19 – Volume diário de produção estimado por extrapolação (V _{ext-24h}) e valor da porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P) por ensaio considerando turbidez na água filtrada igual a 2,0 uT.....	118
Tabela 20 – Volume diário de produção estimado por extrapolação (V _{ext-24h}) e valor da porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P) por ensaio considerando turbidez na água filtrada igual a 2,0 - filtro [P _{84%} /D _{0,11mm} /F _{Tipo2}]	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abs 254nm	Absorbância em comprimento de onda de 254 nm
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
Al ₂ SO ₄	Sulfato de alumínio
ANOVA	Análise de variância
COT	Carbono Orgânico Total
D _{0,03 mm}	Diâmetro de 0,03 milímetros
D _{0,11 mm}	Diâmetro de 0,11 milímetros
D _{0,32 mm}	Diâmetro de 0,32 milímetros
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
F _{Tipo1}	Fundo de filtro Tipo 1
F _{Tipo2}	Fundo de filtro Tipo 2
PAC	Policloreto de Alumínio
P _{84%}	Porosidade de 84%
P _{93%}	Porosidade de 93%
pH	Potencial Hidrogeniônico
SST	Sólidos Suspensos Totais

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	25
2.	OBJETIVOS	27
2.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3.	REVISÃO DE LITERATURA	29
3.1.	ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO ÂMBITO INTERNACIONAL.....	31
3.1.1.	Estudos realizados com a segunda versão do filtro de fibras	32
3.2.	ESTUDOS SOBRE FILTROS DE FIBRAS FLEXÍVEIS NO ÂMBITO NACIONAL	35
3.3.	LAVAGEM DO FILTRO DE FIBRAS FLEXÍVEIS	36
3.4.	A FIBRA DE POLIAMIDA.....	38
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1.	ÁGUA DE ESTUDO	42
4.2.	DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO	43
4.2.1.	Armazenamento da água de estudo	44
4.2.2.	Dosagem de coagulante	44
4.2.3.	Sistema de filtros de fibras flexíveis	45
4.2.4.	Sistema de lavagem dos filtros	48
4.2.4.1.	<i>Perda de carga</i>	49
4.3.	ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DIRETA EM FILTRO DE FIBRAS FLEXÍVEIS	49
4.3.1.	Etapa 1: Caracterização das fibras de poliamida e construção dos leitos.....	49
4.3.1.1.	<i>Microscopia óptica</i>	50
4.3.1.2.	<i>Determinação da porosidade e do número de fibras do leito</i>	50
4.3.1.3.	<i>Cálculo do número de Reynolds</i>	52
4.3.1.4.	<i>Construção dos leitos</i>	55
4.3.2.	Etapa 2: Avaliação das eficiências de remoção de cor e turbidez para a porosidade de 84%	57
4.3.2.1.	<i>Curva de correlação entre sólidos suspensos totais e turbidez.....</i>	60
4.3.3.	Etapa 3: Avaliação das eficiências de remoção de cor e turbidez para a segunda porosidade selecionada.	61
4.3.4.	Etapa 4: Avaliação das eficiências de remoção de cor e turbidez para a nova distribuição de água e ar na entrada do filtro.....	61
4.3.5.	Comparação entre os filtros de fibras com fundo F_{Tipo2} , segundo critérios de desempenho	62

4.3.6.	Testes estatísticos	63
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
5.1.	ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE POLIAMIDA	65
5.2.	ETAPA 2 - AVALIAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ EM FILTROS DE FIBRAS DE POLIAMIDA P _{84%} - FILTROS [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipol}], [P _{84%} /D _{0,11mm} /F _{Tipol}] E [P _{84%} /D _{0,32mm} /F _{Tipol}]	66
5.2.1.	Resultados dos ensaios do filtro de fibras de poliamida D _{0,03mm} - filtro [P _{84%} / D _{0,03 mm} / F _{Tipol}].....	69
5.2.2.	Resultados dos ensaios do filtro de fibras de poliamida D _{0,11mm} – Filtro [P _{84%} /D _{0,11mm} /F _{Tipol}]	77
5.2.3.	Resultados dos ensaios do filtro de fibras de poliamida D _{0,32mm} – Filtro [P _{84%} /D _{0,32mm} /F _{Tipol}]	90
5.2.4.	Análise das amostras compostas	95
5.3.	ETAPA 3 - AVALIAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ PARA O LEITO D _{0,03mm} COM POROSIDADE DE 93% - FILTRO [P _{93%} /D _{0,03} mm/F _{Tipol}]	97
5.4.	ETAPA 4 - AVALIAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ PARA A NOVA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E AR NA ENTRADA DO FILTRO.	101
5.4.1.	Resultado dos ensaios em filtro de fibras D _{0,03mm} , P _{93%} - Filtro [P _{93%} /D _{0,03mm} /F _{Tipol}].....	103
5.4.2.	Resultado dos ensaios em filtro de fibras D _{0,03mm} , P _{93%} - Filtro [P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipol}]	108
5.4.3.	Análise das amostras compostas	113
5.5.	COMPARAÇÃO ENTRE OS FILTROS ESTUDADOS	115
5.5.1.	Comparação entre os volumes diários de água produzidos nos filtros F _{Tipol} – filtros [P _{93%} /D _{0,32mm} /F _{Tipol}] e [P _{84%} /D _{0,32mm} /F _{Tipol}].....	116
5.5.1.1.	<i>Comparação entre os valores de volumes diários de produção estimado por extrapolação (V_{ext-24h}) e valor da porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P) nos filtros F_{Tipol} e filtro [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipol}] em função da taxa de filtração</i>	119
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	121
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124
	APÊNDICE A.....	127

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o sistema de tratamento de água predominante ainda é o convencional, caracterizado pelas etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração. Entretanto a distribuição de água ainda não atende satisfatoriamente toda a população brasileira, apresentando problemas com escassez ou qualidade imprópria da água distribuída (DI BERNARDO, 2003).

O crescimento da urbanização agrava ainda mais o problema, pois além da dificuldade em se obter área para implantação de novos sistemas de tratamento, muitas vezes as áreas próximas à mananciais utilizados na captação das estações de tratamento são ocupadas de maneira desordenada. Essa ocupação pode gerar uma piora da qualidade da água devido à disposição inadequada de esgoto e lixo.

Nesse contexto, os tratamentos não-convencionais mostram-se interessantes para suprir essa demanda. Algumas dessas tecnologias já são consolidadas e usadas em todo o mundo, dentre elas destaca-se a filtração direta ascendente e descendente, a dupla filtração, filtração lenta e flotação por ar dissolvido. No Brasil esses tratamentos vêm se difundindo e já mostram utilização significativa, apesar do volume de água tratada por eles ainda ser bastante pequeno em alguns estados (DI BERNARDO, 2003).

Uma alternativa recente e promissora para o tratamento de água é o uso de filtros de fibras flexíveis. Segundo Lee et al. (2008a), essa tecnologia começou a ser amplamente utilizada na Coreia do Sul para o tratamento terciário de esgoto doméstico, após unidades de lodos ativados. Entretanto, já é aplicada para outros usos, por exemplo, tratamento de água para reúso, tratamento de águas contendo algas e tratamento de águas para abastecimento.

A filtração é do tipo direta, dispensando as unidades de floculação e sedimentação utilizadas no sistema convencional. Outra vantagem é a operação feita em altas taxas de filtração, que resulta em menores tempos de funcionamento e na redução da área requerida para instalação do sistema.

Em 2011, iniciou-se uma linha de pesquisa sobre os filtros de fibras flexíveis no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR), da Escola de Engenharia de São Carlos (ESSC-USP), na qual se insere o presente trabalho.

Nessa linha de pesquisa já foram produzidos dois trabalhos de dissertação de mestrado intitulados “Emprego de filtro de fibra flexível constituído de sisal e de

polipropileno na clarificação de água para abastecimento”, defendido por Alice Kimie Martins Morita (MORITA, 2013), “Emprego de filtros de fibras flexíveis usando fibras de algodão ou de nylon na clarificação de águas para abastecimento”, defendido por Thalita Salgado Fagundes (FAGUNDES, 2015) e uma monografia de conclusão de curso intitulada “Influência da taxa de filtração em filtro de fibra flexível de poliéster na clarificação de efluente sintético de reator anaeróbio” escrita por Filipe Pasqualini Perez (PEREZ, 2015).

Nos estudos desenvolvidos, foram avaliados diferentes materiais para compor o leito de fibras flexíveis, como o sisal, o polipropileno, o algodão e o poliéster. Entretanto, por se tratar de uma tecnologia ainda pouco difundida e estudada, alguns aspectos do funcionamento desse tipo de filtro necessitam de avaliação mais aprofundada.

No trabalho de Fagundes (2015), observou-se que o interior do leito (composto por fibras de algodão de 100 cm de comprimento) não foi aproveitado durante as carreiras de filtração, devido à uma possível má distribuição da água no filtro. Assim, o presente trabalho avaliou a influência da configuração da estrutura de distribuição de água e ar na entrada do filtro (fundo de filtro) na eficiência de remoção de cor e turbidez, diâmetro das fibras, da porosidade do leito.

Considerando que os estudos de Morita (2013), Fagundes (2015) e Felipe (2015) foram desenvolvidos com fibras de diâmetro maiores do que os do filtro comercial, a avaliação da influência desse parâmetro no processo de filtração mostrou-se fundamental para avaliação do dessa tecnologia.

Dessa forma, o objetivo desse projeto foi, em continuação aos estudos anteriores, verificar a influência das seguintes variáveis na eficiência de remoção de cor e turbidez em filtros de fibras flexíveis de poliamida: fundo de filtro, diâmetro médio das fibras e porosidade do leito filtrante.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar a influência da porosidade do leito filtrante, do fundo de filtro e do diâmetro das fibras na eficiência de filtro com leito de fibras flexíveis de poliamida (nylon) aplicado ao tratamento de água para abastecimento humano.

Para a realização do objetivo geral, o trabalho foi dividido em etapas distintas, as quais configuraram os seguintes objetivos específicos:

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a influência do fundo de filtro na eficiência de remoção de cor aparente e turbidez utilizando duas configurações diferentes de fundo de filtro;
- Avaliar a influência do diâmetro das fibras flexíveis do leito na eficiência de remoção de cor aparente e turbidez da água de estudo;
- Para os diferentes diâmetros de fibras estudados, avaliar a influência da taxa de filtração na eficiência de remoção de cor e turbidez da água de estudo;

3. REVISÃO DE LITERATURA

O filtro de fibras flexíveis foi desenvolvido no início dos anos 2000 e utilizado inicialmente na Coreia do Sul para o tratamento terciário de esgoto doméstico, após unidades de lodos ativados (LEE, 2008a). No tratamento de água para abastecimento, esse tipo filtro mostrou-se bastante eficiente, tendo como vantagens as altas taxas de filtração, que podem variar, segundo o catálogo da empresa Wittier Filtration¹, de 2000 a 5000 m³.m⁻².d⁻¹, enquanto a filtração em sistema de ciclo completo possui taxas entre 150 a 300 m³.m⁻².d⁻¹ (Reali et al., 2012). Isso equivale a uma taxa cerca de 15 vezes maior do que as utilizadas nos filtros de areia. Além disso, o sistema de filtração é compacto e dispensa as unidades de coagulação, floculação e decantação utilizadas no sistema convencional de tratamento de água, funcionando como uma unidade de filtração direta. Assim, reduz-se o tempo de detenção hidráulica na estação e a área requerida em planta.

O leito do filtro é composto por finas fibras de nylon (poliamida), com cerca de 30 µm de diâmetro, dispostas uma ao lado da outra. Essas fibras são organizadas em pequenos feixes em formato de U e estes são fixados por uma das extremidades em uma placa perfurada, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Leito de fibras flexíveis de poliamida

Fonte: Mauchauffée et al. (2012)

¹ Disponível para download em <http://www.environmental-expert.com/products/3fm-filtration-system-60304>

A extremidade onde as fibras são presas fica disposta na entrada da unidade de filtração, na parte inferior do filtro. Na primeira configuração desse filtro, a água a ser tratada entra pela parte inferior, distribuindo-se de maneira uniforme no sistema e, simultaneamente, os sólidos suspensos vão se depositando ao longo da superfície das fibras e entre os poros formados entre uma fibra e outra. A água é coletada na parte superior, como mostra o esquema desse filtro apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Esquema de uma planta de filtro de fibras flexíveis em escala piloto

Fonte: Lee et al. (2006) modificado.

Uma segunda versão do filtro de fibras foi desenvolvida e é atualmente comercializada na Europa e na Coreia do Sul. A diferença entre as duas versões é a forma de entrada e de saída da água no filtro. Os detalhes dessa modificação serão apresentados no item 3.1.1.

A configuração do leito combina uma grande área superficial com altas porosidades (mais do que 90%), o que confere uma alta eficiência de remoção e baixas perdas de carga para altas taxas de filtração (LEE et al., 2006). De acordo com o catálogo da empresa Wittier Filtration², o leito possui durabilidade de, aproximadamente, 5 anos.

As características do filtro irão depender da qualidade da água afluenta e do grau de eficiência exigido para o efluente. Morita (2013) listou os principais fatores que interferem na eficiência do filtro, baseando-se nos estudos já realizados sobre essa tecnologia. São eles: a

² Disponível para download em <http://www.environmental-expert.com/products/3fm-filtration-system-60304>

taxa de filtração, porosidade do leito, dosagem do coagulante empregada e comprimento do filtro, sendo a taxa de filtração o fator mais importante.

3.1. ESTUDOS DESENVOLVIDOS NO ÂMBITO INTERNACIONAL

Segundo Lee et al. (2006), apesar dos bons resultados encontrados na filtração em filtros de fibra flexíveis usados no tratamento terciário de esgotos, houve uma queda na eficiência de remoção quando o filtro foi aplicado no tratamento de águas superficiais para produzir água para abastecimento. Assim, os autores avaliaram uma forma de aperfeiçoar esse tipo de filtração através do uso de coagulantes utilizando o método *in-line*.

Para o estudo, foi utilizado um filtro de fibras em escala piloto com leito composto por fibras de poliamida de 30 μm de diâmetro, empacotadas de forma a garantir uma densidade de 80 kg.m^{-3} (porosidade de 93%). A água a ser filtrada foi a do rio Nak-dong (turbidez entre 8 e 11,5 uT), sem nenhum pré-tratamento. O estudo avaliou diferentes dosagens de três coagulantes (Sulfato de Alumínio, Poly Organic Aluminium Sulfate Magnesium – PSOM e Policloreto de alumínio – PAC), variando de 0 a 20 mg.L^{-1} . Com a melhor dosagem determinada, também foram testadas diferentes taxas de filtração, variando de 80 a 150 m.h^{-1} .

Os autores concluíram que a dosagem de coagulantes aumentou a eficiência de remoção e que o PAC e o PSOM foram mais eficientes do que o sulfato de alumínio. Esse último produziu água filtrada com turbidez acima de 0,5 uT, o que estava fora da qualidade considerada satisfatória para o estudo. A melhor dosagem para os polímeros de cadeia longa foi de $1,0 \text{ mg.L}^{-1}$, proporcionando carreiras de filtração com alta duração para a taxa de 120 m.h^{-1} (cerca de 37 min para o PAC e 27 min para o PSOM). De acordo com os autores, para uma água com turbidez de 10 NTU os sistemas convencionais existentes utilizam entre 10 e 20 mg.L^{-1} de PAC: 11% de Al_2SO_4 . Portanto, a dosagem de coagulante dos filtros de fibras flexíveis é muito mais baixa, o que indica uma vantagem sobre os sistemas convencionais.

As taxas que garantiram uma estabilidade da qualidade do efluente foram as de 80 e 120 m.h^{-1} , sendo que a taxa de 120 m.h^{-1} garantiu um maior volume de água filtrada e de material retido, apesar do tempo da carreira de filtração ter sido 30% menor do que a da taxa de 80 m.h^{-1} (cerca de 35 min para a taxa de 120 m.h^{-1} e de 48 min para a taxa de 80 m.h^{-1}).

Além disso, o uso de coagulantes promoveu a remoção de partículas de todos os tamanhos, inclusive de partículas finas, menores do que 4 μm . Isso indica um grande potencial dessa tecnologia para a remoção de alguns microrganismos presentes nas águas superficiais, tais como a *Giardia*, cujo cisto possui diâmetro de 7 a 14 μm , e o *Cryptosporidium*, cujo oocisto possui de 3 a 5 μm .

Lee et al. (2007) avaliaram a influência da densidade de fibras na remoção de turbidez de uma solução de bentonita (turbidez 20 NTU, densidade 1,62 g.mL^{-1} e tamanho médio das partículas 8 μm) em filtros de fibras operados com taxa de filtração de 40 m.h^{-1} . As densidades de leito testadas foram iguais a 50, 65 e 80 kg.m^{-3} . Os autores observaram que houve um aumento na eficiência de remoção de partículas conforme o aumento da densidade do leito. Portanto o filtro de densidade de 80 kg.m^{-3} apresentou-se como o mais eficiente. Com o aumento da densidade, ocorre simultaneamente um aumento da superfície específica e um decréscimo da porosidade, o que culmina em uma diminuição do poro equivalente do meio filtrante.

Nesse mesmo estudo, os autores avaliaram a influência do comprimento do leito na remoção de turbidez. Foram testadas três diferentes taxas de filtração (20, 40 e 80 m.h^{-1}) em filtros em escala de laboratório (30 mm de diâmetro) com quatro comprimentos diferentes (400, 600, 800 e 1000 mm) e concentração de fibras de poliamida igual a 80 kg.m^{-3} , sem o uso de coagulantes.

Observou-se que apesar da maioria das partículas ter sido retida no início do leito, também foram identificadas partículas retidas na parte superior do filtro, ou seja, no final do leito. Esse comportamento está relacionado com o processo de filtração em profundidade que também ocorre nos filtros de areia. Dessa forma, os filtros com maior comprimento mostraram-se mais eficientes na remoção de partículas do que os filtros com menor comprimento.

3.1.1. Estudos realizados com a segunda versão do filtro de fibras

Como mencionado anteriormente, uma nova versão do filtro de fibras foi desenvolvida. Nessa nova configuração, a água entra pela lateral inferior do filtro e, após

passar pelo pacote de fibras, é coletada por meio de um tubo perfurado localizado dentro do filtro, o que caracteriza o fluxo radial. A Figura 3, a seguir, mostra um esquema desse filtro.

Figura 3 – Filtro de Fibras Flexíveis com tubo perfurado

Fonte: Cha et al. (2009) modificado.

Segundo Lee et al (2007), essa modificação da direção do fluxo, de escoamento axial para escoamento radial, implica em uma mudança no caminhar da frente de impurezas. Dessa forma, não se pode mais afirmar que ocorre o processo de filtração em profundidade.

Um estudo similar ao estudo feito por Lee et al. (2006), foi realizado por Lee et al. (2008a), a fim de determinar as condições ótimas de operação dessa nova versão do filtro de fibras. O filtro avaliado possuía 650 mm de diâmetro interno, 1500 mm de comprimento e densidade do leito de fibras equivalente a 80 kg.m^{-3} (93% de porosidade). A água de estudo utilizada foi também a do rio Nak-Dong, com turbidez entre 6,5 e 11,5 NTU e concentração de clorofila-*a* entre 11,5 e 41,2 $\mu\text{g.L}^{-1}$. O coagulante PAC: 11% de Al_2SO_4 , foi utilizado em concentrações que variaram entre 1 e 3 mg.L^{-1} . Os ensaios foram realizados utilizando uma taxa de filtração de 80 m.h^{-1} e a cada dosagem de coagulante avaliou-se a turbidez do filtrado até que o valor de 1 NTU fosse atingido. Assim como no estudo anterior, a melhor dosagem de coagulante foi a de 1 mg.L^{-1} , que garantiu uma carreira de filtração de 100 minutos.

Ainda nesse estudo, os autores avaliaram a influência da taxa de filtração na eficiência de remoção de turbidez e no tempo de duração da carreira. As taxas variaram de 60 a 100 m.h^{-1} e a dosagem de coagulante utilizada foi de 1 mg.L^{-1} . A Figura 4 e o Quadro 1 mostram os resultados encontrados. Observou-se que a duração da carreira de filtração diminuiu conforme a taxa aumentou, entretanto, a produção aumentou com o aumento da taxa.

Figura 4 – Variação da turbidez e da carreira de filtração de acordo com a taxa de filtração

Fonte: Lee et al. (2008a). Modificado por Fagundes (2015)

Cha et al. (2009) avaliaram a viabilidade de utilizar o filtro de fibras flexíveis na remoção de algas presentes em águas superficiais. Nesse estudo foi utilizada água do rio Nak-Dong (concentração de clorofila de 12,03 a 41,18 $\mu\text{g.L}^{-1}$) como afluente de um sistema de filtros em escala piloto.

Sem adição de coagulante o filtro obteve uma eficiência de 60% de remoção, enquanto a operação com adição de coagulante (PAC 11% Al_2O_3) obteve uma eficiência maior que 90%. Os valores de dosagem de coagulante satisfatórios variaram de 1,0 mg.L^{-1} até 2,5 mg.L^{-1} , entretanto a eficiência de remoção não variou significativamente com o acréscimo da dosagem.

Com relação ao tamanho das partículas, a adição de coagulante melhorou a eficiência de remoção de partículas de todos os tamanhos, incluindo as mais finas. Assim, além da remoção das algas, outras partículas presentes na água bruta foram retidas no filtro.

Quadro 1– Produtividade do filtro de acordo com a taxa de filtração

Taxa de filtração (m.h^{-1})	Produtividade ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	Produtividade ($\text{m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
60	18,2	1320
80	24,2	1750
100	30,2	2200

Fonte: Lee et al. (2008a). Modificado

3.2. ESTUDOS SOBRE FILTROS DE FIBRAS FLEXÍVEIS NO ÂMBITO NACIONAL

As pesquisas com filtro de fibras flexíveis, no Brasil, foram desenvolvidas na Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Em todos os estudos desenvolvidos, os filtros apresentaram configuração similar à primeira versão utilizada na Coréia do Sul, apresentada no subitem anterior.

No estudo feito por Morita (2013) foi avaliado o desempenho dos filtros de fibras flexíveis utilizando materiais diferentes da poliamida para filtrar água sintética com $8,19 \pm 0,85$ uT e $14,47 \pm 5,25$ uC. Foram utilizados seis filtros: três com leito de fibras de sisal com comprimentos de 25, 60 e 100 cm e três com leito de fibras de polipropileno, com os mesmos comprimentos, todos com porosidade de 93%. Em um segundo momento os filtros de sisal foram testados com porosidade de 85%. Foi feita a coagulação *in-line* utilizando $22,5 \text{ mg.L}^{-1}$ de sulfato de alumínio. As taxas de filtração variaram de 5 a 80 m.h^{-1} para os filtros de sisal e de 20 a 80 m.h^{-1} para os filtros de polipropileno. O limite estabelecido para o final da carreira de filtração foi de 1,0 uT no efluente.

O filtro de sisal de 100 cm de comprimento e 85 % de porosidade apresentou os melhores índices de filtrabilidade, o que indica seu potencial para utilização no tratamento de água. Outras combinações também promoveram resultados satisfatórios, garantindo um filtrado com valor de turbidez dentro do limite estabelecido, como os filtros de polipropileno operados a taxa de 20 m.h^{-1} (todos os comprimentos) e os de 60 e 100 cm operados a taxa de 80 m.h^{-1} , além do filtro de sisal de 100 cm e 85 % de porosidade operado a taxas de 20 e 40 m.h^{-1} .

Esse estudo mostrou que materiais diferentes da poliamida podem garantir bons resultados na clarificação das águas. A escolha do tipo de fibra depende da disponibilidade no local e a configuração do filtro depende da qualidade do efluente exigida e da carga hidráulica disponível.

Fagundes (2015) também avaliou o uso de fibras com materiais diferentes da poliamida para filtrar água sintética com turbidez $7,7 \pm 0,3$ uT e cor aparente de $97 \pm 5,0$ uC. Nesse estudo, comparou-se o comportamento dos filtros utilizando fibras de poliéster (porosidade 75%) e dos filtros constituídos de algodão (porosidade 67%), ambos com dois comprimentos de leito diferentes: 60 e 100 cm. Em todos os filtros foram avaliadas as taxas

de filtração de 40, 60, 80, 100 e 120 m.h⁻¹ e utilizou-se a coagulação *in-line* com dosagem de sulfato de alumínio de 22,5 e 15,0 mg.L⁻¹ (este último apenas para os filtros de 100 cm). Os limites estabelecidos para o final da carreira de filtração foram de 1,0 e 2,0 uT no efluente.

A autora concluiu que, para os dois tipos de fibra, os leitos de 100 cm tiveram desempenho melhor do que os filtros de 60 cm, o que corrobora com o estudo feito por Lee et al. (2007). Além disso, os filtros tiveram carreiras mais longas utilizando a menor dosagem de coagulante.

Apesar dos dois filtros terem atingido satisfatoriamente os limites impostos em quase todas as taxas, os filtros de poliéster apresentaram carreiras de filtração mais longas do que as do algodão, além de apresentarem perdas de carga menores.

Ainda segundo Fagundes (2015), houve uma má distribuição da água de estudo nos filtros de algodão de 100 cm, detectada por meio de uma avaliação visual do leito após carreira de filtração (antes de realizar a lavagem). Observou-se que o interior do leito estava limpo, o que indicou a presença de caminhos preferenciais. A autora sugere que tal fato seja o motivo da mudança da configuração do filtro utilizado nos estudos de Lee, et al. (2008a e 2008b). A configuração na qual a autora se refere é a mesma apresentada no presente trabalho como sendo a segunda versão dos filtros de fibras flexíveis.

Perez (2015) também utilizou filtro de fibras de poliéster de 100 cm, com porosidade de 77,3% em filtro de 28 mm, para avaliar a remoção de sólidos suspensos de efluente sintético de reator anaeróbio decantado não coagulado (turbidez entre 8,9 e 21,1 uT; cor entre 239 e 526 uH, SST entre 30,5 e 70,2 mg.L⁻¹ e DQO entre 135,0 e 332,0 mg.L⁻¹). A remoção foi avaliada em várias taxas de filtração, variando entre 60 e 120 m³.m⁻².h⁻¹. No estudo, concluiu-se que, mesmo apresentando carreiras com durações menores, as maiores taxas de filtração produziram maior volume de água, sem alteração da qualidade do efluente. Esse resultado foi similar ao obtido no estudo realizado por Lee et al. (2006), citado no subitem anterior, para o tratamento de água superficial para água de abastecimento.

3.3. LAVAGEM DO FILTRO DE FIBRAS FLEXÍVEIS

A lavagem dos filtros é uma etapa fundamental no processo de filtração. A partir dela os sólidos retidos no leito são removidos, restabelecendo a capacidade de retenção do filtro. A

lavagem é feita quando a carreira de filtração é interrompida, devido ao transpasse da turbidez ou à igualdade entre a perda de carga total e a carga hidráulica disponível.

A lavagem no filtro de fibras flexíveis é feita utilizando a combinação ar e água. A fim de aperfeiçoar o processo de lavagem, Lee et al. (2008b) fizeram um estudo com filtro de fibras de poliamida em escala piloto para o tratamento de água superficial do rio Nak-dong. O leito do filtro possuía uma densidade de fibras de 80 kg.m^{-3} , equivalente a uma porosidade de 93%. A taxa de filtração utilizada foi de 60 m.h^{-1} .

Nesse estudo, a lavagem foi feita utilizando ar e água em sequência. Foram avaliados os efeitos da mudança da duração da injeção de ar e do número de sequências de ar e água (estágios da lavagem). A eficiência da lavagem foi estimada por meio da perda de carga inicial, da qualidade do efluente, da duração da carreira de filtração e da recuperação da massa de sólidos retida.

Os autores concluíram que a injeção de ar e o número de estágios de lavagem são fatores importantes para a eficiência da lavagem. A melhor condição de lavagem foi com aplicação de ar por 7 segundos, aplicação de água por 15 segundos e 14 estágios de lavagem. De acordo com o estudo, o volume de água de lavagem corresponde a apenas 3 % do volume de água produzido durante a filtração.

Os autores ressaltam que a condição ótima de lavagem encontrada depende da qualidade da água bruta e da configuração do filtro. Portanto, pode ser diferente para outros tipos de água afluente.

Morita (2013) avaliou o melhor procedimento de lavagem para filtros com 100 cm de comprimento: um com leito de fibras de sisal (porosidade 85%) e outro com leito de fibra de polipropileno (porosidade 93%). Da mesma forma que no estudo feito por Lee et al. (2008), foram avaliadas combinações de números de estágios de lavagem tempos de aplicação de ar e água. Para os dois filtros, o melhor procedimento foi com 5 estágios de lavagem, cada um com aplicação de ar por 3 segundos e aplicação de água (180 L.h^{-1}) por 6 segundos. Esse procedimento garantiu 100% de eficiência e gasto de 3,5% de água filtrada para a lavagem no filtro de sisal e 97% de eficiência e gasto de 1,7 % de água filtrada para a lavagem do filtro de polipropileno.

Fagundes (2015) também avaliou a lavagem para filtros de 100 cm de comprimento, com leito composto por fibras de algodão. A eficiência da lavagem foi estimada por meio da perda de carga inicial e da recuperação da massa de sólidos retida. Foram testadas condições de lavagem utilizando ar e água simultaneamente e condições utilizando ar e água alternadamente. O modo mais eficiente de lavagem foi com três repetições de aplicação de ar

por 10s e aplicação de água por 10s (487 m.h^{-1}). Esse modo proporcionou 95% de eficiência na recuperação dos sólidos suspensos totais e gasto de 8,1% de água filtrada para a lavagem.

3.4. A FIBRA DE POLIAMIDA

A poliamida foi a primeira fibra sintética a ser produzida, em 1934, a partir da polimerização do ácido amino undecanóico (ALFIERI, 2010). Desde então, tem sido amplamente utilizada em diversos setores, principalmente no têxtil.

As poliamidas são formadas por diversos segmentos de polietileno $(\text{CH}_2)_n$ separados por unidades de peptídeos (NH-CO) , que possibilitam a ligação do hidrogênio com a cadeia do polímero, conferindo suas características típicas. O grupo das poliamidas é composto por muitos subtipos, sendo os mais representativos a poliamida 6 e a poliamida 6.6 (DASGUPTA, 1996 apud FACTORI, 2009)

A produção das fibras sintéticas é feita a partir de um derivado de petróleo chamado nafta. Esse derivado é transformado em produtos intermediários: benzeno, eteno, p-xileno e propeno, que são utilizados como matéria prima dessas fibras (ABRAFAS).

No caso das poliamidas, a matéria-prima básica da poliamida 6 é o benzeno obtida pela polimerização da caprolactama, e a poliamida 6.6 é obtida pela polimerização dos monômeros: hexametilenodiamina e ácido adípico (ABRAFAS).

No Brasil, as fibras sintéticas produzidas são destinadas principalmente ao mercado interno, apresentando qualidade comparável às do mercado internacional. Essa qualidade é devida ao elevado grau de rigor nas especificações técnicas e no controle de qualidade, além das tecnologias utilizadas no processo produtivo (CETESB, 2009).

Como o uso da poliamida no tratamento de água é recente, não foram encontradas informações específicas sobre as características da fibra para essa aplicação. Sendo assim, buscou-se informações que mais se aproximaram para o uso em filtro de fibras flexíveis. As principais características, de acordo com Hipermetal Comércio e Indústria Ltda, são:

- Alto ponto de fusão (220 e 245°C , para as poliamidas 6.0 e a 6.6, respectivamente);
- Baixo peso específico ($1,14 \text{ g.cm}^{-3}$);
- Tenacidade;

- Temperatura de trabalho - 40 a 100 °C;
- Boa resistência ao desgaste;
- Não acumula energia estática;
- Boa resistência química;
- Inerte a ataques biológicos.

O Quadro 2 apresenta a resistência química da poliamida de acordo com a Norma ASTM D54.

Quadro 2 – Resistência química da poliamida

Propriedades Químicas	Nylon 6.0	Nylon 6.6
Resistência a ácidos fortes	Não resiste	Não resiste
Resistência a ácidos fracos	Resistência limitada	Resistência limitada
Resistência à bases fortes	Resistente	Resistente
Resistência à bases fracas	Resistente	Resistente

Fonte: Hipermetal Comércio e Indústria Ltda

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado nas dependências do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR) e o Setor de Instalações Piloto do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC – USP. A estrutura do sistema de filtros de fibras flexíveis utilizada foi uma modificação da estrutura desenvolvida por Morita (2013) e modificada por Fagundes (2015), já existente no setor.

Para dar prosseguimento às pesquisas sobre os filtros de fibras flexíveis realizadas no LATAR, a investigação da influência do diâmetro da fibra e da porosidade mostrou-se extremamente relevante.

Além disso, tendo em vista os resultados obtidos no estudo feito por Fagundes (2015), uma nova distribuição de ar e água foi proposta no presente trabalho com o intuito de aproveitar o interior do leito filtrante. Foram avaliados dois tipos de fundo de filtro: i) Tipo 1 (F_{Tipo1}), apresentando quatro orifícios distribuidores periféricos de diâmetros iguais (3,5 mm) e um orifício distribuidor central de maior diâmetro (8 mm); ii) Tipo 2 (F_{Tipo2}), o qual apresentava apenas quatro orifícios distribuidores periféricos idênticos aos do Tipo 1, ou seja, o Tipo 2 diferiu do Tipo 1 apenas com relação à obstrução intencional do orifício central. A Figura 5 mostra um esquema da área transversal dos dois tipos de fundo de filtro. Ressalta-se que a área hachurada representam as fibras fixadas com cola vinílica, portanto não há escoamento nessa área.

Figura 5 – Esquema da área transversal dos fundos de filtro F_{Tipo1} e F_{Tipo2}

Nota: Medidas em milímetros (mm)

O trabalho foi dividido em quatro etapas. Na Etapa 1, as fibras foram caracterizadas quanto ao diâmetro médio e os leitos construídos utilizando uma nova técnica para obtenção da concentração e comprimento desejados de fibras paralelas. Nas Etapas 2 a 4 avaliou-se as eficiências de remoção de cor e turbidez dos filtros de fibras, conforme é apresentado na Tabela 1. Na Etapa 2 foram avaliadas as eficiências de remoção de cor e turbidez para três filtros de fibras flexíveis, cada um com um diâmetro de fibra e com a mesma porosidade do leito (84%) e com o fundo F_{Tipo1}. A Etapa 3 foi desenvolvida a partir dos resultados obtidos na etapa anterior, selecionando-se uma segunda porosidade para o leito de fibras de 0,03 mm de diâmetro e avaliando novamente as eficiências de remoção de cor e turbidez. Finalmente, na Etapa 4, uma nova distribuição de água e ar na entrada do filtro foi avaliada para os filtros compostos por fibras de 0,03 mm de diâmetro.

Tabela 1- Características dos leitos nas etapas 2, 3 e 4, referentes à avaliação das eficiências de remoção de cor e turbidez.

Etapa	Fundo de filtro	Porosidade (%)	Diâmetro das fibras (mm)	Taxas de filtração (m.h ⁻¹)
Etapa 2	F _{Tipo1}	84%	0,03	60
			0,11	80
			0,32	100
Etapa 3	F _{Tipo1}	93%	0,03	60
				80
				100
Etapa 4	F _{Tipo2}	84%	0,03	60
		93%		80
				100

Em todas as etapas foram utilizadas a dosagem de 22,5 mg.L⁻¹ e pH entre 6,3 e 6,5 de sulfato de alumínio como coagulante. Esses parâmetros foram escolhidos com base no estudo sobre filtros de fibras flexíveis realizado por Fagundes (2015), que utilizou esses parâmetros para a água de estudo com mesma característica da água utilizada no presente trabalho.

Foram feitos testes estatísticos para avaliar se houve repetibilidade dos ensaios. Os detalhes e considerações sobre os testes estão apresentados no item 4.3.6.

4.1. ÁGUA DE ESTUDO

A água de estudo utilizada foi produzida por meio da adição de 15g de ácido húmico comercial (Adrice Chemstryl H16752) e 127,5 g de caulinita (Sigma-Aldrich K7375-USA) a

15m³ de água proveniente de poço existente no campus 1 da USP São Carlos, que garantiram cor aparente e turbidez de $86,4 \pm 4,5$ uC e $9,51 \pm 0,22$ uT, respectivamente. Optou-se por utilizar essa água de estudo, pois as pesquisas anteriores com filtros de fibras flexíveis desenvolvidas no LATAR utilizaram água com características semelhantes.

Antes do início de cada bateria de ensaios, o pH da água bruta era verificado e, quando necessário, adicionava-se carbonato de sódio (barrilha) para correção do pH.

4.2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO

A Figura 6 mostra um esquema simplificado da instalação piloto dos filtros de fibras flexíveis. A descrição de cada componente do sistema será feita nos subitens 4.2.1 a 4.2.4. Ressalta-se que a estrutura foi projetada de modo a garantir operação em taxa constante e variação do nível d'água à montante dos filtros.

Figura 6 – Esquema da instalação piloto

4.2.1. Armazenamento da água de estudo

A água de estudo foi preparada e armazenada em reservatório de 15 m³ existente no LATAR a cada bateria de ensaio. Foram adicionados os produtos químicos indicados no item 4.1. a água do poço, sendo a mistura realizada por agitadores contínuos existentes no reservatório. Do reservatório, a água de estudo era bombeada para uma caixa de nível constante de 0,026 m³ instalada a três metros de altura.

A caixa de nível foi construída de modo a conter uma entrada para alimentação da caixa, uma saída para a alimentação dos filtros, uma saída para coleta de amostras da água bruta e um vertedor para o excesso de água da caixa. A água em excesso era encaminhada para o reservatório principal por meio de tubulação de PVC. Para garantir a operação à taxa constante, a alimentação dos filtros era feita sempre mantendo o nível da água na caixa na altura da superfície do coletor.

Da caixa de nível a água seguia, por gravidade, para os filtros em tubulações de 25 mm de diâmetro. Ao longo da tubulação foram dispostas três saídas diferentes (uma para cada filtro), contendo registros de agulha para ajuste das vazões de entrada dos filtros. Ao final da tubulação foi instalado um registro de agulha, utilizado para descartar o primeiro volume de água e evitar que bolhas de ar ficassem presas na tubulação e, conseqüentemente, pudessem alterar a vazão de alimentação dos filtros.

4.2.2. Dosagem de coagulante

Foi utilizado como coagulante sulfato de alumínio hidratado P.A., da marca Vetec, preparado em solução-mãe de 3,5 g.L⁻¹. A água utilizada na solução-mãe era proveniente da água do poço da USP São Carlos. O coagulante foi preparado em um reservatório de 250 L, contendo misturadores mecânicos e injetados no sistema com auxílio de bomba dosadora que direcionavam a solução de coagulante à injetores acoplados na tubulação de saída da caixa de nível constante, antes da saída para os filtros. A mistura rápida entre coagulante e a água de estudo foi feita por meio de chapas metálicas com formato helicoidal existentes no interior da tubulação. Foi estudada a dosagem de coagulante de 22,5 mg.L⁻¹.

A vazão da bomba dosadora variou de acordo com a taxa de filtração desejada, seguindo a Equação 1:

$$Q_{\text{bomba dosadora}} = \sum_{n=1}^{n=3} \frac{\text{DSA} \times Q_{\text{filtro } n}}{C_{\text{solução}}} \quad \text{Equação 1}$$

em que,

$Q_{\text{bomba dosadora}}$ é a vazão da bomba dosadora [L.s^{-1}];

DSA é a dosagem de sulfato de alumínio estudada [mg.L^{-1}];

Q_{filtro} é a vazão de cada filtro [L.s^{-1}];

n é o número de filtros em operação e

$C_{\text{solução}}$ é a concentração da solução de coagulante [mg.L^{-1}].

4.2.3. Sistema de filtros de fibras flexíveis

O sistema de filtros de fibra flexíveis em escala piloto é composto por três filtros de coluna vertical e fluxo ascendente em paralelo, operados simultaneamente. A Figura 7 mostra um esquema de um dos filtros e a Figura 8 mostra uma fotografia dos três filtros instalados no sistema.

Cada filtro foi construído com tubulação de PVC de 28 mm de diâmetro interno e cada um deles tinha o leito formado por fibras de poliamida de um mesmo diâmetro, da seguinte forma:

- i. Filtro 1: Diâmetro médio das fibras = 0,03 mm
- ii. Filtro 2: Diâmetro médio das fibras = 0,11 mm (diâmetro comercial = 0,10 mm)
- iii. Filtro 3: Diâmetro médio das fibras = 0,32 mm (diâmetro comercial = 0,30 mm)

Os diâmetros citados nos itens i, ii, e iii são os diâmetros médios mensurados a partir de análises em microscopia óptica, que está detalhada no item 4.3.1.1. A escolha dos

diâmetros e das porosidades foi feita com base nos estudos desenvolvidos no LATAR e na literatura encontrada.

Os detalhes sobre a construção do leito filtrante está descrito no item 4.3.

Na superfície interna da tubulação de PVC foi colada uma camada de areia, afim de evitar caminhos preferenciais no escoamento da água de estudo.

Figura 7 – Esquema do filtro de fibras flexíveis

Figura 9 – Fotografia da estrutura do sistema de filtros de fibra flexíveis

4.2.4. Sistema de lavagem dos filtros

A lavagem do filtro também foi feita de maneira ascendente, utilizando ar e água alternadamente. Durante os ensaios não se objetivou aperfeiçoar o processo de lavagem, portanto utilizou-se água e ar em excesso de modo a garantir que a perda de carga inicial fosse próxima à do filtro limpo, em todos os ensaios.

O sistema de distribuição de ar era composto por um compressor de ar, conectado aos filtros por meio de mangueiras acopladas imediatamente antes do registro de agulha na tubulação de entrada de água de cada filtro.

A pressão de ar que saía do compressor foi controlada por meio de registros e a vazão medida por um rotâmetro acoplado à mangueira de saída do compressor. Durante todas as lavagens foi utilizada vazão de ar de $1,2 \text{ N.m}^3.\text{h}^{-1}$.

A água utilizada na lavagem também era obtida do poço existente no campus 1 da USP São Carlos. A água era armazenada em um reservatório e era bombeada até um registro de esfera situado no filtro, acima do registro de agulha da entrada de ar. Um rotâmetro localizado entre a bomba e o registro era utilizado para aferir e controlar a vazão de lavagem.

4.2.4.1. Perda de carga

A perda de carga foi mensurada por meio de tomadas de pressão acopladas ao longo do comprimento do filtro e conectadas a um piezômetro. Uma tomada foi colocada no início e outra no final do filtro para controle da perda de carga total no leito filtrante e outras três tomadas foram distribuídas ao longo do leito nas alturas: 16, 33 e 66 cm. Essa distribuição permitiu mensurar a perda de carga em pequenos trechos do filtro, auxiliando na avaliação do aproveitamento do leito durante a carreira de filtração.

4.3. ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DIRETA EM FILTRO DE FIBRAS FLEXÍVEIS

Como mencionado anteriormente, o trabalho foi dividido em quatro etapas. A metodologia utilizada em cada uma delas será descrita a seguir.

4.3.1. Etapa 1: Caracterização das fibras de poliamida e construção dos leitos

Considerando todos os estudos encontrados sobre filtro de fibras flexíveis, as fibras mais utilizadas eram de poliamida. Assim, optou-se por utilizar esse mesmo tipo de fibra. Com relação aos diâmetros, optou-se por utilizar um diâmetro próximo ao utilizado nos filtros de fibras comerciais, cerca de 0,03 mm, um diâmetro próximo ao utilizado no filtro de

poliéster na pesquisa de Fagundes (2015), cerca de 0,32 mm, e um diâmetro intermediário (0,11 mm).

Houve certa dificuldade em encontrar diretamente as fibras de 0,03 mm para o estudo, uma vez que as fibras com esse diâmetro são direcionadas ao setor industrial, principalmente à indústria têxtil.

Uma aplicação para essa microfibras é a composição de cordas de equipamentos de segurança, utilizada como trava-quedas. Assim, entrou-se em contato com uma empresa fabricante desse tipo de corda e foi solicitada uma amostra das fibras de poliamida antes de serem trançadas. A amostra fornecida veio em um fio multifilar, composto por vários fios paralelos. Dessa forma, foi possível construir os leitos filtrantes para esse diâmetro de fibra.

As fibras de 0,11 mm foram encontradas com facilidade em armarinhos, sendo destinadas para a costura. O diâmetro comercial para essa fibra é de 0,1 mm. Já as fibras de 0,32 mm são destinadas para a pesca, encontradas facilmente em lojas especializadas para essa finalidade. O diâmetro comercial para a fibra utilizada é 0,30 mm.

4.3.1.1. Microscopia óptica

A fim de garantir a precisão das dimensões dos diâmetros das fibras utilizadas nos estudos, foi feita a medição em microscopia óptica do diâmetro das mesmas. As análises foram feitas no LATAR utilizando o microscópio trinocular (Olympus, modelo BX41) e com o auxílio de régua acoplada. Para cada diâmetro de fibra, 0,03, 0,11 e 0,32 mm foram feitas 50 medições. As fibras foram fixadas em lâminas para facilitar a leitura. Ao final, foi feito o cálculo do diâmetro médio e do desvio padrão para cada tipo de fibra.

4.3.1.2. Determinação da porosidade e do número de fibras do leito

Para fins práticos, a porosidade foi definida inicialmente. Na Etapa 2, foram avaliados filtros com 84% de porosidade, cada um com um dos diâmetros de fibra escolhidos. Na Etapa 3 avaliou-se apenas o leito de fibras de 0,03 mm, com porosidade de 93%.

Finalmente, na Etapa 4, avaliou-se o leito de fibras de 0,03 mm nas duas porosidades (84% e 93%), usando o fundo de filtro F_{Tipo2} .

Como o diâmetro das fibras não apresentou muitas variações na avaliação feita por microscopia óptica, optou-se por calcular o número de fibras do leito a partir do diâmetro das fibras e das dimensões do filtro.

A porosidade é a área livre do filtro, ou seja, é a área total do filtro menos a área ocupada pelas fibras. Então,

$$\text{Porosidade} \times \text{área do filtro} = 100 - \text{área das fibras} \quad \text{Equação 2}$$

$$P \cdot \pi \cdot \frac{\phi_{\text{Filtro}}^2}{4} = 100 - N \cdot \pi \cdot \frac{\phi_{\text{fibra}}^2}{4} \quad \text{Equação 3}$$

Em que,

P = Porosidade [%];

ϕ_{Filtro} = Diâmetro do filtro [mm]

N = Número de fibras

ϕ_{fibra} = Diâmetro da fibra [mm]

Rearranjando a equação, encontra-se o número de fios (N) necessários para compor o leito

$$N = (100 - P) \cdot \frac{\phi_{\text{Filtro}}^2}{\phi_{\text{fibra}}^2} \quad \text{Equação 4}$$

Essa equação foi utilizada apenas para as fibras de 0,32 e 0,11 mm. Para os fios de 0,03 mm não foi possível utilizar a equação, pois o fio utilizado era multifilar, ou seja, composto por vários monofilamentos de poliamida. Além disso, devido à espessura reduzida, a contagem de monofilamentos do fio mostrou-se impraticável. Assim, para os leitos de fibra de 0,03 mm, o cálculo da porosidade foi feito a partir do volume de fibras, encontrado com auxílio da massa específica do nylon ($1,13 \text{ g.cm}^{-3}$, segundo website da empresa PlastPlex³) e da massa de fios utilizados, de acordo com as equações Equação 5, Equação 6 e Equação 7.

³ Disponível em <http://www.plastplex.com.br/index.php/produtos/plasticos/nylon>

$$\text{Volume [m}^3\text{]} = \frac{\text{massa [kg]}}{\text{Massa específica [\frac{kg}{m}^3\text{]}}} \quad \text{Equação 5}$$

$$\text{Porosidade [\%]} = 100 - \frac{V_{\text{fibras}}}{V_{\text{Filtro}}} \quad \text{Equação 6}$$

Em que,

V_{fibras} = Volume de fibras no leito

V_{Filtro} = Volume do filtro

$$\text{Porosidade [\%]} = 100 - \left(\frac{\text{massa [kg]}}{V_{\text{Filtro}} \cdot \text{Massa específica [\frac{kg}{m}^3\text{]}}} \right) \quad \text{Equação 7}$$

A Tabela 2 mostra o número de voltas e a massa necessária para a construção de cada leito.

Tabela 2- Número e massa de fibras para cada leito

Diâmetro da fibra (mm)	Porosidade (%)	Número de fibras	Massa de fibras (g)
0,32	84	1188	-
0,11	84	9720	-
0,03	93	-	53,58
	84	-	122,46

4.3.1.3. Cálculo do número de Reynolds

Para caracterizar o tipo de escoamento nos filtros de fibras flexíveis estudados calculou-se o número de Reynolds para todas as taxas estudadas em cada um dos filtros. Para os cálculos considerou-se a velocidade cinemática para as temperaturas de 20, 25 e 30 °C,

uma vez que as temperaturas dos ensaios estiveram próximas desses valores. A Equação 8 mostra a fórmula utilizada para o cálculo do número de Reynolds.

$$Re = \frac{vel_{int} \cdot D_{eq}}{v} \quad \text{Equação 8}$$

em que,

vel_{int} é a velocidade intersticial média, considerada nesse estudo como a taxa de filtração dividida pela porosidade do leito;

D_{eq} é o diâmetro equivalente dado por $\frac{4 \cdot \text{Área molhada}}{\text{Perímetro molhado}} = \frac{4(\pi \frac{D^2}{4} - n\pi \frac{d_{fibra}^2}{4})}{\pi D + n\pi d_{fibra}} = \frac{(D^2 - d_{fibra}^2)}{D + nd_{fibra}}$;

v é a viscosidade cinemática (m^2/s);

D é o diâmetro da tubulação (m);

d_{fibra} é o diâmetro da fibra (m) e

n é o número de fibras no leito.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3. Pela tabela, nota-se que os valores do número de Reynolds obtidos em todas as situações foram abaixo de 100, o que indica escoamento em Regime de Forchheimer. Esse regime é o mesmo apresentado na filtração em meios porosos, e caracteriza-se pelo fluxo laminar. Quando o número de Reynolds apresenta valor acima de 100, o escoamento caracteriza-se por estar na transição entre laminar e turbulento ou puramente turbulento. (TRUSSELL; CHANG, 1999 apud BOTARI; DI BERNARDO, 2009).

Tabela 3- Número de Reynolds para cada filtro em cada uma das taxas de filtração estudadas (60, 80 e 100 m/h), considerando as temperaturas de 20, 25 e 30 °C.

Diâmetro da fibra (mm)	Porosidade	Taxa (m/h)	Velocidade intersticial (m/s)	Diâmetro equivalente (m)	Temperatura (°C)	Reynolds
0,03	0,93	60	$1,79 \times 10^{-2}$	$7,55 \times 10^{-4}$	20	13,39
					25	15,09
					30	16,84
		80	$2,39 \times 10^{-2}$	$7,55 \times 10^{-4}$	20	17,85
					25	20,13
					30	20,13
		100	$2,99 \times 10^{-2}$	$7,55 \times 10^{-4}$	20	22,32
					25	25,16
					30	28,07
0,03	0,84	60	$1,98 \times 10^{-2}$	$7,54 \times 10^{-4}$	20	14,82
					25	16,71
					30	18,64
		80	$2,65 \times 10^{-2}$	$7,54 \times 10^{-4}$	20	19,76
					25	22,27
					30	24,85
		100	$3,31 \times 10^{-2}$	$7,54 \times 10^{-4}$	20	24,70
					25	27,84
					30	31,07
0,11	0,84	60	$1,98 \times 10^{-2}$	$6,77 \times 10^{-4}$	20	13,30
					25	14,99
					30	16,72
		80	$2,65 \times 10^{-2}$	$6,77 \times 10^{-4}$	20	17,73
					25	19,98
					30	22,30
		100	$3,31 \times 10^{-2}$	$6,77 \times 10^{-4}$	20	22,16
					25	24,98
					30	27,87
0,32	0,84	60	$1,98 \times 10^{-2}$	$4,86 \times 10^{-4}$	20	9,55
					25	10,76
					30	12,01
		80	$2,65 \times 10^{-2}$	$4,86 \times 10^{-4}$	20	12,73
					25	14,35
					30	16,01
		100	$3,31 \times 10^{-2}$	$4,86 \times 10^{-4}$	20	15,91
					25	17,94
					30	20,01

4.3.1.4. Construção dos leitos

Para a confecção dos leitos criou-se um equipamento composto por um cilindro de madeira de 19,3 cm de raio e 4,1 cm de comprimento e duas chapas redondas concêntricas de 22,3 cm de raio, uma em cada extremidade do cilindro. Essas chapas foram presas com parafusos e porcas borboletas, facilitando a desmontagem. No eixo da estrutura, há um rolamento que permite a sua rotação. O equipamento era mantido apoiado a partir do eixo em um suporte também de madeira. A Figura 10 mostra o equipamento utilizado.

Figura 10 – Equipamento utilizado para confecção dos leitos filtrantes

Para a construção do leito, fixava-se a linha no cilindro e em seguida girava-se manualmente a estrutura em torno do eixo. Para contabilizar o número de voltas, acoplou-se um ciclocomputador. Quando era atingido o número de voltas necessárias, interrompia-se a rotação da roda e a estrutura era desmontada para remover o leito. Para facilitar a retirada do leito, uma fita era utilizada para prender o maço de linhas. Em seguida, cortava-se as linhas próximas à fita, resultando em um leito com comprimento de 121,6 cm. A Figura 11 mostra a retirada dos fios do equipamento.

A extremidade do maço de linhas foi colada em uma base rígida de PVC com cola vinílica, juntamente com canudos de plástico para garantir a distribuição de água, conforme é mostrado na Figura 12. Como mencionado anteriormente foram avaliadas duas configurações

da entrada. A primeira com quatro orifícios periféricos de diâmetros iguais e um orifício central de maior diâmetro, tal como mostra a Figura 12. A segunda entrada era similar à primeira, entretanto o orifício central foi vedado com uma estrutura plástica.

Após a fixação do leito na base de PVC, as linhas foram cortadas de modo a garantir um comprimento final de 1,0 m. A Figura 13 mostra as fotografias dos três leitos de porosidade 84% construídos.

Após a confecção dos leitos, os mesmos foram inseridos na tubulação de PVC de 28 mm, de modo que

Figura 11 – Construção do leito filtrante

Figura 12 – Leito filtrante após fixação em base rígida de PVC

Figura 13 – Fotografias dos leitos de porosidade 84%: a) leito de fibras de 0,11 mm; b) leito de fibras de 0,32mm ; e , c) leito de fibras de 0,03mm

4.3.2. Etapa 2: Avaliação das eficiências de remoção de cor e turbidez para a porosidade de 84%

Nessa etapa foram testados os leitos de fibras com diâmetro 0,03, 0,11 e 0,32 mm, porosidade 84% e fundo de filtro $F_{T_{ip01}}$. Os três filtros foram instalados no sistema de filtração e operados simultaneamente.

Avaliou-se a eficiência de remoção de cor e turbidez em três taxas de filtração, 60, 80 e 100 m.h⁻¹, utilizando dosagem de 22,5 mg.L⁻¹ de coagulante.

Para cada taxa, os filtros foram operados por pelo menos 60 minutos ou até que a turbidez do efluente fosse maior do que 2,0 uT ou ainda quando a perda de carga do filtro se igualasse à carga hidráulica disponível. Depois de encerrada uma carreira de filtração, foram feitas as lavagens dos filtros com várias repetições da sequência alternada de água e ar, para então iniciar nova carreira.

Foram monitoradas as seguintes variáveis durante os ensaios:

- a. Vazão de entrada de cada filtro, mensurada com auxílio dos rotâmetros instalados na entrada de cada filtro e pelo método direto, a cada 30 minutos;
- b. Evolução da perda de carga ao longo leito de cada um dos filtros, nas cinco tomadas de pressão. A avaliação foi feita a cada 15 min. Com esses dados foram confeccionados gráficos de perda de carga em função do tempo de operação do filtro para cada altura da tomada de pressão no leito. Esses gráficos permitiram a avaliação do aproveitamento da altura de leito até o final da carreira de filtração;
- c. Qualidade da água bruta, da água coagulada e do efluente de cada filtro, conforme está apresentado no Quadro 3.

A determinação da cor aparente e da cor verdadeira foi feita utilizando a curva de correlação desses parâmetros com a absorbância em comprimento de onda 495 nm (Abs₄₉₅), proposta por Fagundes (2015). A curva apresenta coeficiente de determinação (R²) 0,9967 e sua equação é expressa conforme apresentado na Equação 9.

$$\text{Cor (uC)} = 355,27 \cdot \text{Abs}_{495} \quad \text{Equação 9}$$

Para a determinação dos sólidos suspensos totais foi feita uma curva de correlação com a turbidez. A determinação da curva está apresentada no item 4.3.2.1. As demais variáveis foram determinadas conforme recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater* (APHA, 2012).

A temperatura foi mensurada com auxílio de um termômetro; o pH foi lido em pHmetro da marca Digimed; o potencial zeta lido em zetâmetro da marca Malvern, modelo Nano-ZS90 e as análises de COT foram feitas em analisador de carbono orgânico total da marca SHIMADZU, modelo TOC-L-CPN. As análises de absorbância 254 e 495 nm, foram

feitas em espectrofotômetro da marca Hach modelo DR5000 e DR4000, em cubetas de quartzo de 5 e 10 cm, respectivamente.

Quadro 3 – Variáveis de controle e frequência de amostragem

VARIÁVEL	ÁGUA BRUTA	ÁGUA COAGULADA	ÁGUA FILTRADA
Cor aparente	Amostra composta por alíquotas coletadas a cada 30 minutos, durante toda a carreira de filtração.	-	A cada 15 minutos.
Cor verdadeira		-	-
Turbidez		A cada 15 minutos.	A cada 15 minutos.
Condutividade		-	Amostra composta por alíquotas coletadas a cada 15 minutos, durante toda a carreira de filtração.
Alcalinidade		-	-
pH		A cada 15 minutos.	-
Sólidos Suspensos Totais (SST)		Amostra composta por alíquotas coletadas a cada 15 minutos, durante toda a carreira de filtração.	Amostra composta por alíquotas coletadas a cada 15 minutos, durante toda a carreira de filtração.
Absorbância (254 nm)		-	
Carbono Orgânico Total (COT)		-	
Potencial Zeta	-	A cada 15 minutos.	-
Temperatura		A cada 15 minutos.	-

Foram feitas amostragens compostas foram feitas devido ao grande número de amostras coletadas durante os ensaios. Cada amostra composta era preparada com volumes iguais de todas as amostras coletadas durante a carreira de filtração. Estabeleceu-se três limites de turbidez para determinar o final da carreira: 0,5, 1,0 e 2,0 uT. O primeiro e segundo valor foram escolhidos com base no atual e no antigo valor de turbidez exigido pelo Padrão de

Potabilidade de água para abastecimento (BRASIL, 2011). O terceiro valor foi estipulado para avaliação de uma possível utilização dos filtros como unidade de pré-filtração.

4.3.2.1. Curva de correlação entre sólidos suspensos totais e turbidez

Para a determinação dos sólidos suspensos totais foi feita uma curva de correlação entre essa variável e a turbidez. A partir de uma amostra da água de estudo coagulada, obtida diretamente da instalação piloto, foram feitas 12 diluições. Uma alíquota de 1 litro de cada diluição foi retirada para realizar as análises de sólidos suspensos totais e outra foi feita para a análise de turbidez, seguindo as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Os resultados de sólidos suspensos e turbidez foram plotados em um gráfico e, assim, obteve-se a curva e a equação apresentadas na Figura 14. Os parâmetros apresentaram um alto coeficiente de determinação, $R^2 = 0,9949$. Portanto, a equação encontrada pode ser utilizada para a determinação de sólidos suspensos totais a partir do valor da turbidez. É importante ressaltar que a análise de sólidos suspensos possui um limite de detecção de $2,5 \text{ mg SST.L}^{-1}$ e um volume máximo de amostra de até 1,0 litro. Tendo isso em vista, o menor valor de SST utilizado para a montagem da curva foi de $2,58 \text{ mg SST.L}^{-1}$ e a turbidez equivalente foi de $2,17 \text{ uT}$, o que justifica o fato da curva não iniciar no ponto zero. Entretanto, pela equação encontrada percebe-se que se a turbidez da amostra for igual a $0,0 \text{ uT}$, a concentração de SST também é igual a $0,0 \text{ mg SST.L}^{-1}$, o que faz sentido levando-se em conta o conceito de turbidez e sólidos suspensos totais. Assim, a equação encontrada pode ser usada sem muitos prejuízos para a determinação de sólidos suspensos totais.

Figura 14 – Curva de correlação entre Sólidos Suspensos Totais e Turbidez

4.3.3. Etapa 3: Avaliação das eficiências de remoção de cor e turbidez para a segunda porosidade selecionada.

Tendo em vista os resultados encontrados na Etapa 1, optou-se por estudar apenas o comportamento do filtro de porosidade 93%, com fundo do filtro do tipo F_{Tipo1} , composto por fibras de diâmetro 0,03 mm.

Dessa forma, nessa etapa foram realizados apenas três ensaios, cada um com uma taxa (60, 80 e 100 m.h^{-1}), para avaliar a remoção de cor e turbidez do leite.

Para cada taxa, o filtro foi operado por pelo menos 60 minutos ou até que a turbidez do efluente fosse maior do que 2,0 uT ou ainda quando a perda de carga do filtro se igualasse à carga hidráulica disponível. Depois de encerrada uma carreira de filtração, foram feitas as lavagens dos filtros com várias repetições da sequência alternada de água e ar, para então iniciar nova carreira.

As variáveis monitoradas foram as mesmas da Etapa 2.

4.3.4. Etapa 4: Avaliação das eficiências de remoção de cor e turbidez para a nova distribuição de água e ar na entrada do filtro.

Nessa etapa foi avaliada a eficiência de remoção de turbidez e cor nos filtros de fibras de 0,03 mm, com fundo de filtro F_{Tipo2} , nas duas porosidades estudadas (84% e 93%). Os dois filtros foram instalados no sistema de filtração e operados simultaneamente.

Foram realizados seis ensaios, sendo dois para cada taxa de filtração (60, 80 e 100 m.h^{-1}). Assim como nas outras etapas, para cada taxa, o filtro foi operado por pelo menos 60 minutos ou até que a turbidez do efluente fosse maior do que 2,0 uT ou ainda quando a perda de carga do filtro se igualasse à carga hidráulica disponível. Depois de encerrada uma carreira de filtração, foram feitas as lavagens dos filtros com várias repetições da sequência alternada de água e ar, para então iniciar nova carreira.

As variáveis monitoradas foram as mesmas da Etapa 2.

4.3.5. Comparação entre os filtros de fibras com fundo F_{Tip02}, segundo critérios de desempenho

Com os resultados obtidos nos ensaios, comparou-se o desempenho dos filtros, segundo o volume diário de água produzido e segundo índices de filtração. Nessa comparação foi considerado carreiras de filtração finalizadas ao atingir turbidez 0,5 uT, e 2,0 uT para cada ensaio.

Para o cálculo do volume diário ($Vol_{ext-24h}$) considerou-se uma projeção hipotética do comportamento do filtro através da extrapolação dos resultados de uma única carreira de filtração para o intervalo de um dia (24 h). Tal projeção levou em conta o volume produzido por carreira de filtração, o volume de água gasto na lavagem e o número de operações do filtro. A determinação foi feita conforme mostra a Equação 10.

$$Vol_{ext-24h} = N(v \cdot A \cdot t_{carreira} - v_{lavagem} \cdot A \cdot t_{lavagem}) \quad \text{Equação 10}$$

em que ,

N é igual à razão $\left[\frac{24 (h)}{(t_{carreira} + t_{lavagem})} \right]$, significando o número de vezes em que cada ciclo, envolvendo a soma entre a carreira e o tempo de lavagem, ocorreria em um dia de operação hipotético do filtro;

v é a taxa de filtração ($m \cdot h^{-1}$),

A é a área transversal do filtro (m^2),

$t_{carreira}$ é a duração da carreira de filtração (h),

$v_{lavagem}$ é a taxa de água aplicada para lavagem dos filtros ($m \cdot h^{-1}$) e

$t_{lavagem}$ é a duração da lavagem (h).

A duração da carreira correspondente a esses valores de turbidez foi obtida por interpolação das curvas de turbidez apresentadas neste trabalho.

Como não foram feitos testes de otimização da lavagem, adotou-se o melhor modo de lavagem desenvolvido por Morita (2013), que foi eficiente tanto para fibras de sisal quanto de polipropileno. O modo consiste em 5 estágios de lavagem, cada um com três segundos de

aplicação de ar e seis segundos de aplicação de água (vazão=180 L.h⁻¹), resultando em 30 s de aplicação de água e 90 s de lavagem total.

A avaliação da porcentagem de água filtrada que é gasta durante o processo de lavagem foi avaliada pela seguinte relação:

$$P(\%) = \frac{V_{AL}}{V_{AF}} \cdot 100 \quad \text{Equação 11}$$

em que P(%) é a porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (%); V_{AL} é o volume de água consumido no processo de lavagem (L) e V_{AF} é o volume de água produzido durante a carreira de filtração (L).

4.3.6. Testes estatísticos

Para avaliar se houve repetibilidade dos ensaios, utilizou-se os seguintes testes estatísticos: Teste-t, Análise de variância (ANOVA), Teste-U de Mann-Whitney e Teste de Kruskal-Wallis.

O teste -t não pareado é indicado para comparar se dois grupos amostrais são significativamente diferentes entre si. Este teste é válido apenas quando as populações seguem distribuição normal e possuem a mesma variância. Caso as populações não sigam distribuição normal, o teste mais indicado é um teste não paramétrico, como o Teste-U de Mann-Whitney.

Para comparar se mais de dois grupos amostrais são significativamente diferentes utiliza-se a Análise de variância (ANOVA), que é um teste paramétrico que considera que as amostras seguem uma distribuição normal com o mesmo desvio padrão (variância). É indicado para comparar mais de dois grupos experimentais diferentes influenciados por um único fator. Quando os dados não seguem uma distribuição normal, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis é o mais indicado.

De maneira geral, a hipótese nula desses testes estatísticos é a de que não existe diferença significativa entre as populações na qual as amostras foram retiradas. Portanto, se o p-valor for menor do que o nível de significância, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, existe

diferença significativa entre os grupos analisados. Da mesma forma, se o p-valor for maior do que o nível de significância, aceita-se a hipótese nula, ou seja, não existe uma diferença estatisticamente significativa entre os grupos analisados.

Os testes foram feitos no *software* SigmaStat, versão 3.5. Em todos os testes considerou-se um intervalo de confiança de 95% (nível de significância igual a 0,05).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão discutidos os resultados obtidos nas diversas baterias de ensaios realizados para este estudo. Para melhor compreensão deste trabalho, os resultados foram divididos em etapas, sendo elas:

- Etapa 1 - Caracterização das fibras de poliamida.
- Etapa 2 - Avaliação das eficiências de remoção de cor e turbidez em filtros de fibras de poliamida, com leitos de 84% de porosidade.
- Etapa 3 - Avaliação das eficiências de remoção de cor e turbidez para o leito $D_{0,03\text{mm}}$ com porosidade de 93% - filtro $[P_{93\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$.
- Etapa 4 - Avaliação das eficiências de remoção de cor e turbidez para a nova distribuição de água e ar na entrada do filtro.

5.1. ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE POLIAMIDA

Os resultados das medições realizadas em microscopia óptica estão apresentados na Tabela 4. As siglas $D_{0,03\text{ mm}}$, $D_{0,11\text{ mm}}$ e $D_{0,32\text{ mm}}$ representam respectivamente fibras de diâmetro 0,03 mm, fibras de diâmetro 0,11 mm e fibras de diâmetro 0,30 mm, e foram utilizadas durante todo o trabalho.

É possível perceber que os fios apresentam bastante uniformidade em seu diâmetro.

Tabela 4 – Medidas (em mm) referentes ao diâmetro real dos fios de nylon dos leitos filtrantes

Variável	$D_{0,03\text{mm}}$	$D_{0,11\text{mm}}$	$D_{0,32\text{mm}}$
Diâmetro médio	$29,8 \times 10^{-3}$	$113,6 \times 10^{-3}$	$325,0 \times 10^{-3}$
Desvio Padrão	$1,8 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-3}$	$3,20 \times 10^{-3}$
Diâmetro Máximo	$33,3 \times 10^{-3}$	$120,0 \times 10^{-3}$	$330,0 \times 10^{-3}$
Diâmetro Mínimo	$26,2 \times 10^{-3}$	$105,0 \times 10^{-3}$	$320,0 \times 10^{-3}$

As imagens utilizadas para aferição dos diâmetros reais foram fotografadas e estão apresentadas na Figura 15.

Figura 15 – Fotografia das amostras de fibras: a) fibra $D_{0,03\text{mm}}$ com ampliação de 400 vezes o tamanho real; b) amostra da fibra $D_{0,11\text{mm}}$ com ampliação de 100 vezes o tamanho real e c) amostra da fibra $D_{0,32\text{mm}}$ com ampliação de 40 vezes o tamanho real.

5.2. ETAPA 2 - AVALIAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ EM FILTROS DE FIBRAS DE POLIAMIDA $P_{84\%}$ - FILTROS $[P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$, $[P_{84\%}/D_{0,11\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ E $[P_{84\%}/D_{0,32\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$

Foram realizadas ao todo 22 baterias de ensaios nessa etapa, para as três taxas de filtração, 60, 80 e 100 m.h^{-1} . É importante lembrar que uma bateria de ensaio indica uma operação no sistema de filtros de fibras, que pode comportar de um a três filtros

simultaneamente. Nessa etapa estavam instalados os filtros de fibras $D_{0,03 \text{ mm}}$, $D_{0,11 \text{ mm}}$ e $D_{0,32 \text{ mm}}$, todos com o fundo de filtro Tipo 1.

Para facilitar a leitura e o entendimento dos resultados apresentados, vale destacar que, para a identificação dos filtros ao longo do trabalho, foi utilizada a seguinte denominação:

$$[P_i / D_j / F_k],$$

em que :

P_i = a porosidade do leito

D_j = o diâmetro da fibra, em mm

F_k = tipo de fundo do filtro (F_{Tipo1} ou F_{Tipo2})

Portanto, nessa etapa, os filtros serão denominados como: $[P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$, $[P_{84\%}/D_{0,11 \text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ ou $[P_{84\%}/D_{0,32 \text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$.

Ressalta-se que, a princípio, seriam realizadas três repetições dos ensaios para cada taxa de filtração. Entretanto, conforme os resultados iam sendo obtidos, houve a necessidade de realizar mais ensaios para uma mesma taxa para melhor avaliação do comportamento do filtro. Assim, a ordem com que os ensaios foram feitos foi de fundamental importância.

A Tabela 5 mostra a ordem cronológica de realização dos ensaios. Na tabela, E_n representa a bateria de ensaios, com n variando de 1 a 18, em que n indica a ordem em que a bateria foi feita.

A repetição para cada filtro e taxa também está indicada na Tabela 5, na forma R_a-T_b , em que a indica a ordem em que a repetição para a taxa T_b foi executada e b indica a taxa (60, 80 ou 100 m.h^{-1}).

Para facilitar a identificação dos ensaios ao longo do trabalho, cada ensaio foi nomeado da seguinte forma:

$$R_a-T_b-E_n$$

Por exemplo: a sigla $R_1-T_{80}-E_1$ indica o ensaio referente à primeira repetição para a taxa de 80 m.h^{-1} , realizada na primeira bateria de ensaios.

Tabela 5 – Ordem dos ensaios realizados na Etapa 2;

Bateria de ensaio	Taxa (m.h ⁻¹)	Repetição		
		[P _{84%} /D _{0,03 mm} /F _{Tipo1}]	[P _{84%} /D _{0,11 mm} /F _{Tipo1}]	[P _{84%} /D _{0,32mm} /F _{Tipo1}]
E ₁	T ₈₀	R ₁ -T ₈₀	R ₁ -T ₈₀	-
E ₂	T ₈₀	R ₂ -T ₈₀	-	-
E ₃	T ₈₀	R ₃ -T ₈₀	R ₂ -T ₈₀	-
E ₄	T ₁₀₀	R ₁ -T ₁₀₀	-	-
E ₅	T ₁₀₀	R ₂ -T ₁₀₀	R ₁ -T ₁₀₀	-
E ₆	T ₁₀₀	R ₃ -T ₁₀₀	R ₂ -T ₁₀₀	R ₁ -T ₁₀₀
E ₇	T ₈₀	R ₄ -T ₈₀	R ₃ -T ₈₀	R ₁ -T ₈₀
E ₈	T ₈₀	R ₅ -T ₈₀	R ₄ -T ₈₀	R ₂ -T ₈₀
E ₉	T ₁₀₀	-	R ₃ -T ₁₀₀	R ₂ -T ₁₀₀
E ₁₀	T ₆₀	R ₁ -T ₆₀	R ₁ -T ₆₀	R ₁ -T ₆₀
E ₁₁	T ₆₀	R ₂ -T ₆₀	R ₂ -T ₆₀	R ₂ -T ₆₀
E ₁₂	T ₈₀	R ₆ -T ₈₀	-	-
E ₁₃	T ₆₀	-	R ₃ -T ₆₀	-
E ₁₄	T ₈₀	R ₇ -T ₈₀	R ₅ -T ₈₀	-
E ₁₅	T ₁₀₀	R ₄ -T ₁₀₀	R ₄ -T ₁₀₀	-
E ₁₆	T ₆₀	R ₃ -T ₆₀	R ₄ -T ₆₀	-
E ₁₇	T ₈₀	R ₈ -T ₈₀	R ₆ -T ₈₀	-
E ₁₈	T ₁₀₀	R ₅ -T ₁₀₀	-	-
E ₁₉	T ₆₀	R ₄ -T ₆₀	R ₅ -T ₆₀	-
E ₂₀	T ₈₀	R ₉ -T ₈₀	R ₇ -T ₈₀	-
E ₂₁	T ₁₀₀	R ₆ -T ₁₀₀	R ₅ -T ₁₀₀	-
E ₂₂	T ₆₀	R ₅ -T ₆₀	R ₆ -T ₆₀	-

As características da água bruta e da água coagulada estão apresentadas na Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente.

Tabela 6 – Características da água bruta para os ensaios realizados na Etapa 2

Variável	Valor Médio	Desvio padrão
pH	7,47	0,18
Potencia Zeta (mV)	-21,78	1,31
Temperatura (°C)	27,48	1,20
Turbidez (uT)	9,74	0,62
cor aparente (uC)	89,43	7,07
cor verdadeira (uC)	30,07	8,77
SST (mg.L⁻¹)	13,28	0,85
COT (mg.L⁻¹)	0,41	0,04
Condutividade (µS.cm⁻¹)	54,45	6,50
Abs 254nm	0,226	0,028
Alcalinidade (mgCaCO₃.L⁻¹)	26,35	2,80

Tabela 7 – Características da água coagulada para os ensaios realizados na Etapa 1

Variável	Média	Desvio Padrão
pH	6,45	0,089
Potencial Zeta (mV)	-0,39	3,08
Temperatura (°C)	27,41	1,18
Turbidez (uT)	10,804	0,345
SST (mg.L⁻¹)	14,73	0,47

5.2.1. Resultados dos ensaios do filtro de fibras de poliamida D_{0,03mm} - filtro [P_{84%} / D_{0,03mm} / F_{Tipo1}]

A Figura 16 mostra os valores de turbidez e cor aparente da água filtrada ao longo do tempo, obtidos nos ensaios realizados com a taxa de 80 m.h⁻¹ e porosidade do leito de 84%. Pela figura é possível perceber que os resultados de cor e turbidez apresentaram

comportamento similar em cada ensaio e, comparando-se as repetições, percebe-se que a repetição R₃-T₈₀-E₃ apresentou comportamento discrepante das outras. Tal discrepância será discutida logo mais adiante, neste mesmo item, após a apresentação dos resultados concernentes aos ensaios realizados com a taxa de 100 m.h⁻¹.

O teste estatístico U de Mann-Whitney confirma o que foi observado acerca do comportamento das repetições para essa taxa. Para os ensaios R₁-T₈₀-E₁ e R₂-T₈₀-E₂, o teste mostrou que não há uma diferença estatisticamente significativa (p-valor = 0,798), portanto os ensaios podem ser considerados estatisticamente iguais. Por outro lado, comparando-se os ensaios R₁-T₈₀-E₁, R₂-T₈₀-E₂ e R₃-T₈₀-E₃ pelo teste de Kruskal-Wallis, concluiu-se que houve diferença significativa entre eles (p-valor = 0,007), confirmando a análise visual da Figura 16.

Figura 16 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₁-T₈₀-E₁, R₂-T₈₀-E₂ e R₃-T₈₀-E₃; filtro [P_{84%}/D_{0,03 mm}/F_{Tipo1}]

Em seguida, foram realizados três ensaios para a taxa de 100 m.h⁻¹, conforme mostra a Figura 17. Esperava-se que o comportamento das curvas para essa taxa seguisse o mesmo das curvas dos R₁-T₈₀-E₁ e R₂-T₈₀-E₂, porém com carreira de filtração mais curta, conforme foi discutido no item 3.1.1, quando foi apresentado o trabalho de Lee et al. (2008). Porém, percebeu-se que, além desse comportamento não ter sido verificado, não houve repetibilidade do comportamento dos filtros nos ensaios para essa taxa.

Figura 17 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₁-T₁₀₀-E₄, R₂-T₁₀₀-E₅ e R₃-T₁₀₀-E₆; filtro [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}].

Tendo em vista os resultados encontrados, a primeira hipótese aventada foi a de que tivesse ocorrido uma possível falha na etapa de coagulação da água de estudo. Entretanto, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 8 (média dos valores de pH e Potencial Zeta obtidos ao longo de cada ensaio e seus respectivos desvios padrões), os valores de pH nos três ensaios encontram-se entre 6,3 e 6,5, faixa adequada para a dosagem de 22,5 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio.

Além disso, o Potencial Zeta também se manteve dentro do esperado, de modo que os três ensaios resultaram em valores próximos a zero. Por conseguinte, pode-se afirmar que a coagulação ocorreu de maneira satisfatória ao longo dos ensaios, invalidando a primeira hipótese aventada para a explicação dos dados discrepantes obtidos nessa etapa do estudo.

Tabela 8 – Água coagulada para os ensaios da taxa de 100 m.h⁻¹; Filtro [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}].

Ensaio	pH médio	P.Z. médio
R ₁ -T ₁₀₀ -E ₄	6,49±0,06	1,53 ± 1,23
R ₂ -T ₁₀₀ -E ₅	6,47±0,04	-0,44 ± 0,55
R ₃ -T ₁₀₀ -E ₆	6,41±0,06	-1,93 ± 2,86

Uma segunda hipótese que poderia justificar a discrepância dos dados dos ensaios R₁-T₁₀₀-E₄, R₂-T₁₀₀-E₅ e R₃-T₁₀₀-E₆, seria uma possível falha na operação de lavagem dos filtros, em que o meio filtrante não estivesse com a mesma condição de limpeza em cada um dos referidos ensaios.

Para verificar essa segunda hipótese, foi inserido um novo procedimento nos ensaios subsequentes. Tal procedimento envolvia a determinação da turbidez da água de lavagem ao final do procedimento de limpeza dos filtros e o aumento da frequência de aplicação de ar e água. Ressalta-se que desde o início do estudo era observada visualmente a perda de carga inicial (com o leito limpo) antes de se iniciar cada ensaio, apesar de não terem sido registrados tais valores. A partir de então, a lavagem só era interrompida quando a perda de carga e a turbidez após o processo fossem iguais à perda de carga e à turbidez obtidas por ocasião dos primeiros ensaios realizados com os filtros alimentados com água do poço (sem adição de caulinita e ácido húmico) e sem aplicação de coagulante.

Para verificar se houve problemas com a lavagem nos ensaios realizados, foram realizados mais dois ensaios com a taxa de 80 m.h^{-1} e dois ensaios na taxa de 60 m.h^{-1} . Com os processos de coagulação e lavagem devidamente controlados, esperava-se que o comportamento das curvas para essa taxa fosse similar ao observado nos ensaios $R_1\text{-}T_{80}\text{-}E_1$ e $R_2\text{-}T_{80}\text{-}E_2$. Entretanto, o comportamento foi similar ao do ensaio $R_3\text{-}T_{80}\text{-}E_3$, como mostra a Figura 18.

Figura 18 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1\text{-}T_{80}\text{-}E_1$, $R_2\text{-}T_{80}\text{-}E_2$, $R_3\text{-}T_{80}\text{-}E_3$, $R_4\text{-}T_{80}\text{-}E_7$ e $R_5\text{-}T_{80}\text{-}E_8$; Filtro $[P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$.

Os ensaios $R_1\text{-}T_{80}\text{-}E_1$ e $R_2\text{-}T_{80}\text{-}E_2$ conseguiram produzir água com turbidez até $0,5 \text{ uT}$ durante aproximadamente 45 minutos, enquanto nos ensaios $R_3\text{-}T_{80}\text{-}E_3$, $R_4\text{-}T_{80}\text{-}E_7$ e $R_5\text{-}T_{80}\text{-}E_8$ esse valor de turbidez não foi atingido.

Foi feito o teste estatístico de Kruskal-Wallis para os ensaios $R_3\text{-}T_{80}\text{-}E_3$, $R_4\text{-}T_{80}\text{-}E_7$ e $R_5\text{-}T_{80}\text{-}E_8$. Como esperado, o teste mostrou que não houve uma diferença estatisticamente

significativa entre os ensaios (p -valor = 0,873) e, portanto, estes podem ser considerados estatisticamente iguais.

Como mostrado anteriormente, o ensaio $R_3-T_{80}-E_3$ é diferente estatisticamente dos ensaios $R_1-T_{80}-E_1$ e $R_2-T_{80}-E_2$. Assim, por extensão, pode-se afirmar que os ensaios $R_4-T_{80}-E_7$ e $R_5-T_{80}-E_8$ também diferem dos dois ensaios iniciais para a taxa de 80 m.h^{-1} .

Assim como na taxa de 100 m.h^{-1} , esperava-se que o comportamento das curvas para a taxa de 60 m.h^{-1} seguisse o mesmo comportamento das curvas dos ensaios $R_1-T_{80}-E_1$ e $R_2-T_{80}-E_2$, porém, nesse caso, com carreira de filtração mais longa. Entretanto, pela Figura 19, percebeu-se que a turbidez de 0,5 uT e a turbidez de 2,0 uT foram atingidas em cerca de 21 minutos e 33 minutos, respectivamente.

Figura 19 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1-T_{60}-E_{10}$, $R_2-T_{60}-E_{11}$; Filtro $[P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$.

Considerando que a qualidade da água bruta, da água coagulada e a lavagem eram mantidas as mesmas (e aproximadamente constantes) nos ensaios, os resultados obtidos após as duas primeiras baterias de ensaio indicam que alguma modificação pode ter ocorrido no filtro de fibras. Assim, decidiu-se pela desmontagem do filtro e retirada do leito de fibras flexíveis após sua lavagem, para avaliação do estado desse leito filtrante.

Observou-se que até aproximadamente os primeiros 60 cm de leito as fibras mantiveram-se paralelas entre si como no início da operação, sem torções significativas. Depois dos 60 cm, entretanto, o leito apresentou parcela significativa de fios emaranhados nas camadas mais externas do leito.

Esse emaranhamento promovia certo estrangulamento do leito, impedindo que este se expandisse com a passagem da água, ocasionando o aparecimento de regiões propícias à

ocorrência de escoamento preferencial e zonas mortas, prejudicando a estrutura do escoamento nessa parte do filtro. Ou seja, a água não se distribuía uniformemente em todas as fibras, diminuindo a eficiência de remoção de partículas por filtração.

Considerando as curvas obtidas nas cinco repetições da taxa de 80 m.h^{-1} , foi possível perceber que houve uma redução da eficiência de remoção de cor e turbidez a partir do ensaio $R_3\text{-}T_{80}\text{-}E_3$. Isso sugere que nesse ensaio o filtro já apresentava fios emaranhados.

Foi realizada uma tentativa de desemaranhar manualmente os fios para recuperar a capacidade inicial de retenção das partículas. O leito foi então reinserido no corpo cilíndrico do filtro e mais um ensaio na taxa de 80 m.h^{-1} foi realizado. O resultado está apresentado na Figura 20. Percebeu-se que houve uma melhora significativa no comportamento da curva, produzindo-se água com turbidez até $1,0 \text{ uT}$ durante aproximadamente 45 min (curva $R_6\text{-}T_{80}\text{-}E_{12}$).

No entanto, no teste de Kruskal-Wallis, o p-valor obtido foi igual a 0,028, indicando que esse ensaio diferiu estatisticamente dos ensaios $R_1\text{-}T_{80}\text{-}E_1$ e $R_2\text{-}T_{80}\text{-}E_2$. Assim, mesmo apresentado melhoras o filtro não atingiu seu potencial de remoção inicial.

Figura 20 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1\text{-}T_{80}\text{-}E_1$, $R_2\text{-}T_{80}\text{-}E_2$, $R_3\text{-}T_{80}\text{-}E_3$, $R_4\text{-}T_{80}\text{-}E_7$, $R_5\text{-}T_{80}\text{-}E_8$ e $R_6\text{-}T_{80}\text{-}E_{12}$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/\text{Tipo1}]$

Apesar dessa recuperação, preferiu-se substituir o leito e refazer os ensaios. O leito antigo foi retirado ainda sujo e úmido e foi fotografado, como pode ser visto na fotografia apresentada na Figura 21. O leito estava limpo nas camadas mais externas de fibra. As partículas foram retidas apenas no interior do leito, a partir dos 30 cm, sendo mais expressivo o depósito na extremidade final. Isso mostra que o leito não estava sendo aproveitado por completo, podendo estar relacionado com o emaranhamento de parcela significativa dos fios nas camadas mais externas do leito.

Figura 21 – Fotografia do leito do filtro [$P_{84\%}/D_{0,03mm}/\text{Tipo1}$], após ensaio $R_6-T_{80}-E_{12}$: a) parte externa do leito e b) parte interna do leito

Tendo isso em vista, uma substituição do leito poderia solucionar o problema. O novo leito foi construído, com as mesmas características do anterior. Foram realizados um ensaio para cada taxa, na sequência: 80, 100 e 60 m.h^{-1} . Essa sequência foi repetida três vezes.

Os resultados de turbidez e cor aparente obtidos na filtração com taxa de 80 m.h^{-1} está apresentado na Figura 22. O Ensaio $R_7-T_{80}-E_{14}$, foi o primeiro ensaio a ser realizado. Percebeu-se que a remoção de turbidez nesse ensaio foi similar aos ensaios $R_1-T_{80}-E_1$ e $R_2-T_{80}-E_2$ realizados com o leito anterior, gerando água com turbidez abaixo de 0,5 uT durante cerca de 47 minutos e turbidez abaixo de 1 uT durante cerca de 62 e minutos. No leito antigo o tempo de filtração foi de 45 min para turbidez abaixo de 0,5 uT e 60 minutos para turbidez até 1 uT. De fato, pelo teste estatístico de Kruskal-Wallis concluiu-se que não há uma diferença estatisticamente significativa entre o Ensaio $R_7-T_{80}-E_{14}$ e os dois primeiros ensaios ($p\text{-valor} = 0,566$). Assim, pode-se inferir que essa era a remoção esperada para essa taxa de filtração.

Figura 22 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_7-T_{80}-E_{14}$, $R_8-T_{80}-E_{17}$ e $R_9-T_{80}-E_{20}$, filtro [$P_{84\%}/D_{0,03\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}$].

Comparou-se os ensaios R₇-T₈₀-E₁₄ e R₈-T₈₀-E₁₇ pelo Teste - U de Mann-Whitney e verificou-se que os ensaios são estatisticamente diferentes (p-valor = 0,045). O mesmo ocorreu quando se comparou os ensaios R₇-T₈₀-E₁₄ e R₉-T₈₀-E₂₀. O p-valor para esse caso foi de 0,042, confirmando a diferença entre os resultados apresentados nos dois ensaios. Portanto, mais uma vez não houve repetibilidade dos ensaios para a taxa de 80 m.h⁻¹.

Para as taxas de 100 e 60 m.h⁻¹ houve repetibilidade dos ensaios, como pode ser visto nas Figuras 23 e 24. O Teste de Kruskal-Wallis para as repetições da taxa de 100 m.h⁻¹, ensaios R₄-T₁₀₀-E₁₅, R₅-T₁₀₀-E₁₈ e R₆-T₁₀₀-E₂₁, obteve p-valor igual a 0,785. Para as repetições da taxa de 60 m.h⁻¹, ensaios R₃-T₆₀-E₁₆, R₄-T₆₀-E₁₉ e R₅-T₆₀-E₂₂, o p-valor encontrado foi igual a 0,827. Portanto as repetições foram iguais para cada taxa.

Contudo, a remoção de turbidez foi muito mais baixa nessas taxas do que nos ensaios da taxa de 80 m.h⁻¹. O tempo de filtração para turbidez até 0,5 uT foi de cerca de 15 minutos para taxa de 100m.h⁻¹ e de 22 minutos para a taxa de 60 m.h⁻¹. Esperava-se que a remoção de turbidez fosse maior conforme a diminuição da taxa de filtração. Dessa forma, conclui-se que mais uma vez pudesse ter havido emaranhamento do leito durante a operação, provavelmente após a primeira lavagem.

Figura 23 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₄-T₁₀₀-E₁₅, R₅-T₁₀₀-E₁₈ e R₆-T₁₀₀-E₂₁; filtro [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipol}]

Figura 24 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₃-T₆₀-E₁₆, R₄-T₆₀-E₁₉ e R₅-T₆₀-E₂₂; filtro [P_{84%}/D_{0,03 mm}/F_{Tipo1}]

Uma provável explicação para o emaranhamento dos fios é a formação de escoamento helicoidal e/ou vórtices durante a etapa de lavagem do leito. O fato de existir um orifício central maior do que os orifícios periféricos pode ter contribuído para a ocorrência desse fenômeno, fazendo com que as fibras se movimentassem descoordenadamente, favorecendo o emaranhamento das mesmas durante a lavagem do leito com ar e água intercaladamente.

Para analisar se a distribuição de ar e água influenciava no processo, resolveu-se estudar uma nova concepção de entrada para o filtro de fibras. A avaliação dessa nova concepção será apresentada no item 4.3.4, referente à Etapa 3 do estudo.

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para o filtro com leito de fibras de diâmetro de 0,11 mm [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}], ainda contendo o fundo de filtro com a concepção antiga (F_{Tipo1}).

5.2.2. Resultados dos ensaios do filtro de fibras de poliamida D_{0,11mm} – Filtro [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]

Os resultados obtidos para a taxa de 80 m.h⁻¹ estão apresentados na Figura 25. Pelo gráfico, é possível perceber que o comportamento da curva de cor foi similar ao de turbidez em cada ensaio. Em nenhum dos ensaios obteve-se turbidez menor ou igual a 0,5 uT.

O ensaio R₁-T₈₀-E₁ apresentou valores de turbidez abaixo de 1 uT por aproximadamente 75 minutos. Entretanto, esse comportamento não foi mantido nos demais ensaios para essa taxa.

Apesar disso, atingiu-se turbidez igual 2,0 uT em cerca de 77 minutos nos R₂-T₈₀-E₃ e R₃-T₈₀-E₇ e 63 minutos no ensaio R₄-T₈₀-E₈.

Mesmo com a melhor remoção obtida pelo R₁-T₈₀-E₁, o teste de Kruskal-Wallis, realizado para comparar todos os ensaios dessa taxa, identificou que não há diferença estatisticamente significativa entre os ensaios (p-valor = 0,063).

Figura 25 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₁-T₈₀-E₁, R₂-T₈₀-E₃, R₃-T₈₀-E₇ e R₄-T₈₀-E₈; filtro [P_{84%}/D_{0,11 mm}/F_{Tipol}]

Os resultados obtidos para a taxa de 100 m.h⁻¹ com o filtro [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipol}] estão apresentados na Figura 26. Até os 30 minutos da carreira de filtração, os três ensaios apresentaram comportamentos semelhantes, tanto para cor quanto turbidez, produzindo água com turbidez entre 1,5 (ensaio R₁-T₁₀₀-E₅) e 2 uT (ensaio R₂-T₁₀₀-E₆) até os 30 minutos de operação. A partir desse ponto, o R₁-T₁₀₀-E₅ deixou de seguir os demais ensaios e atinge valor de turbidez igual a 2 uT apenas aos 90 minutos.

Para a taxa de 60 m.h⁻¹, foram realizados três ensaios com o filtro [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipol}], cujos resultados são mostrados na Figura 27. As três repetições apresentaram o mesmo comportamento. As curvas de cor e turbidez também apresentaram comportamento semelhante em cada ensaio. Entretanto o tempo gasto para atingir a turbidez igual a 2 uT não foi o mesmo, sendo igual a 69 minutos para o ensaio R₃-T₆₀-E₁₃, 75 minutos para o ensaio R₂-T₆₀-E₁₁ e igual a 105 minutos para o ensaio R₁-T₆₀-E₁₀.

O teste de Kruskal-Wallis para esses três ensaios mostrou que , de fato, não existe diferença estatisticamente significativa entre os ensaios (p-valor = 0,751).

Figura 26 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₁-T₁₀₀-E₅, R₂-T₁₀₀-E₆ e R₃-T₁₀₀-E₉; filtro [P_{84%}/D_{0,11} mm/F_{Tipo1}]

Figura 27 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₁-T₆₀-E₁, R₂-T₆₀-E₁₁ e R₃-T₆₀-E₁₃; filtro [P_{84%}/D_{0,11} mm/F_{Tipo1}].

Após a realização desses ensaios, o leito foi retirado ainda sujo para avaliação. Percebeu-se que até aproximadamente 53 cm do início leito (fundo do filtro), houve deposição de partículas no leito. A partir daí o leito apresentou emaranhamentos e as fibras apresentaram-se visualmente limpas até o final do leito (topo do filtro), indicando que não houve aproveitamento desse trecho para a remoção de partículas. A Figura 28 mostra uma

fotografia do leito retirado do filtro [$P_{84\%}/D_{0,11\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}$] após a realização do ensaio R₃-T₆₀-E₁₃.

Figura 28 – Fotografias do leito retirado do filtro [$P_{84\%}/D_{0,11\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}$] após a realização do ensaio R₃-T₆₀-E₁₃: a) fotografia do trecho de leito entre 40 e 50 cm de altura; b) fotografia do trecho de leito entre 50 e 60 cm; e , c) fotografia do trecho de leito entre 70 e 80 cm de altura.

Os valores de perda de carga ao longo do leito [$P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}$] durante a realização do ensaio R₃-T₆₀-E₁₃ são apresentados na Figura 29. A perda de carga mostrou aumento expressivo no trecho 33-66 cm e manteve-se praticamente inalterada nos outros trechos. O aumento da perda de carga indica que estava ocorrendo deposição das partículas nesse trecho do leito, que corresponde ao mesmo trecho que se apresentou mais sujo na observação visual.

Figura 29 – Valores de perda de carga referentes ao ensaio R₃-T₆₀-E₁₃; Filtro [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]

Associando-se as observações visuais do leito com os valores de perda de carga obtidos para o ensaio R₃-T₆₀-E₁₃, taxa 60 m.h⁻¹, é possível afirmar que o emaranhamento das fibras do leito causou perda significativa da capacidade de retenção de partículas nos interstícios do leito, refletindo em menores valores de perda de carga nos trechos mais emaranhados e em menor capacidade do leito como um todo em remover cor e turbidez da água coagulada.

No trecho 66-100 cm, a perda de carga manteve-se praticamente igual à perda de carga no trecho 0-16 cm, com aumento pouco significativo ao longo do tempo, o que indica que houve pouca ou nenhuma deposição de partículas nesse trecho. Esse resultado não era o esperado, tendo em vista o resultado obtido no leito [P_{84%}/D_{0,03 mm}/F_{Tipo1}], estudado anteriormente, que removeu maior parte das partículas no trecho final do leito. Entretanto o baixo valor da perda de carga está de acordo com a observação visual realizada. O emaranhamento e as fibras praticamente limpas nesse trecho indicaram fortemente a perda da capacidade de retenção de partículas desse trecho de leito, que condizem com aos baixos valores da perda de carga apresentados pelos referidos trechos.

Tendo isso em vista, tentou-se identificar a partir de qual ensaio ocorreu o emaranhamento. Para isso, foi analisada a perda de carga por trecho de todos os ensaios realizados. As Figuras 30 a 39 mostram os valores de perda de carga por trecho na ordem cronológica em que foram realizados anteriormente. Em todos os ensaios, o aumento mais expressivo da perda de carga (maior retenção de partículas) ocorreu no trecho 33-66 cm. Em alguns ensaios houve retenção de partículas no trecho 16-33 cm, como nos ensaios R₁-T₈₀-E₁, R₁-T₁₀₀-E₅, R₂-T₁₀₀-E₆, R₃-T₈₀-E₇ e R₁-T₆₀-E₁₀. O trecho 0-16 cm, não contribuiu

significativamente para o aumento da perda de carga total em nenhum ensaio. Já o trecho-66-100 cm, manteve-se com perda de carga constante em todos os ensaios, exceto para os ensaios na taxa de 100 m.h^{-1} ($R_1\text{-}T_{100}\text{-}E_5$, $R_2\text{-}T_{100}\text{-}E_6$ e $R_4\text{-}T_{100}\text{-}E_{15}$), que apresentaram um ligeiro aumento.

Os resultados obtidos são análogos aos resultados para o ensaio $R_3\text{-}T_{60}\text{-}E_{13}$, que antecedeu a retirada do leito. Dessa forma, como não houve uma mudança significativa do comportamento da perda de carga ao longo das baterias de ensaios, não foi possível detectar em qual ensaio ocorreu o emaranhamento das fibras. Assim, apesar de não se poder determinar com certeza a partir de qual ensaio houve o emaranhamento das fibras do leito, ficou comprovado o efeito nocivo do fenômeno de emaranhamento das fibras desse tipo de leito.

Figura 30 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [$P_{84\%}/D_{0,11\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}$] – Ensaio $R_1\text{-}T_{80}\text{-}E_1$

Figura 31 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [$P_{84\%}/D_{0,11\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}$] – Ensaio $R_2\text{-}T_{80}\text{-}E_3$

Figura 32 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₁-T₁₀₀-E₅

Figura 33 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₂-T₁₀₀-E₆

Figura 34 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₃-T₈₀-E₇

Figura 35 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₄-T₈₀-E₈

Figura 36 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₃-T₁₀₀-E₉

Figura 37 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₁-T₆₀-E₁₀

Figura 38 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₂-T₆₀-E₁₁

Figura 39 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₃-T₆₀-E₁₃

Como não foi possível identificar o exato momento em que ocorreu o emaranhamento das fibras e, conseqüentemente, o efeito causado na remoção de cor e turbidez, optou-se em refazer alguns ensaios após tentativa de desemaranhamento dos fios. Foram realizados mais três ensaios para as taxas de 80 m.h⁻¹ e 60 m.h⁻¹ e dois ensaios para a taxa de 100 m.h⁻¹.

A Figura 40 mostra os resultados obtidos para os ensaios com taxa de 80 m.h⁻¹. O ensaio R₅-T₈₀-E₁₄, primeiro ensaio realizado após o desemaranhamento das fibras, manteve a

produção de água filtrada com turbidez menor que 1,0 uT até os 45 minutos e menor do que 2 uT até cerca de 93 minutos. Esses valores de duração são mais baixos do que os obtidos para o ensaio R₁-T₈₀-E₁, primeiro ensaio realizado no leito, que atingiu turbidez da água efluente do filtro igual à 1,0 uT aos 75 minutos de operação do filtro. Entretanto quando comparado aos ensaios R₂-T₈₀-E₃, R₃-T₈₀-E₇ e R₄-T₈₀-E₈, a duração foi maior nesse ensaio.

Figura 40 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₅-T₈₀-E₁₄, R₆-T₈₀-E₁₇ e R₇-T₈₀-E₂₀; filtro [P_{84%}/D_{0,11 mm}/F_{Tip01}]

O comportamento do ensaio R₆-T₈₀-E₁₇, apesar do pico apresentado aos 75 minutos, manteve-se similar ao do ensaio R₅-T₈₀-E₁₄. Já o ensaio R₇-T₈₀-E₂₀ apresentou valores de turbidez um pouco mais altos, atingindo a turbidez igual a 2,0 uT aos 48 minutos.

Apesar dessa ligeira diferença, o teste de Kruskal-Wallis para esses três ensaios indicou que não existe diferença estatisticamente significativa entre eles (p-valor = 0,172). O mesmo resultado foi obtido quando se comparou os ensaios iniciais com os realizados após o desemaranhamento, também pelo teste de Kruskal-Wallis (p-valor = 0,154). Isso indica que, mesmo com um certo grau de emaranhamento do leito, a remoção de turbidez e cor mantiveram o mesmo padrão de comportamento antes e após o emaranhamento.

Os ensaios realizados para a taxa de 100 m.h⁻¹ são apresentados na Figura 41. Os comportamentos das duas curvas foram similares, como pode ser visto na figura. A turbidez igual a 2,0 uT foi atingida aos 41 e aos 24 minutos, para os ensaios R₄-T₁₀₀-E₁₅ e R₅-T₁₀₀-E₂₁, respectivamente. Apesar de serem um pouco diferentes, os tempos foram condizentes com a duração obtida no ensaio R₂-T₁₀₀-E₆, realizado antes do desemaranhamento das fibras, para a mesma medida de turbidez.

Ao realizar o teste de Kruskal-Wallis para todos ensaios obtidos nessa taxa, tanto antes quanto depois do desemaranhamento, concluiu-se que não existe diferença estatística entre as repetições ($p\text{-valor} = 0,253$).

Figura 41 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₄-T₁₀₀-E₁₅ e R₅-T₁₀₀-E₂₁; filtro [P_{84%} / D_{0,11 mm} / F_{Tipo1}]

Os ensaios realizados para a taxa de 60 m.h^{-1} são apresentados na Figura 42. Os ensaios R₄-T₆₀-E₁₆ e R₅-T₆₀-E₁₉ apresentaram resultados similares. O ensaio R₄-T₆₀-E₁₆ atingiu turbidez menor do que 0,5 uT apenas aos 15 minutos de ensaio (0,373 uT), e atingiu 1 uT aos 41 minutos. Desconsiderando o pico atingido aos 75 minutos, a turbidez igual a 2 uT foi alcançada aos 111 minutos. O ensaio R₅-T₆₀-E₁₉ apresentou valores de turbidez mais baixos do que os outros dois ensaios, atingindo os valores de turbidez 1 uT e 2 uT aos 78,4 min e 118,6 min, respectivamente. Nesse ensaio também se atingiu turbidez menor do que 0,5 uT, mantendo-se nessa faixa dos 5 aos 17 minutos. O ensaio R₆-T₆₀-E₂₂ apresentou o pior resultado, atingindo 1 uT em aproximadamente 1 minuto e turbidez igual 2 uT, aos 41 minutos.

A diferença entre os ensaios foi confirmada pelo teste de Kruskal-Wallis, que resultou em um $p\text{-valor}$ igual a 0,039, indicando que existe diferença estatisticamente significativa entre eles.

Compararam-se também esses ensaios com um dos ensaios feitos anteriormente à retirada do leite. Uma vez que todos os ensaios realizados anteriormente para essa taxa foram considerados iguais pelo teste de Kruskal-Wallis, considerou-se que a similaridade entre um deles com esse novo grupo de ensaios indicaria a repetibilidade dos mesmos. Assim, o ensaio R₁-T₆₀-E₁₀ foi comparado com os ensaios R₄-T₆₀-E₁₆ R₅-T₆₀-E₁₉ e R₆-T₆₀-E₂₂, pelo teste

ANOVA, já que os dados seguiam distribuição normal. O teste identificou que, de fato houve diferença entre os ensaios (p-valor = 0,008).

Figura 42 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₄-T₆₀-E₁₆, R₅-T₆₀-E₁₉ e R₆-T₆₀-E₂₂; filtro [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}].

Os valores de perda de carga obtidos para os ensaios realizados após a retirada do leito estão apresentados nas Figuras 43 a 50. Notou-se um melhor aproveitamento do trecho 66-100 cm principalmente nos ensaios com taxas de 100 m.h⁻¹. Ressalta-se que no ensaio R6-100, penúltimo ensaio a ser realizado, o trecho 66-100 cm foi o que mais contribuiu com o valor de perda de carga total. Isso mostra que o desemaranhamento das fibras melhorou a distribuição das partículas ao longo do leito.

Figura 43 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R₅-T₈₀-E₁₄

Figura 44 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R₄-T₁₀₀-E₁₅

Figura 45 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R₄-T₆₀-E₁₆

Figura 46– Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R₆-T₈₀-E₁₇

Figura 47– Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R₅-T₆₀-E₁₉

Figura 48 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R₇-T₈₀-E₂₀

Figura 49 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R₅-T₁₀₀-E₂₁

Figura 50 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R₆-T₆₀-E₂₂

A Tabela 9 mostra a contribuição de cada trecho para a perda de carga total em termos de porcentagem, em todos os ensaios realizados para esse leito, antes e após o desemaranhamento (área sombreada na tabela). Para facilitar a comparação, fixou-se a turbidez em 2,0 uT e, com o tempo correspondente, a perda de carga foi encontrada por interpolação.

Pela tabela, fica claro a melhora na remoção de partículas para o trecho 66-100 cm, como já havia sido observado pelos gráficos de perda de carga.

Apesar da melhora do leito em termos de aproveitamento do leito, pouca mudança foi observada em termos de remoção de turbidez e cor. Ao final dos ensaios o leito foi removido e foi identificado um leve emaranhamento das fibras, distribuído no trecho 60-100 cm. Esse emaranhamento pode ter sido ocasionado pela inadequação do fundo de filtro F_{Tipo1} para distribuir adequadamente água e ar durante o processo de lavagem do leito.

Tendo isso em vista e considerando os resultados obtidos para o leito de fibras D_{0,03mm}, recomenda-se para trabalhos futuros que sejam feitos testes com outros tipos de fundo de filtro tendo em vista a grande importância de se ter uma adequada distribuição de ar e água, de modo a se obter lavagem eficiente das fibras sem causar emaranhamento das mesmas.

Tabela 9 – Porcentagem da perda de carga total até turbidez igual a 2,0 uT.

Taxa	ensaio	Perda de carga por trecho (%)				Total
		0-16 cm	16-33 cm	33-66 cm	66-100 cm	
60	1	11,2	39,0	39,8	10,0	100
	2	22,4	24,4	34,9	18,3	100
	3	8,2	22,8	52,8	16,2	100
	4	10,1	25,9	38,8	25,2	100
	5	9,5	23,7	42,9	23,9	100
	6	6,1	20,2	43,7	29,9	100
80	1	11,7	44,6	32,8	10,9	100
	3	4,2	18,2	37,6	40,1	100
	4	14,6	45,0	27,1	13,3	100
	7	9,9	22,0	39,3	28,8	100
	8	9,0	24,9	39,6	26,5	100
	9	7,7	21,4	41,6	29,3	100
100	2	8,2	31,5	44,8	15,6	100
	3	18,4	39,5	30,0	18,6	100
	4	8,8	26,8	47,8	16,6	100
	5	8,8	22,6	38,4	30,2	100
	6	7,2	14,2	38,8	39,8	100

Nota: Área sombreada indica resultados dos ensaios após desemaranhamento do leito.

5.2.3. Resultados dos ensaios do filtro de fibras de poliamida $D_{0,32mm}$ – Filtro $[P_{84\%}/D_{0,32mm}/F_{Tipo1}]$

Para os filtros com leito $D_{0,32mm}$ foram realizados dois ensaios para cada uma das taxas: 60, 80 e 100 $m.h^{-1}$. Ao contrário dos outros leitos estudados para a porosidade de 84%, esse leito não apresentou problemas com o emaranhamento das fibras. Isso se ocorreu, muito provavelmente, devido ao diâmetro das fibras nessa configuração $[P_{84\%}/D_{0,32mm}/F_{Tipo1}]$ ser

mais de dez vezes o diâmetro dos filtros [$P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}$], cujos resultados foram discutidos anteriormente.

Os resultados de turbidez e cor da água filtrada obtidos pelo filtro [$P_{84\%}/D_{0,32\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}$] para a taxa de 60 m.h^{-1} são apresentados na Figura 51. Pela figura, percebe-se que, em cada ensaio, os resultados de cor foram similares aos de turbidez ao longo do tempo. Além disso, o comportamento das curvas de remoção de turbidez e de cor mostrou-se diferente dos apresentados nos leitos de fibras [$P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}$] e [$P_{84\%}/D_{0,11 \text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}$], sendo, nesse caso, praticamente constante ao longo do tempo. Entretanto em nenhuma das repetições produziu-se água com turbidez menor ou igual a $2,0 \text{ uT}$.

Figura 51 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1\text{-}T_{60}\text{-}E_{10}$ e $R_2\text{-}T_{60}\text{-}E_{11}$; filtro [$P_{84\%}/D_{0,32\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}$].

A perda de carga por trecho do filtro, para os dois ensaios está apresentado nas Figuras 52 e 53. Nos dois ensaios a perda de carga permaneceu a mesma nos dois trechos iniciais do filtro (de 0 até $33,0 \text{ cm}$). A partir do terceiro trecho, percebe-se um ligeiro aumento da perda de carga, que se mantém até o final do leito. Apesar disso, o aumento da perda de carga total do filtro foi baixo (18 mm para o ensaio $R_1\text{-}T_{60}\text{-}E_{10}$ e 15 mm para o ensaio $R_2\text{-}T_{60}\text{-}E_{11}$). Esse pequeno aumento está de acordo com os resultados de cor e turbidez da água filtrada obtidos, pois os valores elevados desses parâmetros indicam que poucas partículas estavam sendo retidas no filtro e, conseqüentemente, houve pouca alteração na perda de carga.

Figura 52 – Valores de perda de carga por trecho referentes ao ensaio R1-T60-E10; filtro [P84%/D0,32mm/FTipo1]

Figura 53 – Valores de perda de carga por trecho referentes ao ensaio R2-T60-E11; filtro [P84%/D0,32mm/FTipo1]

Os resultados de turbidez e cor da água filtrada, obtidos pelo filtro [P_{84%}/D_{0,32mm}/F_{Tipo1}] para a taxa de 80 m.h⁻¹, são apresentados na Figura 54. Da mesma forma que nos ensaios para a taxa de 60 m.h⁻¹, os resultados de cor foram similares aos de turbidez ao longo do tempo nos ensaios referentes à taxa de 80 m.h⁻¹. No R₁-T₈₀-E₇ a turbidez manteve-se em torno de 6,0 uT ao longo de todo o período do ensaio, com exceção do ponto correspondente aos 75 minutos, que obteve turbidez igual a 8,4 uT. No ensaio R₂-T₈₀-E₈ observou-se um ligeiro aumento da turbidez ao longo do tempo, de 4,0 uT até 7,0 uT, obtida aos 75 minutos. Como pôde ser visto, em nenhuma das repetições produziu-se água com turbidez menor ou igual a 2,0 uT.

Figura 54 – Valores de turbidez e cor da água filtrada em filtros de fibras, referentes aos ensaios R₁-T₈₀-E₇ e R₂-T₈₀-E₈; [P_{84%}/D_{0,32mm}/F_{Tipo1}].

Os valores de perda de carga por trecho do filtro obtidos no ensaio R₁-T₈₀-E₇ estão apresentados na Figura 55. Assim como nos ensaios da taxa de 60 m.h⁻¹, a perda de carga permaneceu a mesma nos dois trechos iniciais do filtro (de 0 até 33,0 cm). A partir do terceiro trecho, percebe-se um ligeiro aumento da perda de carga, que se mantém até o final do leito. Apesar disso, o aumento da perda de carga total do filtro foi de 28 mm, valor um pouco maior do que os obtidos para a taxa de 60 m.h⁻¹.

Figura 55 – Valores de perda de carga por trecho, referentes ao ensaio R₁-T₈₀-E₇; filtro [P_{84%}/D_{0,32 mm}/F_{Tipo1}].

Os valores de perda de carga para o ensaio R₂-T₈₀-E₈ não foram apresentados nesse item, pois apresentaram problemas durante a coleta de dados, possivelmente devido à interferência de bolhas de ar nos piezômetros. O gráfico com os valores encontrados para esse ensaio encontra-se no Apêndice A.

Os resultados de turbidez e cor da água filtrada, obtidos pelo filtro [P_{84%}/D_{0,32mm}/F_{Tipo1}] para a taxa de 100 m.h⁻¹, são apresentados na Figura 56. Os resultados de cor foram similares aos de turbidez ao longo do tempo nos ensaios. No ensaio R₁-T₁₀₀-E₆ a curva de remoção de turbidez não apresentou um padrão bem definindo, oscilando entre 5,3 e 7,5 uT. No R₂-T₁₀₀-E₉ a turbidez manteve-se em torno de 6,0 uT ao longo de todo o período do ensaio, com exceção do ponto correspondente aos 75 minutos, que obteve turbidez igual a 10,8 uT. Esse último valor de turbidez equivale ao valor encontrado para a turbidez da água coagulada para esse ensaio, o que indica que não houve retenção significativa de partículas nesse tempo ou então que houve transpasse ao longo do leito. Como pôde ser visto, em nenhuma das repetições produziu-se água com turbidez menor ou igual a 2,0 uT.

Figura 56 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₁-T₁₀₀-E₆ e R₂-T₁₀₀-E₉; [P_{84%}/D_{0,32mm}/F_{Tipo1}]

A perda de carga por trecho do filtro, para os dois ensaios está apresentado nas Figuras 57 e 58. O comportamento da perda de carga foi similar aos dos ensaios anteriores para esse leito: permaneceu a mesma nos dois trechos iniciais do filtro (de 0 até 33,0 cm) e, a partir do terceiro trecho, houve um ligeiro aumento da perda de carga, que se manteve até o final do leito. A perda de carga total do filtro foi de 48 mm para o ensaio R₁-T₁₀₀-E₆ e 26 mm para o ensaio R₂-T₁₀₀-E₉.

Figura 57 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R₁-T₁₀₀-E₆

Figura 58 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R₂-T₁₀₀-E₉.

Para facilitar a comparação entre os resultados obtidos, obteve-se uma curva de turbidez média entre as repetições realizadas em cada taxa. Essas curvas estão apresentadas na Figura 59.

Os comportamentos das curvas foram iguais em todas as taxas. A turbidez obtida para as taxas de 60 m.h^{-1} e 80 m.h^{-1} apresentaram valores bem próximos durante todo o experimento, enquanto para a taxa de 100 m.h^{-1} os valores de turbidez obtidos foram ligeiramente maiores do que o dessas duas taxas.

De fato, comparando-se os valores de turbidez médios para cada taxa pelo Teste Kruskal-Wallis, concluiu-se que não existe diferença estatisticamente significativa entre as taxas (p -valor = 0,119).

Figura 59 – Valores turbidez e cor da água filtrada referentes à média dos ensaios de cada uma das taxas de filtração ($60, 80$ e 100 m.h^{-1}) em filtro de fibras [$P_{84\%}/D_{0,32\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}$].

Apesar de não se ter atingido os valores de turbidez estabelecidos para o presente trabalho, houve remoção de turbidez durante os ensaios. Além disso, o leito não estava sujeito a emaranhamentos, o que facilitou a sua manutenção e durabilidade. Considerando a baixa perda de carga ao longo dos ensaios, uma sugestão para trabalhos futuros seria aumentar a densidade de fibras no filtro e avaliar se ocorre melhora na qualidade da água filtrada. Ou ainda, avaliar como o filtro se comportaria com água bruta com outras características.

5.2.4. Análise das amostras compostas

Estabeleceu-se previamente os limites de turbidez $0,5$ e $2,0 \text{ uT}$ para realizar as análises das amostras compostas. Considerando a inconstância nos resultados do

[P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] devido ao problema de emaranhamento das fibras, a caracterização da água filtrada por esse filtro não será apresentada.

O filtro [P_{84%}/D_{0,32mm}/F_{Tipo1}] não atingiu turbidez menor que 2,0 uT em nenhum momento dos ensaios. Já os filtros [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}], mesmo apresentando emaranhamentos, conseguiu repetibilidade dos ensaios e garantiu turbidez menor do que 2,0 uT por tempo satisfatório. Assim, a caracterização da qualidade da água efluente desse filtro foi feita por meio de análises compostas das amostras com turbidez menor ou igual a 2,0 uT obtidas durante os ensaios. Os valores de turbidez, Condutividade, Abs 254 nm, COT e SST obtidos estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Média dos valores de turbidez, Condutividade, Abs254, COT e SST das amostras compostas (turbidez até 2,0 uT), referentes aos ensaios no filtro [P_{84%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]

Ensaio	Turbidez (uT)	Condutividade (µS.cm ⁻¹)	Abs 254nm	COT (mg.L ⁻¹)	SST (mg.L ⁻¹)
Bruta	9,74±0,62	54,45±6,50	0,226±0,028	0,41±0,04	13,28±0,85
R3-T60	0,86	49,49	0,024	0,13	1,17
R4-T60	0,906	59,26	0,022	0,24	1,23
R5-60	1,32	52,68	0,032	0,14	1,80
R5-T80	1,10	52,82	0,022	0,13	1,50
R6-T80	0,708	57,06	0,014	0,14	0,96
R7-T80	1,4	67,28	0,033	0,14	1,91
R4-T100	0,9275	52,42	0,009	0,15	1,26
R5-T100	1,14	55,38	0,027	0,15	1,55

Os resultados obtidos em todas as variáveis foram aproximadamente constantes nos ensaios, sem apresentar variações com a taxa de filtração. Além disso, houve uma grande redução dos valores em relação à água bruta, resultado que condiz com as curvas de remoção de turbidez e cor apresentadas neste trabalho.

5.3. ETAPA 3 - AVALIAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ PARA O LEITO $D_{0,03\text{mm}}$ COM POROSIDADE DE 93% - FILTRO $[P_{93\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$

Tendo em vista os resultados obtidos para o filtro de fibras $[P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo1}}]$ com porosidade 84%, optou-se por estudar o comportamento do filtro com uma porosidade maior, ou seja, com menor densidade de fibra. Essa escolha foi feita para avaliar se o processo de emaranhamento das fibras estava relacionado com o número de fibras do leito.

Dessa forma, nessa etapa foram realizados apenas três ensaios, cada um com uma taxa (60, 80 e 100 m.h^{-1}). A ordem dos ensaios foi feita na ordem apresentada na tabela 11.

Tabela 11 – Ordem dos ensaios realizados na Etapa 3.

Bateria de ensaio	Taxa (m.h^{-1})	Repetição
		Filtro $D_{0,03\text{mm}}$
E₁	T ₆₀	R ₁ -T ₆₀ -E ₁
E₂	T ₈₀	R ₁ -T ₈₀ -E ₂
E₃	T ₁₀₀	R ₁ -T ₁₀₀ -E ₃

As características da água coagulada e da água bruta estão apresentados na Tabela 12 e Tabela 13, respectivamente.

Tabela 12 – Características da água coagulada para os ensaios realizados na Etapa 3

Variável	Média	Desvio Padrão
pH	6,40	0,03
Potencial Zeta (mV)	2,13	1,00
Temperatura (°C)	25,0	0,0
Turbidez (uT)	10,77	0,35
SST (mg.L⁻¹)	14,68	0,48

Tabela 13 – Características da água bruta para os ensaios realizados na Etapa 3

Variável	Média	Desvio padrão
pH	7,38	0,04
Potencial Zeta (mV)	-22,10	0,26
Temperatura (°C)	25,0	0,0
Turbidez (uT)	9,48	0,84
cor aparente (uC)	88,58	7,74
cor verdadeira (uC)	35,76	15,29
SST (mg.L ⁻¹)	12,93	1,15
COT (mg.L ⁻¹)	0,33	0,02
Condutividade (μS.cm ⁻¹)	63,89	4,17
Abs 254	0,215	0,054
Alcalinidade (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	30,81	0,62

Para facilitar a compreensão dessa etapa os resultados de cor e turbidez obtidos nos três ensaios foram plotados em um mesmo gráfico, apresentado na Figura 60.

Figura 60 – Valores de turbidez e cor da água filtrada em filtros de fibras, referentes aos ensaios R₁-T₆₀-E₁, R₁-T₈₀-E₂ e R₁-T₁₀₀-E₃; filtro [P₉₃% / D_{0,03} mm / F_{Tipo1}].

O comportamento da curva de turbidez e da curva de cor da água filtrada seguiu o mesmo comportamento em cada ensaio. O Ensaio R₁-T₆₀-E₁, primeiro a ser realizado, obteve o melhor resultado da qualidade da água filtrada, mantendo água com turbidez menor ou igual a 0,5 uT durante 110 minutos e atingindo 2,0 uT aos 151 minutos. Comparativamente, nos

ensaios R₃-T₆₀-E₁₆[P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}], R₄-T₆₀-E₁₉[P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] e R₅-T₆₀-E₂₂[P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}], apresentados no item 5.2.1 após tentativa de desemaranhamento do leito, o tempo médio gasto para se atingir turbidez igual a 0,5 uT foi de 22 minutos.

O Ensaio R₁-T₈₀-E₂, segundo ensaio a ser realizado, mostrou resultado diferente do esperado. A turbidez igual a 0,5 uT não foi atingida e os valores de turbidez igual a 1 uT e 2 uT foram atingidos aos 19,4 e 49,2 minutos. Os resultados obtidos são muito inferiores se comparado com o ensaio R₁-T₈₀-E₁[P_{84%} / D_{0,03 mm}/F_{Tipo1}], que atingiu turbidez igual a 0,5 uT, 1,0 uT e 2,0 uT, respectivamente, aos 46,4, 56,8 e 76,1 minutos.

Da mesma forma, o comportamento da curva R₁-T₁₀₀-E₃, não foi satisfatório, atingindo rapidamente a turbidez igual a 2,0 uT aos 29,5 minutos. Esperava-se que o comportamento das curvas fosse igual, porém com carreira de filtração mais curta, conforme foi discutido no item 3.1.1, quando foi apresentado o trabalho de Lee et al. (2008).

Tendo esses resultados em vista e considerando o emaranhamento ocorrido no leito [P_{84%}/D_{0,03 mm}/F_{Tipo1}], discutido no item 5.2.1, havia indícios de que o leito pudesse ter emaranhado novamente. Assim, o leito foi retirado para avaliação.

Notou-se que mais uma vez o leito emaranhou nas camadas mais externas do leito, como pode ser visto na Figura 61. Nesse leito, porém, o emaranhamento se deu ao longo de todo leito, sendo mais significativo no último trecho. As camadas mais centrais mantiveram-se sem alterações.

Figura 61 – Leito emaranhado após ensaios – filtro [P_{93%} / D_{0,03 mm} / F_{Tipo1}].

O emaranhamento também pode ser notado pelos valores da perda de carga por trecho, em cada um dos ensaios, como mostra as Figuras 62 a 64. No ensaio R₁-T₆₀-E₁, o

gráfico mostra que houve aumento da perda de carga em todos os trechos do leito, com exceção do trecho 0-16 cm. O trecho com maior depósito de partículas foi o 33-66 cm.

A partir do segundo ensaio, R₁-T₈₀-E₂, houve aumento da perda de carga apenas no trecho 66-100 cm. No trecho 33-66 cm, que se mostrou mais representativo no ensaio anterior para remoção de turbidez, não houve indício de retenção eficiente de partículas, dada a perda de carga constante.

Figura 62 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{93%} / D_{0,03 mm} / F_{Tipo1}] – Ensaio R₁-T₆₀-E₁

Figura 63 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{93%} / D_{0,03 mm} / F_{Tipo1}] – Ensaio R₁-T₈₀-E₂

Figura 64 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{93%} / D_{0,03 mm} / F_{Tipo1}] – Ensaio R₁-T₁₀₀-E₃

Considerando a baixa remoção de turbidez tanto no ensaio R₁-T₈₀-E₂ quanto no R₁-T₁₀₀-E₃, o aumento da perda de carga no trecho 66-100 cm se deu não só pelo depósito de

partículas, mas também devido ao emaranhamento acentuado no final do leito, que provavelmente funcionou como barreira para o escoamento da água de estudo.

A partir desses resultados, concluiu-se que o leito já apresentou emaranhamento após a primeira lavagem do filtro. Como mencionado no item 5.2.1, a possível formação de escoamento helicoidal e/ou vórtices durante a etapa de lavagem do leito provavelmente possa explicar o emaranhamento dos fios. O fato de existir um orifício central maior do que os orifícios periféricos pode ter contribuído para a ocorrência desse fenômeno, fazendo com que as fibras se movimentassem descoordenadamente, favorecendo o emaranhamento das mesmas.

Para verificar essa hipótese, buscou-se avaliar se a distribuição de ar e água no fundo de filtro influenciava no processo por meio de uma nova concepção de entrada para o filtro de fibras (fundo F_{Tipo2}), seguida da realização de nova bateria de ensaios cujos resultados são apresentados no próximo item.

5.4. ETAPA 4 - AVALIAÇÃO DAS EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ PARA A NOVA DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA E AR NA ENTRADA DO FILTRO.

Nessa etapa foram estudadas as eficiências de remoção de cor e turbidez em filtros de fibras $D_{0,03\text{mm}}$ e fundo do filtro F_{Tipo2} . Esse fundo apresentava apenas quatro orifícios distribuidores periféricos, dispensando o orifício central utilizado no fundo F_{Tipo1} . Foram operados dois leitos simultaneamente, um com porosidade de 84% e o outro com porosidade de 93%.

Avaliou-se o comportamento do filtro em três taxa: 60, 80 e 100 m.h^{-1} . A ordem com que os ensaios foram realizados está apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 – Ordem dos ensaios da Etapa 4

Bateria de ensaio	Taxa (m.h ⁻¹)	Repetição	
		P _{93%} D _{0,03 mm}	P _{84%} D _{0,03 mm}
E ₁	T ₆₀	R ₁ -T ₆₀ -E ₁	-
E ₂	T ₁₀₀	R ₁ -T ₁₀₀ -E ₂	R ₁ -T ₁₀₀ -E ₂
E ₃	T ₈₀	R ₁ -T ₈₀ -E ₃	R ₁ -T ₈₀ -E ₃
E ₄	T ₁₀₀	R ₂ -T ₁₀₀ -E ₄	R ₂ -T ₁₀₀ -E ₄
E ₅	T ₈₀	R ₂ -T ₈₀ -E ₅	R ₂ -T ₈₀ -E ₅
E ₆	T ₆₀	-	R ₁ -T ₆₀ -E ₆
E ₇	T ₆₀	R ₂ -T ₆₀ -E ₇	R ₂ -T ₆₀ -E ₇

As características da água bruta e da água coagulada estão apresentados na Tabela 15 e Tabela 16, respectivamente.

Tabela 15 – Características da água bruta para os ensaios realizados na Etapa 4

Variável	Média	Desvio padrão
pH	7,44	0,19
Potencial Zeta.(mV)	-21,21	1,22
Temperatura (°C)	27,3	1,3
Turbidez (uT)	9,31	0,62
cor aparente (uC)	81,15	10,58
cor verdadeira (uC)	29,59	7,50
SST (mg.L ⁻¹)	12,69	0,84
COT (mg.L ⁻¹)	0,37	0,02
Condutividade (µS.cm ⁻¹)	51,36	2,02
Abs 254	0,228	0,044
Alcalinidade (mgCaCo ₃ .L ⁻¹)	26,41	1,44

Tabela 16 – Características da água coagulada para os ensaios realizados na Etapa 4

Variável	Média	Desvio Padrão
pH	6,47	0,09
P.Z.(mV)	-0,51	3,83
Temperatura (°C)	26,8	1,7
Turbidez (uT)	10,65	0,21
SST (mg.L ⁻¹)	14,52	0,28

5.4.1. Resultado dos ensaios em filtro de fibras D_{0,03mm}, P_{93%} - Filtro [P_{93%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}]

Os resultados obtidos nos ensaios operados com taxa de 60 m.h⁻¹ são apresentados na Figura 65. O comportamento da curva de cor e da curva de turbidez foram similares em cada ensaio. Além disso, os dois ensaios foram bastante similares ao longo do tempo: os valores de turbidez iguais a 0,5 uT , 1,0 uT e 2,uT foram alcançados no ensaio R₁-T₆₀-E₁ em cerca de 89 min, 120 min e 153 min, respectivamente e no ensaio R₂-T₆₀-E₇ esses valores foram alcançados em cerca de 82 min,109 min e 151 min, respectivamente. O Teste - U de Mann-Whitney para esses dois ensaios mostrou que de fato, não houve diferença estatisticamente significativa entre eles (p-valor = 0,959).

Figura 65 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₁-T₆₀-E₁ e R₂-T₆₀-E₇; filtro [P_{93%}/D_{0,03 mm}/F_{Tipo2}].

Observou-se também que o comportamento das curvas de turbidez para essa taxa foi similar ao da curva $R_1-T_{60}-E_1[P_{93\%}/D_{0,03\text{ mm}}/F_{\text{Tipo1}}$], apresentada no item 5.2.1, como mostra a Figura 66. A similaridade foi confirmada pelo teste Kruskal-Wallis, que resultou num p-valor= 0,876, comprovando que não existe diferença estatisticamente significativa entre esses ensaios. Considerando que, tanto para o filtro de fundo F_{Tipo1} quanto para o filtro de fundo F_{Tipo2} , os leitos eram inicialmente iguais, ou seja, diferiam apenas no tipo de fundo utilizado, esses resultados indicam que, antes da sua primeira lavagem, o filtro F_{Tipo1} apresentou remoção de cor e turbidez muito similares às do filtro com fundo F_{Tipo2} .

Figura 66 – Comparação entre as curvas de turbidez obtidas nos filtros F_{Tipo1} e F_{Tipo2} , operados com taxa de 60 m.h^{-1} .

É importante ressaltar que o ensaio $R_1-T_{60}-E_1$ foi o primeiro ensaio realizado para esse leito, enquanto o ensaio $R_2-T_{60}-E_7$ foi o último. Assim, mesmo com os processos de lavagem ocorrido entre esses dois ensaios, o resultado mostrou-se similar. Portanto, isso indica que não houve emaranhamento das fibras e que, de fato, o orifício central existente no fundo de filtro F_{Tipo1} propiciou o processo de emaranhamento nos estudos feitos nos itens anteriores.

A Figura 67 mostra os valores de turbidez e cor obtidos para os ensaios realizados com taxa de 80 m.h^{-1} . O comportamento dos ensaios $R_1-T_{80}-E_3$ e $R_2-T_{80}-E_5$ foram similares tanto para a cor quanto para turbidez.

Os valores de turbidez iguais a $0,5\text{ uT}$, $1,0\text{ uT}$ e $2,0\text{ uT}$ foram alcançados em menor tempo no ensaio $R_1-T_{80}-E_3$ sendo iguais a $48,2\text{ min}$, $74,1\text{ min}$ e $95,3\text{ min}$, respectivamente, enquanto no ensaio $R_2-T_{80}-E_5$ esses valores foram alcançados em cerca de $21,7\text{ min}$, $42,8\text{ min}$ e $61,3\text{ min}$, respectivamente. Apesar disso, o Teste - U de Mann-Whitney mostrou que não existe diferença significativa entre os ensaios (p-valor = 0,212).

O teste de Kruskal-Wallis foi utilizado para comparar esses ensaios com o ensaio $R_1-T_{80}-E_2[P_{93\%}/D_{0,03mm}/F_{T_{ip}01}]$, apresentado no item 5.2.1. O resultado obtido foi que houve diferença significativa entre os ensaios ($p\text{-valor} = 0,046$). Além disso, no ensaio $R_1-T_{80}-E_2[P_{93\%}/D_{0,03mm}/F_{T_{ip}01}]$, a turbidez igual a 0,5 uT não foi atingida e os valores de turbidez igual a 1 uT e 2 uT foram atingidos aos 19,4 e 49,2 minutos. Esses valores são muito inferiores aos dois ensaios realizados nos filtro com fundo $F_{T_{ip}02}$ para a taxa de 80 m.h^{-1} , confirmando mais uma vez que a mudança do fundo do filtro evitou o emaranhamento do leite e, conseqüentemente, propiciou a melhora da qualidade da água filtrada.

Figura 67 – Valores de turbidez e cor da água filtrada em filtros de fibras referentes aos ensaios $R_1-T_{80}-E_3$ e $R_2-T_{80}-E_5$; filtro $[P_{93\%}/D_{0,03mm}/F_{T_{ip}02}]$,

A Figura 68 mostra os valores de turbidez e cor obtidos nos ensaios realizados com taxa de 100 m.h^{-1} . Apesar da turbidez inicial no ensaio $R_2-T_{100}-E_4$ ter sido um pouco mais alta do que no ensaio $R_1-T_{100}-E_2$, as curvas apresentam semelhança. A turbidez igual a 0,5 uT não foi atingida em nenhum dos ensaios e a turbidez igual a 2,0 uT foi alcançada aos 57,1 min no ensaio $R_1-T_{100}-E_2$ e aos 56,4 minutos no ensaio $R_2-T_{100}-E_4$. Já a turbidez igual a 1,0 uT só foi atingida no ensaio $R_1-T_{100}-E_2$ aos 30,9 minutos.

A partir dos resultados de turbidez obtidos, calculou-se uma curva média de turbidez para cada uma das taxas, conforme é apresentado na Figura 69. Pelo gráfico, percebe-se que a curva Média-T80 e Média-T60 mantiveram-se abaixo de 0,5 uT até os 30 minutos. A partir daí a curva Média-T80 sobe com velocidade maior do que a Média-T60, que se manteve abaixo de 0,5 uT até os 84 minutos. A curva Média-T100, por outro lado, não se sobrepôs às outras curvas. Entretanto, apresentou comportamento similar ao da taxa de 80 m.h^{-1} , principalmente após os 15 minutos.

Figura 68 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₁-T₁₀₀-E₂ e R₂-T₁₀₀-E₄; filtro [P_{93%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}].

Figura 69 – Valores médios de turbidez dos ensaios realizados para cada taxa (60, 80 e 100 m.h⁻¹); filtro [P_{93%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}]

As Figuras 70 a 75 mostram os valores de perda de carga por trecho ao longo de todos os ensaios realizados no filtro [P_{93%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}]. Em todos os gráficos é possível perceber que houve aumento da perda de carga no trecho 33-66 cm e no trecho 66-100 cm. Portanto, a remoção de partículas passou a ser mais significativa a partir dos 33 cm. Uma possível explicação para esse fato poderia estar relacionada a uma provável má distribuição do escoamento no início do filtro, apresentando regiões com espaços mortos. Dessa forma, os primeiros 33 cm de filtro poderiam ter a função de distribuir de forma mais homogênea as linhas de corrente do escoamento na seção transversal do filtro. Essa interpretação de caráter apenas especulativo demonstra a importância de se ter o comprimento maior ou igual a um metro, conforme mostrado nos estudos de Fagundes (2015) e Morita (2013). Isso indica a

necessidade de realização de estudos com vistas a melhor se conhecer a estrutura do escoamento nesse tipo de filtro, para diferentes tipos de fundo de filtro.

Figura 70 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [$P_{93\%}$ / $D_{0,03}$ mm / F_{Tipo2}] – Ensaio R₁-T₆₀-E₁

Figura 71 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [$P_{93\%}$ / $D_{0,03}$ mm / F_{Tipo2}] – Ensaio R₂-T₆₀-E₇

Figura 72 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [$P_{93\%}$ / $D_{0,03}$ mm / F_{Tipo2}] – Ensaio R₁-T₈₀-E₃

Figura 73 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [$P_{93\%}$ / $D_{0,03}$ mm / F_{Tipo2}] – Ensaio R₂-T₈₀-E₅

Figura 74 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [$P_{93\%}$ / $D_{0,03}$ mm / $F_{T_{ip}02}$] – Ensaio R₁-T₁₀₀-E₂

Figura 75 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [$P_{93\%}$ / $D_{0,03}$ mm / $F_{T_{ip}02}$] – Ensaio R₂-T₁₀₀-E₄

5.4.2. Resultado dos ensaios em filtro de fibras $D_{0,03\text{mm}}$, $P_{93\%}$ - Filtro [$P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{T_{ip}02}$]

Os valores de turbidez e cor da água filtrada obtidos nos ensaios operados com taxa de 80 m.h^{-1} estão apresentados na Figura 76. Apesar de alguma oscilações na curva R₂-T₈₀-E₅, o comportamento dos ensaios foi similar ao longo do tempo, conforme resultado obtido pelo teste-T aplicado para comparação dos dois ensaios ($P\text{-valor} = 0,478$).

Figura 76 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios R₁-T₈₀-E₃ e R₂-T₈₀-E₅; filtro [$P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{T_{ip}02}$].

Devido às oscilações no ensaio R₂-T₈₀-E₅, o tempo gasto para atingir turbidez iguais a 0,5 uT, 1,0 uT e 2,0 uT foi diferente nos ensaios: 48,2 min, 74,1 min e 95,3 min, respectivamente, para o ensaio R₁-T₆₀-E₆ e 21 min, 42,8 min e 61,3 min, respectivamente, para o ensaio R₂-T₈₀-E₅.

Comparando os resultados dos ensaios operados na taxa de 80 m.h⁻¹ com os ensaios R₁-T₈₀-E₁[P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] e R₂-T₈₀-E₂[P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}], primeiros ensaios apresentado no item 5.2.1 antes do emaranhamento do leito, observou-se que o comportamento dos filtros é igual. O teste de Kruskal-Wallis aplicado nesses quatro ensaios mostrou que de fato os ensaios são semelhantes. (p-valor = 0,864). O comportamento das curvas pode ser visto na Figura 77.

Figura 77 – Valores de turbidez para os ensaios com taxa de 80 m.h⁻¹ em filtros P84% e fundo de filtro F_{Tipo1} e F_{Tipo2}.

Considerando que os leitos eram iguais, diferindo apenas no tipo de fundo utilizado, isso indica que essa é a capacidade de remoção desse leito para a taxa de 80 m.h⁻¹.

Ressalta-se que o ensaio R₁-T₈₀-E₃ foi terceiro a ser realizado para esse leito e, portanto, houveram duas lavagens do filtro antes desse ensaio. O ensaio R₂-T₈₀-E₅ foi feito em ensaio depois, ou seja, houveram dois processos de lavagem antes dele. Mesmo assim, os ensaios mantiveram-se com remoções similares de turbidez e cor. Isso demonstra que não houve emaranhamento das fibras e que, de fato, o orifício central existente no fundo de filtro F_{tipo1} causou o emaranhamento de fibras do leito verificado nos estudos discutidos nos itens anteriores.

A Figura 78 mostra os valores de turbidez e cor da água filtrada obtidos nos ensaios operados com taxa de 60 m.h^{-1} . Os dois ensaios foram similares ao longo do tempo. Os valores turbidez igual 0,5 uT, 1,0 uT e 2,0 uT foram alcançados aos 41,0 min, 55,8 min e 93,6 min, respectivamente, no ensaio $R_1\text{-T}_{60}\text{-E}_6$ e aos 36,9 min, 61,2 min e 94,7 min, respectivamente, no ensaio $R_2\text{-T}_{60}\text{-E}_7$.

Além disso, o teste-t aplicado nesses dois ensaios mostrou que não existe diferença estatisticamente significativa entre eles (P-valor = 0,723).

Figura 78 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1\text{-T}_{60}\text{-E}_6$ e $R_2\text{-T}_{60}\text{-E}_7$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo2}}]$.

A Figura 79 mostra os valores de turbidez e cor da água filtrada obtidos nos ensaios operados com taxa de 100 m.h^{-1} .

Figura 79 – Valores de turbidez e cor da água filtrada, referentes aos ensaios $R_1\text{-T}_{100}\text{-E}_2$ e $R_2\text{-T}_{100}\text{-E}_4$; filtro $[P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo2}}]$.

Assim como para as outras taxas, os dois ensaios foram similares ao longo do tempo. Os valores turbidez igual 0,5 uT, 1,0 uT e 2,0 uT foram alcançados aos 39,5 min, 53,6 min e 67,7min, respectivamente, no ensaio $R_1-T_{100}-E_2$ e aos 41,0 min, 49,9 min e 57,5 min, respectivamente, no ensaio $R_2-T_{100}-E_4$.

A similaridade entre os ensaios foi comprovada pelo Teste - U de Mann-Whitney, que mostrou que não existe diferença estatisticamente significativa entre eles (P-valor = 0,862).

A partir dos resultados de turbidez obtidos, calculou-se uma curva média de turbidez para cada uma das taxas, conforme é apresentado na Figura 80. Pelo gráfico, é possível perceber que praticamente não houve diferença entre a curva Média-T80 e a Média-T60. A produção de água com turbidez menor ou igual a 0,5 uT ocorreu por cerca de 37 minutos. A partir daí a curva Média-T80 sobe com velocidade maior do que a Média-T60, que se manteve abaixo de 0,5 uT até os 84 minutos.

A curva Média-T100, por outro lado, não se sobrepôs às outras curvas. Entretanto, apresentou comportamento similar ao das outras taxas. A qualidade da água filtrada foi um pouco inferior à das outras taxas, mantendo-se com turbidez menor ou igual a 1,0 uT dos 6 min aos 21,4 min e com turbidez menor ou igual a 2,0 uT até os 56,9 min. Valores de turbidez menor ou igual a 0,5 uT não foram alcançados para a taxa de 100 $m.h^{-1}$.

Figura 80 – Valores médios de turbidez dos ensaios realizados para cada taxa (60, 80 e 100 $m.h^{-1}$)

As Figuras 81 a 86 mostram os valores de perda de carga por trecho ao longo de cada ensaio para o filtro $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}]$. Em todos os gráficos é possível perceber que houve comportamento atípico da perda de carga, com aumento expressivo desse parâmetro no trecho 66-100 cm e diminuição expressiva do mesmo no trecho 33-66 cm. A diminuição da perda de

carga nesse trecho poderia indicar um caminhamento de impurezas desse trecho para o trecho seguinte. Entretanto, para que isso ocorresse, a perda de carga total deveria aumentar significativamente ao longo do tempo, ao contrário do que ocorreu nesses ensaios.

Outra possibilidade seria alguma falha durante a operação ou mesmo a presença de bolhas nos filtros. Porém, ressalta-se que esse problema não foi identificado no filtro com leito $[P_{93\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo2}}]$ operado simultaneamente com o filtro em questão.

A explicação para a não utilização dos primeiros 33 cm seria a mesma mencionada para os filtros $[P_{93\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo2}}]$, no item 5.4.1, de que houve uma provável má distribuição do escoamento no início do filtro, apresentando regiões com espaços mortos. Dessa forma, os primeiros 33 cm de filtro poderiam ter a função de distribuir de forma mais homogênea as linhas de corrente do escoamento na seção transversal do filtro.

Figura 81 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%} / D_{0,03 \text{ mm}} / F_{\text{Tipo2}}]$ – Ensaio R₁-T₆₀-E₆

Figura 82 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%} / D_{0,03 \text{ mm}} / F_{\text{Tipo2}}]$ – Ensaio R₂-T₆₀-E₇

Figura 83 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%} / D_{0,03} mm / F_{Tipo2}] – Ensaio R₁-T₈₀-E₃

Figura 84 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%} / D_{0,03} mm / F_{Tipo2}] – Ensaio R₂-T₈₀-E₅

Figura 85 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%} / D_{0,03} mm / F_{Tipo2}] – Ensaio R₁-T₁₀₀-E₂

Figura 86 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%} / D_{0,03} mm / F_{Tipo2}] – Ensaio R₂-T₁₀₀-E₄

5.4.3. Análise das amostras compostas

A Tabela 17 mostra a média dos valores de turbidez, Condutividade, Abs254 nm, COT e SST das amostras compostas referentes aos ensaios com filtro de fundo F_{Tipo2}. Foram analisadas as compostas para três valores de turbidez: 0,5 uT, 1,0 uT e 2,0 uT.

As duas porosidades apresentaram valores médios análogos em todas as variáveis analisadas, independente das compostas. Comparando os resultados das compostas com os da água bruta, percebe-se que houve um leve aumento da condutividade, provavelmente devido à adição do coagulante sulfato de alumínio à água de estudo. Com relação às outras variáveis, houve uma grande redução dos valores em relação à água bruta, resultado que condiz com as curvas de remoção de turbidez e cor apresentadas neste trabalho.

Tabela 17 – Média dos valores de turbidez, Condutividade, Abs254, COT e SST das amostras compostas por taxa e porosidade; Filtro F_{Tipo2}.

Composta	Taxa-Porosidade	Turbidez (uT)	Condutividade ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	Abs 254nm	COT (mg.L^{-1})	SST (mg.L^{-1})
Bruta	-	9,31 $\pm$ 0,62	51,36 $\pm$ 2,02	0,228 $\pm$ 0,044	0,37 $\pm$ 0,02	12,69 $\pm$ 0,84
0,5 uT	T ₆₀ -P ₉₃	0,335 $\pm$ 0,02	59,27 $\pm$ 2,18	0,022 $\pm$ 0,003	0,14 $\pm$ 0,01	0,46 $\pm$ 0,03
	T ₈₀ -P ₉₃	0,437 $\pm$ 0,08	56,16 $\pm$ 1,47	0,014 $\pm$ 0,008	0,14 $\pm$ 0,02	0,60 $\pm$ 0,11
	T ₁₀₀ -P ₉₃	-	-	-	-	-
	T ₆₀ -P ₈₄	0,252 $\pm$ 0,02	58,21 $\pm$ 0,64	0,015 $\pm$ 0,004	0,16 $\pm$ 0,00	0,34 $\pm$ 0,03
	T ₈₀ -P ₈₄	0,422 $\pm$ 0,1	56,09 $\pm$ 1,22	0,014 $\pm$ 0,004	0,14 $\pm$ 0,02	0,57 $\pm$ 0,14
	T ₁₀₀ -P ₈₄	0,367 $\pm$ 0,08	56,22 $\pm$ 1,7	0,018 $\pm$ 0,009	0,12 $\pm$ 0,01	0,50 $\pm$ 0,11
1,0 uT	T ₆₀ -P ₉₃	0,426 $\pm$ 0,03	59,10 $\pm$ 2,56	0,014 $\pm$ 0,000	0,11 $\pm$ 0,02	0,58 $\pm$ 0,04
	T ₈₀ -P ₉₃	0,507 $\pm$ 0,14	56,16 $\pm$ 1,26	0,019 $\pm$ 0,002	0,14 $\pm$ 0,01	0,69 $\pm$ 0,2
	T ₁₀₀ -P ₉₃	0,701	55,98	0,018	0,15	0,96
	T ₆₀ -P ₈₄	0,518	57,74	0,015	0,13	0,71
	T ₈₀ -P ₈₄	0,362	55,43	0,014	0,13	0,49
	T ₁₀₀ -P ₈₄	0,481 $\pm$ 0,03	56,36 $\pm$ 1,39	0,010 $\pm$ 0,000	0,12 $\pm$ 0,03	0,66 $\pm$ 0,04
2,0 uT	T ₆₀ -P ₉₃	0,809 $\pm$ 0,13	59,42 $\pm$ 2,33	0,018 $\pm$ 0,007	0,12 $\pm$ 0,01	1,10 $\pm$ 0,17
	T ₈₀ -P ₉₃	0,755 $\pm$ 0,09	56,47 $\pm$ 1,17	0,014 $\pm$ 0,003	0,13 $\pm$ 0,00	1,03 $\pm$ 0,12
	T ₁₀₀ -P ₉₃	1,355 $\pm$ 0,4	56,50 $\pm$ 1,24	0,015 $\pm$ 0,006	0,12 $\pm$ 0,00	1,85 $\pm$ 0,55
	T ₆₀ -P ₈₄	0,815 $\pm$ 0,11	57,55 $\pm$ 0,39	0,011 $\pm$ 0,003	0,13 $\pm$ 0,01	1,11 $\pm$ 0,14
	T ₈₀ -P ₈₄	0,722 $\pm$ 0,29	56,23 $\pm$ 1,46	0,013 $\pm$ 0,006	0,13 $\pm$ 0,02	0,98 $\pm$ 0,4
	T ₁₀₀ -P ₈₄	1,01	55,80	0,023	0,14	1,38

5.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS FILTROS ESTUDADOS

A comparação entre os filtros foi feita considerando a sua potencialidade técnica em ser utilizado com unidade de filtração direta ou como unidade de pré-filtração, determinada pelos critérios de produção de água filtrada respeitando os valores limites de turbidez iguais a 0,5 uT e 2,0 uT, respectivamente.

Considerando os resultados obtido na Etapa 2, observou-se que o filtro $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$ obteve problemas de emaranhamento, não sendo indicado o seu uso como unidade de filtração direta nem como pré-filtro, dada a sua inconstância nos resultados e dificuldade de operação.

Os filtros $[P_{84\%}/D_{0,32mm}/F_{Tipo1}]$ apesar de não apresentarem emaranhamento, não atingiram turbidez menor que 2,0 uT em nenhum momento dos ensaios. Portanto, o filtro com essa configuração, operando com taxas entre 60 e 100 $m.h^{-1}$, também não é indicada como unidade de pré-filtração.

Já os filtros $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$, mesmo apresentando emaranhamentos, conseguiu repetibilidade dos ensaios e garantiu turbidez menor do que 2,0 uT por tempo considerado satisfatório para esse tipo de filtro.

Na Etapa 4, tanto o filtro $[P_{93\%}/D_{0,32mm}/F_{Tipo2}]$ quanto o $[P_{84\%}/D_{0,32mm}/F_{Tipo2}]$ apresentaram resultados satisfatórios para os dois valores limites de turbidez estabelecidos.

Portanto, na análise comparativa entre os filtros investigados, apresentada no item a seguir, em um primeiro momento é apresentada a comparação entre os filtros com fundo F_{Tipo2} com base nos dois critérios de valor limite de turbidez pré-estabelecidos.

Em seguida, é feita comparação entre esses filtros e o filtro $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$, considerando limite de turbidez igual a 2,0 uT. Para esse último filtro, utilizou-se apenas os resultados obtidos após desemaranhamento das fibras do filtro.

Os critérios de comparação utilizados foram o volume produzido e a porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem. A comparação foi feita considerando carreiras de filtração finalizadas ao atingir turbidez 0,5 uT, e 2,0 uT para cada ensaio. A duração da carreira correspondente a esses valores de turbidez foi obtida por interpolação das curvas de turbidez apresentadas neste trabalho.

Como mencionado na metodologia, item 4.3, não foram feitos testes de otimização da lavagem. Portanto adotou-se o melhor modo de lavagem desenvolvido por Morita (2013):

5 estágios, cada um com três segundos de aplicação de ar e seis segundos de aplicação de água (vazão=180 L.h⁻¹).

5.5.1. Comparação entre os volumes diários de água produzidos nos filtros F_{Tipo2} – filtros $[P_{93\%}/D_{0,32\text{mm}}/F_{\text{Tipo2}}]$ e $[P_{84\%}/D_{0,32\text{mm}}/F_{\text{Tipo2}}]$

O volume diário de água produzido é uma combinação de diversos fatores, dentre eles, a vazão de filtração, duração da carreira, número de operações realizadas e o volume de água gasto na lavagem. Para facilitar a leitura das tabelas desse item foram feitas algumas abreviações nos nomes das variáveis apresentadas a seguir:

N = número de carreiras em um dia

Vol_{filt} = o volume de água produzido em uma carreira de filtração,

Vol_{lav} = volume de água gasto em uma lavagem e

$\text{Vol}_{\text{ext-24h}}$ = volume diário de produção estimado por extrapolação (em 24h).

Média $\text{Vol}_{24\text{h}}$ = média dos volumes de água produzidos em 24h em cada ensaio, para mesma taxa e mesmo tipo de filtro.

P = porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (%), que indica a porcentagem do volume de água de lavagem pelo volume de água produzido em uma carreira de filtração.

A Tabela 18 mostra os resultados dos cálculos de volume obtidos em todos os ensaios, considerando turbidez igual a 0,5 uT. Os ensaios da taxa de 100 m.h⁻¹, no filtro $[P_{93\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo2}}]$, não foram capazes de produzir água filtrada com valores de turbidez menores ou iguais ao valor limite pré-estabelecido.

O maior volume diário obtido foi com taxas de 100 m.h⁻¹, no filtro $[P_{84\%}/D_{0,03\text{mm}}/F_{\text{Tipo2}}]$. Mesmo que as durações das carreiras tenham sido baixas nesses ensaios, existe o fato da vazão ser mais alta que as demais, fazendo uma compensação no resultado final. Além disso, valores baixos no tempo de carreira possibilita com que mais carreiras sejam realizadas por dia, ao custo de um maior consumo de água na lavagem devido ao número de processos de lavagem. Nesse caso específico, o volume gasto não foi excessivo, já

que a porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P) foi de 5,5% e 5,3% para as repetições dessa taxa.

Tabela 18 – Volume diário de produção estimado por extrapolação ($V_{\text{ext-24h}}$) e valor da porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P) por ensaio considerando turbidez na água filtrada igual a 0,5 uT

Filtro	Ensaio	t_{carreira} (min)	Q (L/min)	Vol. _{filt} (L)	N	Vol. _{lav} (L)	Vol. _{ext-24h} (L)	P (%)	Média Vol. _{24h} (L)
[P _{93%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo2}]	R ₁ -T ₆₀ -E ₁	86,9	0,6	53,5	16,4	24,64	854,46	2,88	853,49
	R ₂ -T ₆₀ -E ₇	81,9	0,6	50,4	17,4	26,13	852,51	3,06	
	R ₁ -T ₈₀ -E ₃	48,2	0,8	39,6	29,4	44,15	1119,98	3,94	1083,38
	R ₂ -T ₈₀ -E ₅	21,7	0,8	17,8	64,0	96,04	1046,78	9,17	
	R ₁ -T ₁₀₀ -E ₂	*	*	*	*	*	*	*	*
	R ₂ -T ₁₀₀ -E ₄	*	*	*	*	*	*	*	
[P _{84%} /D _{0,03mm} /F _{Tipo2}]	R ₁ -T ₆₀ -E ₆	41,1	0,6	25,3	34,4	51,67	819,10	6,31	815,34
	R ₂ -T ₆₀ -E ₇	36,9	0,6	22,7	38,3	57,42	811,58	7,08	
	R ₁ -T ₈₀ -E ₃	36,8	0,8	30,2	38,3	57,49	1101,16	5,22	1093,63
	R ₂ -T ₈₀ -E ₅	30,9	0,8	25,4	45,4	68,15	1086,11	6,28	
	R ₁ -T ₁₀₀ -E ₂	39,5	1,0	40,6	35,7	53,60	1396,70	3,84	1398,15
	R ₂ -T ₁₀₀ -E ₄	41,0	1,0	42,1	34,5	51,68	1399,61	3,69	

Nota: Os ensaios da taxa de 100 m.h⁻¹, no filtro [P_{93%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}], não foram capazes de produzir água filtrada com valores de turbidez menores ou iguais ao valor limite pré-estabelecido

Comparando-se as duas porosidades, nota-se que para a taxa de 60 m.h⁻¹, as repetições do filtro [P_{93%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}] apresentaram tempo de carreira e, consequentemente, Vol._{filt} maiores do que as repetições do filtro P_{84%}. Mesmo que o volume diário final tenha sido próximo, foram feitas mais lavagens no filtro [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}], resultando em um gasto maior com a lavagem nesse filtro. Esse gasto é caracterizado pela porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P), que para esse filtro foi de 8,9% e 9,9%, enquanto no filtro P_{93%} foi de 4,2% e 4,5%.

Por outro lado, nos ensaios realizados com taxa de 80 m.h⁻¹ os comportamentos dos filtros foram similares. Ressalta-se que essa taxa de filtração proporcionou os melhores resultados para o filtro [P_{93%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}].

Em relação às taxas de filtração, observou-se que o volume diário de produção estimado por extrapolação ($Vol_{ext-24h}$) aumentou com o aumento das taxas. Esse resultado é o mesmo encontrado na literatura, como mencionado no item 3.

Esses resultados mantiveram-se mesmo aumentando o valor de turbidez para 2,0 uT, como pode ser visto na Tabela 19. O melhor resultado continuou sendo na taxa de 100 m.h⁻¹, nesse caso, não apenas para o filtro P_{84%}, mas também para o filtro P_{93%}. Para essa taxa as médias dos valores de $Vol_{ext-24h}$ foram praticamente iguais nos dois filtros: 1402,2 L [$P_{93\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}$] e 1408,7 L [$P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}$].

Tabela 19 – Volume diário de produção estimado por extrapolação ($V_{ext-24h}$) e valor da porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P) por ensaio considerando turbidez na água filtrada igual a 2,0 uT

Filtro	Ensaio	$t_{carreira}$ (min)	Q (L/min)	Vol. _{filt} (L)	N	Vol. _{lav} (L)	Vol. _{ext-24h} (L)	P (%)	Média Vol. _{24h} (L)
[$P_{93\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}$]	R ₁ -T ₆₀ -E ₁	153,3	0,6	94,4	9,3	14,02	868,35	1,61	868,23
	R ₂ -T ₆₀ -E ₇	151,3	0,6	93,2	9,5	14,20	868,11	1,64	
	R ₁ -T ₈₀ -E ₃	95,3	0,8	78,3	15,0	22,48	1150,53	1,95	1141,83
	R ₂ -T ₈₀ -E ₅	61,3	0,8	50,3	23,2	34,82	1133,13	3,07	
	R ₁ -T ₁₀₀ -E ₂	57,1	1,0	58,6	24,9	37,31	1421,35	2,62	1421,00
	R ₂ -T ₁₀₀ -E ₄	56,4	1,0	57,9	25,2	37,78	1420,64	2,66	
[$P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo2}$]	R ₁ -T ₆₀ -E ₆	93,6	0,6	57,7	15,3	22,89	856,75	2,67	856,92
	R ₂ -T ₆₀ -E ₇	94,7	0,6	58,3	15,1	22,63	857,09	2,64	
	R ₁ -T ₈₀ -E ₃	71,3	0,8	58,5	20,0	29,98	1139,96	2,63	1138,22
	R ₂ -T ₈₀ -E ₅	65,8	0,8	54,0	21,6	32,44	1136,48	2,85	
	R ₁ -T ₁₀₀ -E ₂	67,7	1,0	69,5	21,0	31,55	1430,07	2,21	1425,88
	R ₂ -T ₁₀₀ -E ₄	57,5	1,0	59,0	24,7	37,08	1421,70	2,61	

A porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P) do filtro, em todos os ensaios, mostrou-se muito menor para esse valor de turbidez do que para turbidez de 0,5 uT. Esse resultado, juntamente com o volume de água produzido, mostra o grande potencial dos filtros não só para o emprego em sistemas de filtração direta, como também em unidades de pré-filtração.

Ressalta-se, contudo, a necessidade de se avaliar a melhor condição de lavagem para os filtros em estudo. Dependendo das condições de lavagem, esses resultados poderão eventualmente sofrer variações.

5.5.1.1. Comparação entre os valores de volumes diários de produção estimado por extrapolação ($V_{ext-24h}$) e valor da porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P) nos filtros F_{Tipo2} e filtro $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ em função da taxa de filtração

A Tabela 20 mostra os valores de $Vol_{ext-24h}$ e de (P) calculados para os ensaios realizados para o filtro $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ em função dos valores de taxa de filtração investigados. Nesse filtro, o valor de $Vol_{ext-24h}$ aumentou com o crescimento da taxa de filtração. O maior volume médio produzido foi, portanto para a taxa de 100 m.h^{-1} , com produção de 1372,08 L.

Esse resultado corrobora com o resultado encontrado para os filtros com fundo F_{Tipo2} , apresentado nesse mesmo item. Ambos apresentaram o mesmo aumento da produção diária de água com o aumento da taxa e valores de volume de água bem próximos. Os valores de perda de lavagem foram ligeiramente maiores para o filtro $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ em algumas taxas, mas ainda assim, apresentaram valores abaixo de 7%.

Portanto, da mesma forma que os filtros F_{Tipo2} , o filtro $[P_{84\%}/D_{0,11mm}/F_{Tipo1}]$ mostrou grande potencial para ser empregado em unidades de pré-filtração. Ressalta-se, entretanto, a necessidade de se realizar estudos mais aprofundados sobre o comportamento desse leito com outros fundos de filtro, para avaliar a influência do emaranhamento.

Tabela 20 – Volume diário de produção estimado por extrapolação ($V_{\text{ext-24h}}$) e valor da porcentagem estimada de consumo de água no processo de lavagem (P) por ensaio considerando turbidez na água filtrada igual a 2,0 - filtro $[P_{84\%}/D_{0,1\text{mm}}/F_{\text{Tipo2}}]$

Filtro	Ensaio	t _{carreira} (min)	Q (L.min ⁻¹)	Vol. _{fill} (L)	N	Vol. _{lav} (L)	V _{ext-24h} (L)	P (%)	Média Vol. _{24h} (L)
[P _{84%} /D _{0,11mm} /F _{Tipo1}]	R3-T60	88,71	0,62	54,62	16,10	24,15	855,10	2,82	840,76
	R4-T60	71,46	0,62	44,00	19,94	29,91	847,56	3,53	
	R5-60	41,36	0,62	25,47	34,19	51,29	819,60	6,26	
	R5-T80	93,14	0,82	76,47	15,34	23,01	1149,79	2,00	1135,72
	R6-T80	66,25	0,82	54,39	21,49	32,24	1136,77	2,84	
	R7-T80	48,68	0,82	39,97	29,13	43,70	1120,61	3,90	
	R4-T100	40,67	1,03	41,74	34,76	52,14	1398,90	3,73	
	R5-T100	23,91	1,03	24,54	58,40	87,60	1345,26	6,51	

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando os resultados apresentados no item 5 conclui-se que:

- O fundo do filtro mostrou-se de extrema importância para o bom funcionamento de filtros com fibras flexíveis, principalmente quando dotados de fibras com diâmetros menores do que 0,11 mm. Para configurações de fundo de filtro inadequadas, como a F_{Tipo1} utilizada nesse trabalho, dependendo do diâmetro das fibras, emaranhamentos podem ocorrer no leito, causando prejuízo marcante ao desempenho da filtração. A mudança para o fundo F_{Tipo2} solucionou o problema dos emaranhamentos e possibilitou a obtenção de resultados consistentes, estabilidade operacional e repetibilidade dos ensaios.
- Os resultados dos ensaios com leitos de fibras $D_{0,03\text{mm}}$ e fundo F_{Tipo1} sofreram grande interferência do emaranhamento, comprometendo a eficiência de remoção de turbidez e cor. Essa interferência foi menos intensa nos ensaios em filtros com leito composto por fibras $D_{0,11\text{mm}}$ e fundo F_{Tipo1} , já que houve pouca variação na eficiência de remoção. Já nos leitos com fibras $D_{0,32\text{mm}}$, não houve emaranhamento. Assim, pode-se concluir que quanto menor o diâmetro da fibra maior é a tendência ao emaranhamento caso não se utilize fundos de filtro com concepção adequada para evitar o emaranhamento dessas fibras de pequeno diâmetro.
- O filtro com fibras $D_{0,11\text{mm}}$ e fundo F_{Tipo1} atingiu valores de turbidez menores ou iguais a 0,5 uT em apenas alguns momentos durante os ensaios, não sendo suficiente a sua utilização como unidade de filtração direta em tratamentos de água para abastecimento humano. Por outro lado, houve produção de água com turbidez menor ou igual a 2,0 uT em todos os ensaios por bastante tempo, o que torna o leito viável operacionalmente para ser utilizado como unidade de pré-filtração. Estudos adicionais são recomendáveis no futuro com vistas a se determinar o comportamento dos filtros com fibras $D_{0,11\text{mm}}$ associado ao fundo F_{Tipo2} que evitaria seu emaranhamento parcial.
- O filtro com fibras $D_{0,32\text{mm}}$ e fundo F_{Tipo1} não obteve qualidade satisfatória para ser usado como filtro nem como pré-filtro, já que os valores de turbidez obtidos foram superiores a 2,0 uT em todos os ensaios. Como o leito não está sujeito a emaranhamentos, o que facilita a sua manutenção e durabilidade, e considerando a

baixa perda de carga ao longo dos ensaios, uma sugestão para trabalhos futuros seria aumentar a densidade de fibras no filtro e avaliar se ocorre melhora na qualidade da água filtrada. Ou ainda, avaliar como o filtro se comportaria com água bruta com outras características.

- Para água sintética de turbidez média de 9,31 uT e cor aparente média de 81,15 uC, os dois filtros de fibras de poliamida $D_{0,03\text{mm}}$ com fundo F_{Tipo2} e porosidades 93% e 84%, respectivamente, foram capazes de produzir água filtrada com turbidez abaixo de 0,5 uT nas taxas estudadas (60, 80 e 100m.h^{-1}). Entretanto, o filtro de 93% de porosidade, não atingiu a turbidez mínima de 0,5 uT quando operado com taxa de 100 m h^{-1} , indicando que filtros com fundo F_{tipo2} e $D_{0,03\text{mm}}$ para porosidades de leito muito elevadas (93%) deve-se adotar taxas com valores abaixo de 100 m h^{-1} .
- Dentre todas as configurações de filtro de fibras flexíveis estudadas, o filtro F_{Tipo2} com fibras $D_{0,03\text{mm}}$ e leito com porosidade de 84%, tendo como base o limite de turbidez de 0,5 uT, operado com taxa de 100 m.h^{-1} apresentou o melhor desempenho, produzindo o maior valor estimado de volume líquido diário, com uma porcentagem estimada de gasto de água para lavagem em torno de 5,4%.
- Para o limite de turbidez de 2,0 uT, os filtro de fibras de $D_{0,03\text{mm}}$ (porosidade 84% e 93%) e o filtro de $D_{0,11\text{ mm}}$ (porosidade 84%) apresentaram produtividade similar em todas as taxas de filtração estudadas, sendo maior na taxa de 100 m.h^{-1} .
- Não houve diferença significativa em relação à produtividade dos filtros quando se compara as duas porosidades estudadas (84% e 93%).

Sugere-se para estudos posteriores:

- Avaliação aprofundada de novas configurações de fundos de filtro, que garantam distribuição mais homogênea da água afluente do filtro e que evitem o emaranhamento das fibras;
- Avaliação da eficiência de remoção de cor e turbidez dos filtros com fibra $D_{0,11\text{mm}}$ e $D_{0,32\text{mm}}$ em outras porosidades;
- Avaliação da eficiência de remoção de cor e turbidez dos filtros de fibras flexíveis com outros coagulantes;
- Estudos aprofundados sobre o procedimento adequado para a lavagem dos filtros com fundo F_{Tipo2} ;

- Estudo do escoamento hidrodinâmico do leite, tanto durante a operação do filtro quanto na lavagem;
- Estudos da distribuição do tamanho de partículas na água efluente dos filtros de fibras de poliamida com fundo F_{Tipo2} , com o objetivo de remover microrganismos patogênicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAFAS. Associação Brasileira de Produtores de Fibras Artificiais e Sintéticas. Disponível em < <http://www.abrafas.org.br/fibras/manufaturadas.html>.> Acesso em 29 de julho de 2016.

APHA (American Public Health Association), American Water Works Association, Water Environment Federation. Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater, Ed.: 22nd, Washington, DC. 2012

ARBOLEDA, J. 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 Salud.

ALFIERI, P. Apostila de Fibras Têxteis I - Fibras Naturais e Artificiais. Centro Universitário da FEI. São Paulo/SP. 199p. 2010

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, n2, p.245-256, abr/jun 2009.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, 12 de Dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

CHA, J.; LEE, J.; BENAİM, R.; MOON, T.; HAN, K; KIM, C. Flexible fiber filter: potential for algae removal. **Water Supply: Research and technology AQUA**, 58.2, 153-157, 2009.

DI BERNARDO, L. (Coord.) et al. Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta, PROSAB 3. ABES pp. 480. São Carlos 2003.

FACTORI, I. M.; Processamento e propriedades de compósitos de poliamida 6.6 reforçada com partículas de vidro reciclado. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo /SP.

FAGUNDES, T.S. Emprego de Filtro de Fibras Flexíveis constituído de Fibras de Algodão Mercerizado e Poliéster na clarificação de água para abastecimento. 2015. Dissertação

(mestrado em Ciências).Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP.

HIPERMETAL COMÉRCIO E INDÚSTRIA LTDA. Disponível em<http://www.hipermetal.com.br/site/produtos/plasticos_industriais/Nylon.pdf> Acesso em 20 de julho de 2016.

LEE, J.J; CHA, J.H; BEN AIM, R.; HAN, K.B; KIM, C.W. Fiber filter as an alternative to the process of flocculation-sedimentation for water treatment. **Desalination**, 231, 323-331, 2008a.

LEE, J.J; CHA, J.H; BEN AIM, R.; HAN, K.B; KIM, C.W. Toward and Optimization of the backwashing process in the flexible fiber filter. **Separation Science and Technology**, 43, 1667-1676, 2008b.

LEE, J.J; Jeong. M.K.; Im, J.H; BEN AIM, R.; Kim, J.R.; Poo, K.M.; KIM, C.W. Better understanding of the filtration characteristics in the fibre filter module (3FM). **Water Science and Technology**. Vol. 55, n. 1-2, 77-83, 2007.

LEE, J.J; Jeong. M.K.; Im, J.H; BEN AIM, R.; Lee, S.H.; Oh, J.E; Woo, H.J.; KIM, C.W Enhancing flexible fiber filter (3FM) performance using in-line coagulation. **Water Science and Technology**. Vol. 53, n. 7, 59-66, 2006.

MAUCHAUFFÉE, S. et al. **New technologies or innovative treatment lines for reliable water treatment for P&P and minimization of waste production**. 2012. Disponível em <<http://www.aquafit4use.eu/userdata/file/Public%20results/AquaFit4Use%20-%20Innovative%20Treatment%20Lines%20for%20Pulp%20%20Paper.pdf>> Acesso 22 de janeiro de 2015.

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). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

PEREZ, F. P. Influência da taxa de filtração em filto de fibra flexível de poliéster na clarificação de efluente sintético de reator anaeróbio. 2015. Monografia. \escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

REALI, M.A.P; PAZ, L.P.S; DANIEL, L. (2012). Tratamento de Água para Consumo Humano. In: CUNHA, D.G.F E CALIJURI, M.C. (Coord.).**Engenharia Ambiental**. Editora Elsevier-Campus, Brasil.1600 p.

TRUSSEL, 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.

APÊNDICE A

1. Valores de perda de carga mensurados para o filtro $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$.

Figura 87 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₁-T₈₀-E₁

Figura 88 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₂-T₈₀-E₂

Figura 89 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₃-T₈₀-E₃

Figura 90 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₁-T₁₀₀-E₄

Figura 91 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tip01}] – Ensaio R₂-T₁₀₀-E₅

Figura 92 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,031mm}/F_{Tip01}] – Ensaio R₃-T₁₀₀-E₆

Figura 93 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tip01}] – Ensaio R₄-T₈₀-E₇

Figura 94 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tip01}] – Ensaio R₅-T₈₀-E₈

Figura 95 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₁-T₆₀-E₁₀

Figura 96 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₂-T₆₀-E₁₁

Figura 97 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₆-T₈₀-E₁₂

Figura 98 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras $[P_{84\%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}]$ – Ensaio R₇-T₈₀-E₁₄

Figura 99 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R4-T100-E15

Figura 100 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R3-T60-E16

Figura 101 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R8-T80-E17

Figura 102 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R5-T100-E18

Figura 103 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R4-T60-E19

Figura 104 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R9-T80-E20

Figura 105 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R6-T100-E21

Figura 106 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P_{84%}/D_{0,03mm}/F_{Tipo1}] – Ensaio R6-T60-E22

1. Valores de perda de carga referentes ao ensaio R₂-T₈₀-E₈ – filtro [P₈₄%/D_{0,32}mm/F_{Tipo1}].

Figura 107 – Perda de carga por trecho ao longo dos filtros de fibras [P₈₄%/D_{0,11}mm/F_{Tipo1}] – Ensaio R1-T100-E5