

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

FILIPE PASQUALINI PEREZ

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE FILTRAÇÃO EM FILTRO DE
FIBRA FLEXÍVEL DE POLIÉSTER NA CLARIFICAÇÃO DE
EFLUENTE SINTÉTICO DE REATOR ANAERÓBIO.**

SÃO CARLOS, SP

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

Influência da taxa de filtração em filtro de fibra flexível de poliéster na clarificação de efluente sintético de reator anaeróbio.

Aluno: Filipe Pasqualini Perez
Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali
Co-orientadora: Eloá Cristina Figueirinha Pelegrino

Monografia apresentada ao curso de graduação de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

São Carlos, SP

2015

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.

P438i Peres, Filipe Pasqualini
Influência da taxa de filtração em filtro de fibra
flexível de poliéster na clarificação de efluente
sintético de reator anaeróbio / Filipe Pasqualini
Peres; orientador Marco Antonio Penalva Reali. São
Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2015.

1. Tratamento de esgoto. 2. Filtração. 3. Filtro de
fibras flexíveis. 4. Água de reúso. 5. Poliéster. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Filipe Pasqualini Perez

Data da Defesa: 29/10/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Marco Antonio Penalva Reali (Orientador(a))

Aprovado

Luiz Antonio Daniel

Aprovado

Leila Patrício de Carvalho

Aprovado Leila Patrício de Carvalho

Prof. Dr. Marcos Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091 - Trabalho de Graduação

Dedico esse trabalho a todos que investem seus esforços para melhorar o quadro de saneamento básico no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Reali e a Eloá por sempre me auxiliarem, me ensinarem e incentivarem a buscar mais.

Aos técnicos Bérgamo, Alcino e Teresa por sempre serem atenciosos e prestativos.

Aos meus colegas de graduação e laboratório Bruno e João, por inúmeras dificuldades, superação e suporte no laboratório.

Aos meus pais, Laodicéia e Geraldo, e ao meu irmão, Vinícius, por compreensão, suporte e por ser um porto seguro para mim durante esses anos.

Ao pessoal da República Feudo pela convivência e por inúmeras histórias juntos.

À AIESEC São Carlos por me mostrar uma nova visão de mundo.

Aos meus colegas de graduação por esses anos vividos juntos, especialmente ao pessoal do POVO por me incentivarem sempre a escrever essa monografia.

Ao pessoal da Hidrosan, por me apoiarem sempre que precisei para concluir esse trabalho.

Ambiente limpo não é o que mais se limpa e sim o que menos se suja.

Chico Xavier

RESUMO

PEREZ, F. P. **Influência da taxa de filtração em filtro de fibra flexível de poliéster na clarificação de efluente sintético de reator anaeróbio.** 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Os filtros de fibras flexíveis são unidades de filtração, cujo leito filtrante é formado por fibras de poliamida, permitindo altas eficiências de remoção de sólidos suspensos e aplicação de altas taxas de filtração. O presente estudo avaliou tal configuração de filtro utilizando fibras de poliéster. Foi utilizado um filtro com diâmetro interno de 28 mm e porosidade entre 76,9 e 77,3%, com comprimento de leito de 1000 mm. Foi utilizada para alimentação do filtro, efluente sintético de reator anaeróbio decantado não coagulado, com variação de turbidez entre 8,9 e 21,1 uT, cor entre 239 e 526 uH, SST entre 30,5 e 70,2 mg/L, e DQO entre 135,0 e 332,0 mg/L. Foram avaliadas taxas de filtração de 60, 70, 80, 90, 100, 110 e 120 m³/m².h, sem coagular o afluente. Foi estabelecida uma perda de carga máxima de 2,22 mca. As maiores taxas de filtração apresentaram uma produção de água maior sem alterar a qualidade do efluente, apesar de durações de carreiras menores. O valor de SST no efluente do filtro é compatível com valores de água de reúso para diversas aplicações. O filtro remove partículas maiores que 7,5 µm. Esse estudo mostrou potencial no uso de fibra de poliéster no uso de fibras flexíveis aplicados em tratamento de esgoto para reúso. Sugerem-se estudos avançados para aplicações futuras no Brasil.

Palavras-chave: tratamento de esgoto; filtração, filtro de fibras flexíveis; água de reúso; poliéster.

ABSTRACT

PEREZ, F. P. **Influence of filtration rate in flexible fiber filter of polyester in synthetic wastewater of anaerobic reactor clarification.** 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

The flexible fiber filters are filtration unit which filter media is made of polyamide fibers, obtaining high solids removal efficiency and high filtration rates. This study evaluated the performance of the filter using polyester. One field-scale filter with an internal diameter of 28 mm, porosity between 76.9 and 77.3 %, and height of 1000 mm was installed. As influent was used a decanted synthetic effluent of anaerobic reactor, without coagulation, with this characteristics: turbidity between 8,9 and 21,1 uT, color between 239 and 526 uH, total suspended solid between 30.5 and 70.2 mg/L, and COD between 135,0 and 332,0 mg/L, without coagulating the influent. It was established a maximal pressure of 2.22 mH₂O. High rate of filtration present high daily water production without changing the effluent quality, however with a lower time of filtration. The value of suspended solid was compatible application of this effluent to reuse. The filter removed particles higher than 7.5 µm. This study indicated the potential of using flexible fiber filter made of polyester in wastewater treatment and reuse. It is suggested advanced studies for this technology to future application in Brazil.

Keywords: wastewater treatment, filtration, flexible fiber filter, reuse, polyester

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação da perda de carga ao longo do comprimento de filtro, para diferentes tempos de operação, para filtros com ação superficial significativa. Fonte: DI BERNARDO e PREZOTTI (1991).....	6
Figura 2 - Variação da perda de carga ao longo do comprimento de filtro, para diferentes tempos de operação, para filtros com ação da profundidade significativa. Fonte: DI BERNARDO e PREZOTTI (1991).....	6
Figura 3 - Meio filtrante de fibras flexíveis de poliamida. Fonte: MAUCHAUFFE, 2010	10
Figura 4 – Unidade de filtro de fibra flexível WTP-225 da empresa SSENG. Fonte: SSENG.....	11
Figura 5 – Tratamento terciário da ETE Jesus Netto em São Paulo-SP. Fonte: SABESP.....	15
Figura 6- Diagrama de blocos ilustrativos do sistema de tratamento de esgoto sintético estudado	17
Figura 7 - Foto do reator anaeróbio ascendente de fibra flexível estudado por PELEGRINO (2015)	19
Figura 8 - Foto do tanque de coleta do efluente do reator anaeróbio e do sedimentador.....	20
Figura 9 – Peneira utilizada para garantir a segurança do FFF após a decantação	21
Figura 10– Foto do recipiente, do agitador e da bomba utilizados nos ensaios	22
Figura 11–Saída da bomba e início do deslocamento do líquido por gravidade	22
Figura 12 – Esquema do deslocamento do afluente no FFF e da localização da entrada de ar e água para sua lavagem.....	23
Figura 13 - Saída da unidade de filtração e entrada para o sistema de coleta de esgoto do laboratório.....	23
Figura 14 – Esquema da unidade piloto de filtração	24
Figura 15 - Configuração das fibras de poliéster no leito filtrante	25
Figura 16 – Recuperação das fibras de poliéster após o uso por FAGUNDES (2015).....	26
Figura 17 - Leito de fibra flexível de poliéster e a tubulação de PVC onde o mesmo foi inserido	27
Figura 18 - Esquema da unidade piloto de filtração	29
Figura 19 - Foto de um trecho da tomada de pressão em metros de coluna de água	30
Figura 20 – Relação entre vazão e frequência do inversor da bomba helicoidal	37
Figura 21 – Relação entre a taxa de filtração e a frequência do inversor da bomba helicoidal	38
Figura 22 – Relação da turbidez (NTU) com SST (mg/L) para o tipo de água estudada.....	39

Figura 23–Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	40
Figura 24 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I com tempos de 336, 356 e 359 minutos simulados	41
Figura 25 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	42
Figura 26 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	43
Figura 27 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	44
Figura 28 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	45
Figura 29 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	46
Figura 30 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	47
Figura 31 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	48
Figura 32 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	49
Figura 33 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	49
Figura 34 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	50
Figura 35 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	51
Figura 36 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	52
Figura 37 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	53
Figura 38 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	54
Figura 39 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	55

Figura 40 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	56
Figura 41 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	57
Figura 42 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	58
Figura 43 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	59
Figura 44 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	60
Figura 45 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	60
Figura 46 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	61
Figura 47 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	63
Figura 48 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	63
Figura 49 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	64
Figura 50 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	65
Figura 51 – Relação entre taxa de filtração e produção de água em 24 horas para os ensaios com lavagem do tipo I	66
Figura 52 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	68
Figura 53 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II com tempos de 361, 421, 481, 541, 601 e 621 minutos simulados	68
Figura 54 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	69
Figura 55 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	70
Figura 56 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	71

Figura 57 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II com tempos de 361, 421, 481, 541, 601, 661 e 708,5 minutos simulados	72
Figura 58 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	72
Figura 59 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	74
Figura 60 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	75
Figura 61 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II com tempos de 241, 301 e 345,5 minutos simulados	76
Figura 62 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	76
Figura 63 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	77
Figura 64 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	79
Figura 65 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	79
Figura 66 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	80
Figura 67 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	81
Figura 68 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	82
Figura 69 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	83
Figura 70 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	83
Figura 71 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	84
Figura 72 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	85
Figura 73 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	86

Figura 74 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	86
Figura 75 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	88
Figura 76 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	89
Figura 77 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	90
Figura 78 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	90
Figura 79 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	91
Figura 80 – Relação entre taxa de filtração e produção de água em 24 horas para os ensaios com lavagem do tipo II.....	93
Figura 81 - Efluente B do reator anaeróbio com conglomerados.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características do esgoto sintético	18
Tabela 2–Monitoramento realizado na pesquisa	33
Tabela 3 – Superfície de contato de cada fio e do leito utilizado nos ensaios.....	37
Tabela 4 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	40
Tabela 5–Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	42
Tabela 6– Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	43
Tabela 7 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	44
Tabela 8 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	46
Tabela 9 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	46
Tabela 10 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	47
Tabela 11 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	50
Tabela 12 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	50
Tabela 13 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	51
Tabela 14 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	53
Tabela 15 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	53
Tabela 16 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	54

Tabela 17 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	57
Tabela 18 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	57
Tabela 19 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	58
Tabela 20 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	61
Tabela 21 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	61
Tabela 22 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	62
Tabela 23 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I	64
Tabela 24 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo I.....	64
Tabela 25 – Resumo das maiores e menores remoções dos ensaios com lavagem do tipo I ...	66
Tabela 26 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	67
Tabela 27 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	69
Tabela 28 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 60 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	70
Tabela 29 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	71
Tabela 30 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	73
Tabela 31 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 70 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	73
Tabela 32 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	74
Tabela 33 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	77

Tabela 34 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 80 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	77
Tabela 35 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	78
Tabela 36 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	80
Tabela 37 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 90 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	80
Tabela 38 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	81
Tabela 39 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	84
Tabela 40 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 100 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	84
Tabela 41 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	85
Tabela 42 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	87
Tabela 43 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	87
Tabela 44 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	88
Tabela 45 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	91
Tabela 46 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 120 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II	91
Tabela 47 – Resumo das maiores e menores remoções dos ensaios com lavagem do tipo II..	92
Tabela 48 - Caracterização para o afluente A, efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 110 m ³ /m ² .h com a lavagem do tipo II.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Afluente do reator anaeróbio ascendente de fibras flexíveis
B	Efluente do reator anaeróbio ascendente de fibras flexíveis e afluente do decantador
C	Efluente do decantador e afluente do filtro de fibra flexível de poliéster
D	Efluente do filtro de fibra flexível de poliéster e do final do processo de tratamento
DQO	Demanda química de oxigênio
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
ETA	Estação de tratamento de água
ETE	Estação de tratamento de esgoto
FFF ou 3F	Filtro de fibra flexível
ICWE	Conferência Internacional de Água e Ambiente
mca	Metros de coluna de água
LATAR	Laboratório de Tratamento Avançado e Reúso de Águas
RMSP	Região metropolitana de São Paulo
RPD	Reúso potável direto
RPI	Reúso potável indireto
SHS	Departamento de Hidráulica e Saneamento
USP	Universidade de São Paulo
WHO	Organização Mundial da Saúde

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i	Área interna da tubulação do sistema de filtração
D_{fio}	Diâmetro médio dos fios de poliéster
d_i	Diâmetro interno da tubulação do sistema de filtração
H	Perda de carga no filtro
h_s	Altura percorrida pela partícula no tanque de sedimentação
IFI	Índice de filtrabilidade de Ives
L	Comprimento do filtro
Q	Vazão da bomba ou vazão na entrada do filtro
n	Número total de fibras
n_d	Número de carreiras por dia.
S_{fio}	Área superficial de contato de 1 fio
S_{leito}	Área superficial de contato de todo o meio filtrante
t_c	Tempo de uma carreira de filtração
t_s	Tempo de sedimentação da partícula no decantador
$Turb_{af}$	Valor médio da turbidez afluente ao filtro
$Turb_{ef}$	Valor médio da turbidez efluente ao filtro
v	Taxa de filtração
$Vol_{carreira}$	Volume líquido produzido por carreira
$Vol_{diário}$	Volume líquido produzido em 24 horas
vs	Velocidade de sedimentação
λ	Eficiência de remoção de partículas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo geral.....	3
2.2	Objetivo específico	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Filtração – considerações iniciais	4
3.1.1	Considerações iniciais sobre filtração	4
3.1.2	Filtração por ação da profundidade e superficial.....	4
3.1.3	Fatores que influenciam no processo de filtração	7
3.1.4	Índices.....	8
3.1.5	Carreira de filtração	8
3.2	Filtros com fibra flexível	9
3.2.1	Aplicações do filtro de fibra flexível.....	10
3.2.2	Estudos envolvendo filtro de fibra flexível	11
3.2.3	Lavagem dos filtros de fibras flexíveis.....	13
3.3	Tratamento de esgoto e reúso de efluente doméstico.....	14
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
4.1	Considerações iniciais.....	17
4.2	Água de estudo e processo de tratamento.....	17
4.3	Etapa I: Definição do material filtrante	24
4.3.1	Cálculo da porosidade dos filtros	25
4.3.2	Cálculo da superfície de contato de cada filtro.....	27
4.4	Etapa II: Ensaios de filtração em fibras flexíveis de poliéster	28
4.4.1	Instalação da unidade piloto	28
4.4.2	Sistema de filtro de fibra flexível de poliéster.....	28

4.4.3	Bomba helicoidal	30
4.4.4	Sistema de lavagem dos filtros	31
4.4.5	Planejamento dos ensaios	31
4.4.6	Monitoramento dos ensaios	32
4.4.7	Avaliação do desempenho do filtro de fibra flexível	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1	Etapa I: Caracterização do material filtrante.....	36
5.1.1	Cálculo da porosidade dos filtros	36
5.1.2	Cálculo da superfície de contato de cada filtro.....	36
5.2	Etapa II: Ensaios de filtração em fibras flexíveis de poliéster.....	37
5.2.1	Calibração da vazão.....	37
5.2.2	Relação entre SST e turbidez	38
5.2.3	Avaliação das taxas de filtração com lavagem tipo I	39
5.2.4	Avaliação das taxas de filtração com lavagem tipo II.....	67
5.2.5	Análise geral dos ensaios.....	93
5.2.6	Análise do sistema de tratamento e de fósforo total	96
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1 INTRODUÇÃO

O Brasil ainda é um país que carece muito de infraestrutura básica principalmente em relação ao tratamento de esgotos domésticos. Segundo o IBGE¹, em 2008 apenas 55 % dos municípios brasileiros dispunham de seu afastamento e apenas 29 % tratavam seus esgotos coletados. Além disso, sabe-se que nem toda estação de tratamento de esgoto (ETE) opera corretamente, despejando seus efluentes “semi-tratados”, não garantindo qualidade aceitável de despejo para o corpo receptor dessa água.

A falta de tratamento de esgoto doméstico faz com que rios, lagos e aquíferos, fiquem contaminados diminuindo seu potencial de utilidade e sua funcionalidade para a sociedade. Além disso, o despejo de esgoto sem tratamento em rios faz, por exemplo, com que cidades a jusante do despejo, capte uma água de pior qualidade, encarecendo o processo de tratamento de água.

Sendo assim, uma solução que pode incentivar o investimento na rede coletora de esgoto e em ETEs, além da melhoria da qualidade de vida e respeito ao meio ambiente, seria reutilizar o esgoto tratado. Partindo desse princípio, a água reutilizada teria valor econômico e seria uma alternativa para diversas aplicações como, por exemplo, industrial.

Novas tecnologias mais modernas e mais compactas de tratamento estão surgindo, como é o caso do filtro de fibras flexíveis (FFF ou 3F). Atualmente, é usado principalmente no sudeste asiático como tratamento terciário de esgoto doméstico e industrial, ou como pré-tratamento para osmose reversa visando reutilizar seu efluente (LEE *et al*, 2006).

Esses filtros são formados por fibras flexíveis de poliamida unifilamentares, contudo sua tecnologia é muito recente e ainda necessita de estudos. Sendo assim, pesquisas estão sendo desenvolvidas variando tanto sua aplicação quanto suas características. A Escola de Engenharia de São Carlos – USP possui uma linha de pesquisa sobre essa nova unidade de tratamento. A exemplo, têm-se o trabalho de MORITA (2013) que avaliou fibras unifilares de sisal e polipropileno, e FAGUNDES (2015) que avaliou fibras de algodão Mercerizado e poliéster, ambos os trabalhos voltados para clarificação de água para abastecimento.

¹ Disponível em:
http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/defaulttabzip_esgot_san.shtml
Acessado em 11/10/2015

O presente trabalho está inserido neste grupo de pesquisa, e visa estudar a aplicabilidade do filtro de fibras flexíveis para a clarificação de esgoto doméstico com o objetivo de utilizar o efluente como reúso.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho do filtro de fibra flexível constituído de fios multifilares de poliéster na clarificação de efluente de reator anaeróbio alimentado por esgoto doméstico sintético.

2.2 Objetivo específico

Avaliar a influência das taxas de filtração na clarificação de efluente de reator anaeróbio no filtro de fibra flexível estudado.

Avaliar se a remoção de SST é compatível para utilizar como água de reúso.

Avaliar, qualitativamente, o tamanho de partículas no efluente do filtro de fibras flexíveis.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Filtração – considerações iniciais

3.1.1 Considerações iniciais sobre filtração

O processo da filtração consiste na apreensão de um determinado tamanho de partícula no meio filtrante, retirando tais partículas da água. Normalmente esse tipo de processo é utilizado nas fases finais no tratamento de água com a finalidade de atender aos padrões de potabilidade da Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde. No caso de tratamento de efluentes domésticos e industriais esse tipo de processo compõe o tratamento secundário ou terciário da etapa de tratamento.

Segunda ARBOLEDA (1973), o processo de filtração pode ter características distintas, como:

- Variação da carga superficial;
- Variação no sentido do fluxo, sendo ascendente ou descendente, operados a pressão ou por gravidade.

A variação da carga superficial pode ser classificada pelo tipo de filtração com baixa carga por filtros lentos (taxas entre 7 e 14 m³/m².d), alta carga superficial por filtros rápidos (taxas entre 120 a 600 m³/m².d) e altíssima carga superficial por filtro de fibras flexíveis (entre 1400 e 2800 m³/m².d).

A filtração por filtros rápidos necessita de coagulação. A coagulação é um processo que auxilia na agregação das partículas e desestabilização dos colóides para aumentar o rendimento do tratamento. Segundo REALI *et al* (2012), o tamanho das partículas retidas em filtros rápidos é maior que aquelas retidas em filtros lentos, devido ao processo de coagulação. Vale ressaltar que quanto maior a taxa de filtração, mais compacta será a unidade e que para a coagulação em filtros de fibras flexíveis e em filtros convencionais de areia a dosagem de coagulante é menor do que seria necessário para o processo unitário de flocação e decantação (LEE *et al*, 2008a).

3.1.2 Filtração por ação da profundidade e superficial

A filtração por meio da ação superficial ocorre com a retenção da maioria das partículas apenas no começo do meio filtrante. Enquanto que a filtração por ação da profundidade faz com que as partículas sejam retidas ao longo do meio filtrante (DI

BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008). Pode-se observar tal diferença entre as duas ações através da medição da pressão em alguns pontos do filtro, e com a diferença nos pontos coletados, determinar a perda de carga no trecho estudado no filtro. Com isso pode-se verificar se o filtro está operando por meio da ação superficial ou por meio da ação da profundidade.

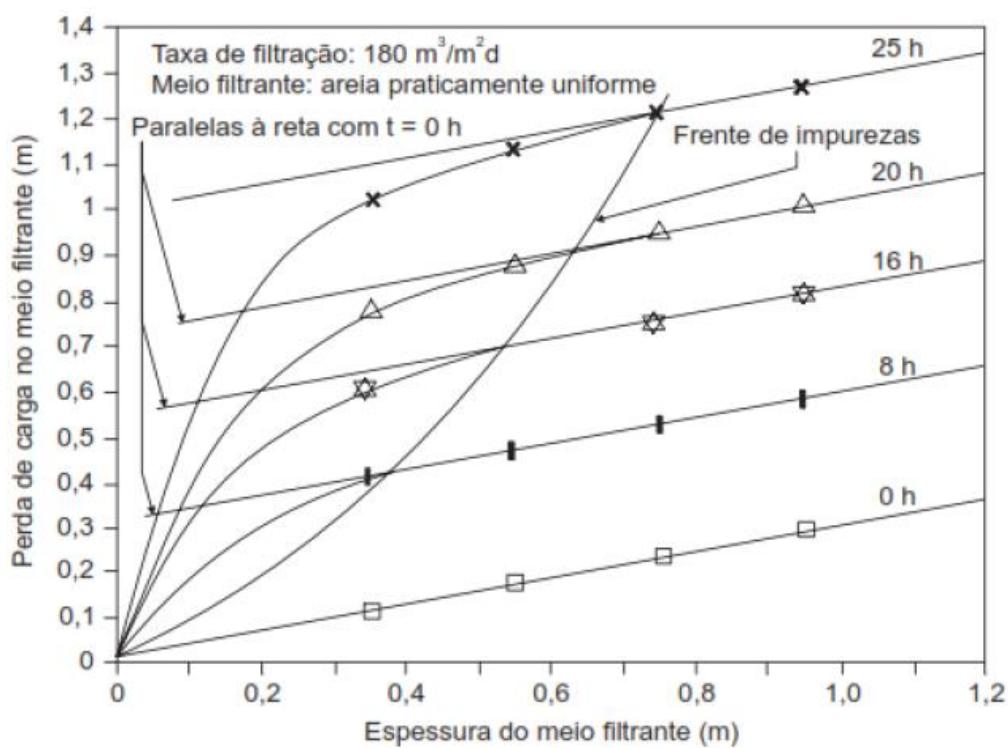
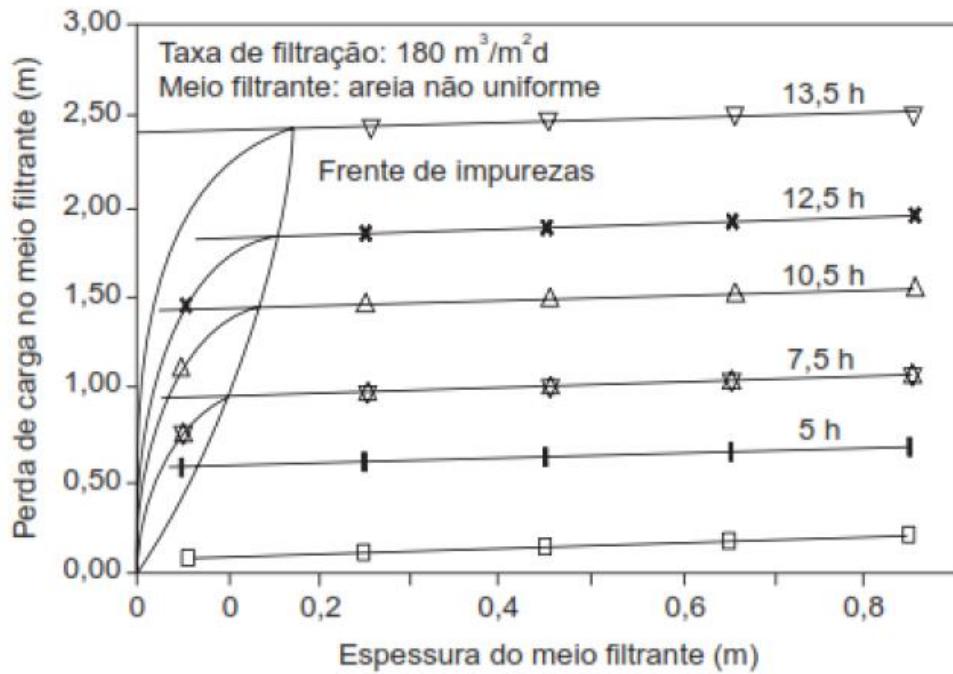
A filtração por ação da profundidade possui vantagens em relação à superficial. De acordo com ARBOLEDA (1973), filtros que apresentam características de ação da profundidade possuem duração de carreiras maiores e maior produção efetiva de água.

O mecanismo da ação da profundidade pode ser influenciado por (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008):

- Características físicas e químicas das partículas, da água e do meio filtrante;
- Taxa de filtração;
- Métodos de operação do filtro.

A velocidade do escoamento pode interferir nas forças de aderência e cisalhamento, resultando tanto na adesão das partículas quanto no seu desprendimento no meio filtrante.

De acordo com DI BERNARDO e PREZOTTI (1991), a frente de impurezas pode ser observada em um gráfico de relação de perda de carga com a espessura do meio filtrante. Na Figura 1 está representado a variação da perda de carga em um filtro granular com ação superficial. Nota-se que a perda de carga ocorre nos primeiros 15 cm de leito, com um tempo de aproximadamente 13,5 horas. Na Figura 2 está representada a perda de carga com ação da profundidade, observando que a perda de carga ocorre em uma espessura maior do que na Figura 1. A frente de pureza pode ser observada ao longo do leito pelo tempo de carreira.



3.1.3 Fatores que influenciam no processo de filtração

Os principais fatores que influenciam os processos de filtração foram descritos por ARBOLEDA (1973) e são:

a) Tipo de meio filtrante

O meio filtrante influencia diretamente no aspecto hidráulico do filtro, mostrado a exemplo com a perda de carga inicial. Sendo assim, sua forma, superfície e volume devem ser consideradas em processos de filtração e na escolha do meio filtrante. É importante citar que a escolha do material filtrante afeta diretamente a eficiência de tratamento (λ). Na Equação 1 está representada, para meios granulares, a relação entre a eficiência de tratamento e o diâmetro médio das partículas (d).

$$\lambda = \alpha \frac{1}{d^k} \quad \text{Equação 1}$$

Segundo ARBOLEDA (1973), k é um coeficiente que varia entre 1 e 3, sem que se chegue a um acordo a respeito de seu valor entre alguns autores, e α é uma constante.

b) Taxa de filtração

Para meios granulares a taxa de filtração (v) é inversamente proporcional à eficiência de filtração (λ), como mostra a Equação 2.

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

Segundo ARBOLEDA (1973), n é um coeficiente que varia entre 0,7 e 1, e α é uma constante.

c) Tipo de suspensão

As características da suspensão a ser filtrada possuem grande influência no desempenho do filtro. Dentre as características físicas podem-se destacar o tamanho dos flocos, sua densidade e seu volume, influenciando no tempo de evolução da perda de carga nos filtros, pois preenchem os poros do meio filtrante. O rendimento do filtro também é

influenciado pelo tamanho dos flocos, e quando se apresentam na faixa coloidal, não são retidos, e por último, a resistência ao desprendimento dos flocos ao longo da filtração.

Dentre as características químicas podem-se destacar o pH e o potencial zeta, interferindo nas forças de repulsão ou atração entre as partículas e o meio filtrante.

d) Temperatura

A temperatura influencia nas características físicas e químicas da suspensão, podendo alterar a remoção dos flocos ou ainda na evolução da perda de carga.

3.1.4 Índices

Os índices são utilizados para poder comparar sistemas semelhantes com algumas características diferentes, e mostrar qual é o sistema mais viável a ser escolhido. Como já citado, o processo de filtração depende de inúmeros fatores, muitas vezes integrados e complexos, sendo assim torna-se complicado sua avaliação. Por isso são utilizados alguns índices para facilitar a comparação dos sistemas.

No caso dos filtros granulares, é comum a utilização do índice de filtrabilidade de Ives (IFI), o qual relaciona a perda de carga no instante considerado (H), o tempo no instante considerado (t_c), o valor de turbidez afluente ($Turb_{af}$) e efluente ($Turb_{ef}$) e a taxa de filtração (v) (IVES, 1978 apud DI BERNARDO e DANTAS, 2005). A Equação 3 representa o cálculo do IFI.

$$IFI = \frac{H \cdot Turb_{ef}}{Turb_{af} \cdot t_c \cdot v} \quad \text{Equação 3}$$

Tem-se que quanto menor o IFI maior será a eficiência da filtração.

Nota-se, porém, nessa equação, que o índice está relacionado diretamente com o volume bruto produzido por carreira, uma vez que taxa de filtração multiplicada pelo tempo de duração da carreira, resulta no volume bruto, e não leva em consideração efetivamente o tempo de duração da carreira. Além disso, o IFI não leva em consideração o volume líquido produzido, uma vez que não é considerado o volume de água utilizado para a lavagem dos filtros.

3.1.5 Carreira de filtração

A carreira de filtração é o tempo de operação de um ciclo do filtro, ou seja, desde o momento que se inicia a operação até o momento da interrupção, para lavagem ou

manutenção. Após a lavagem ou manutenção do filtro, dá-se início novamente ao processo de filtração iniciando uma nova carreira.

A causa do término da carreira pode ser dado pela perda da qualidade da água produzida (transpasse), atingido valores acima do desejado, ou ainda pela igualdade da perda de carga com a carga hidráulica disponível (MORITA, 2013). O funcionamento ideal do filtro é quando esses dois fatores ocorrem ao mesmo instante ou próximos, otimizando a utilização do filtro (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2009).

A duração da carreira depende do meio filtrante e de sua porosidade, da qualidade do afluente e da taxa de filtração de operação. Nota-se que a variação da taxa de filtração interferiu significativamente no estudo de JEANMAIRE *et al* (2007), na qual foi variado a taxa de 50 para 200 m³/m².h, sendo que a maior taxa apresentou um tempo menor de carreira com um meio filtrante constituído de poliamida. Em relação à porosidade, LEE *et al* (2007), variou a concentração de fibras de poliamida (em massa) no FFF de 50 a 80 kg/m³ e concluiu que o filtro com maior concentração de fibras possui maior perda de carga, afetando diretamente na carga hidráulica disponível para o filtro. Contudo os mesmos autores afirmaram que filtros com maior concentração de fibras possuem melhor qualidade em seu efluente.

3.2 Filtros com fibra flexível

Os filtros de fibra flexíveis apresentam alguns aspectos de funcionamento semelhantes e outros diferentes dos filtros de areia. LEE *et al* (2007) estudaram o perfil da turbidez ao longo do leito de um FFF de poliamida (nylon), mostrando que a retenção da maioria das partículas ocorria no início do leito filtrante, contudo muitas partículas eram retidas ao longo do leito até o seu final, mostrando que a frente de impurezas caminha mais rapidamente ao longo do leito do que em filtros de areia, ou seja, o comprimento do FFF influencia no rendimento de seu tratamento.

A estrutura do filtro de fibra flexível é simples. Consiste em uma tubulação preenchida com fibras flexíveis paralelas entre si, presas em uma ou nas duas extremidades. O fluxo pode ser tanto ascendente quanto descendente e é paralelo ao comprimento das fibras. O comprimento das fibras assim como seu material e o diâmetro da tubulação são variáveis. A Figura 3 apresenta uma foto de um leito de fibra flexíveis de poliamida.



Figura 3 - Meio filtrante de fibras flexíveis de poliamida. Fonte: MAUCHAUFFE, 2010

A duração da carreira de um 3F é menor do que em um filtro de areia, contudo as altas taxas fazem com que a produção efetiva de água dos filtros 3F seja maior do que nos filtros de areia (MORITA, 2013).

A porosidade do meio filtrante depende do volume de espaços vazios no leito, quanto menor for esse espaço, ou seja, menor a porosidade, melhor será a qualidade do efluente gerado, devido a maior remoção de partículas, e maior será a perda de carga no leito. Portanto, porosidade baixa pode resultar em um menor tempo de carreira.

3.2.1 Aplicações do filtro de fibra flexível

Atualmente a aplicação do filtro de fibra flexível já é uma realidade na Europa e no Sudeste Asiático. A Coréia do Sul trata mais de 2 milhões de metros cúbicos por dia de esgoto doméstico utilizando a tecnologia 3F como tratamento terciário (BEN AIM *et al*, 2004 *apud* LEE *et al*, 2008a).

O efluente do tratamento terciário possui alta qualidade, sendo assim a sua disposição garante uma boa manutenção dos corpos hídricos, ou ainda, esse efluente pode ser utilizado na indústria como água de reúso.

O filtro de fibra flexível também é utilizado para tratamento de efluentes industriais e mais recentemente como tratamento de água. O material das fibras utilizadas pela tecnologia sul-coreana é de poliamida. A Figura 4 representa um unidade de filtração com fibras comercializadas pela empresa SSENG junto ao seu sistema de filtração. Esse sistema trabalha com módulos em paralelo e em série, produzindo um efluente com turbidez de aproximadamente 0,3 uT, usando processo de coagulação.



Figura 4 – Unidade de filtro de fibra flexível WTP-225 da empresa SSENG. Fonte: SSENG²

A utilização da unidade 3F é mais vantajosa comparando com filtros de areia para a clarificação de efluentes domésticos, pois trabalha em altas taxas enquanto que filtros de areia necessitam de uma velocidade de filtração relativamente mais baixa, necessitando de uma área de instalação maior. Em contrapartida, as unidades 3F possuem um alto preço de manutenção, apresentando uma desvantagem em relação aos filtros de areia devido ao maior número de lavagens necessárias por dia (LEE *et al*, 2007).

Apesar de ser uma tecnologia já consolidada, os fenômenos por trás do 3F são complexos e necessitam ser estudados (LEE *et al*, 2007), assim como a porosidade para diversos tipos de fibras, comprimento e aplicabilidade em países como o Brasil.

3.2.2 Estudos envolvendo filtro de fibra flexível

Os estudos sobre filtros de fibras flexíveis ainda não são expressivos mundialmente, contudo existem muitos pesquisadores trabalhando em seu desenvolvimento e na avaliação de seu desempenho para diversas aplicações como, por exemplo, tratamento da água do mar (JEANMAIRE *et al*, 2007; KIM *et al*, 2013), remoção de algas em águas superficiais (CHA *et al*, 2009), tratamento de água para abastecimento (MORITA, 2013; FAGUNDES, 2015)

² Disponível em: <http://ssecor.com/eng/biz/05/index.html>
Acessado em 04/10/2015.

JEANMAIRE *et al* (2007) utilizaram um filtro de fibras flexíveis de poliamida com porosidade de 49 % com o objetivo de obter efluente filtrado com turbidez inferior a 0,1 uT e partículas menores que 5 µm para injeção em poços “offshore” em plataformas de petróleo. Seu afluente consistia em água do mar com turbidez entre 0,5 e 5,0 uT. A unidade de filtração possuía 200 mm de diâmetro com altura de 1200 mm e foi variada a taxa de 50 a 200 m³/m².h. Os autores utilizaram cloreto férrico e WAC HB (clorossulfato de alumínio altamente básico) como coagulantes e tiveram que adaptar a dosagem de acordo com a turbidez de entrada no filtro. Os resultados mostraram remoções de 98% de partículas maiores que 5 µm a partir de um afluente de turbidez igual a 1,0 uT em uma taxa de 100 m³/m².h com dosagem de 5 ppm de cloreto férrico ou WAC HB, com uma perda de carga final de 120 mbar. Foi notado que a qualidade da água bruta interferiu na qualidade do filtrado e na duração de carreira, variando entre 1 a 10 horas para a taxa de 100 m³/m².h.

KIM *et al* (2013) utilizaram um filtro de fibras flexíveis de polietileno com uma densidade de empacotamento de 910 kg/m³ com o objetivo de pré-tratamento para a ultrafiltração. Seu afluente consistia na água do Mar Amarelo, localizado entre a China e a Península da Coréia, com turbidez variando até 52,0 uT. A unidade de filtração possuía 1570 mm de diâmetro e 3229 mm de altura, sendo que a taxa utilizada foi de 25 m³/m².h. O resultado apresenta níveis de turbidez no efluente sempre menores que 3,0 uT utilizando o coagulante sulfato férrico. Os autores notaram uma perda das fibras de polipropileno durante a operação de dois anos, tendo que trocar o FFF devido a tal fato. Indicam ainda que deve-se estudar e melhorar o material das fibras para que estes resistam a mais tempo de operação em estações de dessalinização.

CHA *et al* (2009) utilizaram um filtro de fibras flexíveis de poliamida com porosidade de 93% com o objetivo de remover algas da água do rio *Nak-dong* (Coréia do Sul). A unidade de filtração possuía 650 mm de diâmetro e 1500 mm de altura, sendo que foi variada a taxa de 60 a 120 m³/m².h. Foi utilizado PAC (policloreto de alumínio) como coagulante. Os autores conseguiram remover mais de 85% das algas no meio. Foi notado que a remoção das algas não foi influenciada pelo aumento da velocidade de filtração, ou seja, a remoção na taxa de 120 m³/m².h foi tão eficiente quanto em taxas inferiores.

MORITA (2013) utilizou filtro de fibra flexível de sisal com porosidade de 85 %, e outro de polipropileno, com porosidade de 93%, para clarificação de água para abastecimento. O afluente do sistema consistia em água sintética com turbidez de 8,0 uT. A unidade de filtração possuía 28 mm de diâmetro e o comprimento do leito foi variado de 250 mm até

1000 mm. Utilizou-se sulfato de alumínio como coagulante e variou-se a taxa entre 5 e 80 m³/m².h. Concluiu-se que para o FFF de sisal apenas o comprimento com 1000 mm foi eficiente na remoção da turbidez, até atingir turbidez de 1,0 uT. Enquanto que o FFF de polipropileno atingiu os níveis de turbidez abaixo de 1,0 uT em todos os comprimentos, com duração de carreira variável. Portanto, nota-se que o tipo de material filtrante influencia no processo de filtração.

FAGUNDES (2015) utilizou filtro de fibra flexível de algodão mercerizado, com porosidade de 67%, e poliéster, com porosidade de 75%, para clarificação de água para abastecimento. O afluente do sistema consistia em água sintética com turbidez de 7,7 uT. A unidade de filtração possuía 28 mm de diâmetro e comprimentos de 600 e 1000 mm. Utilizou-se sulfato de alumínio como coagulante e variou-se a taxa entre 40 e 120 m³/m².h. Concluiu-se, assim como MORITA (2013), que o comprimento do filtro desempenha um papel importante no processo de filtração, pois os filtros com 1000 mm apresentaram maiores produtividade efetiva de água e tempo de carreiras maiores.

3.2.3 Lavagem dos filtros de fibras flexíveis

Como citado anteriormente, quando a carga hidráulica disponível se igualar a perda de carga, ou quando o filtro estiver na eminência do transpasse, deve-se interromper o processo de filtração e iniciar a lavagem.

MORITA (2013) ressalta que as operações ótimas de lavagem são específicas para cada configuração de meio filtrante estudado, assim como a qualidade do efluente.

Estudos realizados por LEE *et al* (2008b) mostraram que foi mais efetiva a utilização de ar e água separadamente. No caso estudado, a otimização se deu na injeção de 7 segundos de ar seguido de 15 segundos de água em 14 ciclos de repetições, totalizando tempo de lavagem de pouco mais de 5 minutos, desconsiderando manobras de operações. Ressalta-se que o leito filtrante era de fibras de poliamida.

Diferentes sequências e tempos de aplicações de ar e água para leitos de fibra de sisal e polipropileno foram estudados por MORITA (2013) que chegou à conclusão que a sequência de ar (3 segundos), seguido da aplicação de água (6 segundos) em 7 ciclos, mostrou-se ótima para os leitos estudado. Totalizando, o tempo de lavagem foi de 45 segundos, desconsiderando manobras de operações.

FAGUNDES (2015) também estudou a lavagem do 3F, na qual em sua pesquisa os leitos filtrantes eram constituídos de algodão Mercerizado e de poliéster. No efluente da água de lavagem de poliéster, foi encontrado pequenas fibrilas do material, provavelmente devido ao jato de ar comprimido, mostrando uma pequena degradação do meio filtrante. Em relação ao filtro de algodão, foi otimizada a lavagem com a inserção de ar (10 segundos) e água (10 segundos) em 3 ciclos de lavagem, totalizando um tempo de lavagem de 60 segundos, desconsiderando manobras de operação, consumindo um total de 2,5 L de água para a lavagem, representando cerca de 10,8 % de sua produtividade.

Quando o processo de lavagem do filtro não é suficiente para que o filtro continue uma boa operação, é necessário que se troque o meio filtrante.

3.3 Tratamento de esgoto e reúso de efluente doméstico

A Conferência Mundial das Nações Unidas sobre Água e Meio Ambiente, ocorrida em Dublin em 1992, mudou uma visão antiga de que a água é um bem abundante e infinito e que seu uso nunca será comprometido. Os resultados da conferência mostram que além da água ser um recurso essencial para a vida, desenvolvimento e meio ambiente, é ainda um recurso finito e que possui um valor econômico, por isso seu uso deve ser entendido como um bem econômico (ICWE, 1992).

A atual crise hídrica que algumas regiões do sudeste brasileiro vêm enfrentando demonstra mais que nunca a afirmação acima. Sendo assim, algumas alternativas estão sendo estudadas e aplicadas na tentativa de reverter o processo do crescimento da demanda em relação ao não acompanhamento da disponibilidade hídrica. Além da problemática da falta de água, toma-se a contraexemplo a região metropolitana de São Paulo (RMSP) que em 2013 tratava apenas 33 % de seu esgoto doméstico gerado (HESPAÑOL, 2013). Tal fato acarreta na degradação dos corpos hídricos na região, dificultando o abastecimento público, portanto se torna um ciclo vicioso de consumo e despejo sem tratamento.

Apesar desse quadro apresentado, o reúso de água proveniente de efluentes domésticos já é uma realidade em algumas cidades brasileiras. A estação de tratamento de esgoto (ETE) Jesus Netto em São Paulo, operada pela SABESP, já produz água de reúso desde 1998 (SABESP, 2015). Como tratamento terciário são utilizados 4 filtros granulares pressurizados e 6 filtros de cartucho. A Figura 5 mostra uma imagem do tratamento terciário realizado na ETE.



Figura 5 – Tratamento terciário da ETE Jesus Netto em São Paulo-SP. Fonte: SABESP³

Atualmente, apenas a SABESP tem a capacidade de fornecer aproximadamente 13 mil m³ de água de reúso por dia, nas unidades de ETE ABC, Barueri, Parque Novo Mundo, São Miguel Paulista e Jesus Netto (SABESP, 2015).

Se comparar a produção de água realizada pela SABESP de aproximadamente 9,5 milhões de m³ por dia (SABESP, 2015) e adotando um coeficiente de retorno de 0,80, tem-se que a mesma empresa deve tratar cerca de 7,6 milhões m³ de esgoto por dia. Comparando com a disponibilidade de água de reúso produzida pela SABESP, chega-se à conclusão que menos de 0,15 % do esgoto produzido é utilizado como reúso, ou seja, há um grande mercado a ser explorado em território brasileiro, contudo como já mencionado, primeiramente deve-se tratar os esgotos domésticos das cidades brasileiras.

O tratamento de esgoto pode ser dividido em quatro tipo de tratamento. São elas:

- Tratamento preliminar: remoção de sólidos grosseiros em suspensão e areia;
- Tratamento primário: separação e remoção de sólidos sedimentáveis;
- Tratamento secundário: remoção a matéria orgânica particulada e dissolvida;
- Tratamento terciário: remoção de macronutrientes (fósforo e nitrogênio).

³ Disponível no site: http://site.sabesp.com.br/uploads/file/ap_ass_meio_amb.pdf
Acessado em 05/10/2015

Em relação a água de reúso a ETE deve conter todos os tratamentos supracitados para viabilizar o processo (HESPAÑHOL, 2013). O reúso pode ser classificado em reúso potável indireto (RPI), reúso potável direto (RPD) ou reúso não potável.

Os esgotos tratados para RPI são lançados em corpos receptores, tanto superficiais quanto subterrâneos, e posteriormente são captados e utilizados. Esses corpos receptores servem como atenuadores ambientais, ou seja, diluem as baixas concentrações de poluentes remanescentes dos sistemas avançados de tratamento utilizados (THOBANOGLOUS et al, 2011). Um problema da aplicação dessa metodologia no Brasil é que além dos corpos receptores brasileiros estarem poluídos, as companhias de saneamento assim que despejarem o seu efluente tratado no corpo receptor perdem automaticamente o domínio sobre aquela água, ou seja, eles estariam despejando um efluente de melhor qualidade do que seria necessário e não teriam como resgatar o investimento. Sendo assim, as companhias de saneamento brasileiras não possuem interesse na aplicação do RPI (HESPAÑHOL, 2013).

Em relação aos esgotos tratados de RPD, estes são encaminhados diretamente para ETA ou para reservatórios. A vantagem desse sistema é que as companhias têm o domínio sobre essa água e não necessitariam construir um sistema de distribuição separado para destinar a água tratada da ETA de reúso para os consumidores (HESPAÑHOL, 2013). Vale ressaltar ainda que a utilização desse método diminui a necessidade de transposições de bacias como vem ocorrendo para o abastecimento público.

O reúso não potável pode ser destinado para a agricultura, indústrias, recreação ou aquicultura. Normalmente a destinação é para uso industrial, que podem ser para torres de resfriamento, caldeiras, água de processamento, construção civil e fins menos nobres que não necessitam que a água seja potável (ABES, 1992). Tal fato, indica que para centros urbanos industrializados como RMSP, por exemplo, seria uma boa alternativa para os efluentes de ETEs da região, como vem sendo implementado pela SABESP.

Um ponto negativo da regulamentação da prática de reúso é a falta de normas técnicas brasileiras que garantam a segurança da aplicação do reúso. O que as ETEs fazem para trabalharem com segurança, é utilizar normas internacionais ou estrangeiras, como o caso da Organização Mundial da Saúde (WHO) ou da Agência Americana de Proteção Ambiental, EPA (CHEIS; 2013)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações iniciais

Para o desenvolvimento desse trabalho, foram utilizadas as instalações do Laboratório de Tratamento Avançado e Reúso de Águas (LATAR), interligado por um grupo de estudo do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP).

O estudo foi dividido em 2 etapas:

- Etapa I: Caracterização do material filtrante;
- Etapa II: Ensaios de filtração em fibras flexíveis de poliéster.

4.2 Água de estudo e processo de tratamento

O sistema de tratamento consistia nas seguintes etapas: tratamento em reator anaeróbio, decantação e filtração, como mostra a Figura 6. Para a facilitar o entendimento dos dados nesse trabalho, foram nomeados alguns afluentes e efluentes do processo, descrito abaixo:

- A: Esgoto sintético doméstico e afluente do reator anaeróbio;
- B: Efluente do reator anaeróbio e afluente do decantador;
- C: Efluente do decantador e afluente do filtro;
- D: Efluente do filtro.



Figura 6- Diagrama de blocos ilustrativos do sistema de tratamento de esgoto sintético estudado

O reator anaeróbio é objetivo de estudo de PELEGRINO (2015) em seu doutorado no laboratório LATAR da EESC/USP (em fase de elaboração)⁴. O fluxo era de forma ascendente através de bombas dosadoras. Esse reator era alimentado com um afluente produzido

⁴ PELEGRINO, E.C. F. Proposição, construção e avaliação do desempenho de um sistema constituído por reator anaeróbio com leito de fibras flexíveis em escala piloto aplicado ao tratamento de esgoto. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Defesa prevista para dezembro de 2015.

sinteticamente com o objetivo de simular um esgoto municipal. As características do esgoto sintético preparado, foram modificadas a partir do Syntho (simula o esgoto doméstico, sendo de fácil preparo e custo relativamente baixo), que foi desenvolvido para representar um padrão comum de águas residuais domésticas (NOPEN; CAPALOZZA; VANROLLEGHEM, 2001), e foi adaptado de HO (2007). Assim foram pré-definidas as seguintes características da alimentação do reator anaeróbio mostrada na Tabela 1.

Tabela 1- Características do esgoto sintético

Composto	Dosagem (mg/L)
Amido solúvel	236
Acetato de sódio	145
Extrato de levedura	36
Leite em pó	490
Cloreto de Amônio	107
Ureia	78
Fosfato de Diamônio	77
Bicarbonato de sódio	600

Fonte: PELEGRINO (2015)

PELEGRINO (2015) usou 6 reatores anaeróbios de fibra flexíveis, estudando seu comportamento. Para o processo de tratamento por filtração, foi coletado efluente do reator anaeróbio que se mostrava mais estável. A Figura 7 representa quatro dos seis reatores.

O efluente do reator anaeróbio era coletado e armazenado em um tanque para possibilitar a operação do filtro, pois este possuía taxa superior à taxa do reator. Para cada ensaio em FFF era coletado aproximadamente 180 L de efluente ao longo de dois dias.

Para iniciar o ensaio utilizava-se um bastão para homogeneizar o líquido (B). Após sua homogeneização esperava-se um tempo (ts) de uma hora, antes de sua coleta. Como havia uma diferença de 60,0 cm de altura (hs) entre o topo e o ponto da coleta, pela Equação 4 tem-se que a velocidade de sedimentação (vs) era de 1,0 cm/min.

$$vs = \frac{hs}{ts} \quad \text{Equação 4}$$

Após a sedimentação, era realizado uma descarga de fundo no tanque de aproximadamente 5 L, com objetivo da remoção das partículas maiores que prejudicariam a carreira de filtração, caso ocorresse uma resuspensão dessas partículas. Após a descarga de fundo, dava-se início a coleta do efluente que seria usado na filtração. Esse descarte faz com que a velocidade de sedimentação se altere, sendo próximo de 1 cm/min. Ressalta-se, que a coleta do material decantado foi realizado em batelada conforme a necessidade de alimentação do filtro. A Figura 8 representa uma foto do tanque de coleta/decantador utilizado.

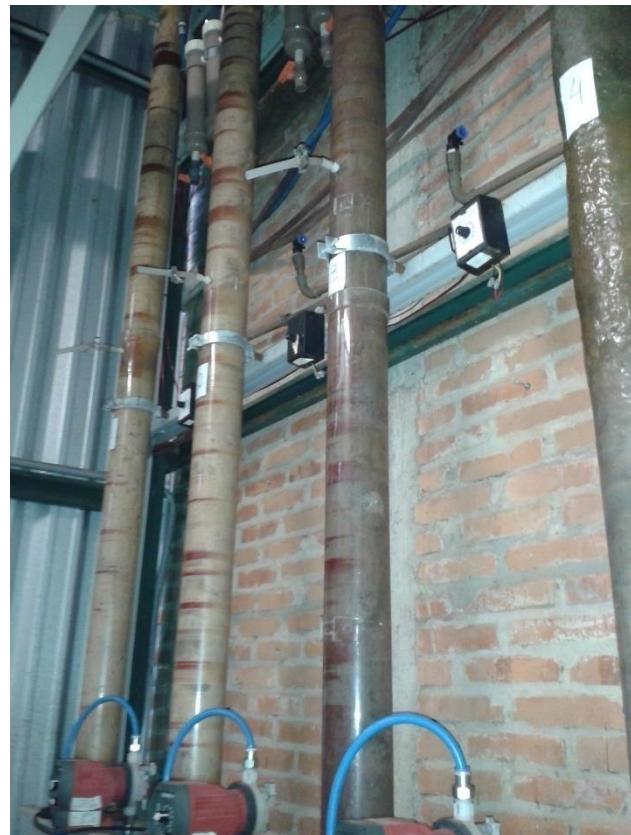


Figura 7 - Foto do reator anaeróbio ascendente de fibra flexível estudado por PELEGRINO (2015)

Durante a coleta, era utilizada uma peneira simples de malha 2,5 x 2,5 mm. O uso da peneira teve o objetivo de garantir a proteção do filtro para remover alguns resquícios de conglomerados ou materiais flutuantes que escapavam do sedimentador. A Figura 9 retrata a peneira utilizada no tratamento.



Figura 8 - Foto do tanque de coleta do efluente do reator anaeróbio e do sedimentador

Em seguida, o efluente C era transportado para um recipiente com uma saída no fundo onde o afluente do 3F se dirigia até uma bomba helicoidal, como mostra a Figura 10. Esse recipiente tinha capacidade de 15 L e era reabastecido ao longo do ensaio. Utilizava-se um agitador para homogeneizar o líquido com um regularizador de velocidade de rotação para possibilitar a alteração na velocidade de agitação em função da altura do líquido no recipiente. A bomba deslocava o líquido C para uma entrada superior por onde o líquido se dirigia ao filtro por gravidade, como mostra a Figura 11.



Figura 9 – Peneira utilizada para garantir a segurança do FFF após a decantação

O afluente do filtro se deslocava por gravidade até acumular energia potencial (altura de água) suficiente para conseguir superar as perdas de carga no leito limpo e assim, iniciar a filtração ascendente como mostra a Figura 12. E por último, a saída do efluente do filtro dava-se pela lateral, onde era redirecionado para a tubulação de esgoto do laboratório, como mostra a Figura 13. Essa saída era utilizada para se fazer a coleta do efluente final do sistema (D). Na Figura 12, também está representado a entrada de ar e água para a lavagem, detalhado no item 4.4.4. A Figura 14 representa um esquema da constituição da unidade de filtração.



Figura 10– Foto do recipiente, do agitador e da bomba utilizados nos ensaios



Figura 11–Saída da bomba e início do deslocamento do líquido por gravidade



Figura 12 – Esquema do deslocamento do afluente no FFF e da localização da entrada de ar e água para sua lavagem



Figura 13 - Saída da unidade de filtração e entrada para o sistema de coleta de esgoto do laboratório

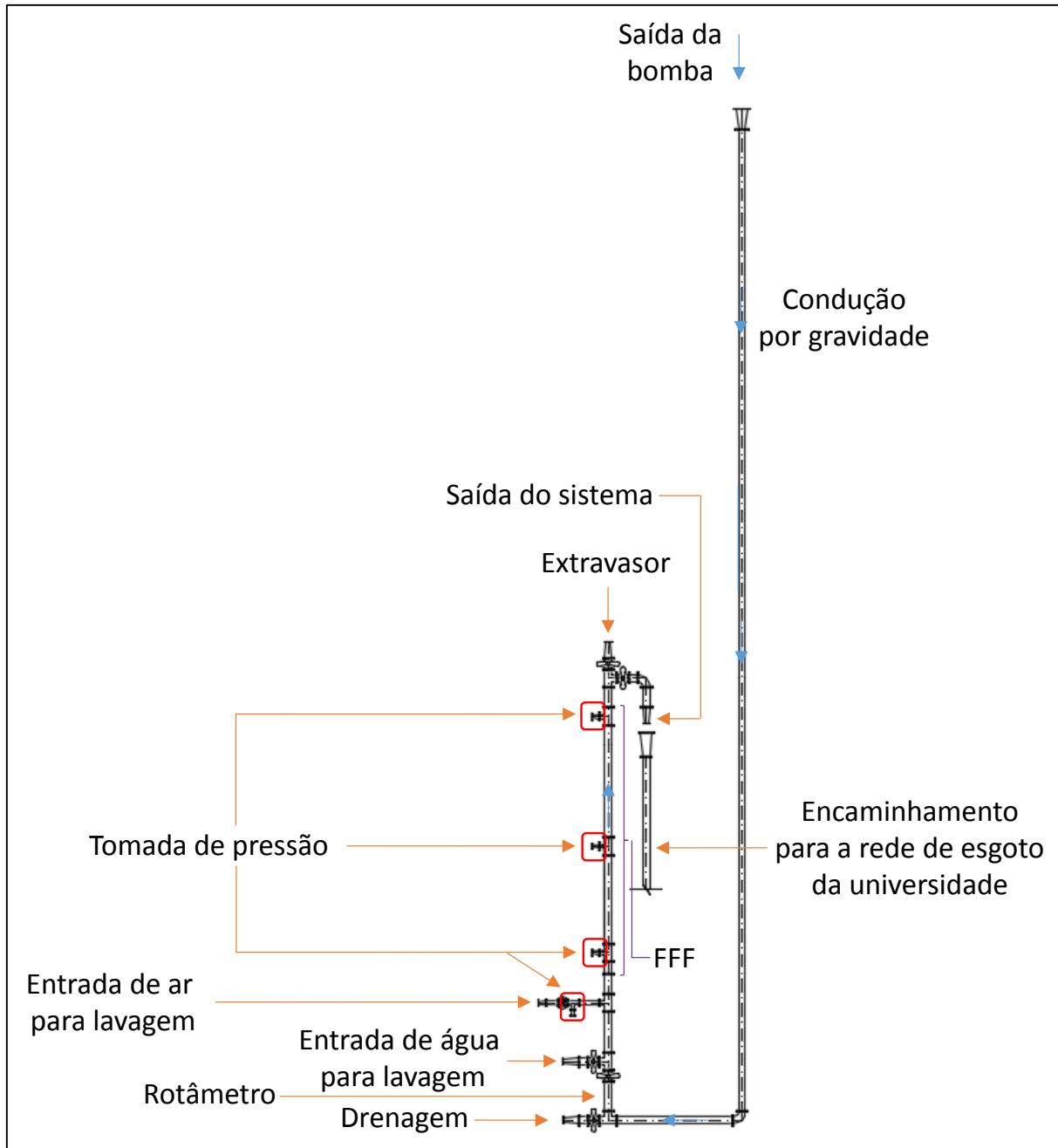


Figura 14 – Esquema da unidade piloto de filtração

4.3 Etapa I: Definição do material filtrante

O meio filtrante é o mesmo utilizado por FAGUNDES (2015), constituído de fibras de poliéster com um comprimento de leito de 1000 mm. Tal tipo de fibra não apresentou perda de massa em meios agressivos entre $\text{pH } 4,7 \pm 0,3$ e $9,0 \pm 0,3$ com um período de contato de até 7 meses. Esse meio filtrante era composto por linhas/fios de costura 100% poliéster TEX 38, da indústria têxtil Sancris. Foi observado ainda por microscopia eletrônica de varredura que a aparência das fibras permaneceu as mesmas (FAGUNDES, 2015).

As fibras de poliéster desse leito foram separadas em chumaços com a mesma quantidade de fibras e configurado de uma forma a diminuir caminhos preferenciais, como mostra a Figura 15. Para a construção foram utilizados pedaços uniformes de canudo plástico para manter uma configuração homogênea.



Figura 15 - Configuração das fibras de poliéster no leito filtrante

4.3.1 Cálculo da porosidade dos filtros

Quando FAGUNDES (2015) realizou seus ensaios, a porosidade do meio filtrante de poliéster era de 75%. Contudo após sua pesquisa, foi feito um processo de recuperação para se reutilizar o leito filtrante.

Essa recuperação consistia em realinhar as fibras e desfazer os nós que haviam formados no leito. Para isso, foi utilizado um pente comum, iniciando o processo de realinhamento das pontas livres até a outra extremidade do leito, como mostra a Figura 16.



Figura 16 – Recuperação das fibras de poliéster após o uso por FAGUNDES (2015)

A Figura 17 compara o leito de fibra flexível de poliéster com a tubulação onde foi inserida.



Figura 17 - Leito de fibra flexível de poliéster e a tubulação de PVC onde o mesmo foi inserido

Para recalcular o número de fibras (n), utilizou-se a Equação 5, baseado no trabalho de FAGUNDES (2015).

$$n = -93,685 \cdot \text{Porosidade}[\%] + 9351,6 \quad \text{Equação 5}$$

Fonte: FAGUNDES (2015)

4.3.2 Cálculo da superfície de contato de cada filtro

Para calcular a superfície de contato do leito (S_{leito}), utilizou-se as Equações 6 e 7.

$$S_{fio} = \pi \cdot D_{fio} \cdot L \quad \text{Equação 6}$$

$$S_{leito} = n \cdot (\pi \cdot D_{fio} \cdot L) \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

- n : número de fios no leito filtrante;
- D_{fio} : diâmetro médio dos fios de poliéster determinado por Fagundes (2015);
- L : comprimento do leito.

4.4 Etapa II: Ensaios de filtração em fibras flexíveis de poliéster

4.4.1 Instalação da unidade piloto

A instalação da unidade piloto utilizada para a realização dos ensaios se encontra nas dependências externas do LATAR e é composta por todo o sistema de tratamento supracitado: alimentação do reator anaeróbio, reator anaeróbio, tanque de coleta/decantador e filtro de fibra flexível. O funcionamento do sistema de tratamento foi citado no item 4.2.

4.4.2 Sistema de filtro de fibra flexível de poliéster

O sistema de filtração desta pesquisa foi construído com tubos, peças e acessórios de PVC, todos com 28 mm de diâmetro interno. A parede interna da tubulação onde o filtro foi alocado foi revestido com areia para evitar caminhos preferenciais da água pela parede lisa do tubo de PVC.

O interior do filtro era recheado com as fibras de poliéster, preso na parte inferior e livres na parte superior. O comprimento do leito era de 1000 mm. Na tubulação do filtro haviam duas tomadas de pressões. Havia outras duas tomadas de pressões externas ao filtro, a primeira localizada antes do filtro e a segunda depois do filtro. O esquema da Figura 18 mostra as principais dimensões (filtro e disponibilidade hidráulica) de como era a unidade do sistema de filtração.

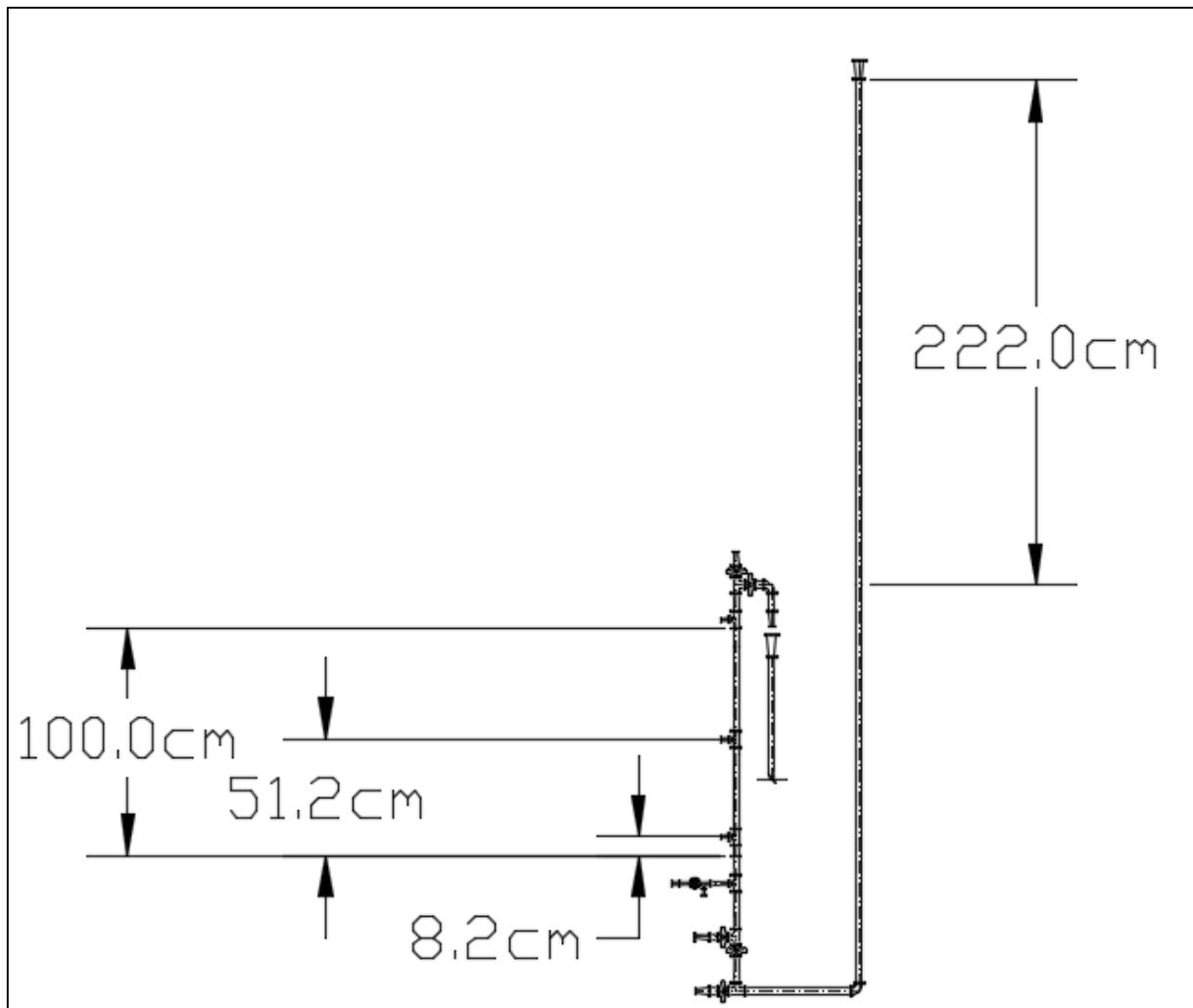


Figura 18 - Esquema da unidade piloto de filtração

As leituras de pressão ao longo do leito filtrante eram realizadas por meio de mangueiras transparentes que eram interligadas aos piezômetros (colunas) dispostos verticalmente possibilitando a medida em metros por coluna de água (mca), como mostra a Figura 19. Esse sistema foi instalado para permitir o registro da perda de carga durante o ensaio e ao longo do leito filtrante. As tomadas de pressões foram instaladas nas alturas: 0; 8,2 cm; 51,2 cm e 100,0 cm. A máxima carga hidráulica disponibilizada pelo sistema para o processo de filtração era 2,22 mca.



Figura 19 - Foto de um trecho da tomada de pressão em metros de coluna de água

Havia ainda na base do sistema, um rotâmetro para se verificar a vazão de filtração. Mesmo com o rotâmetro, a vazão era verificada volumetricamente através de uma proveta e um cronômetro durante os ensaios.

4.4.3 Bomba helicoidal

A bomba helicoidal utilizada possuía uma vazão de aproximadamente 130 L/h, sendo assim para viabilizar a variação da vazão e consequentemente da taxa de filtração, foi utilizado um inversor de frequência. Com isso foi relacionado a variação da frequência com a vazão da bomba através de um ensaio variando a frequência e a vazão.

É importante ressaltar que esse ensaio apenas prepara uma base para calibrar a vazão da bomba e assim, operar com a taxa desejada, mas não pode ser substituída pela medição da vazão ao longo do ensaio devido a variações de vazão que podem ocorrer.

4.4.4 Sistema de lavagem dos filtros

Foram realizados dois tipos de lavagem durante os ensaios. A lavagem I foi realizada inserindo ar e água concomitantemente e depois apenas água. Na lavagem II foi alternada a introdução de ar e água para a lavagem do leito.

Para a lavagem com água, foi utilizada a rede pública de abastecimento com uma turbidez em torno de 0,19 uT. Já para a introdução de ar na lavagem, foi utilizado um compressor de ar, mantendo a pressão à 0,3 MPa.

Vale ressaltar que as lavagens foram realizadas até que a perda de carga no filtro se igualasse as perdas de carga medida utilizando água. Antes dos ensaios para cada tipo de lavagem, foi realizado a medição da perda de carga em função da taxa de filtração sendo o afluente apenas água. Assim, ocorria uma estabilização da perda de carga, sendo adotado esse valor como o zero para os ensaios. Portanto, só iniciava o ensaio quando após a lavagem, os valores de perda de carga se encontravam iguais ou próximos as perdas de carga anteriormente medidas. O objetivo da variação do estudo da lavagem era apenas comparar os métodos e não criar um protocolo de lavagem. Apesar de não quantificar o volume utilizado de água, foi padronizado o método de lavagem tanto para a lavagem tipo I quanto para o tipo II.

Após o ensaio era bombeado água através da bomba helicoidal para que nenhuma partícula danificasse o equipamento e ainda era lavada a tubulação evitar que alguma partícula do ensaio anterior interferisse no ensaio seguinte, já que havia uma variação na qualidade do afluente C da unidade filtrante.

4.4.5 Planejamento dos ensaios

Os ensaios realizados foram feitos com variações da taxa entre 60 e 120 m³/h em um filtro de fibra flexível de poliéster com porosidade entre 76,9% a 77,3% (mostrado no capítulo de resultados e discussões, item 5.1.1), com lavagens do tipo I e II supracitados.

Durante o ensaio foi estabelecido uma perda de carga máxima de 2,22 mca e o tempo de carreira foi determinado quando atingisse tal pressão. Determinou-se que caso ocorresse que a turbidez do efluente se aproximasse à do afluente (transpasse), o ensaio também poderia ser interrompido.

Vale salientar que o armazenamento de afluente C possuía em média 180 L, contudo para alguns ensaios seriam necessários volumes maiores de afluente, sendo assim, quando se

acabava o afluente o ensaio automaticamente seria interrompido. Caso o volume de afluente terminasse antes que se atingisse a perda de carga de 2,22 mca, foi simulado o tempo de duração da carreira até tal perda de carga, através do comportamento do gráfico da perda de carga pelo tempo de duração da carreira. Em relação à qualidade desse efluente, adotou-se que não ocorreu forte variações, considerando a composta D como amostra para todo o tempo de carreira com uma perda de carga de 2,22 mca. A composta D é formado pelas amostras coletadas de efluente durante o ensaio com tempos determinados de coleta.

Durante o ensaio, eram coletadas amostras com intervalos de tempo iguais para compor uma amostra geral denominada de composta. Durante o ensaio era monitorado a turbidez efluente D para verificar a ocorrência do transpasse. Após e antes do ensaio era realizado a lavagem da tubulação, bomba e filtro.

4.4.6 Monitoramento dos ensaios

Para a avaliação da eficiência no processo de clarificação do esgoto sintético utilizando filtro de fibras flexíveis de poliéster, foram coletadas amostras com frequência previamente estabelecidas representado na Tabela 2. É importante destacar que apesar da alta frequência da coleta, ela não pode ser maior devido a aplicabilidade do sistema.

Ressalta-se aqui que a leitura do pH se deu em apenas em alguns ensaios. Por último, foi realizado análises de fósforo total e dissolvido na taxa de filtração definida como ótima para a o sistema e para o afluente estudado.

O tamanho das partículas foi lido no equipamento Zetasizer nano modelo ZS90-Malvern que possuí capacidade de leitura de partículas com diâmetros entre 0,3 nm a 10 µm. A sua técnica de leitura é através de espalhamento dinâmico de laser nos ângulos 12,8° e 90°. Vale lembrar que o equipamento não registra partículas maiores que 10 µm ou menores que 0,3 nm. Sendo assim, partículas que não se enquadram nesse intervalo não são computadas, apesar de estarem presentes na amostra como, por exemplo, o efluente B, que possuía partículas visualmente maiores. Vale salientar que esse equipamento fornece apenas resultados concernentes à porcentagem de partícula nas diversas classes de tamanhos investigadas pelo equipamento, sendo que o equipamento não fornece dados referente à concentração de partículas, sendo assim, os resultados possuem um caráter qualitativo. Para todos os ensaios, foi introduzido 1 mL de amostra.

Para a leitura de sólidos suspensos totais foram utilizadas membrana de fibra de vidro AP40 de porosidade 0,7 µm. A obtenção de todos os valores das análises de SST foram correlacionadas com a turbidez, utilizando os resultados dessa correlação para todas as amostras analisadas.

A turbidez foi lida no turbidímetro da HACH 2100P e a cor aparente e a DQO foram lidas no equipamento da HACH DR 2800.

Todos os ensaios foram realizados considerando as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2012).

Tabela 2–Monitoramento realizado na pesquisa

Amostra	Variável	Frequência
-	Verificação da vazão da bomba de alimentação	20 minutos
-	Leitura da perda de carga	A cada 5 minutos, exceto quando a carreira possuía alta duração, percebida pelo autor, então se monitorava a cada 10 minutos
Efluente B	Turbidez	A cada 5 minutos, exceto quando a carreira possuía alta duração, percebida pelo autor, então se monitorava a cada 10 minutos
	Cor aparente	
	SST	
	Tamanho das partículas	
	Temperatura	
Afluente C	Turbidez	1 amostra por ensaio
	Cor aparente	
	SST	
	DQO	
	Tamanho das partículas	
Composta D	Temperatura	A cada 5 minutos, exceto quando a carreira possuía alta duração percebida pelo autor, então se monitorava a cada 10 minutos
	Turbidez	
	Cor aparente	
	SST	
	DQO	
	Tamanho das partículas	1 amostra por ensaio
	Temperatura	

4.4.7 Avaliação do desempenho do filtro de fibra flexível

Após o monitoramento dos ensaios, foi realizada a comparação do desempenho em cada taxa de filtração. Vale relembrar que a perda de carga máxima pré-determinada foi de 2,22 mca e que para algumas taxas foram simulados a continuação de sua filtração sem que ocorresse o transpasse até atingir uma perda de carga de 2,22 mca, devido à limitação no armazenamento de afluente C.

Na comparação de desempenho considerou-se:

- Tempo de carreira de filtração (min);
- Volume bruto produzido por cada carreira (L);
- Volume líquido produzido por cada carreira (L);
- Volume líquido produzido em 24 horas (L);
- Valores de turbidez, cor aparente DQO e SST do afluente C e da composte D;
- Tamanho médio de partículas presente no afluente C e na composte D;

O volume líquido produzido por carreira é dado pelo volume bruto produzido descontando o volume gasto na lavagem. Para comparar a produção diária entre as taxas de filtração foram simuladas duas possibilidades de consumo de volume para a lavagem para os cálculos de produção diária.

Na primeira, como já comentado na revisão bibliográfica (item 3), foi adotado o método de lavagem ótimo determinada por FAGUNDES (2015) em seu estudo, com consumo de 2,5 L em um tempo de um minuto de lavagem por carreira. Como no estudo de FAGUNDES (2015), o FFF era utilizado como um processo na clarificação de água e o estudo desse trabalho é a clarificação de esgoto sintético, foi adotado que a segunda possibilidade de consumo de água para lavagem seria o dobro determinado por FAGUNDES (2015), ou seja 5,0 L por carreira em um tempo de 1 minuto de lavagem. É importante ressaltar dois fatores: não foi considerado o tempo de manobras de operações de válvula nas lavagens, e que a otimização encontrada por FAGUNDES (2015) foi para o leito de algodão Mercerizado, contudo tal lavagem foi mais eficiente do que as outras testadas para o poliéster.

Sendo assim, o volume líquido produzido em 24 horas é dado pela Equação 8.

$$Vol_{diário} = Vol_{carreira} \cdot n_d \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

- $Vol_{diário}$: Volume líquido produzido em 24 horas (L);
- $Vol_{carreira}$: Volume líquido produzido por carreira (L);
- n_d : número de carreiras por dia.

O número de carreiras por dia é determinado pela Equação 9.

$$n_d = \frac{1440}{t_c + 1} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

- t_c : tempo de uma carreira de filtração (min).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Etapa I: Caracterização do material filtrante

5.1.1 Cálculo da porosidade dos filtros

É importante ressaltar que durante o processo de recuperação das fibras do leito, foi verificado a perda de certa quantidade de fios de poliéster, devido à formação de nós entre as fibras, não tendo sido possível evitar tal problema devido ao fato do processo de construção do leito ter sido artesanal. Sendo assim, a solução encontrada para que esses nós não interferissem no processo de filtração foi a remoção dessas fibras.

A perda de fibras durante o estudo foi entre 180 e 220 fibras. Sendo assim, a porosidade do 3F com fibras de poliéster foi estimada entre 76,9% (2145 fios) e 77,3% (2105 fios), utilizando a Equação 5. Vale ressaltar, conforme descrito na revisão bibliográfica, capítulo 3, que quanto menor a porosidade, maior o número de fibras e maior é a retenção das partículas.

5.1.2 Cálculo da superfície de contato de cada filtro

O diâmetro da fibra de poliéster foi determinado por FAGUNDES (2015) através de microscopia ótica de uma amostra aleatória de fibras, encontrando os seguintes resultados:

- diâmetro médio: 321,8 μm ;
- diâmetro máximo: 400,0 μm ;
- diâmetro mínimo 250,0 μm ;
- desvio padrão: 25.

Os fios de poliéster utilizados nesse trabalho eram destinados ao setor têxtil, portanto, não há o rigor de diâmetro que possivelmente seria interessante para a aplicação das fibras em FFF, nem de resistência a fluxos de ar comprimido ou água. Vale ressaltar que os fios eram constituídos por microfibrilas torcidas entre si.

Utilizando a Equação 6 e a Equação 7, sabendo que o comprimento do leito era de 1000 mm, calculou-se a superfície de contato dos filtros, mostrado na Tabela 3.

De acordo com FAGUNDES (2015), a superfície de contato do leito antes do processo de recuperação do meio filtrante era de 23.507,2 cm^2 , com porosidade de 75,0%. Sendo assim,

pode-se afirmar que o processo de recuperação utilizado reduziu a superfície de contato do leito entre 7,74% e 9,46%.

Tabela 3 – Superfície de contato de cada fio e do leito utilizado nos ensaios

Parâmetro	Porosidade de 76,9%	Porosidade de 77,3%
Superfície de contato de cada fio (cm ²)	10,1	10,1
Superfície de contato do leito (cm ²)	21.687,5	21.283,1

5.2 Etapa II: Ensaios de filtração em fibras flexíveis de poliéster

5.2.1 Calibração da vazão

O resultado do ensaio para relacionar a vazão da bomba com a frequência do inversor de frequência pode ser conferido na Figura 20.

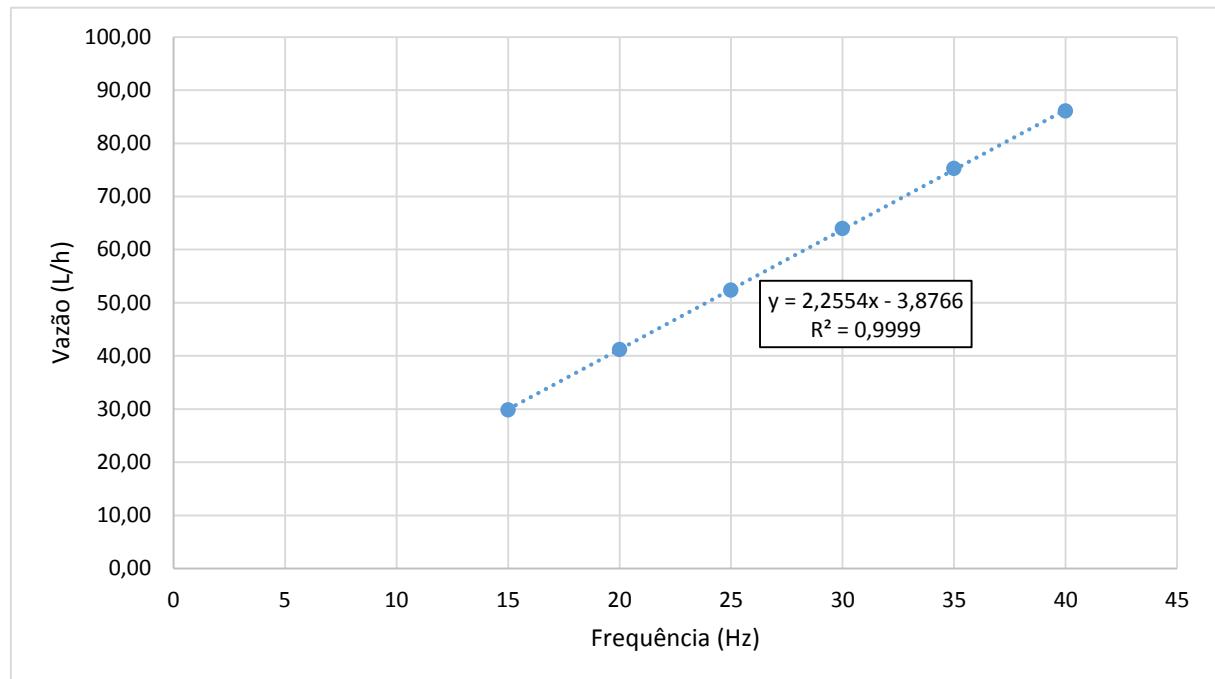


Figura 20 – Relação entre vazão e frequência do inversor da bomba helicoidal

A relação taxa de filtração com a vazão pode ser relacionada da seguinte forma:

$$\nu = \frac{Q}{A_i} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_i^2} \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

- v : taxa de filtração ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$);
- Q : vazão da bomba ou vazão na entrada do filtro;
- A_i : área interna da tubulação do sistema de filtração;
- d_i : diâmetro interno da tubulação do sistema de filtração (28 mm).

Assim foi relacionado a taxa de filtração com a frequência do inversor, mostrado na Figura 21.

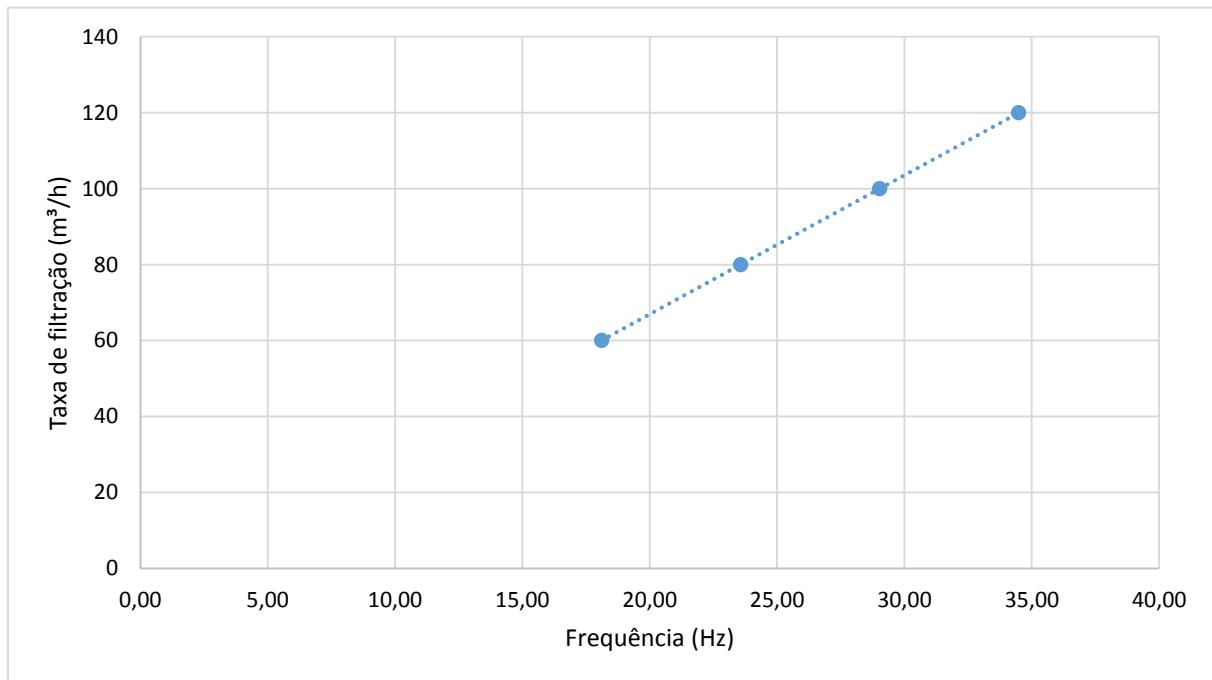


Figura 21 – Relação entre a taxa de filtração e a frequência do inversor da bomba helicoidal

Antes de realizar o ensaio era verificada a vazão da bomba utilizando água no sistema e durante o ensaio era verificado a vazão do efluente do filtro.

5.2.2 Relação entre SST e turbidez

Como as análises de SST possui uma grande variabilidade, fez-se um gráfico correlacionando-a com a turbidez. Esse gráfico, junto com a equação da reta está na Figura 22. Vale lembrar que a turbidez é influenciada pelos sólidos suspensos e pelos colóides, e para os dados de turbidez encontrado, foram utilizados esse gráfico.

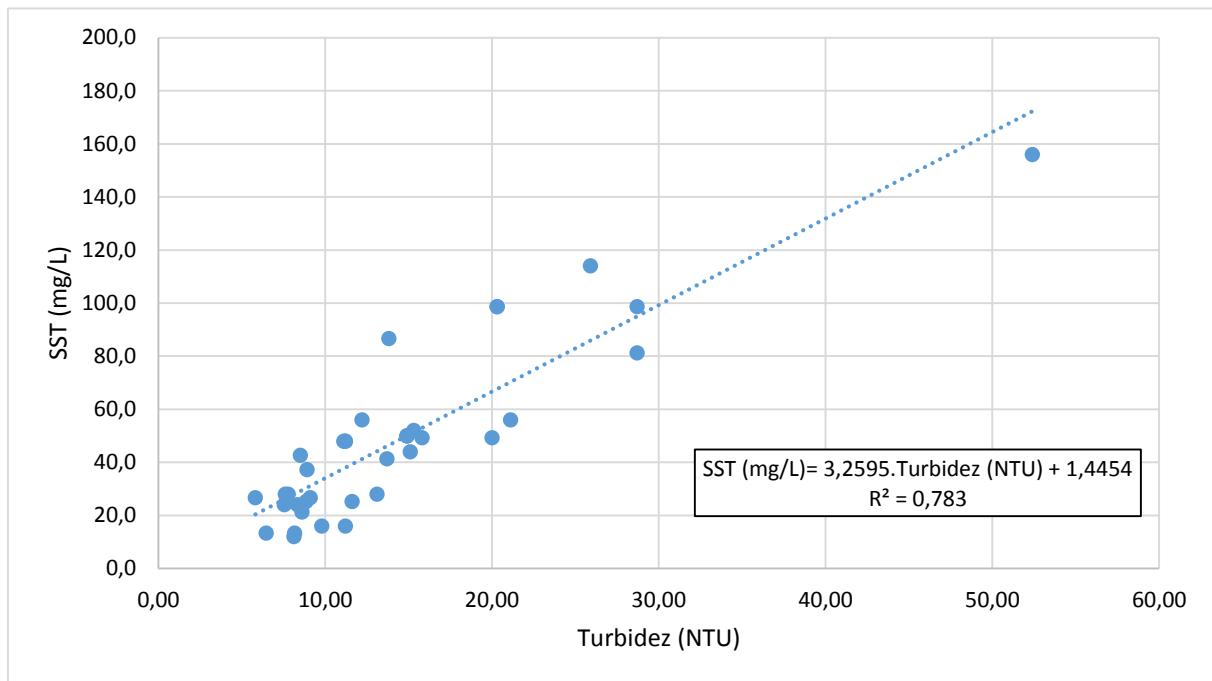


Figura 22 – Relação da turbidez (NTU) com SST (mg/L) para o tipo de água estudada

5.2.3 Avaliação das taxas de filtração com lavagem tipo I

A avaliação das taxas de filtração com lavagem do tipo I é apresentada a seguir. Recordando que a lavagem do tipo I é a inserção concomitante de ar e água, logo em seguida apenas água, lembrando que não foi objetivo do estudo dessa pesquisa calcular a quantidade de água utilizada na lavagem do leito. Recorda-se também que não ocorreu coagulação do afluente e que o consumo de água para a lavagem é uma estimativa.

5.2.3.1 Taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

Esse ensaio foi realizado no dia 22/05/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão na Tabela 4. Destaca-se a remoção de turbidez pelo FFF.

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 23. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0. Nota-se com esse gráfico uma tendência de saturação da retenção de partículas, uma vez que a turbidez do efluente D tende a aumentar progressivamente e quase uniformemente com o tempo, tendendo a aproximação de uma reta, depois de 30 minutos de filtração.

Tabela 4 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 60 m³/m².h com a lavagem do tipo I

Amostra	Análises				
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total(mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)
Efluente B	15,3	414	204	51,3	21,0
Afluente C	13,7	362	196	46,1	21,0
Composta D	8,6	298	160	29,5	21,0
Remoção FFF	37,2 %	17,7 %	18,4 %	36,06%	-

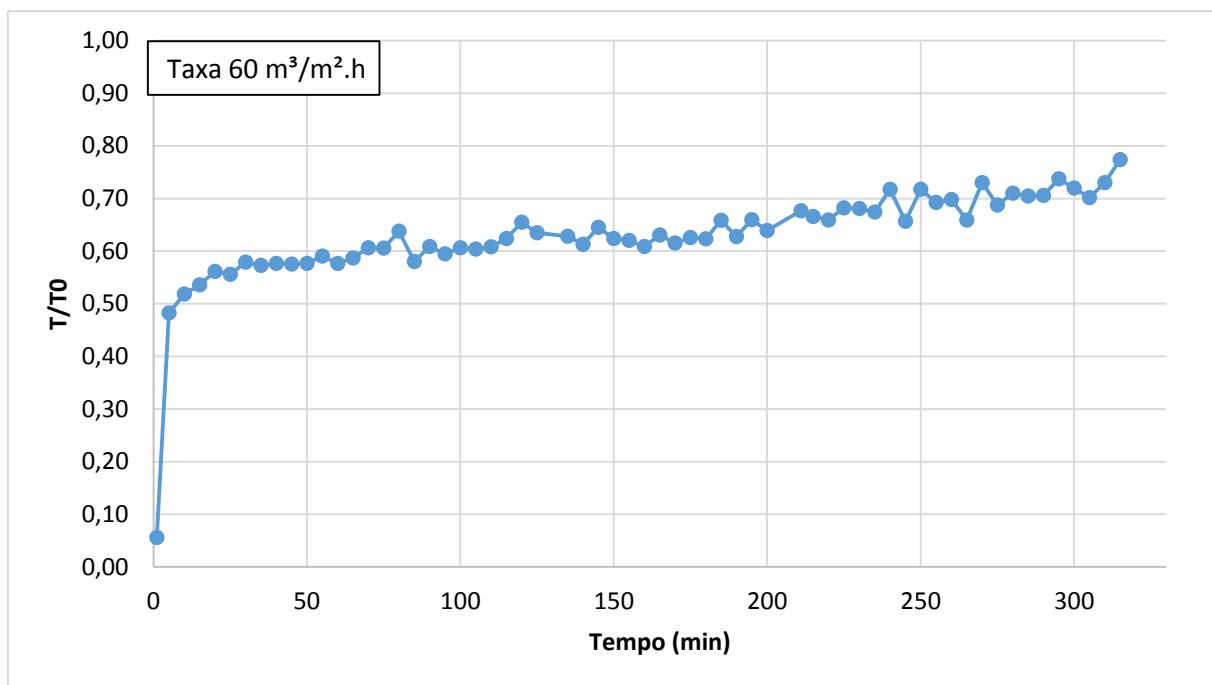


Figura 23–Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 60 m³/m².h com a lavagem do tipo I

A duração do ensaio foi de 316 minutos, contudo ainda não havia atingido a perda de carga máxima de 2,22 mca, portanto através dos resultados anteriores foi simulado o tempo de carreira até que se atingisse essa perda de carga máxima. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 24. Nota-se a partir desse gráfico, que a perda de carga nesse tipo de filtro teve um comportamento diferente da perda de carga em um filtro de leito granular. Vale ressaltar que o tempo de duração teórico do ensaio foi de 359 minutos.

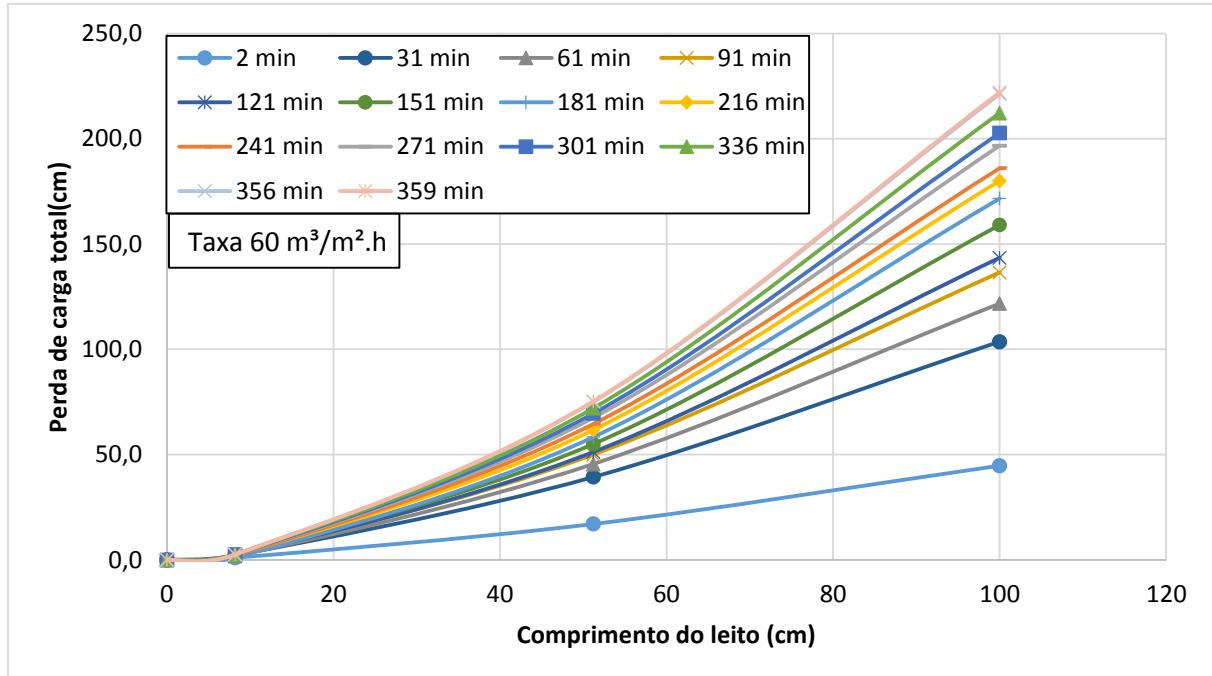


Figura 24 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo I com tempos de 336, 356 e 359 minutos simulados

Na Figura 25 mostra a perda de carga ao longo do tempo. Pode-se notar a partir desse gráfico que por volta dos 30 minutos iniciais há um aumento não linear da perda de carga. Após esse período a perda de carga tende a aumentar progressivamente semelhando-se a uma reta. Portanto, provavelmente com o passar do tempo houve uma melhor distribuição do material retido ao longo do leito de fibras, resultando em menor taxa de aumento de perda de carga.

A Tabela 5 e a Tabela 6 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que a relação de volume gasto para lavagem tanto para lavagem com 2,5 L quanto para lavagem com 5,0 L apresentou-se baixa.

Na Figura 26 é mostrado a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 164,2 nm e 1281 nm. Nota-se que dentre as partículas presentes na amostra D, predominavam partículas na faixa de tamanho entre 0,1 e 1,5 μm (com pico em torno de 0,85 μm). Por sua vez, no afluente C, predominavam (30%) partículas com tamanho médio em torno de 6 μm , mostrando que a filtração em filtro de fibras (sem coagulação) do efluente do reator anaeróbio removeu com eficiência partículas com tamanho maior que 1,5 μm . Isso era de se esperar,

tendo em vista tratar-se de filtração sem prévia coagulação da amostra. Em outras palavras, o material coloidal presente no afluente C (com tamanho abaixo de $1\mu\text{m}$ e que causa turbidez na amostra), por não ter sido previamente coagulado, não foi capaz de ser retido com eficiência no filtro de fibras. Esse fato é mostrado pelos resultados relativamente baixos de eficiência de remoção de turbidez mostrados na Figura 23.

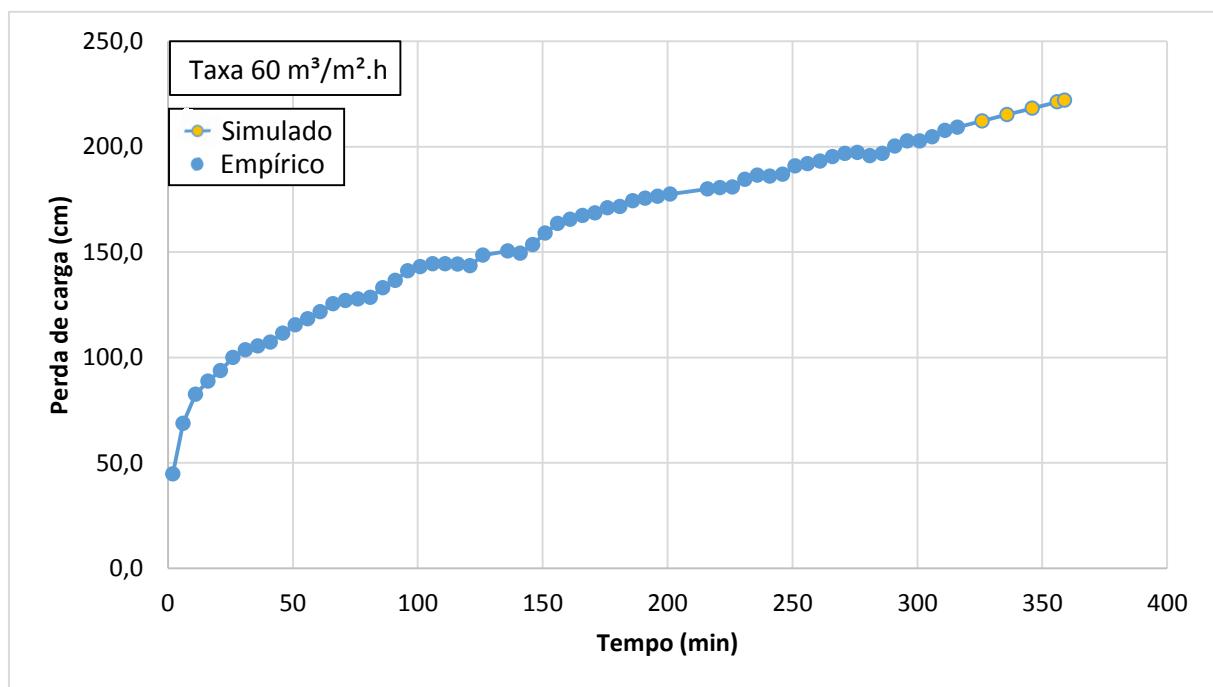


Figura 25 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

Tabela 5–Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Perda de carga total (mca)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,09	316	4,5	194,6	192,1	189,6
Empírico e Simulado	2,22	359	4,0	222,3	219,8	217,3

Tabela 6– Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Volume líquido produzido em 24 horas		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	864,45 L	853,2 L	11,3 L	22,5 L	1,28%	2,57%
Empírico e Simulado	879,2 L	869,2 L	10,0 L	20,0 L	1,12%	2,25%

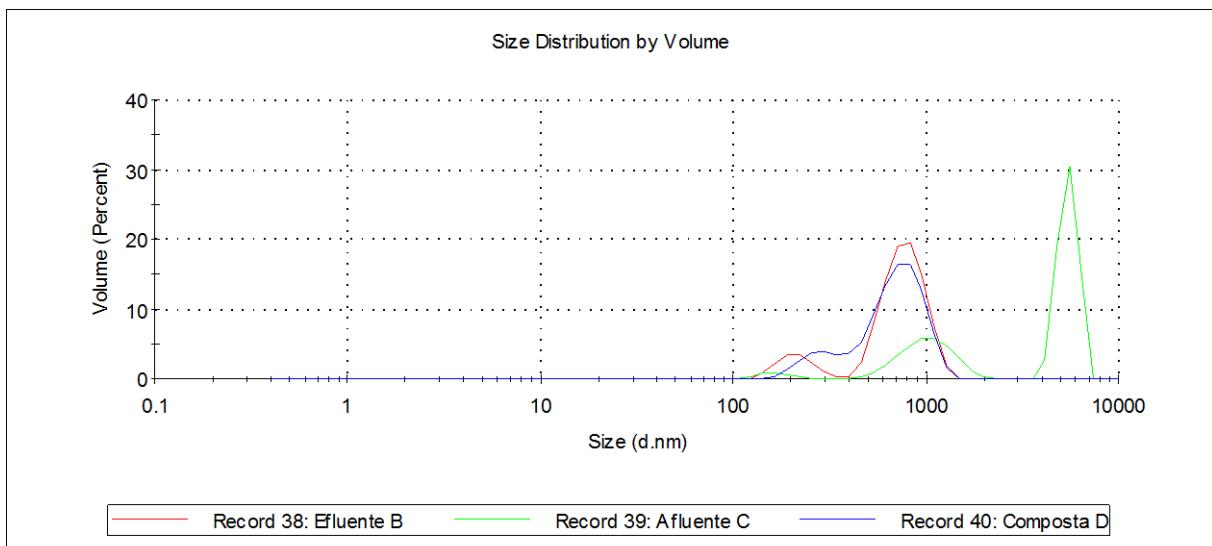


Figura 26 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

5.2.3.2 Taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$

Esse ensaio foi realizado no dia 11/05/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 7. Nota-se que apesar da qualidade do afluente C ter os maiores valores de turbidez, DQO, SST e cor, a remoção apresentou-se relativamente baixa, devido ao fato do afluente não ter sido previamente coagulado, permanecendo com concentração significativa de partículas coloidais. Tais partículas são também causadoras de turbidez, juntamente com as partículas em suspensão (que apresentam tamanhos acima da faixa coloidal, cujo limite superior é usualmente adotado como sendo 1 μm). Tais partículas coloidais não são passíveis de remoção eficiente por filtração sem que sejam previamente coaguladas. Nesse ponto é importante lembrar que a proposta do estudo foi a avaliação do filtro de fibras como unidade para remoção de partículas em suspensão com tamanho acima da faixa coloidal.

A turbidez do afluente C foi a maior turbidez afluente do FFF encontrada nos ensaios e tal fato influenciou diretamente no tempo de carreira desse ensaio. Portanto, a turbidez do afluente dos FFFs influencia diretamente no tempo de carreira da filtração, fato também constatado por JEANMAIRE *et al* (2007).

Tabela 7 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

Amostra	Análises				
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total(mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)
Efluente B	52,4	934	437	172,2	20,2
Afluente C	21,1	526	189	70,2	20,2
Composta D	11,47	329	165	38,8	20,2
Remoção FFF	45,64%	37,45%	12,70%	44,70%	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 27. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T₀. Nota-se que a turbidez possui uma leve tendência de crescimento, contudo atingiu o limite da perda de carga estipulado.

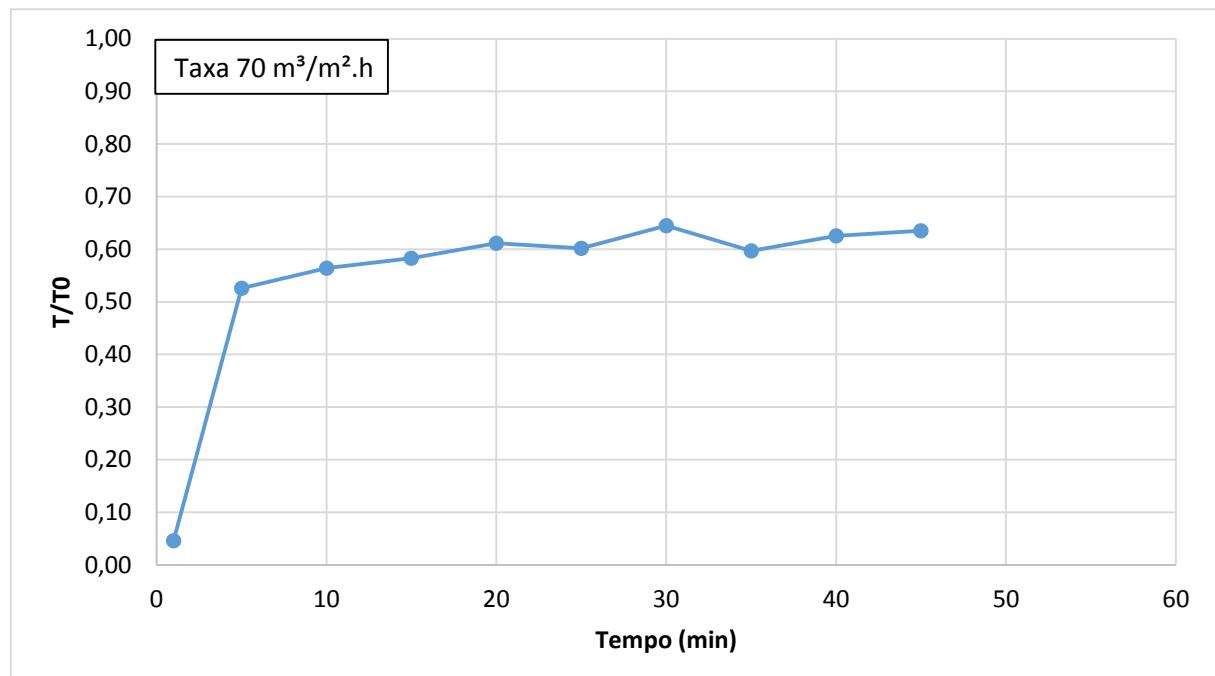


Figura 27 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

A duração do ensaio foi de 51 minutos, chegando a perda de carga máxima de 2,22 mca. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 28. A partir desse gráfico nota-se que na primeira metade do leito filtrante há maior perda de carga que no final, contudo, a perda de carga ainda se manteve bem distribuída.

A Figura 29 mostra a perda de carga ao longo do tempo. Nota-se a partir desse gráfico que não ocorreu uma estabilização do crescimento da perda de carga, por causa do curto tempo de duração da carreira devido a qualidade do afluente C.

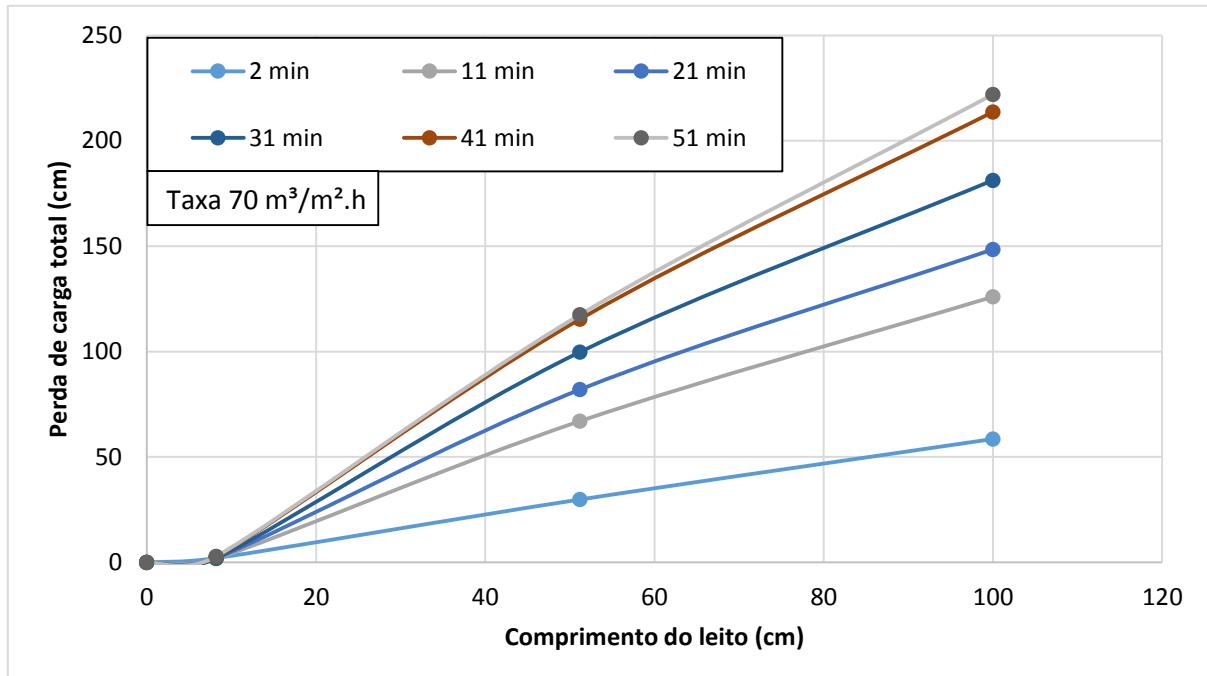


Figura 28 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

A Tabela 8 e a Tabela 9 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que a baixa duração da carreira de filtração devido a qualidade do afluente C resultou numa relação de consumo maior de água para lavagem em relação à produção de água diária.

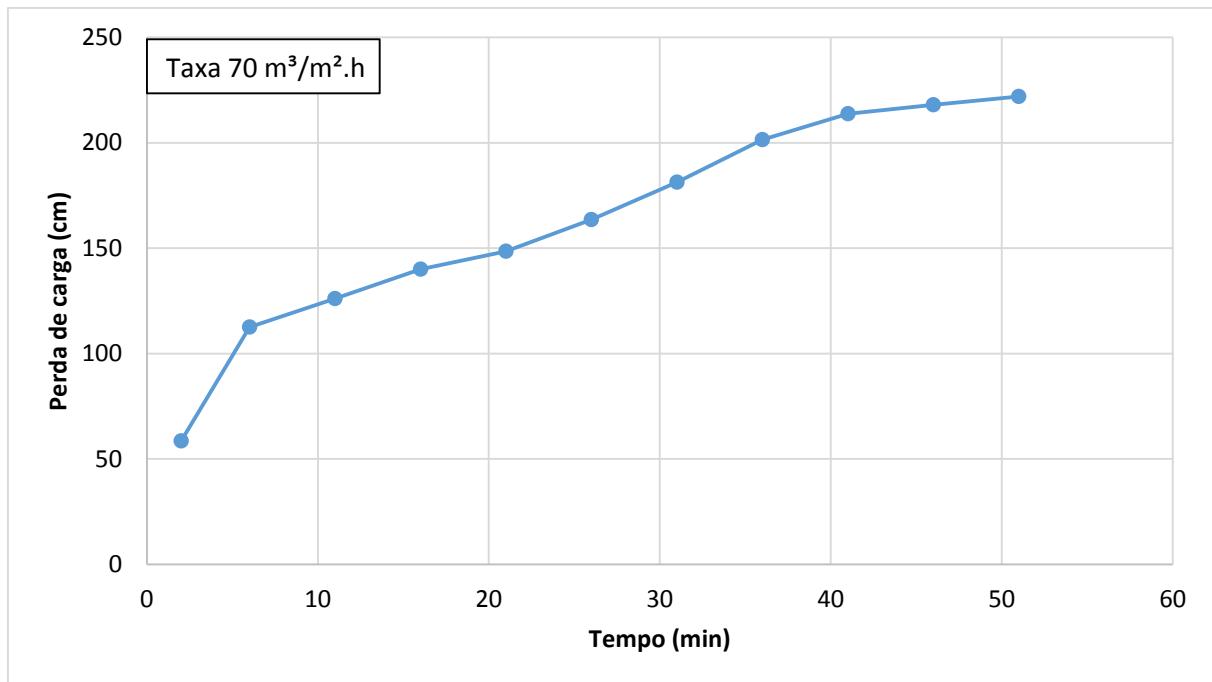


Figura 29 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

Tabela 8 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Perda de carga total (mca)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,22	51	27,7	36,64	34,14	31,64

Tabela 9 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	945,7	876,4	69,3	138,5	6,82%	13,65%

Na Figura 30 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 58,77 nm e 2305 nm. Nota-se que as partículas menores que 2,3 μm não são tão representativas em relação ao percentual de volume dessas partículas.

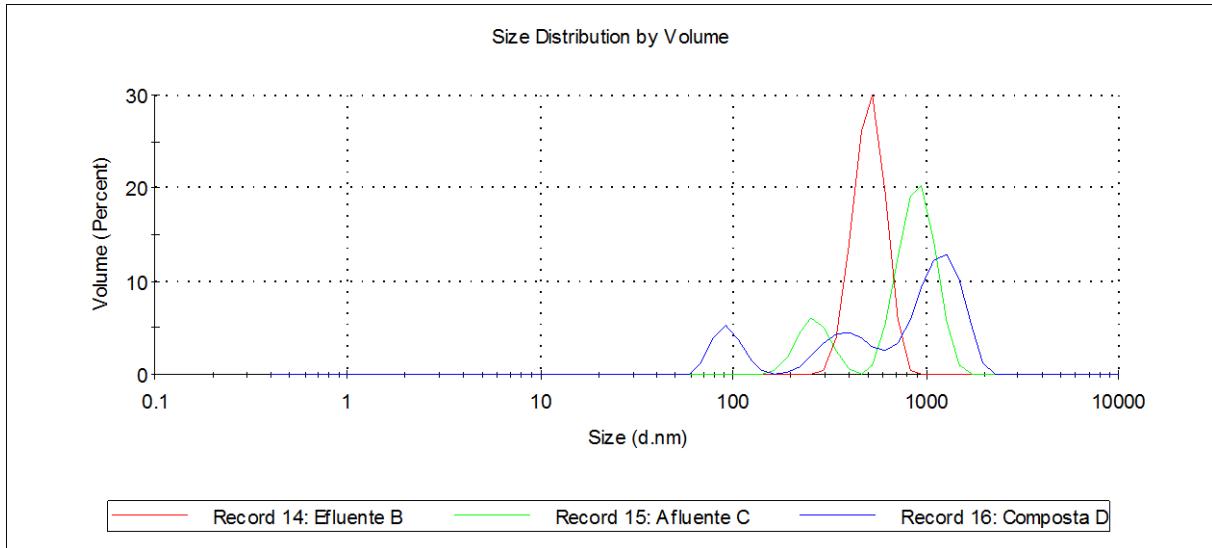


Figura 30 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

5.2.3.3 Taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

Esse ensaio foi realizado no dia 18/05/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 10. Nota-se uma boa remoção de turbidez, cor aparente e SST, considerando que não ocorreu coagulação.

Tabela 10 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

Amostra	Análises				
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total(mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)
Efluente B	13,8	396	217	46,4	20,2
Afluente C	12,2	363	213	41,2	20,2
Composta D	7,54	226	175	26,0	20,2
Remoção FFF	38,20%	37,74%	17,84%	36,86%	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 31. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0. Nota-se que entre os tempos de 15 e 40 minutos a qualidade do efluente manteve-se semelhante, logo após ocorreu uma leve piora na qualidade do efluente D, mas ainda manteve-se constante entre os tempos de 40 e 65 minutos.

A duração do ensaio foi de 66,8 minutos, chegando a perda de carga máxima de 2,22 mca. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 32. Nota-se aqui que há uma perda de carga bem distribuída ao longo do leito no início do processo de filtração, possuindo uma tendência de ocorrer uma maior perda de carga no final do leito ao longo do ensaio.

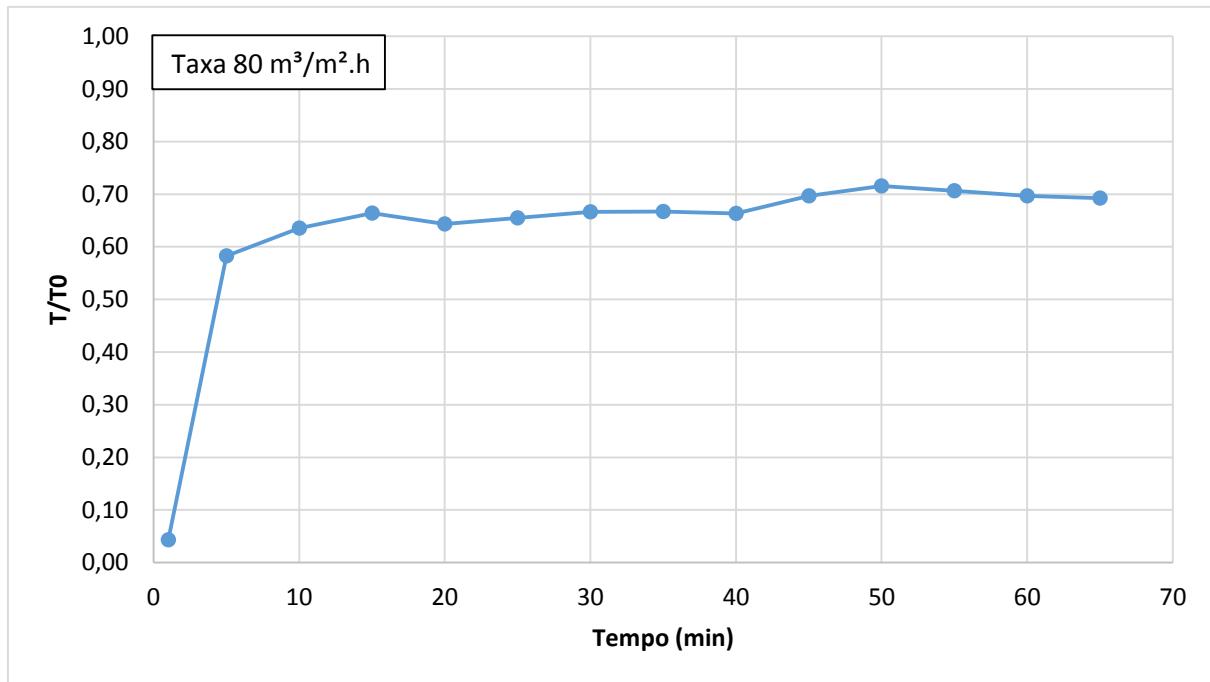


Figura 31 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

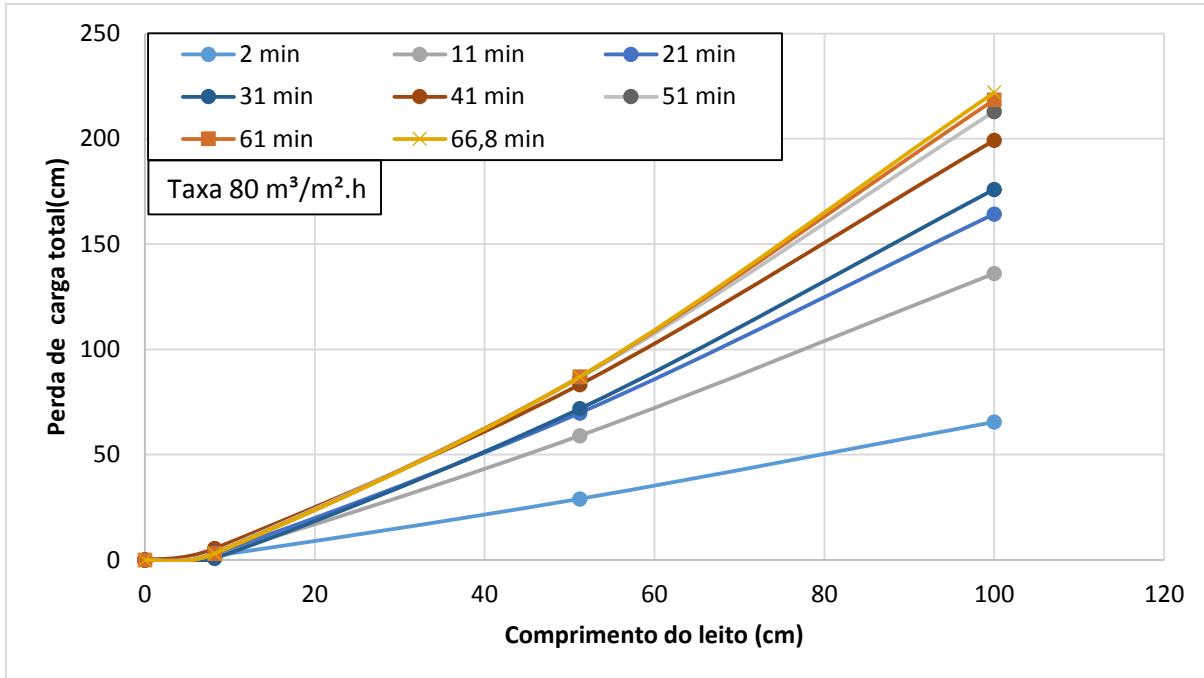


Figura 32 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

Na Figura 33 é representada a perda de carga ao longo do tempo. A perda de carga ao longo do ensaio possui um formato parabólico.

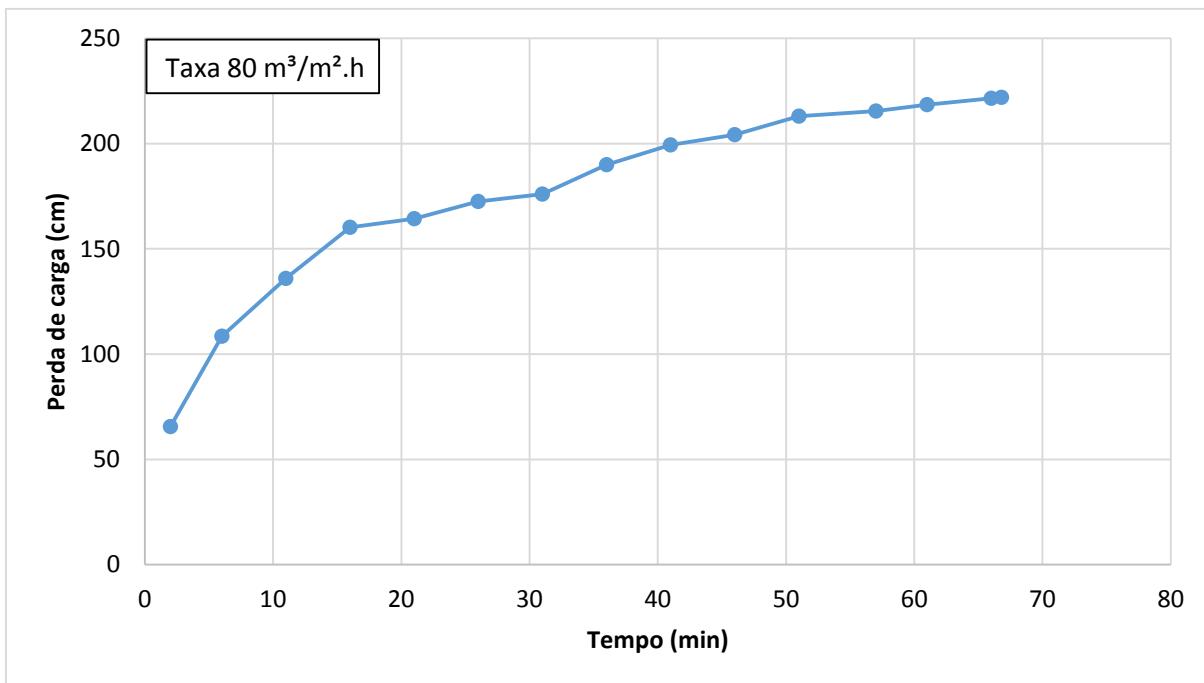


Figura 33 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

A Tabela 11 e a Tabela 12 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente.

Na Figura 34 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 122,4 nm e 1718 nm.

Tabela 11 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Perda de carga total (mca.)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,22	66,8	21,2	54,9	52,4	49,9

Tabela 12 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1110,9	1057,9	53,0	106,0	4,55%	9,11%

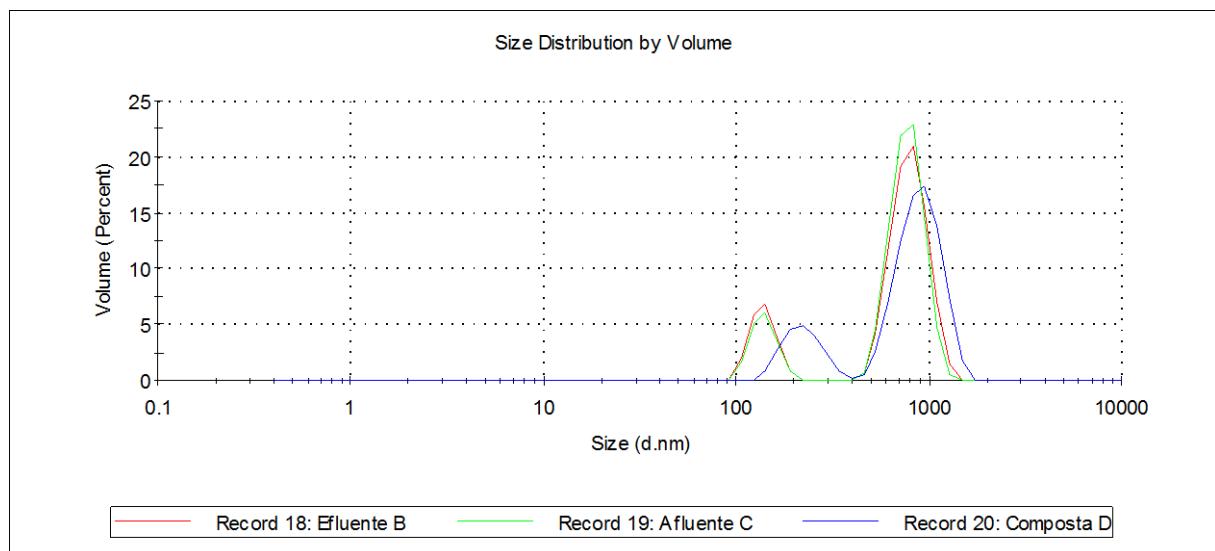


Figura 34 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

5.2.3.4 Taxa de 90 m³/m².h

Esse ensaio foi realizado no dia 15/05/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 13. Nota-se a partir dessa tabela que houve uma boa redução geral de turbidez, cor aparente e SST, já que não ocorreu coagulação. Nota-se que a qualidade do afluente C afetou o tempo de carreira desse ensaio

Tabela 13 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 90 m³/m².h com a lavagem do tipo I

Amostra	Análises				
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total (mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)
Efluente B	15,8	448	243	52,9	20,2
Afluente C	15,1	427	234	50,7	20,2
Composta D	7,8	263	168	26,9	20,2
Remoção FFF	48,34%	38,41%	28,21%	46,97%	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 35. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T₀. Nota-se que a qualidade do efluente manteve-se praticamente constante ao longo do ensaio.

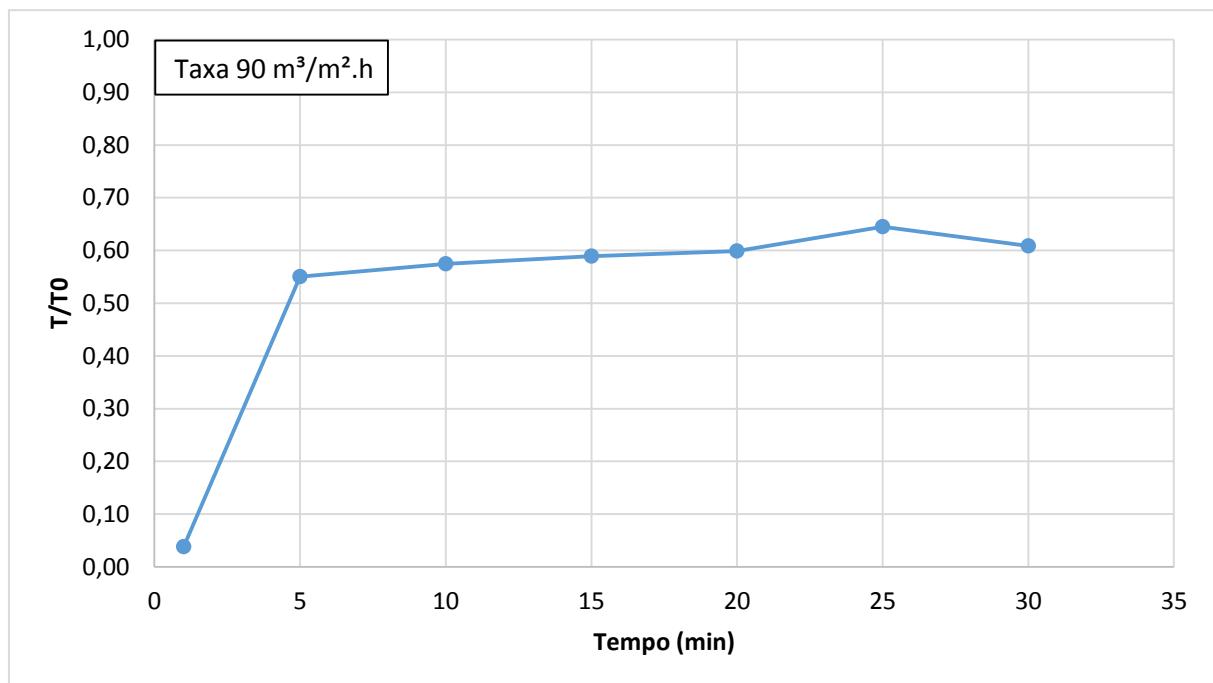


Figura 35 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 90 m³/m².h com a lavagem do tipo I

A duração do ensaio foi de 27,8 minutos, chegando a perda de carga máxima de 2,22 mca. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 36. Nota-se que a perda de carga nesse ensaio foi bem distribuída ao longo do leito do início do ensaio ao final.

Na Figura 37 é representada a perda de carga ao longo do tempo. A perda de carga ao longo do ensaio possui um formato parabólico.

A Tabela 14 e a Tabela 15 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que apesar da boa qualidade do efluente D do filtro, devido ao baixo tempo de carreira, a relação da água necessária para a lavagem, junto com o total de água produzida é significativa, tanto para a lavagem com 2,5 L quanto para a lavagem com 5,0 L.

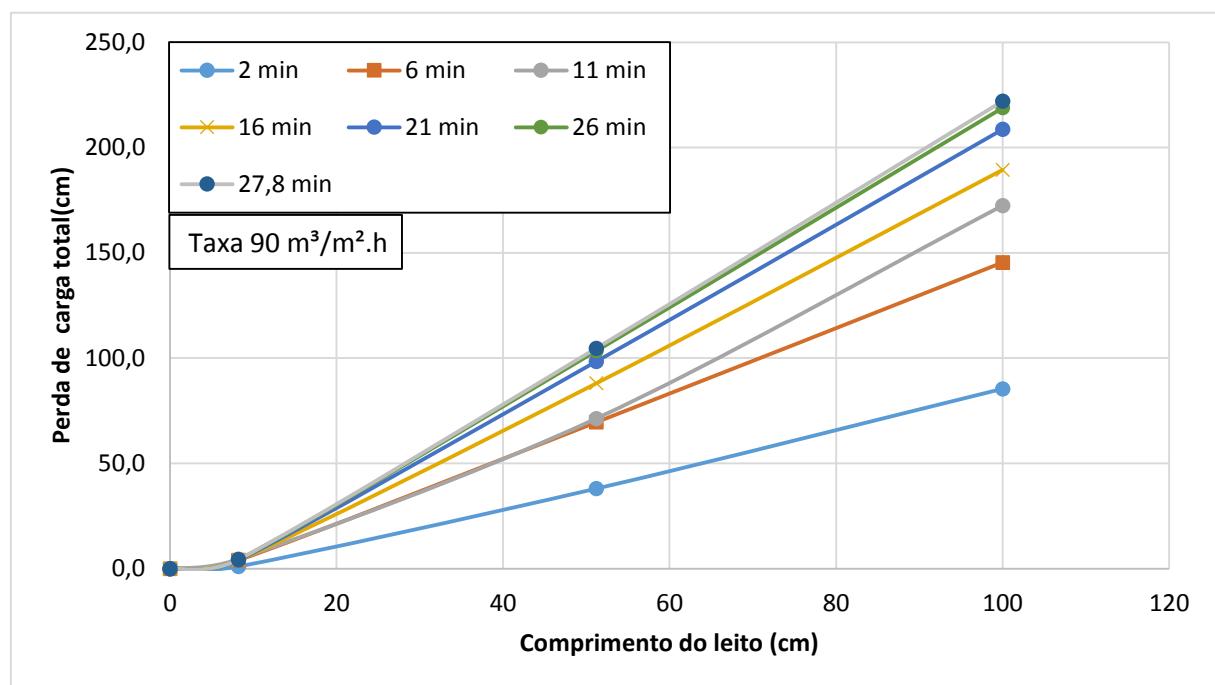


Figura 36 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

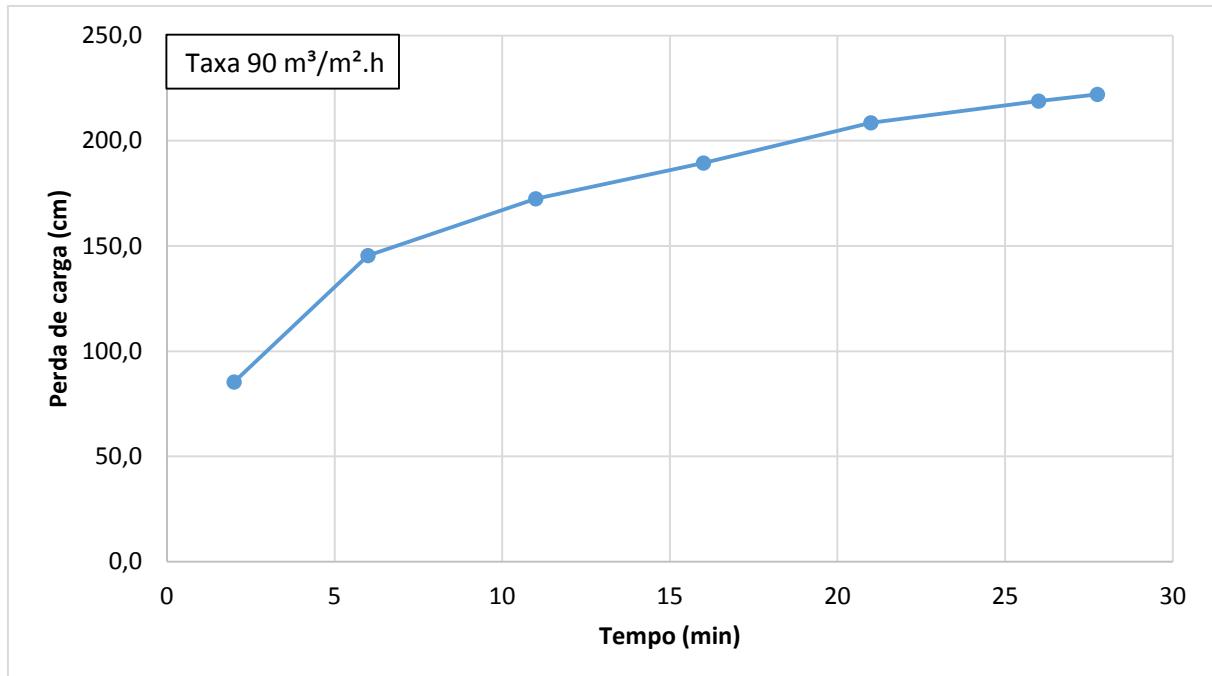


Figura 37 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

Tabela 14 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Perda de carga total (m.c.a.)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,22	27,8	50	25,64	23,14	20,64

Tabela 15 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1157,0	1032,0	125,0	250,0	9,75%	19,50%

Na Figura 38 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 91,28nm e 7456nm.

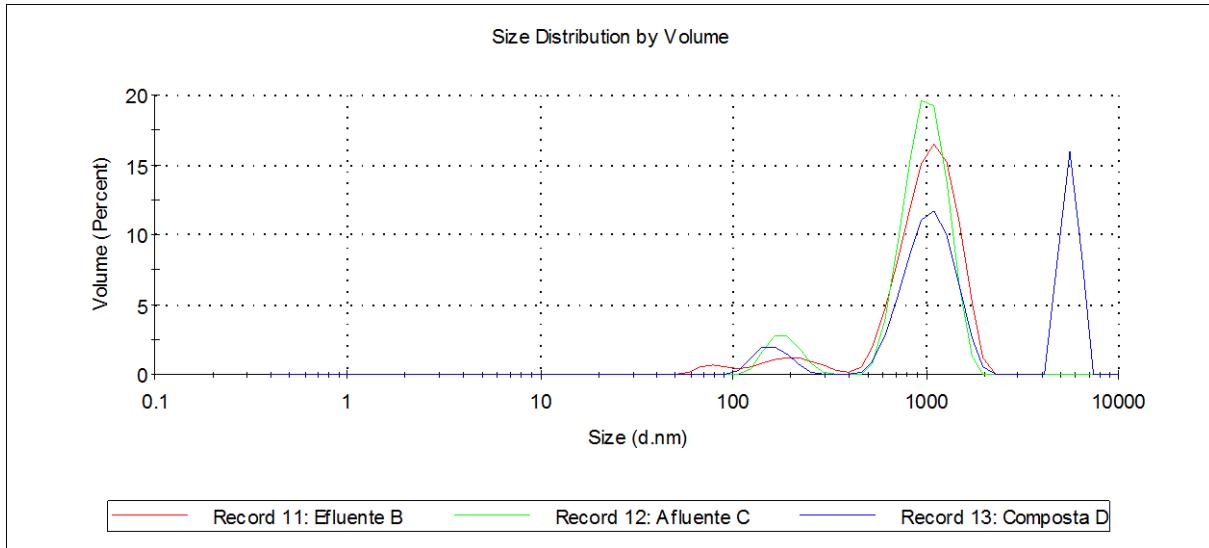


Figura 38 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

5.2.3.5 Taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

Esse ensaio foi realizado no dia 23/05/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 16. Nota-se sensível remoção de todos os parâmetros analisados.

Tabela 16 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

Amostra	Análises				
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total (mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)
Efluente B	15	375	336	50,3	21,5
Afluente C	14,9	381	332	50,0	21,5
Composta D	8,9	254	298	30,5	21,5
Remoção FFF	40,27%	33,33%	10,24%	39,10%	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 39. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0. A qualidade do efluente D em relação à turbidez manteve-se constante ao longo do ensaio a partir de 20 minutos.

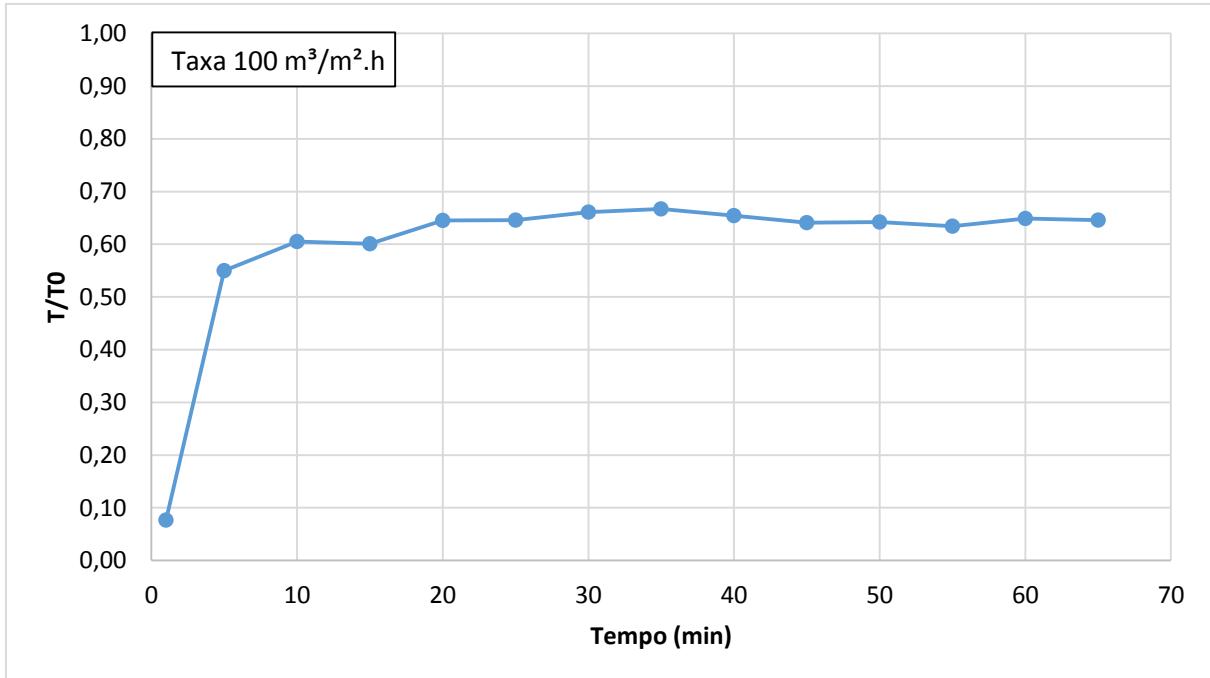


Figura 39 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

A duração do ensaio foi de 73,8 minutos, chegando a perda de carga máxima de 2,22 mca. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 40. Nota-se que a perda de carga manteve-se bem distribuída ao longo do leito praticamente durante todo o ensaio e que no tempo de 11 minutos ocorreu uma maior perda de carga no início do leito.

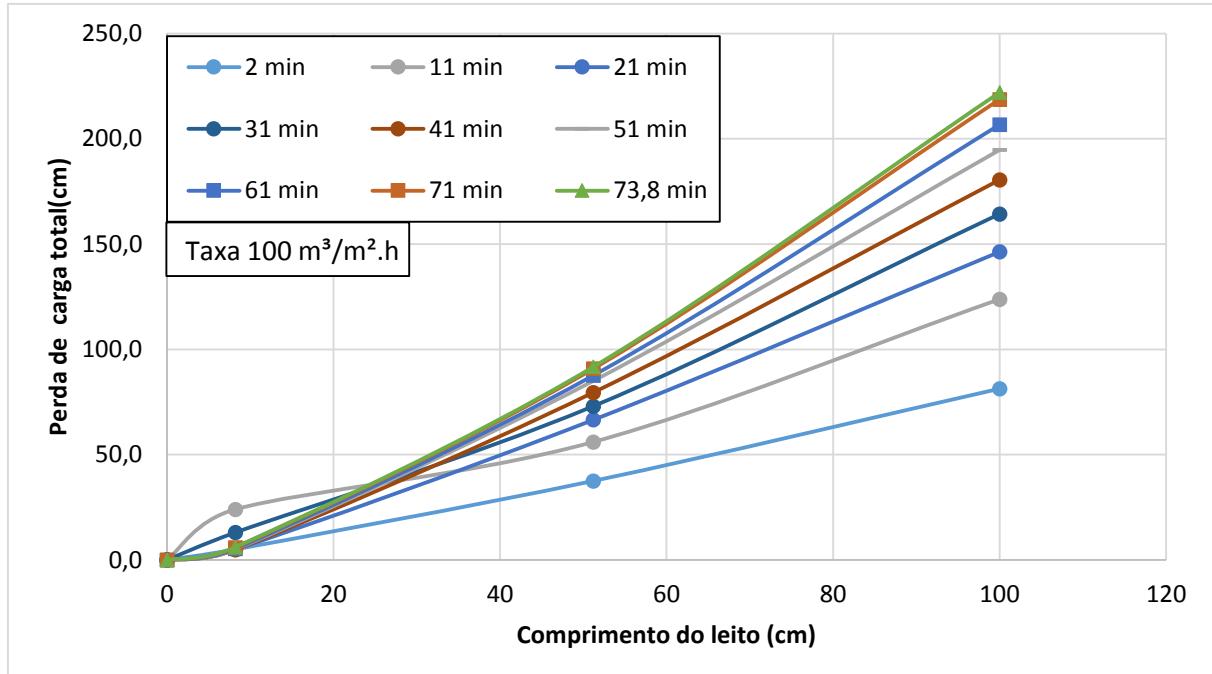


Figura 40 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo I

Na Figura 41 é representada a perda de carga ao longo do tempo. Nota-se que a perda de carga durante o ensaio aumentou-se constantemente em relação ao tempo, aproximando-se a uma reta.

A Tabela 17 e a Tabela 18 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que ocorreu uma relação satisfatória entre a água de lavagem e a produção diária e que houve um acréscimo considerável no volume produzido em 24 horas entre a taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ e a taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$, provavelmente pela maior retenção de partículas na taxa de filtração de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ implicando em um tempo de carreira menor devido à um aumento maior da perda de carga.

Na Figura 42 é representada a distribuição de partículas. A composta D teve partículas majoritariamente entre 141,8 nm e 7456 nm. Observa-se com esse gráfico que no afluente C do filtro, cerca de 17% das partículas se encontravam por volta de $1,5 \mu\text{m}$ e que na composta D do efluente do filtro, a relação do tamanho das partículas ocorreu em 3 picos, primeiro na faixa coloidal de 250 nm com 5% da relação, segundo na faixa de $2,0 \mu\text{m}$ com 15% da relação e por último na faixa de $5,5 \mu\text{m}$ com 12% da relação. Tal fato mostra a variabilidade das amostras, pois não foram computadas partículas com diâmetros maiores que $3,0 \mu\text{m}$ no afluente, mas foram encontradas partículas com diâmetros de até $7,0 \mu\text{m}$ no efluente do filtro.

Vale lembrar de que como é uma amostra qualitativa, não se tem o número de partículas para poder fazer uma afirmação com mais segurança.

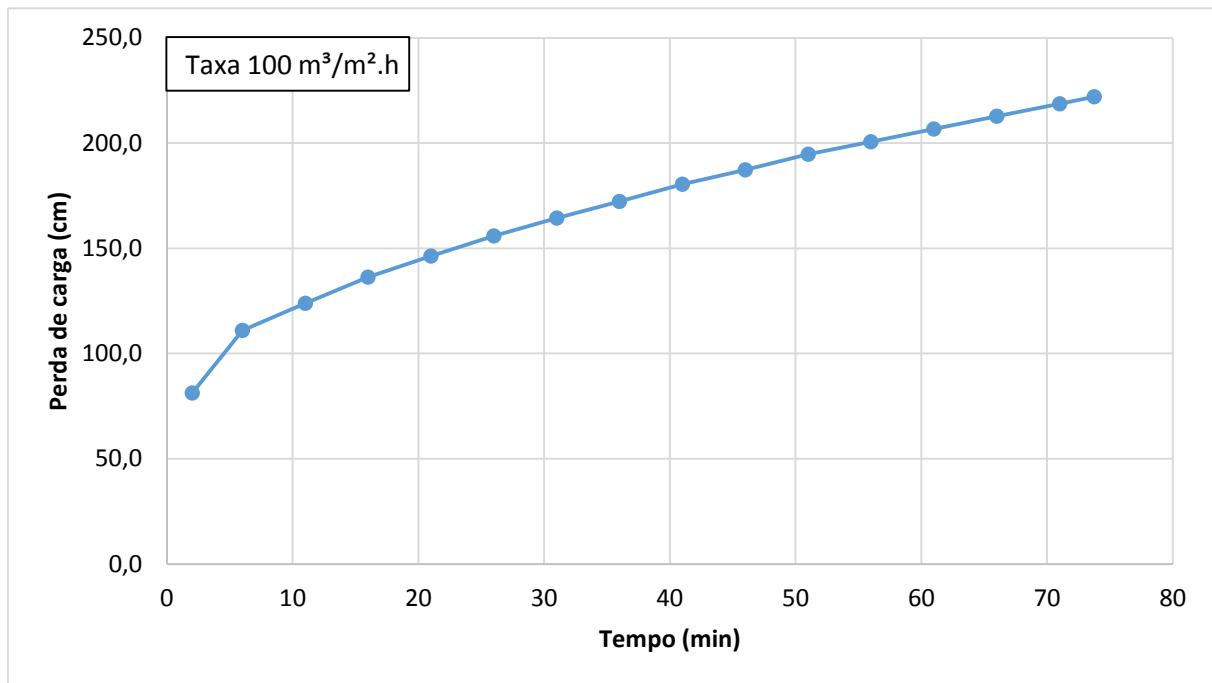


Figura 41 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo I

Tabela 17 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Perda de carga total (mca)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,22	73,8	19,3	75,69	73,19	70,69

Tabela 18 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1412,6	1364,3	48,3	96,5	3,30%	6,61%

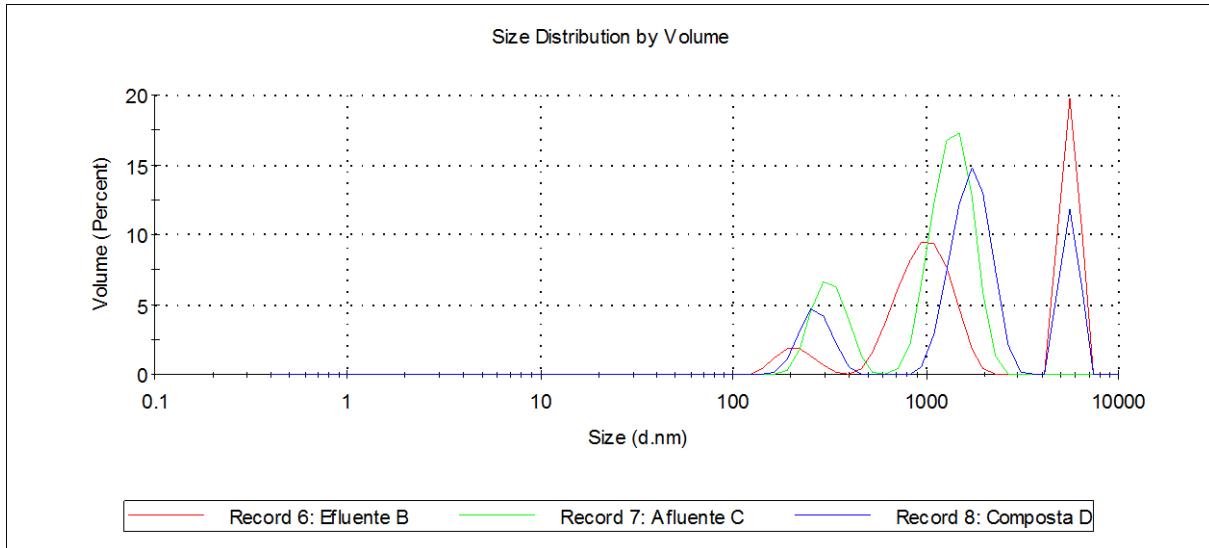


Figura 42 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

5.2.3.6 Taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

Esse ensaio foi realizado no dia 23/05/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 19. Nota-se uma boa remoção dos parâmetros analisados no efluente D, já que não ocorreu coagulação.

Tabela 19 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

Amostra	Análises				
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total(mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)
Efluente B	15	375	336	50,3	21,5
Afluente C	14,9	381	332	50,0	21,5
Composta D	9,1	280	270	31,1	21,5
Remoção FFF	38,93%	26,51%	18,67%	37,80%	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 43. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0. A qualidade do efluente D, em relação à turbidez, possui uma leve piora ao longo do ensaio, se aproximando a uma reta com uma leve inclinação, mas praticamente constante.

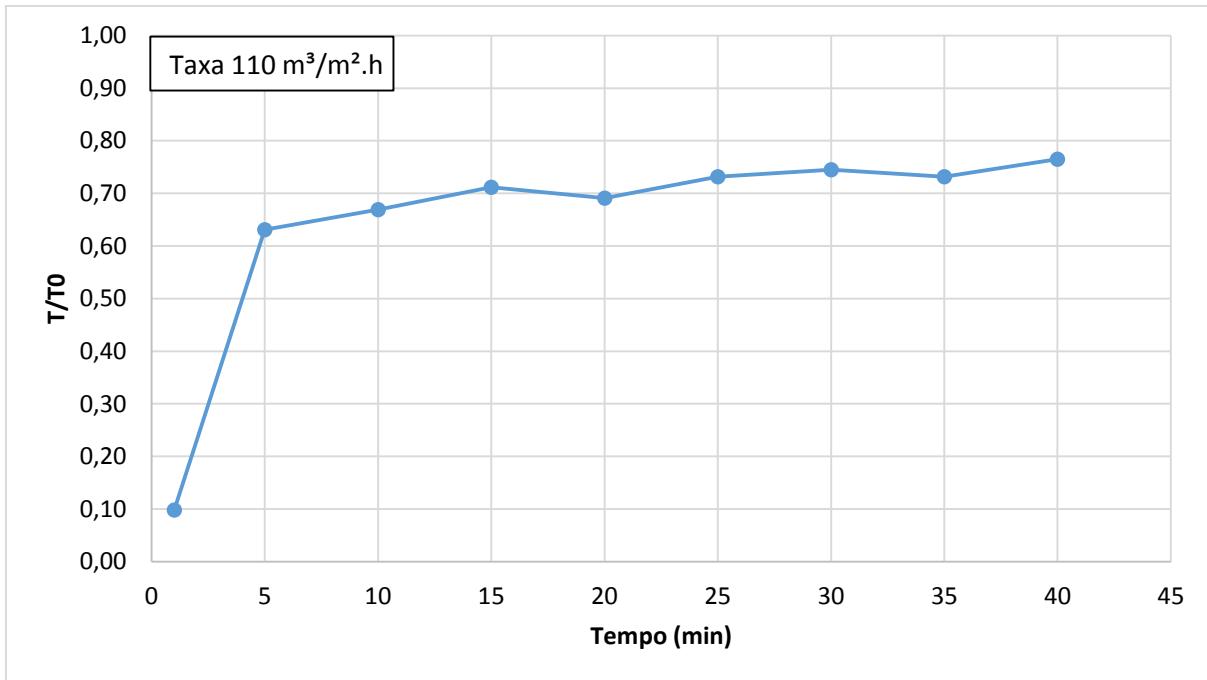


Figura 43 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

A duração do ensaio foi de 41,9 minutos, chegando a perda de carga máxima de 2,22 mca. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 44. Observa-se que a maior perda de carga ocorre no final do meio filtrante.

Na Figura 45 é representada a perda de carga ao longo do tempo. Nota-se que o aumento da perda de carga ocorre progressivamente se aproximando a uma reta.

A Tabela 20 e a Tabela 21 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Observa-se que comparando com a taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ a produção de água aumenta aproximadamente em 90 L e que a se reduz cerca de 30 minutos a duração da carreira.

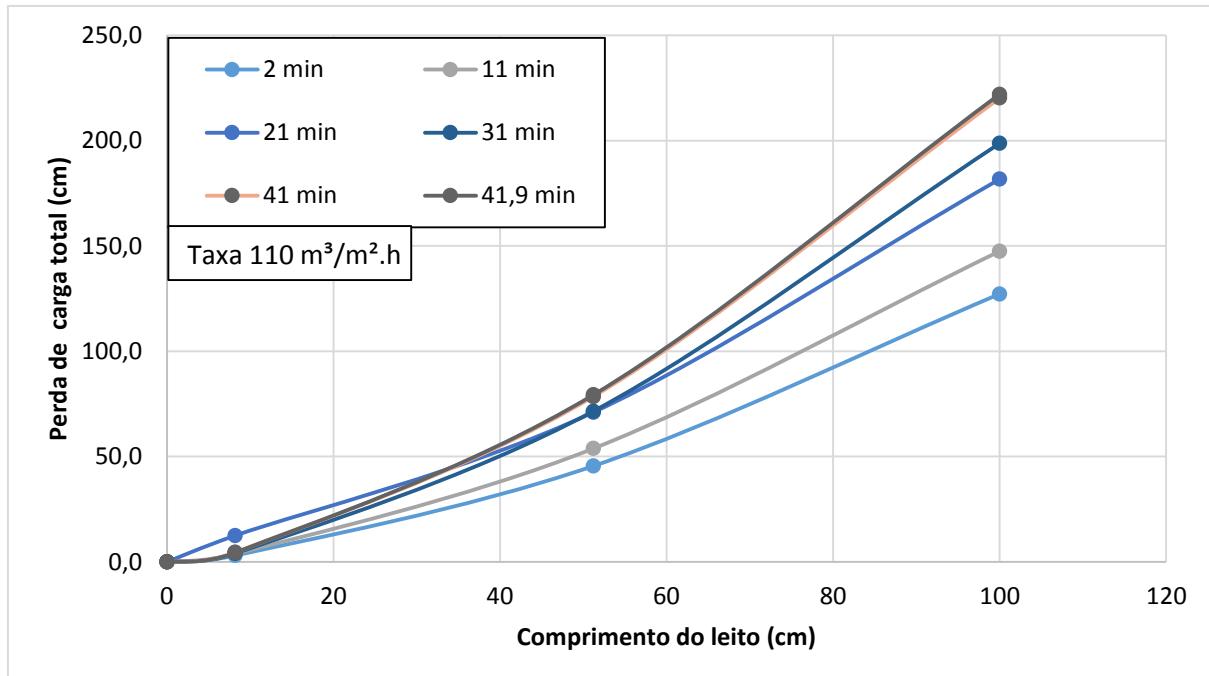


Figura 44 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

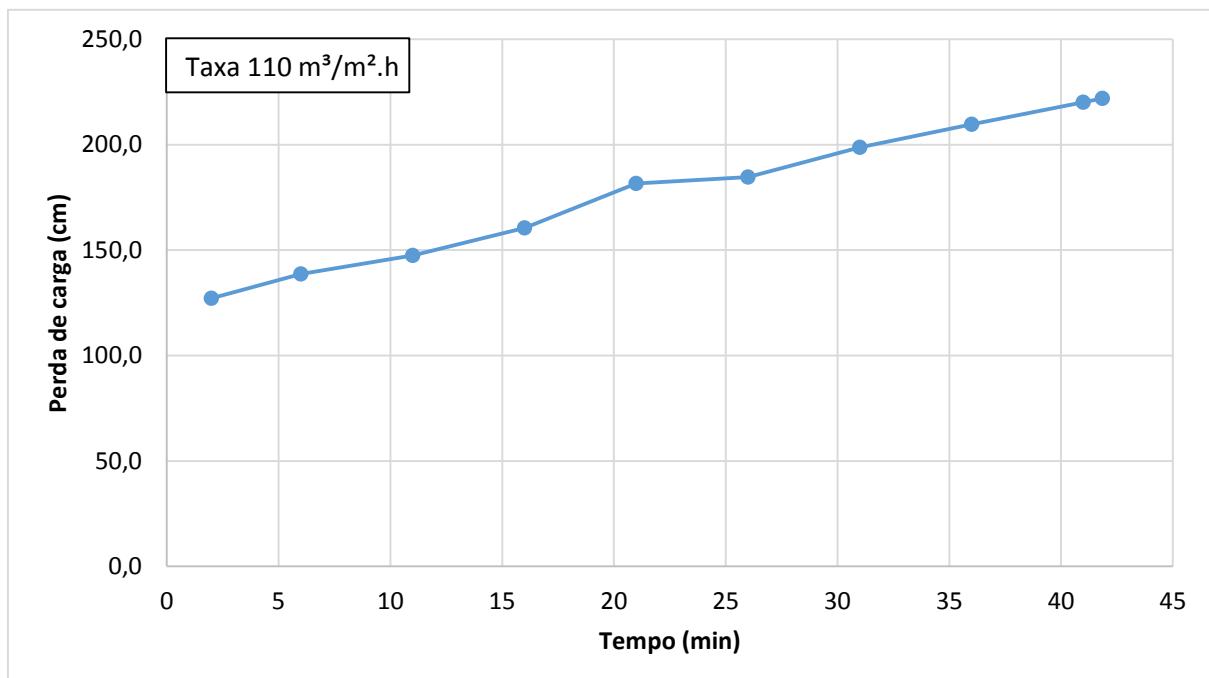


Figura 45 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

Tabela 20 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Perda de carga total (m.c.a.)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,22	41,9	33,6	47,26	44,76	42,26

Tabela 21 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1503,9	1419,9	84,0	168,0	5,29%	10,58%

Na Figura 46 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 164,2 nm e 5560 nm. Observa-se com esse gráfico que o pico da distribuição de partículas pelo volume encontra-se por volta de 2,0 μm para o efluente D.

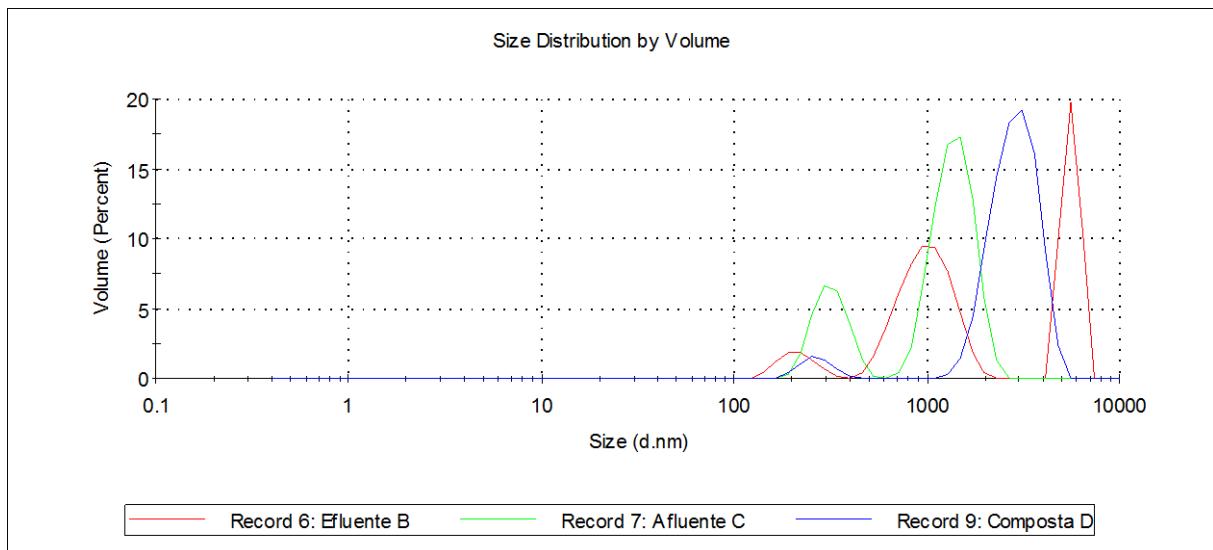


Figura 46 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo I

5.2.3.7 Taxa de 120 m³/m².h

Esse ensaio foi realizado no dia 23/05/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 22. Nota-se que a remoção de SST foi menor em relação as taxas de 100 e 110 m³/m².h, contudo manteve-se um rendimento similar das outras taxas de filtração analisadas. É importante ressaltar que o efluente B e afluente C foram os mesmos para essas três taxas.

Tabela 22 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 120 m³/m².h com a lavagem do tipo I

Amostra	Análises				
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total (mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)
Efluente B	15	375	336	50,3	21,5
Afluente C	14,9	381	332	50,0	21,5
Composta D	8,5	260	253	29,2	21,5
Remoção FFF	42,95%	31,76%	23,80%	41,71%	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 47. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0. A qualidade do efluente D, em relação a turbidez, manteve-se constante entre 5 e 20 minutos.

A duração do ensaio foi de 22,7 minutos, chegando a perda de carga máxima de 2,22 mca. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 48. Nota-se que ocorreu maior perda de carga na parte final do leito filtrante ao longo do ensaio.

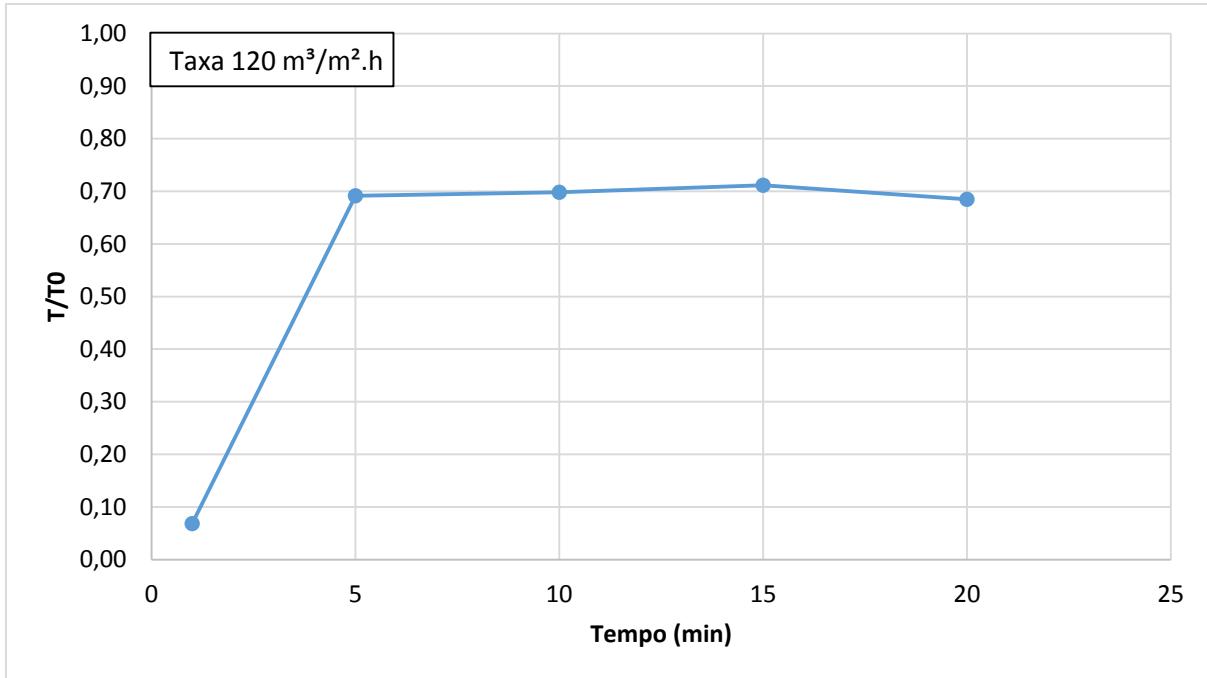


Figura 47 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

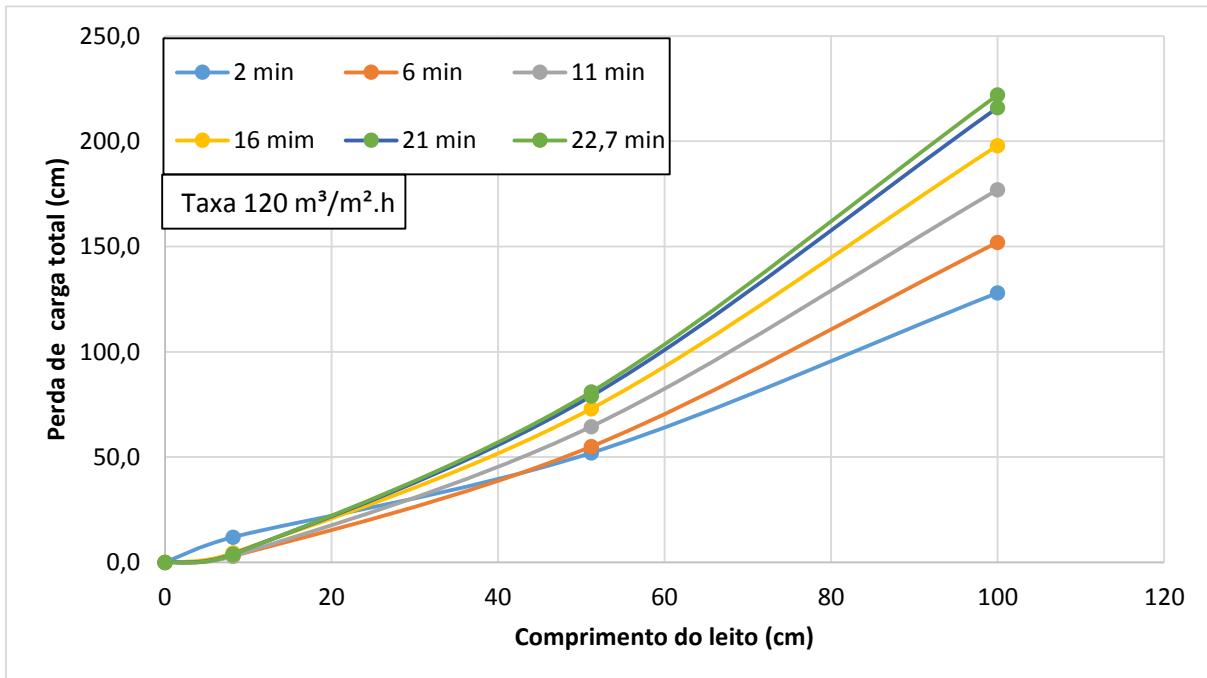


Figura 48 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

Na Figura 49 é representada a perda de carga ao longo do tempo. Nota-se que o aumento da perda de carga se assemelha a uma leve curva, quase se aproximando a uma reta.

A Tabela 23 e a Tabela 24 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Comparando com a taxa de

110 m³/m².h nota-se que o número de carreiras por dia quase dobrou para a taxa de 120 m³/m².h. Apesar disso, para a lavagem com 2,5 L de água a produção diária é maior para a taxa de 120 m³/m².h, já para a lavagem com 5,0 L de água a produção diária de água clarificada é maior para a taxa de 110 m³/m².h.

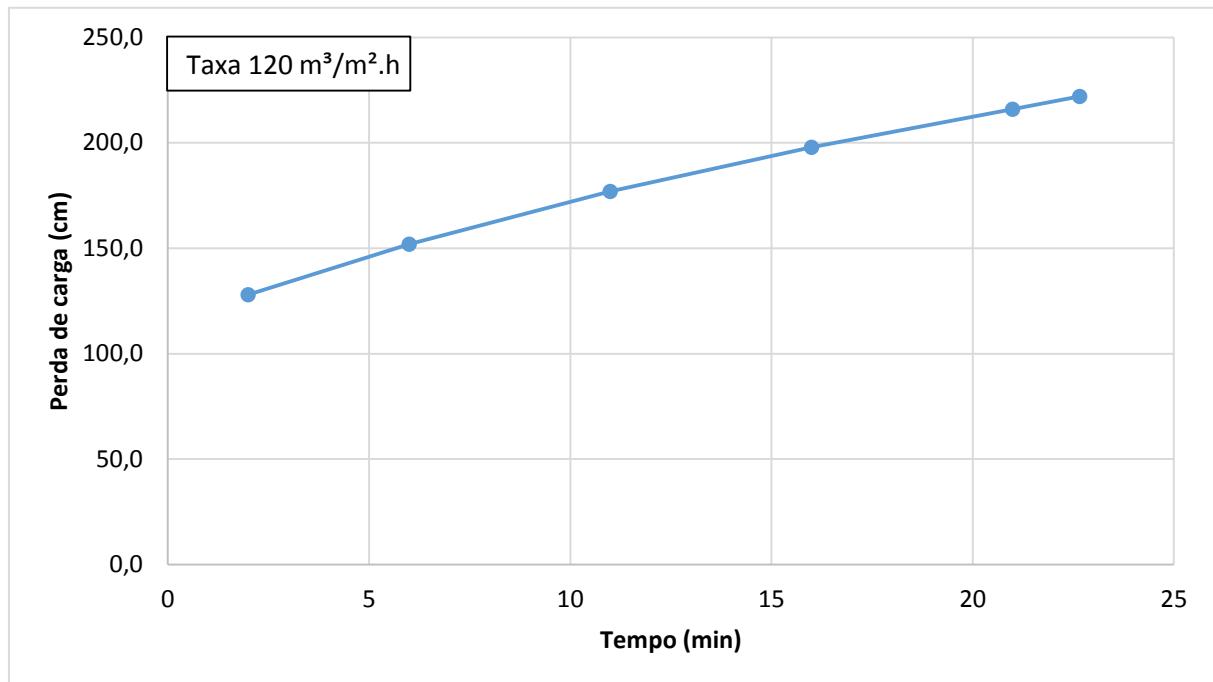


Figura 49 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de 120 m³/m².h com a lavagem do tipo I

Tabela 23 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 120 m³/m².h com a lavagem do tipo I

	Perda de carga total (m.c.a.)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,22	22,7	60,8	27,92	25,42	22,92

Tabela 24 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 120 m³/m².h com a lavagem do tipo I

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1545,5	1393,5	152,0	304,0	8,95%	17,91%

Na Figura 50 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 164,2 nm e 4145 nm. Nota-se que para a composta D o pico se encontra na faixa de 1,5 µm.

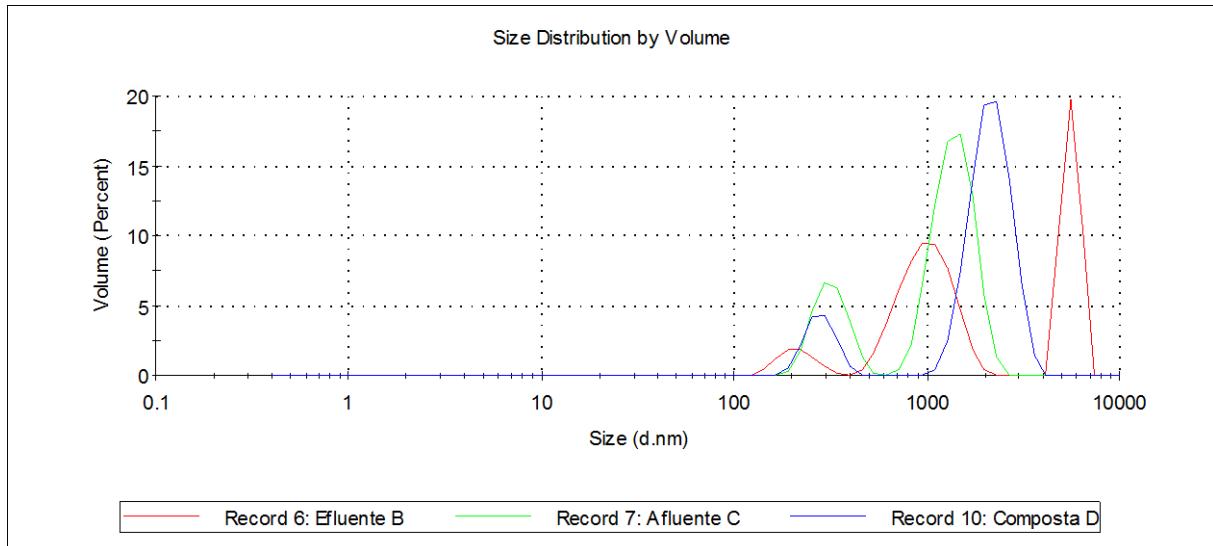


Figura 50 - Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo I

5.2.3.8 Análise geral das taxas de filtração dos ensaios com lavagem do tipo I

Avaliando as taxas de filtração dos ensaios com lavagem do tipo I foi possível afirmar que o tempo de carreira depende da qualidade do afluente no filtro de fibra flexível assim como em filtros convencionais. Tal fato pode ser constatado nos ensaios da taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ na qual o afluente do filtro apresentava-se com níveis mais altos de turbidez, cor aparente, DQO e SST, e obteve-se um tempo de carreira menor do que as outras taxas.

Observa-se ainda que independente da taxa de filtração e da qualidade do afluente entre 12,2 e 21,1 uT, a qualidade do efluente obtida através destes ensaios foram semelhantes. A Tabela 25 apresenta o resumo dos ensaios com lavagem do tipo I. Observa-se que em geral a remoção foi satisfatória, relembrando que não foram utilizados coagulantes nesse experimento. A remoção de SST foi de 40% aproximadamente, correlacionando a curva turbidez por SST mostrada anteriormente.

Tabela 25 – Resumo das maiores e menores remoções dos ensaios com lavagem do tipo I

	Maior remoção	Taxa da maior remoção	Menor remoção	Taxa da menor remoção
Turbidez	48,48%	90 m ³ /m ² .h	37,23%	60 m ³ /m ² .h
Cor aparente	38,41%	90 m ³ /m ² .h	17,68%	70 m ³ /m ² .h
SST	46,97%	90 m ³ /m ² .h	36,06%	60 m ³ /m ² .h
DQO total	33,86%	70 m ³ /m ² .h	10,24%	100 m ³ /m ² .h

Observa-se ainda que apesar das altas taxas possuírem um grande número de carreiras diárias, ou seja, maior gasto para lavagem dos filtros, a produção de água diária é maior nas altas taxas do que nas baixas, devido ao curto tempo de lavagem de apenas um minuto. Nota-se ainda pela Figura 51 que se o número de carreiras de uma taxa for alto, a produção diária de água será menor comparando com uma taxa de filtração menor, como constatado entre a taxa de 110 e 120 m³/m².h na lavagem com 5,0 L, na qual a produção diária da taxa de 110 m³/m².h é maior que de 120 m³/m².h, pois a taxa de 120 m³/m².h necessita de um volume diário maior de água para lavagem, devido ao curto tempo de duração de uma carreira.

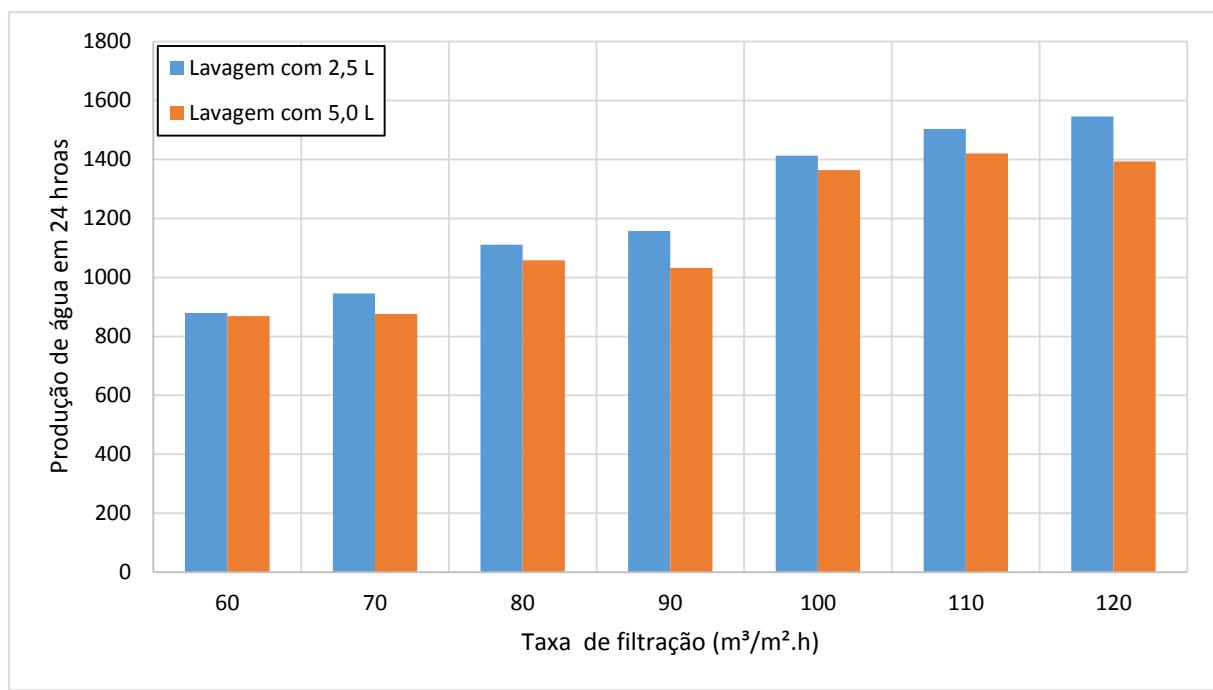


Figura 51 – Relação entre taxa de filtração e produção de água em 24 horas para os ensaios com lavagem do tipo I

Em relação à perda de carga, nota-se que houve uma boa distribuição ao longo do leito desde o inicio da filtração, mostrando um melhor aproveitamento do meio filtrante em

relação com a carga disponível. Contudo não se tem o acompanhamento da frente de impureza mostrada pela perda de carga, portanto não se tem uma garantia de quando irá ocorre o transpasse, como observado melhor em filtros com leitos granulares.

Em relação ao tamanho de partículas, nota-se que as partículas representativas presentes são inferiores a 7,5 µm no efluente do FFF.

5.2.4 Avaliação das taxas de filtração com lavagem tipo II

Os ensaios com lavagem do tipo II estão apresentados abaixo. Recordando que a lavagem do tipo II é a inserção separada ar e água, relembrando que não foi objetivo do estudo dessa pesquisa calcular a quantidade de água utilizada na lavagem do leito. Recorda-se novamente que não ocorreu coagulação do afluente.

5.2.4.1 Taxa de 60 m³/m².h

Esse ensaio foi realizado no dia 18/07/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 26. Nota-se que alguns dados de DQO estão ausentes. Isso ocorreu por problemas nas análises.

Tabela 26 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 60 m³/m².h com a lavagem do tipo II

Amostra	Análises				
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total(mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)
Efluente B	28,7	479	214,5	95,0	22
Afluente C	13,1	340	-	44,1	22
Composta D	8,1	259	-	27,8	22
Remoção FFF	38,17%	23,82%	-	36,92%	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 52. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0. Nota-se com esse gráfico que ao longo de todo o ensaio não ocorreu uma alteração na qualidade do efluente D.

A duração do ensaio foi de 331 minutos, contudo ainda não havia chegado a perda de carga máxima de 2,22 mca, portanto através do comportamento do gráfico entre a perda de carga e a duração da carreira, foi simulado valores até que se atingisse a perda de carga máxima. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser

conferida na Figura 53. Nota-se a partir desse gráfico, que a perda de carga se encontra bem distribuída ao longo do leito e que o tempo de duração teórico do ensaio foi de 621 minutos.

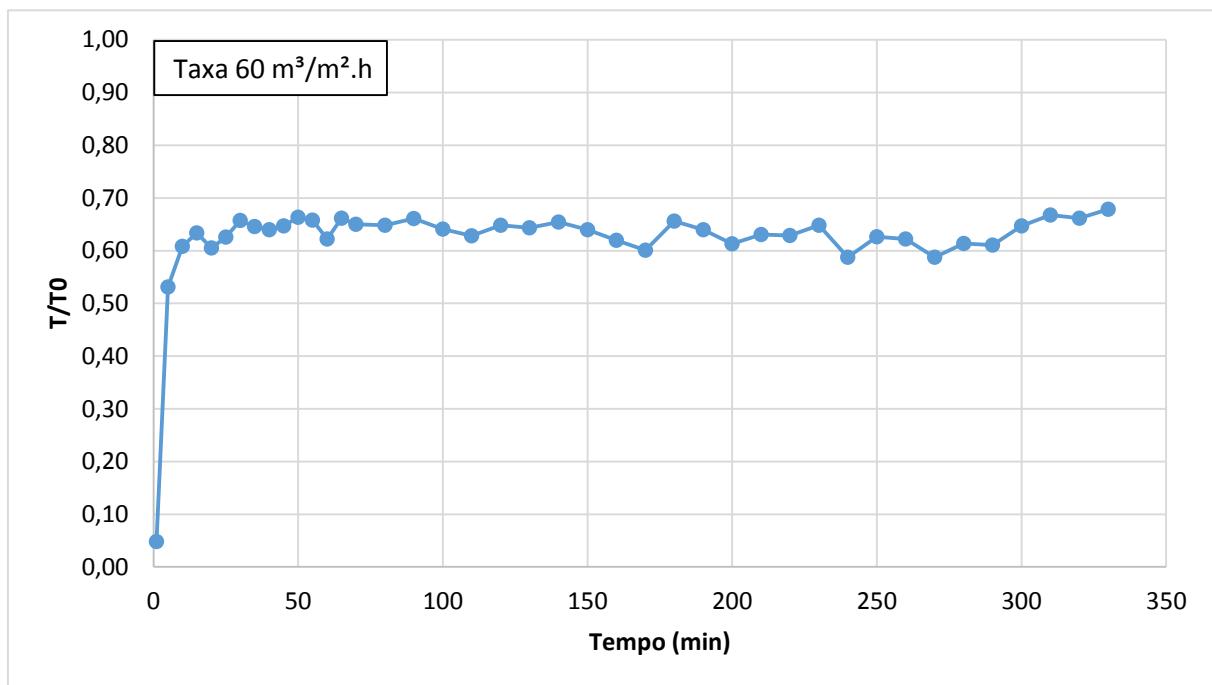


Figura 52 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

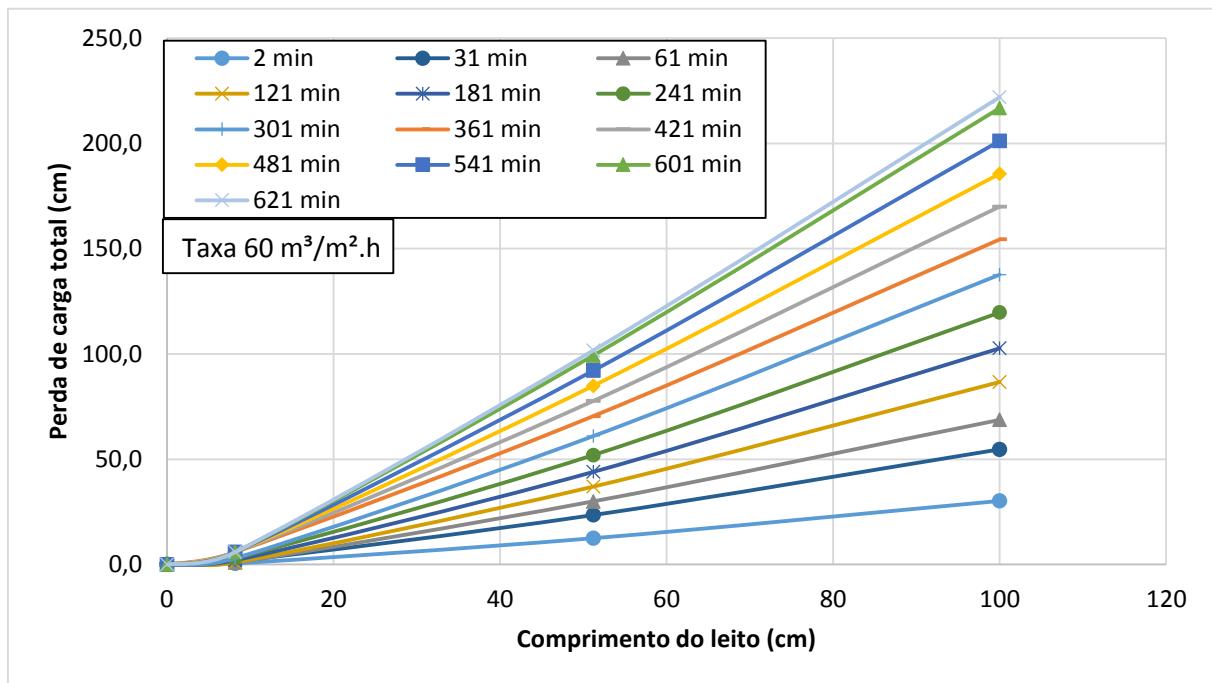


Figura 53 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II com tempos de 361, 421, 481, 541, 601 e 621 minutos simulados

Na Figura 54 é representada a perda de carga ao longo do tempo. Pode-se notar a partir desse gráfico que os pontos que representam os valores da perda de carga em função do tempo de operação parecem apresentar tendência retilínea.

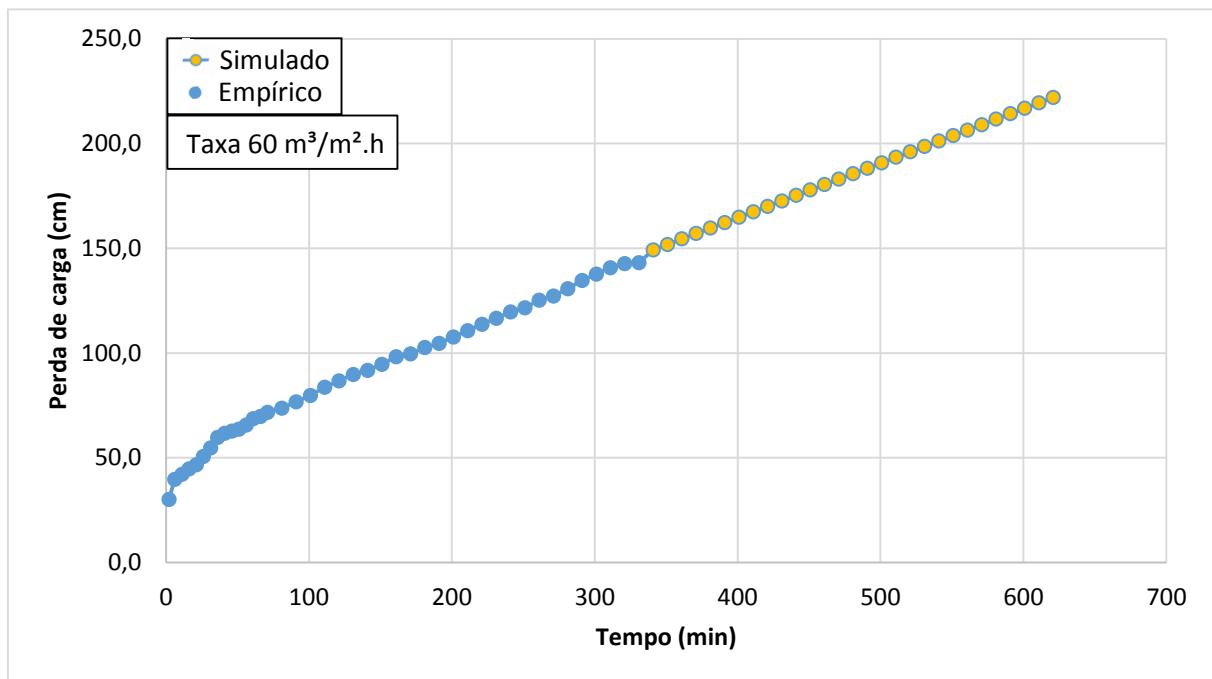


Figura 54 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

A Tabela 27 e a Tabela 28 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que a relação de volume gasto para lavagem tanto para lavagem com 2,5 L quanto para lavagem com 5,0 L apresentou-se baixa, devido a duração do período de uma carreira ser alta.

Tabela 27 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Perda de carga total (mca)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume líquido produzido por carreira (L)		
				Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	
Empírico	1,38	331	4,3	203,8	201,34	198,84
Empírico e Simulado	2,22	621	2,3	382,4	379,93	377,43

Tabela 28 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	873,3	862,4	10,8	21,7	1,23%	2,45%
Empírico e Simulado	879,6	873,8	5,8	11,6	0,65%	1,31%

Na Figura 55 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 190,1nm e 1990nm.

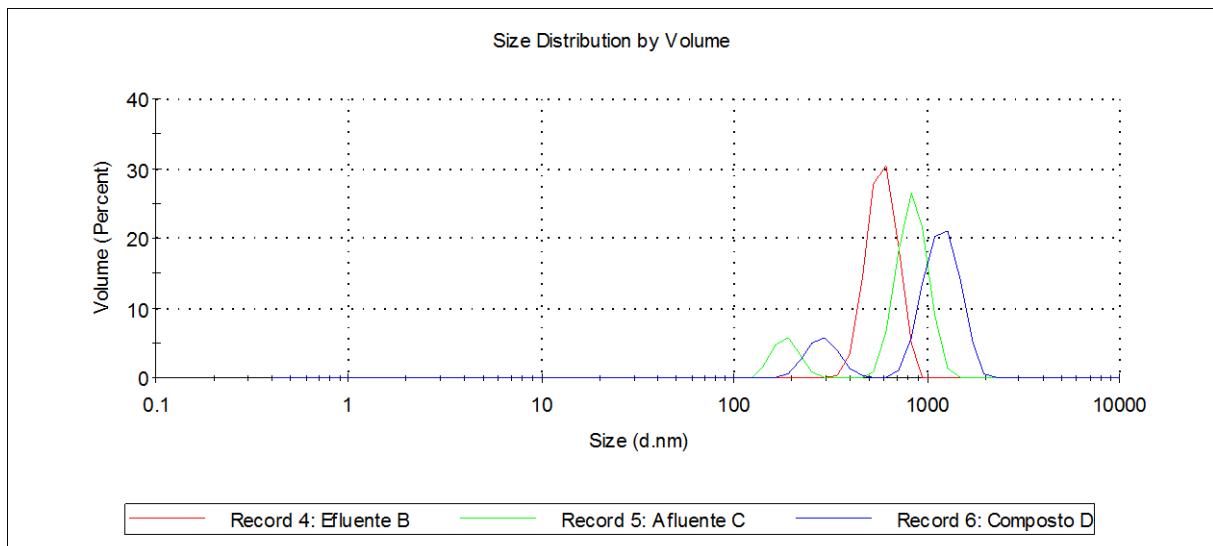


Figura 55 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

5.2.4.2 Taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

Esse ensaio foi realizado no dia 22/07/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 29. Observa-se que a remoção de turbidez e cor aparente foi mais baixa em relação à outras taxas de filtração.

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 56. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0.

Tabela 29 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 70 m³/m².h com a lavagem do tipo II

Amostra	Análises					
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total (mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)	pH
Efluente B	23,9	474	-	79,3	21	7,33
Afluente C	11,6	330	135	39,3	21	7,36
Composta D	9,80	271	116	33,4	21	7,75
Remoção FFF	15,52%	17,88%	14,26%	14,95%	-	-

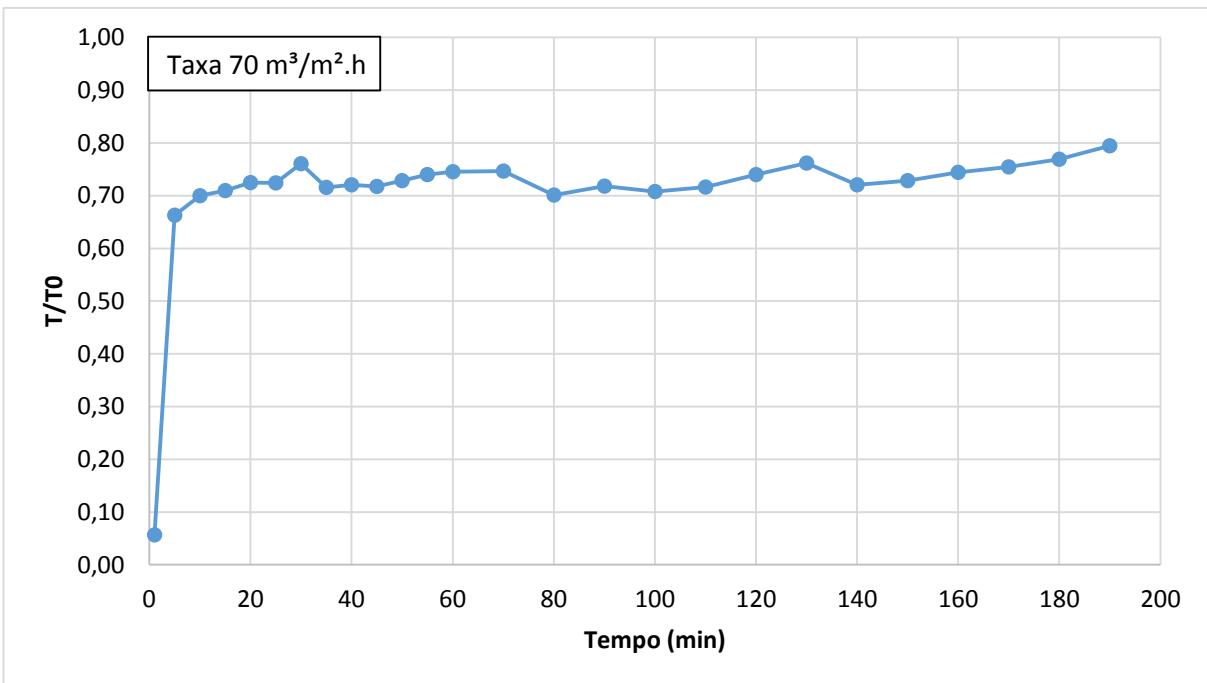


Figura 56 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 70 m³/m².h com a lavagem do tipo II

A duração do ensaio foi de 321 minutos, contudo ainda não havia chegado a perda de carga máxima de 2,22 mca, portanto através do comportamento do gráfico entre a perda de carga e a duração da carreira, foi simulado valores até que se atingisse a perda de carga máxima. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 57. Nota-se a partir desse gráfico, que a perda de carga se encontra bem distribuída ao longo do leito e que o tempo de duração teórico do ensaio foi de 708,5 minutos.

Na Figura 58 é representada a perda de carga ao longo do tempo. Pode-se notar a partir desse gráfico que representam os valores da perda de carga em função do tempo de operação parecem apresentar tendência retilínea.

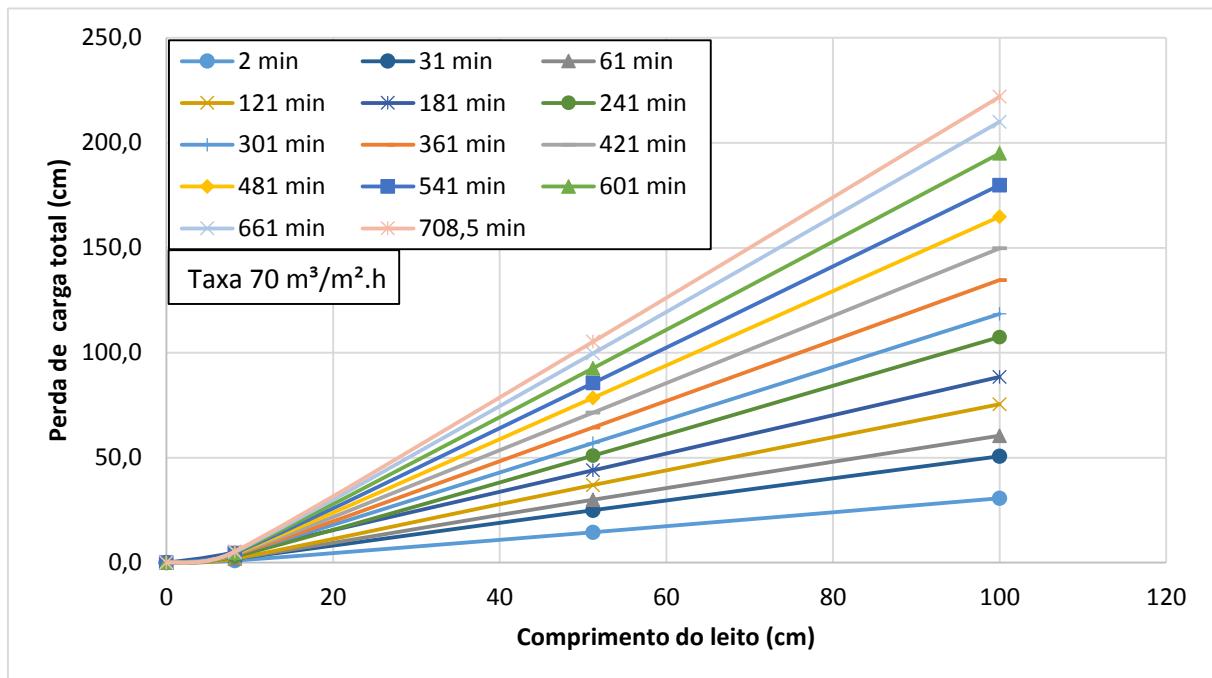


Figura 57 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo II com tempos de 361, 421, 481, 541, 601, 661 e 708,5 minutos simulados

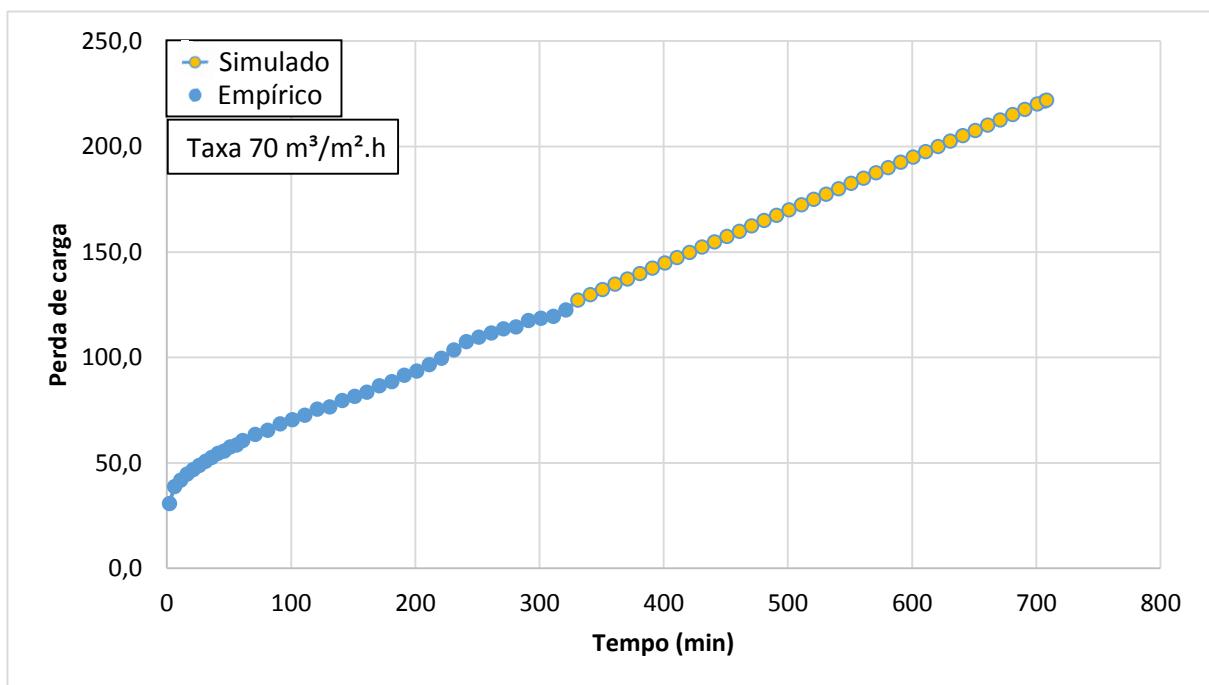


Figura 58 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo II

A Tabela 30 e a Tabela 31 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que a relação de

volume gasto para lavagem tanto para lavagem com 2,5 L quanto para lavagem com 5,0 L apresentou-se baixa, devido a duração do período de uma carreira ser alta.

Tabela 30 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de 70 m³/m².h com a lavagem do tipo II

	Perda de carga total (mca)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1,23	321	4,5	230,6	228,14	225,64
Empírico e Simulado	2,22	708,5	2,0	509,1	506,56	504,06

Tabela 31 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de 70 m³/m².h com a lavagem do tipo II

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1020,2	1009,1	11,2	22,4	1,08%	2,17%
Empírico e Simulado	1028,1	1023,0	5,1	10,1	0,49%	0,98%

Na Figura 59 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 164,2nm e 3580nm. Nota-se que na composta D 22% das partículas possuía o tamanho de 1,5 µm.

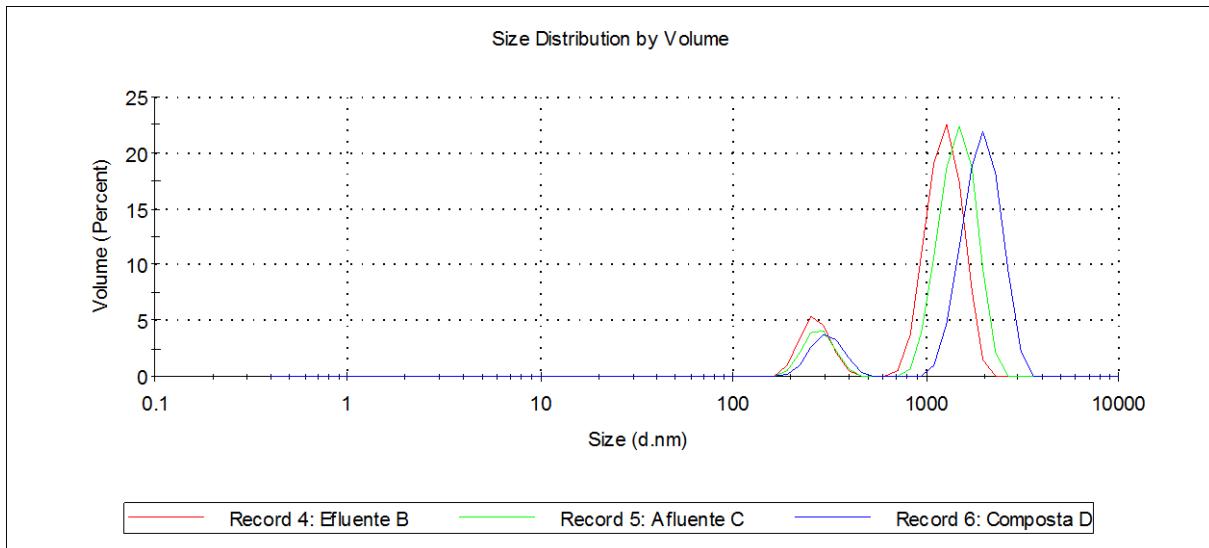


Figura 59 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $70 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

5.2.4.3 Taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

Esse ensaio foi realizado no dia 29/07/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 32.

Tabela 32 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

Amostra	Análises					
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total (mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)	pH
Efluente B	20,0	431	-	66,6	22,5	7,33
Afluente C	11,2	320	237	38,0	22,5	7,31
Composta D	8,2	237	158	28,2	22,5	7,56
Remoção FFF	26,79%	25,94%	33,45%	25,77%	-	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 60. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0. Nota-se com esse gráfico, que há uma tendência da qualidade do efluente em relação à turbidez de se manter constante.

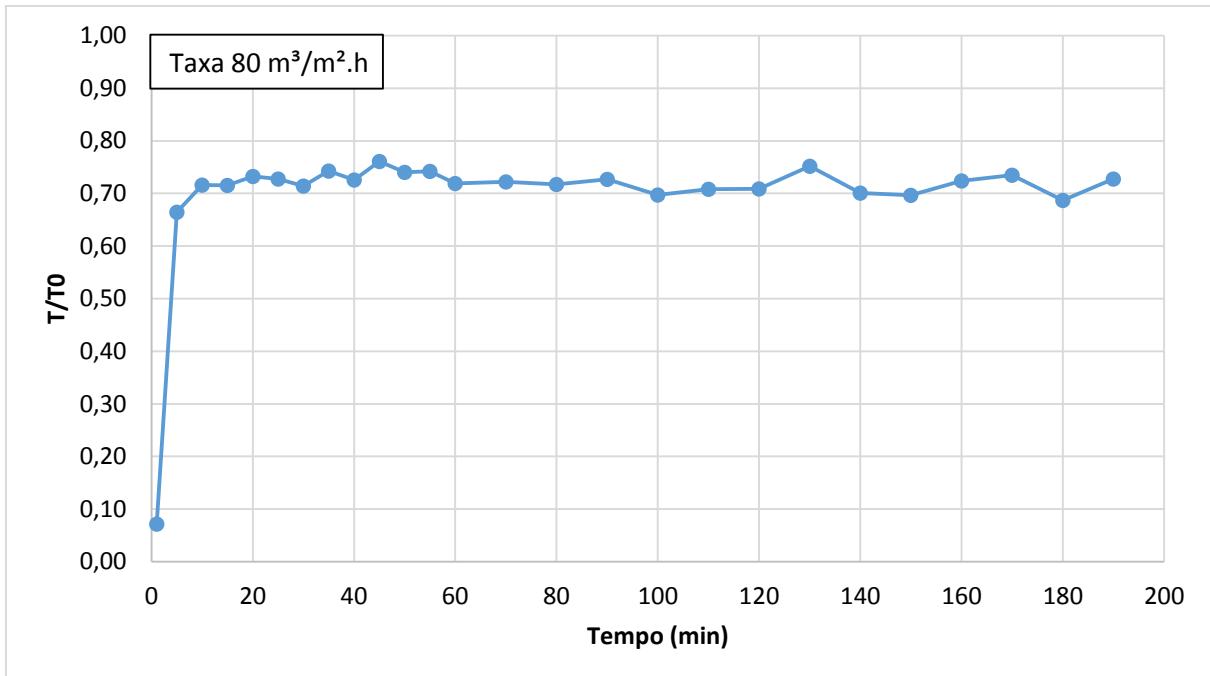


Figura 60 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

A duração do ensaio foi de 191 minutos, contudo ainda não havia chegado a perda de carga máxima de 2,22 mca, portanto através do comportamento do gráfico entre a perda de carga e a duração da carreira, foi simulado valores até que se atingisse a perda de carga máxima. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 61. Nota-se a partir desse gráfico, que a perda de carga se encontra mais expressivamente na parte final do leito e que o tempo de duração teórico do ensaio foi de 345,5 minutos.

Na Figura 62 é representada a perda de carga ao longo do tempo. Pode-se notar a partir desse gráfico que representam os valores da perda de carga em função do tempo de operação parecem apresentar tendência retilínea.

A Tabela 33 e a Tabela 34 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que a relação de volume gasto para lavagem tanto para lavagem com 2,5 L quanto para lavagem com 5,0 L apresentou-se baixa, devido a duração do período de uma carreira ser alta.

Na Figura 63 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 190,1nm e 7456nm. Nota-se que 25% do volume da amostra na composta D, são partículas com $5,0 \mu\text{m}$ de diâmetro

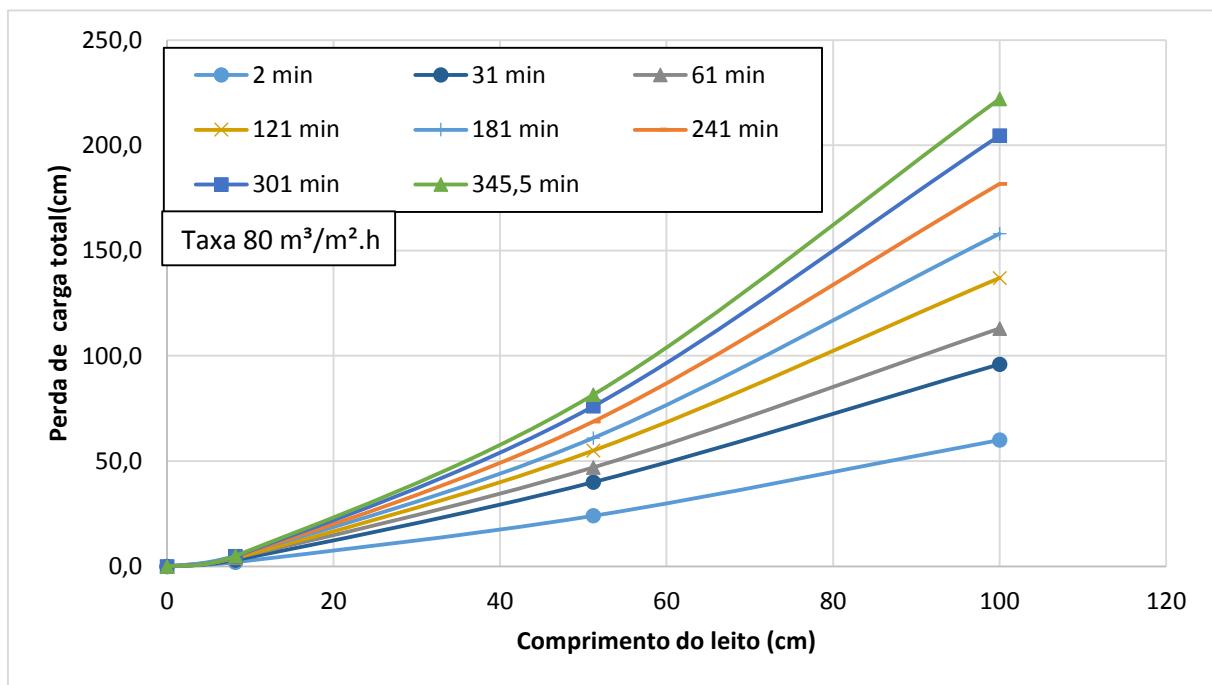


Figura 61 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II com tempos de 241, 301 e 345,5 minutos simulados

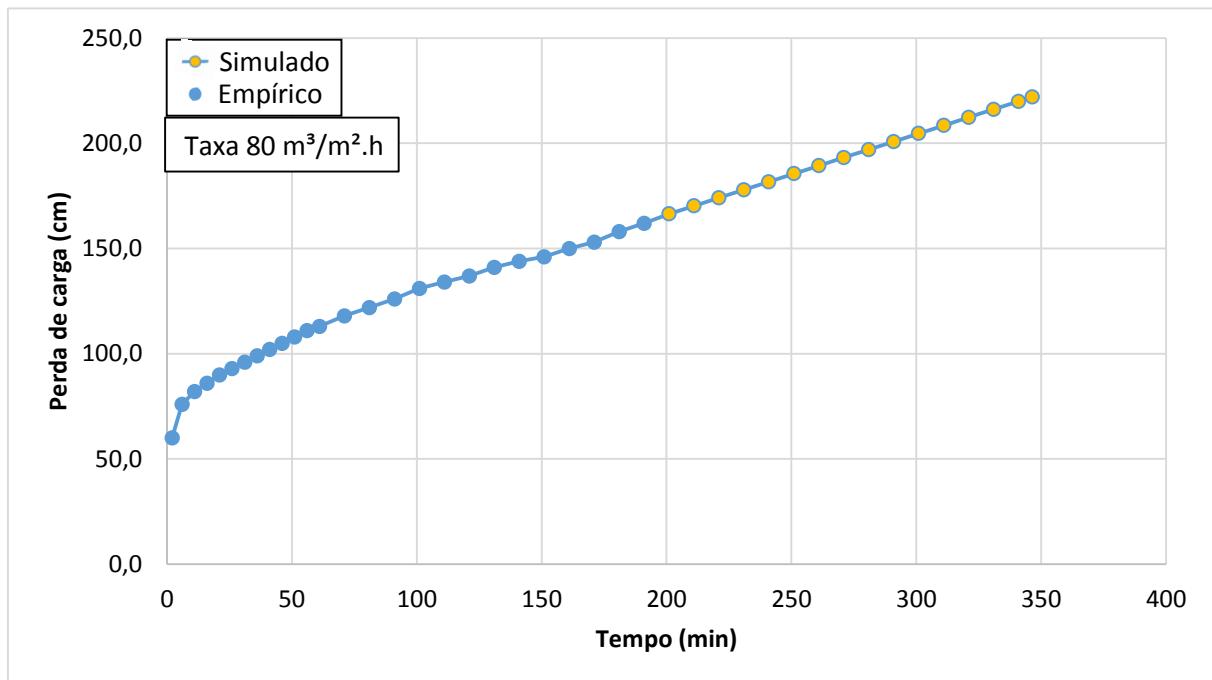


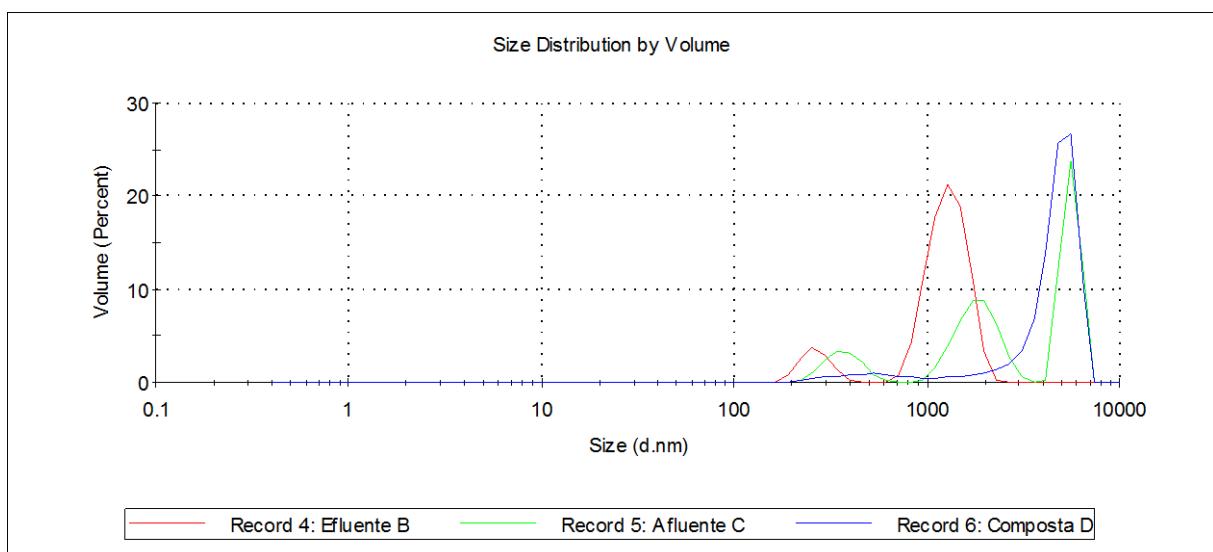
Figura 62 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

Tabela 33 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Perda de carga total (mca)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1,62	191	7,5	156,8	154,31	151,81
Empírico e Simulado	2,22	346,5	4,1	284,5	281,98	279,48

Tabela 34 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1157,3	1138,6	18,8	37,5	1,59%	3,19%
Empírico e Simulado	1168,5	1158,1	10,4	20,7	0,88%	1,76%

Figura 63 – Gráfico da distribuição de partículas em relação ao porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $80 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

5.2.4.4 Taxa de 90 m³/m².h

Esse ensaio foi realizado no dia 23/07/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 35. Nota-se que alguns dados de DQO estão ausentes. Isso ocorreu por problemas nas análises.

Tabela 35 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 90 m³/m².h com a lavagem do tipo II

Amostra	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	Análises			
			DQO total (mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)	pH
Efluente B	20,3	594	-	67,6	22,0	7,32
Afluente C	11,2	340	186	38,0	22,0	7,24
Composta D	7,6	205	-	26,2	22,0	7,78
Remoção FFF	32,14%	39,71%	-	30,92%	-	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 64. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0. Nota-se com esse gráfico, que não ocorreu um comportamento uniforme da qualidade do efluente em relação à turbidez.

A duração do ensaio foi de 138,9 minutos, chegando a perda de carga máxima de 2,22 mca. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 65. Nota-se a partir desse gráfico, que a perda de carga se encontra bem distribuída ao longo do leito.

Na Figura 66 é representada a perda de carga ao longo do tempo. Pode-se notar a partir desse gráfico que os pontos da perda de carga se assemelham a uma curva suave.

A Tabela 36 e a Tabela 37 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que a relação de volume gasto para lavagem tanto para lavagem com 2,5 L quanto para lavagem com 5,0 L apresentou-se baixa, devido à alta produtividade de água dado pela taxa de filtração aliado ao tempo de funcionamento.

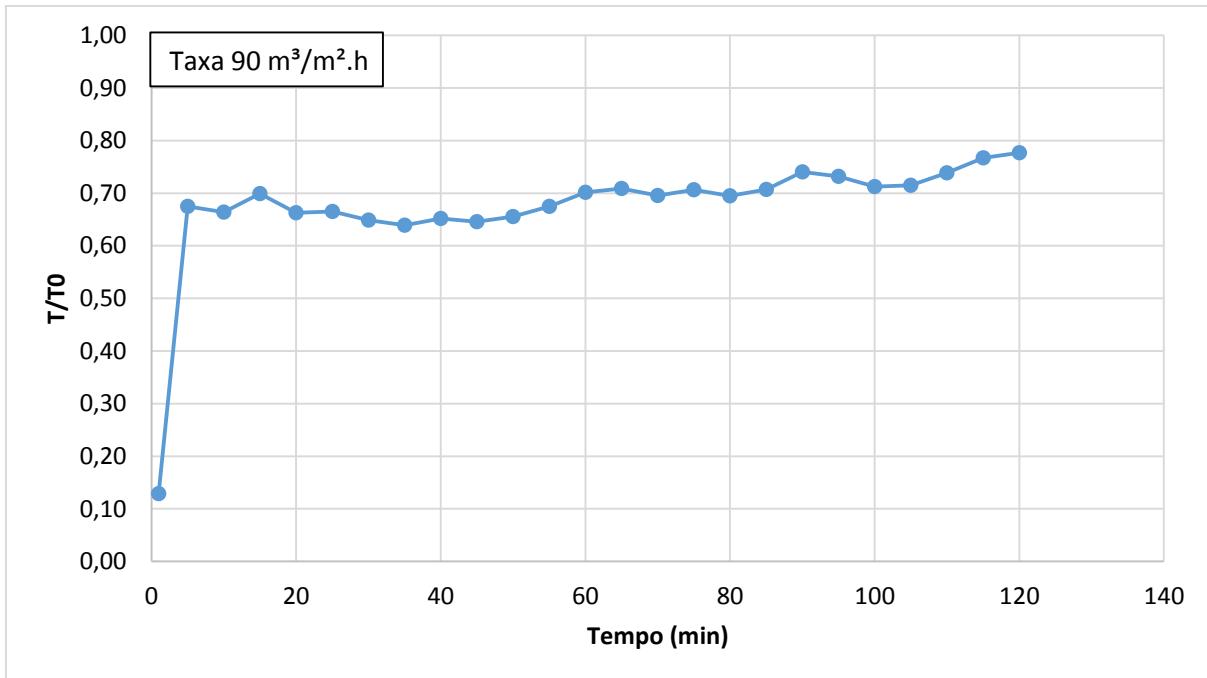


Figura 64 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

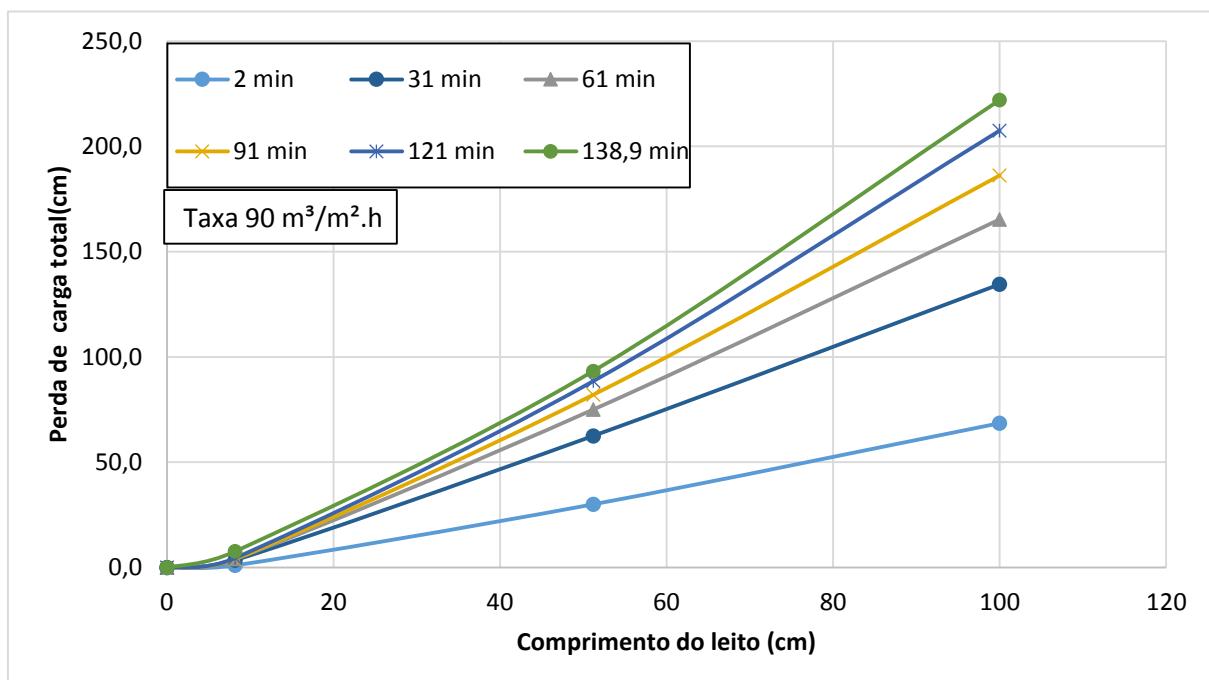


Figura 65 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

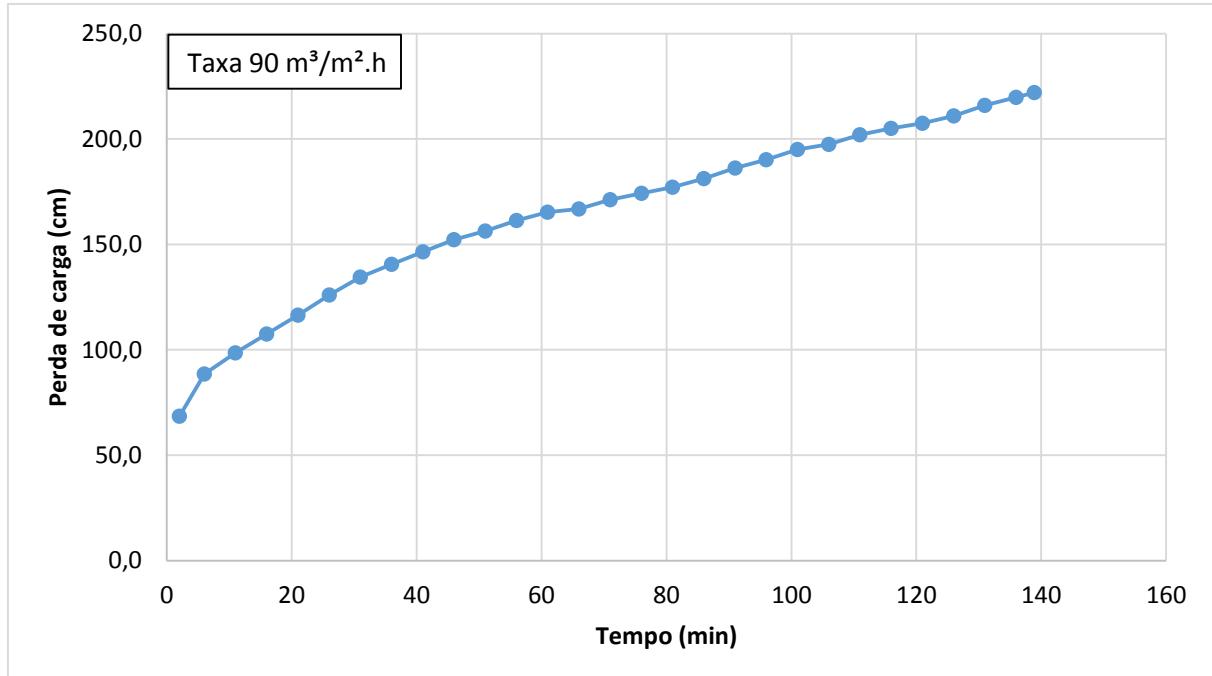


Figura 66 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

Tabela 36 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Perda de carga total (mca)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,22	138,9	10,3	128,3	125,80	123,30

Tabela 37 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1294,8	1269,1	25,7	51,5	1,95%	3,90%

Na Figura 67 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 141,8nm e 1990nm.

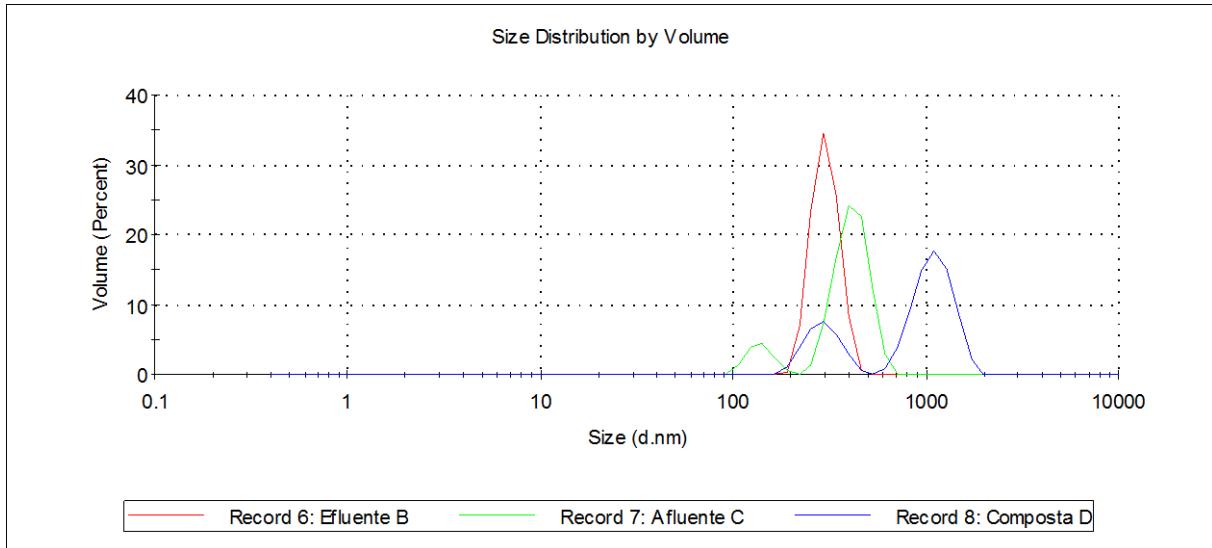


Figura 67 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $90 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

5.2.4.5 Taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

Esse ensaio foi realizado no dia 15/07/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 38.

Tabela 38 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

Amostra	Análises					
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total (mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)	pH
Efluente B	13,9	640	527	46,8	22,5	6,9
Afluente C	11,0	318	257	37,3	22,5	7,24
Composta D	6,5	210	241	22,5	22,5	7,47
Remoção FFF	41,36%	33,96%	6,42%	39,76%	-	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 68. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0. Nota-se com esse gráfico, que a partir do tempo de 20 minutos é que ocorreu a estabilização da qualidade do efluente.

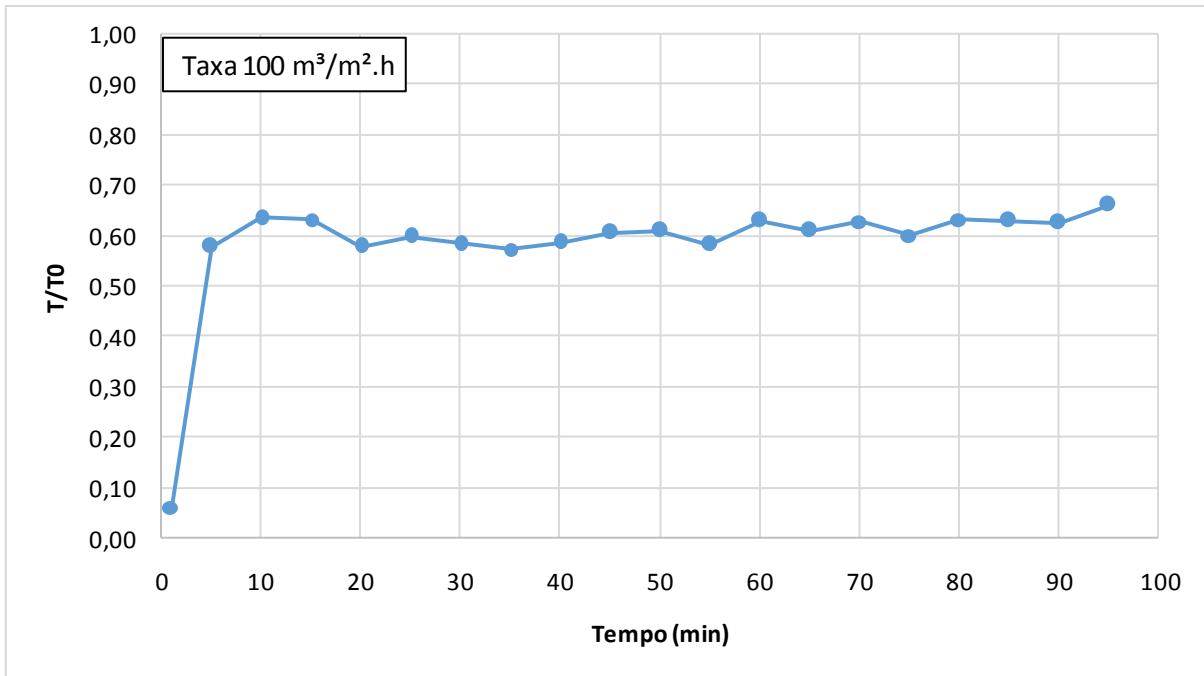


Figura 68 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

A duração do ensaio foi de 111 minutos, chegando a perda de carga máxima de 2,22 mca. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 69. Nota-se a partir desse gráfico, que a perda de carga se encontra maior na primeira metade do leito.

Na Figura 70 é representada a perda de carga ao longo do tempo. Pode-se notar a partir desse gráfico que os pontos da perda de carga se assemelham a uma reta.

A Tabela 39 e a Tabela 40 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que a relação de volume gasto para lavagem tanto para lavagem com 2,5 L quanto para lavagem com 5,0 L apresentou-se baixa, devido à alta produtividade de água dado pela taxa de filtração aliado ao tempo de funcionamento.

Na Figura 71 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 105,7 nm e 1990 nm. Nota-se pelo gráfico que a configuração da distribuição das partículas pelo volume do efluente do reator anaeróbio e do filtro apresentam características semelhantes. Vale lembrar que esse gráfico é uma relação de porcentagem de volume por tamanho, por tanto não indica a quantidade de partículas, mas sim, onde a faixa que ocorre o maior volume de partículas com aquele diâmetro.

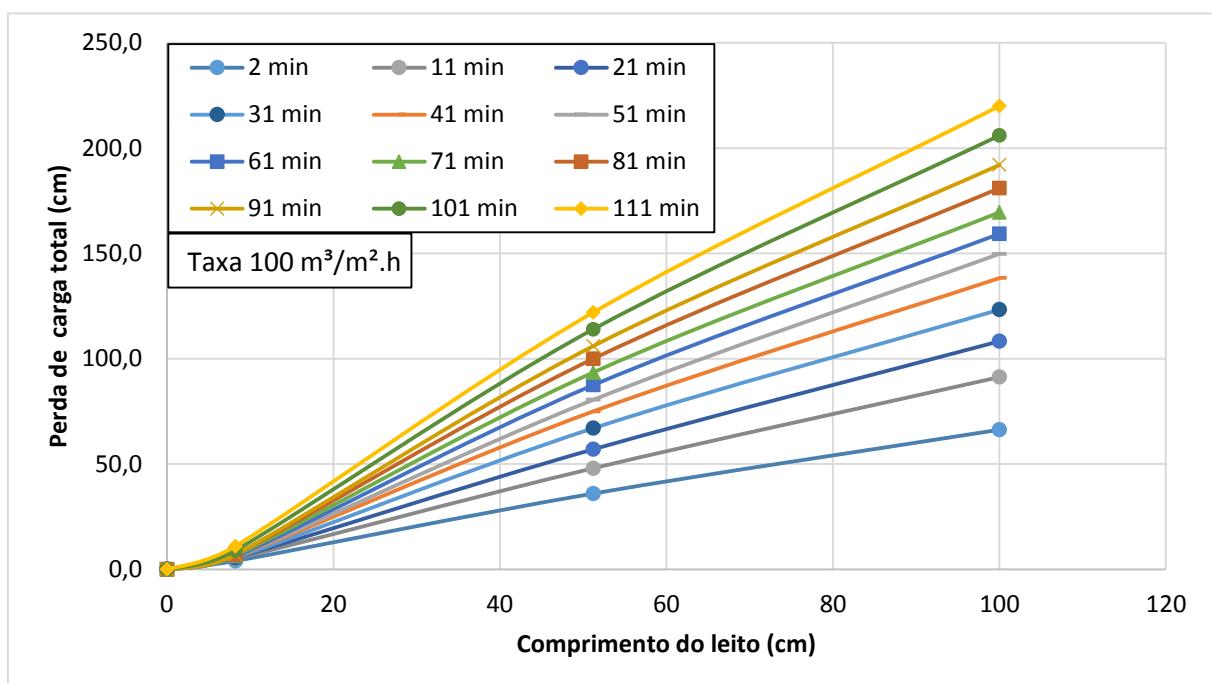


Figura 69 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

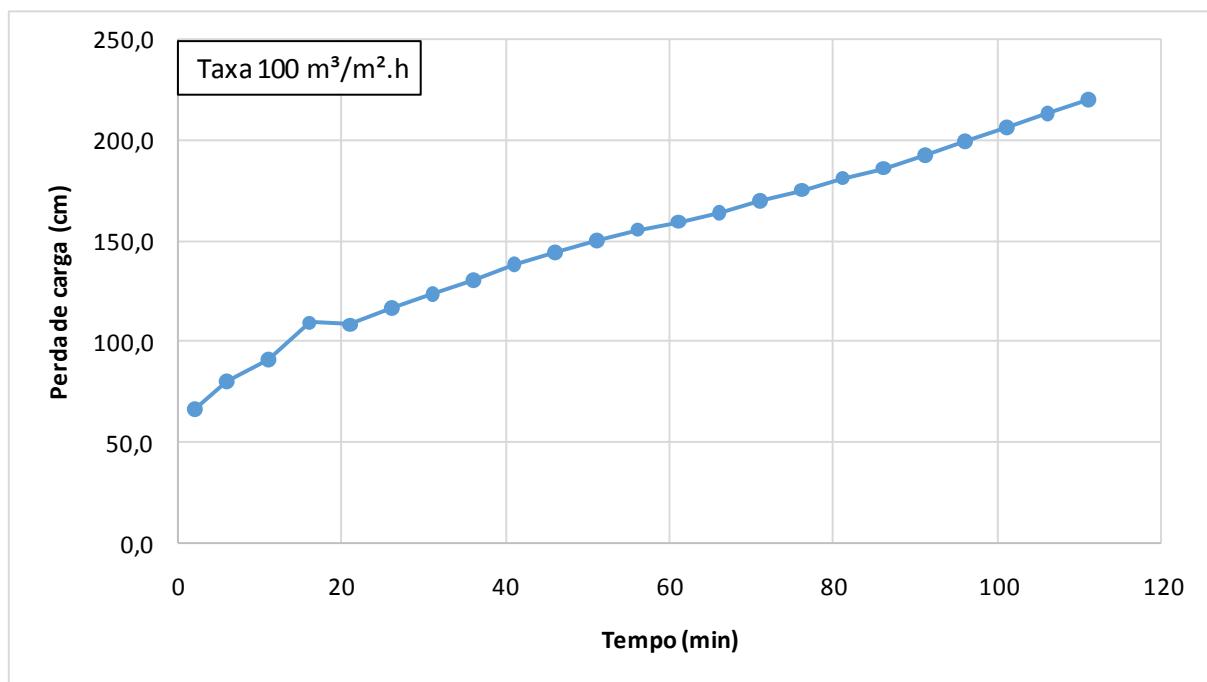


Figura 70 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

Tabela 39 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Perda de carga total (mca)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,22	111	12,9	113,9	111,42	108,92

Tabela 40 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1432,6	1400,4	32,1	64,3	2,19%	4,39%

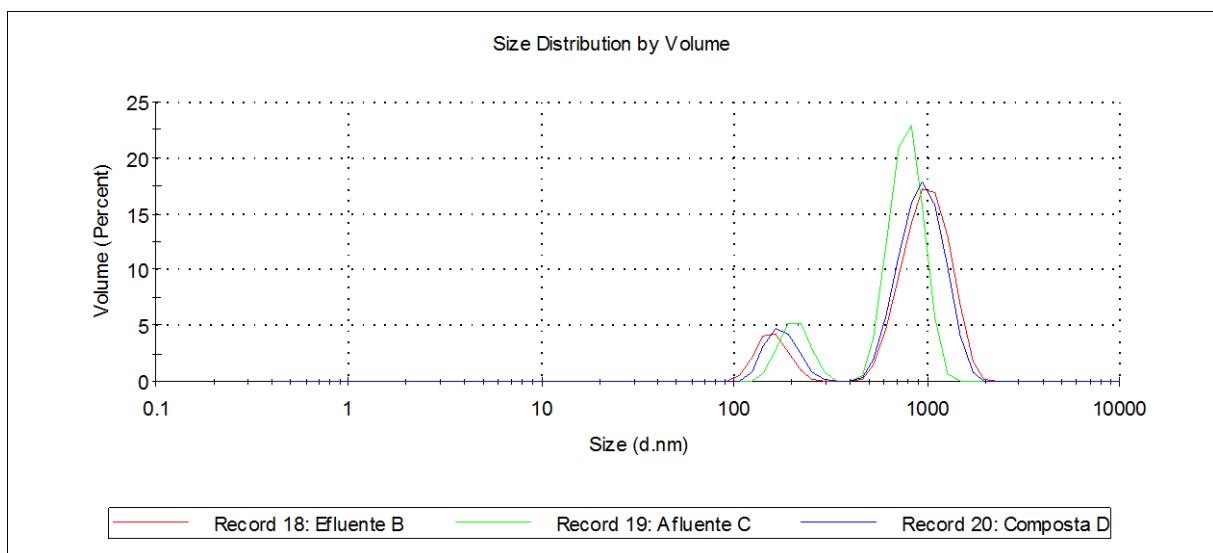


Figura 71 – Gráfico da distribuição de partículas em relação ao volume para o ensaio com taxa de $100 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

5.2.4.6 Taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$

Esse ensaio foi realizado no dia 23/07/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 41. Nota-se que alguns dados de DQO estão ausentes. Isso ocorreu por problemas nas análises.

Tabela 41 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 110 m³/m².h com a lavagem do tipo II

Amostra	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	Análises			
			DQO total (mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)	pH
Efluente B	20,3	594	-	67,6	22,5	7,32
Afluente C	11,2	340	186	38,0	22,5	7,24
Composta D	8,3	215	-	28,5	22,5	7,70
Remoção FFF	25,89%	36,76%	-	24,91%	-	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 72. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T₀. Nota-se com esse gráfico, que a qualidade do efluente manteve-se constante.

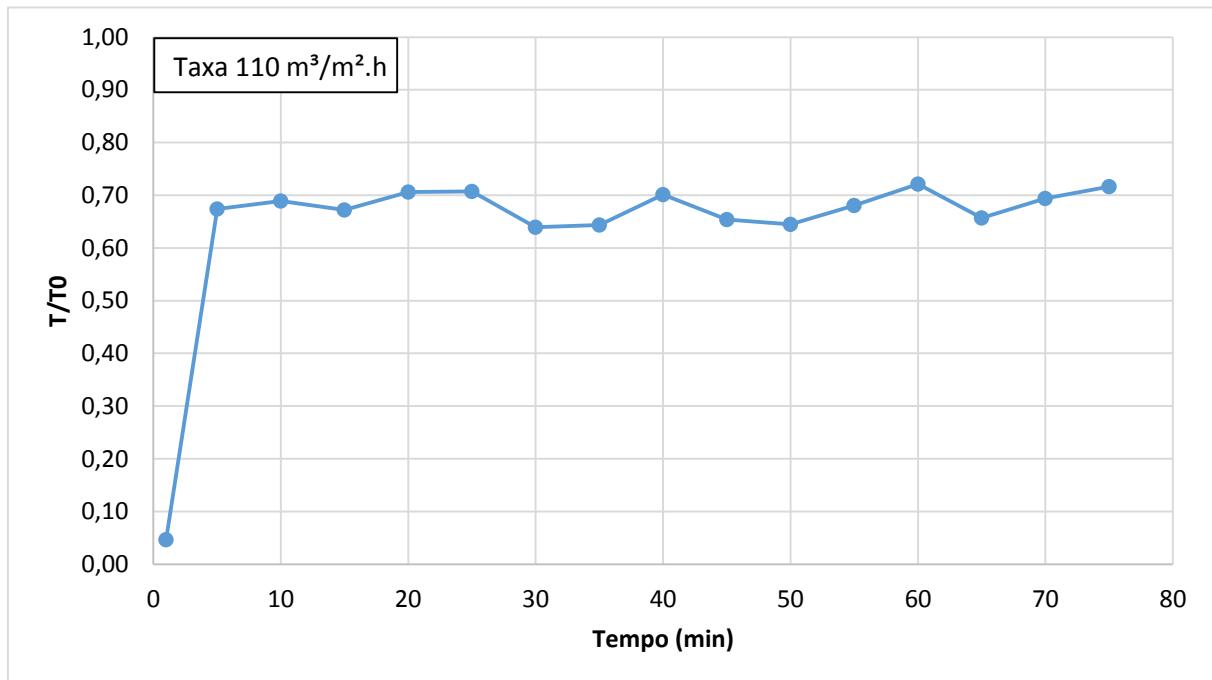


Figura 72 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de 110 m³/m².h com a lavagem do tipo II

A duração do ensaio foi de 86,5 minutos, chegando a perda de carga máxima de 2,22 mca. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 73. Nota-se a partir desse gráfico, que a perda de carga se distribuiu mais igualmente ao longo do leito com o avanço do ensaio, mostrado pela inclinação da reta da perda de carga.

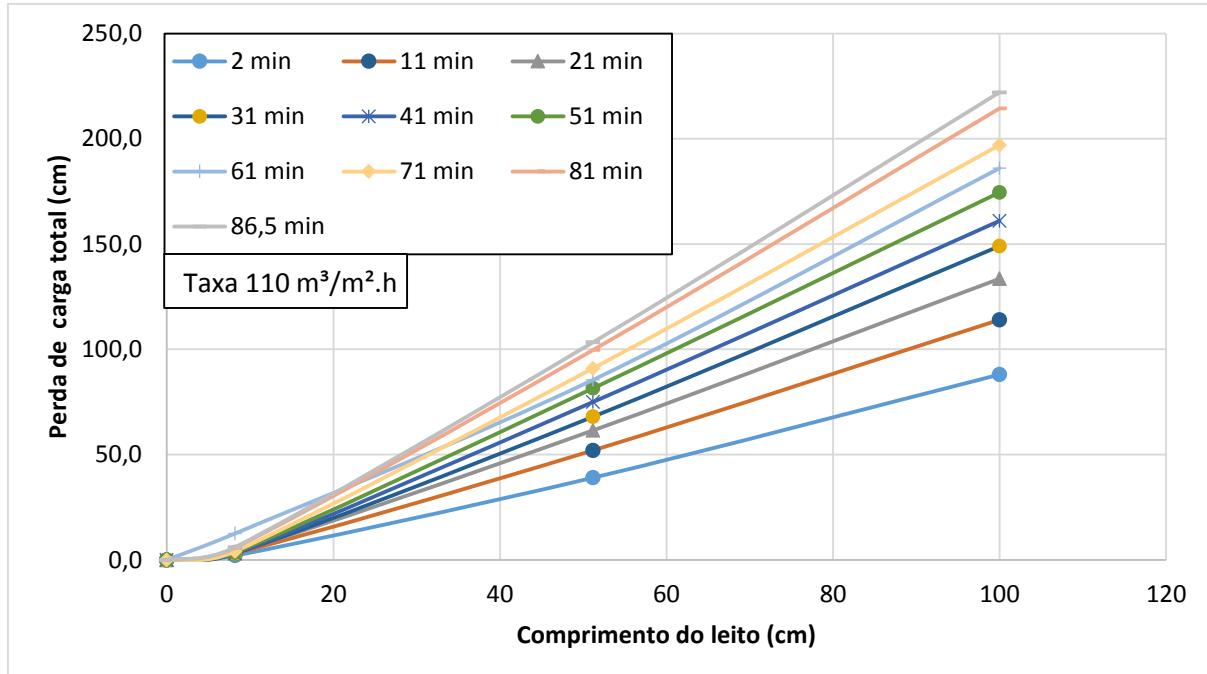


Figura 73 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo II

Na Figura 74 é representada a perda de carga ao longo do tempo. Pode-se notar a partir desse gráfico que os pontos da perda de carga se assemelham a uma reta.

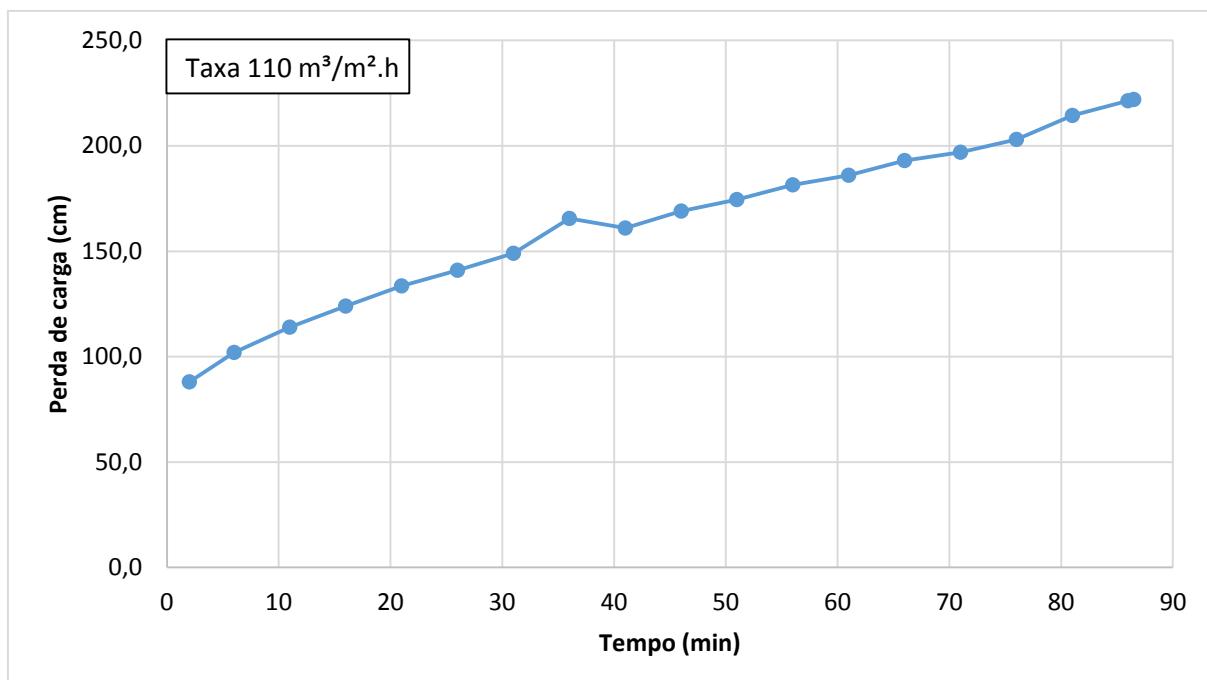


Figura 74 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo II

A Tabela 42 e a Tabela 43 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que a relação de volume gasto para lavagem tanto para lavagem com 2,5 L quanto para lavagem com 5,0 L apresentou-se baixa, devido à alta produtividade de água dado pela taxa de filtração aliado ao tempo de funcionamento.

Tabela 42 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo

II

	Perda de carga total (mca)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)	
					Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,22	86,5	16,5	97,7	95,16	92,66

Tabela 43 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1566,0	1524,9	41,1	82,3	2,56%	5,12%

Na Figura 75 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 122,4nm e 955,4nm. Nota-se que as partículas presentes em todas as amostras (B, C e D), estão majoritariamente na faixa coloidal, tal fato mostra que seria interessante coagular o afluente.

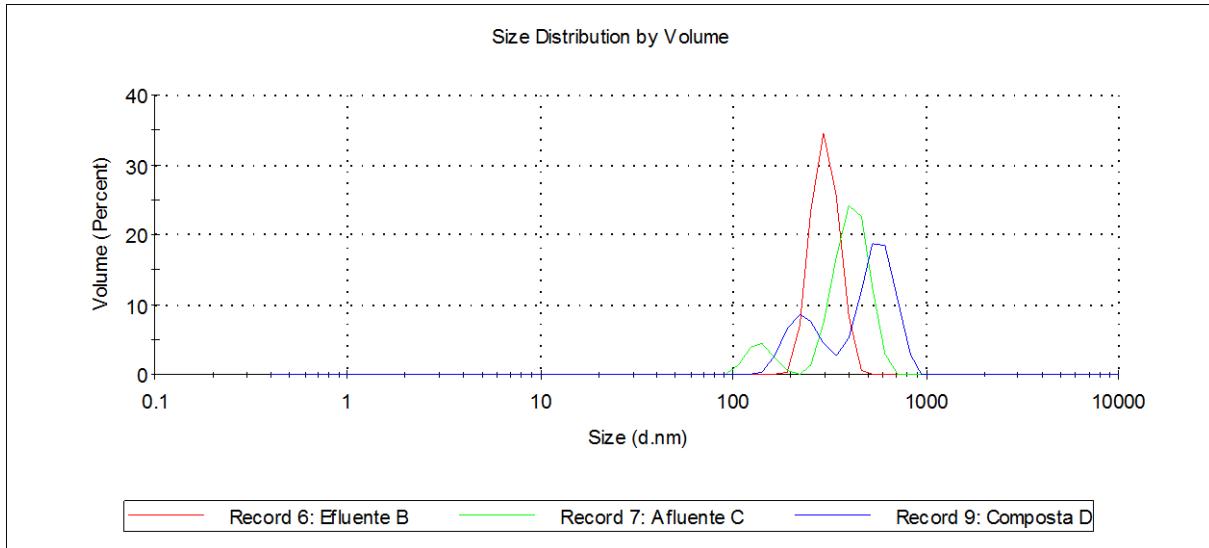


Figura 75 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $110 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

5.2.4.7 Taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$

Esse ensaio foi realizado no dia 21/07/2015. As características do efluente B, afluente C e a composta D estão representados na Tabela 44.

Tabela 44 - Caracterização para o efluente B, afluente C e composta D para a taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

Amostra	Análises				
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO total(mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)
Efluente B	28,7	442	-	95,0	22,5
Afluente C	8,9	239	222	30,5	22,5
Composta D	5,8	135	193	20,4	22,5
Remoção FFF	34,83%	43,51%	13,18%	33,18%	-

O monitoramento da turbidez se encontra na Figura 76. No gráfico é representado na ordenada a razão entre a turbidez do efluente, T, pela turbidez do afluente, T0. Nota-se com esse gráfico, que a qualidade do efluente manteve-se constante.

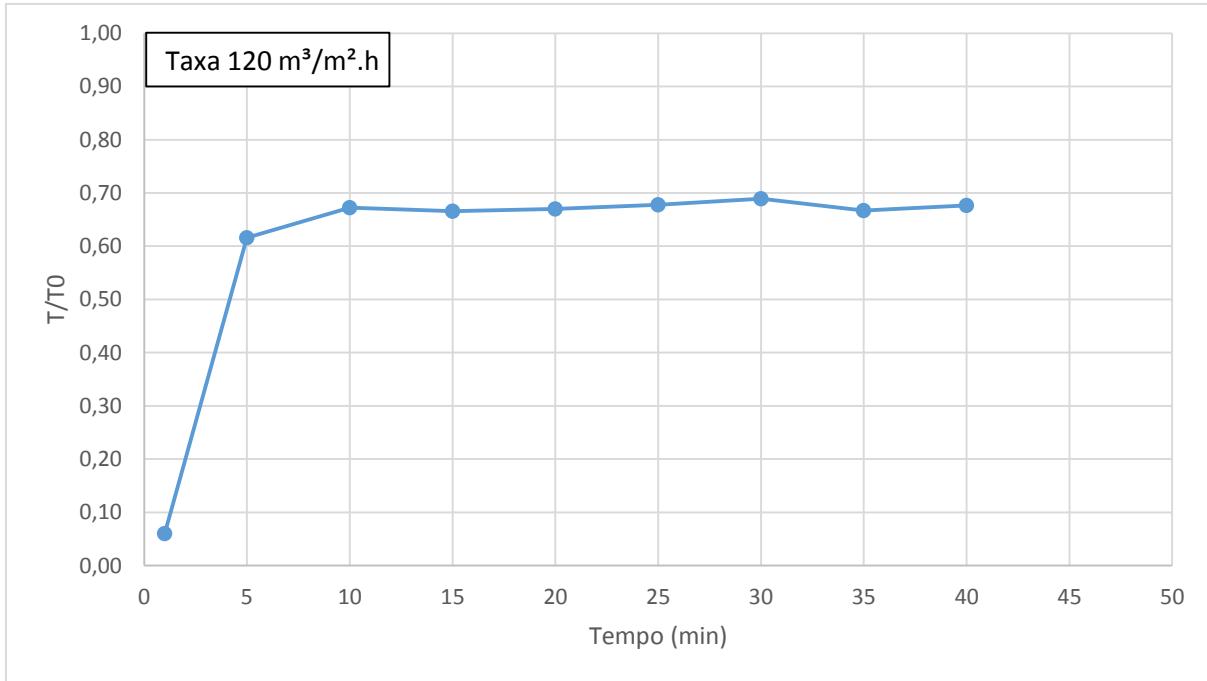


Figura 76 – Monitoramento da turbidez ao longo do ensaio para a taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ com a lavagem do tipo II

A duração do ensaio foi de 50,1 minutos, chegando a perda de carga máxima de 2,22 m.c.a. A perda de carga ao longo do leito com diversos tempos durante o ensaio pode ser conferida na Figura 77. Nota-se a partir desse gráfico, que a perda de carga se distribui igualmente ao longo do leito com o avanço do ensaio, mostrado pela inclinação da reta da perda de carga, exceto nos dois primeiros minutos na qual a segunda metade do leito causou mais perda de carga.

Na Figura 78 é representada a perda de carga ao longo do tempo. Pode-se notar a partir desse gráfico que os pontos da perda de carga possuem uma leve curvatura.

A Tabela 45 e a Tabela 46 relacionam o tempo de filtração com a produção por carreira e a produção diária de água clarificada, respectivamente. Nota-se que a relação de volume gasto para lavagem tanto para lavagem com 2,5 L quanto para lavagem com 5,0 L apresentou-se satisfatória.

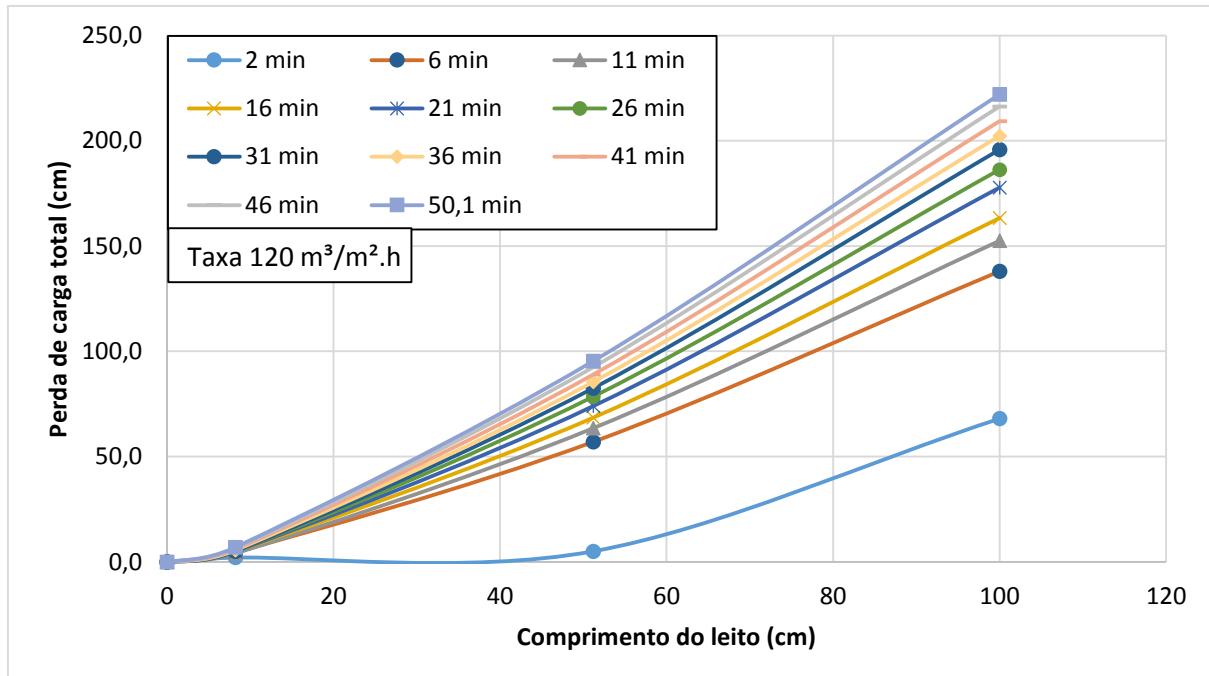


Figura 77 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo II

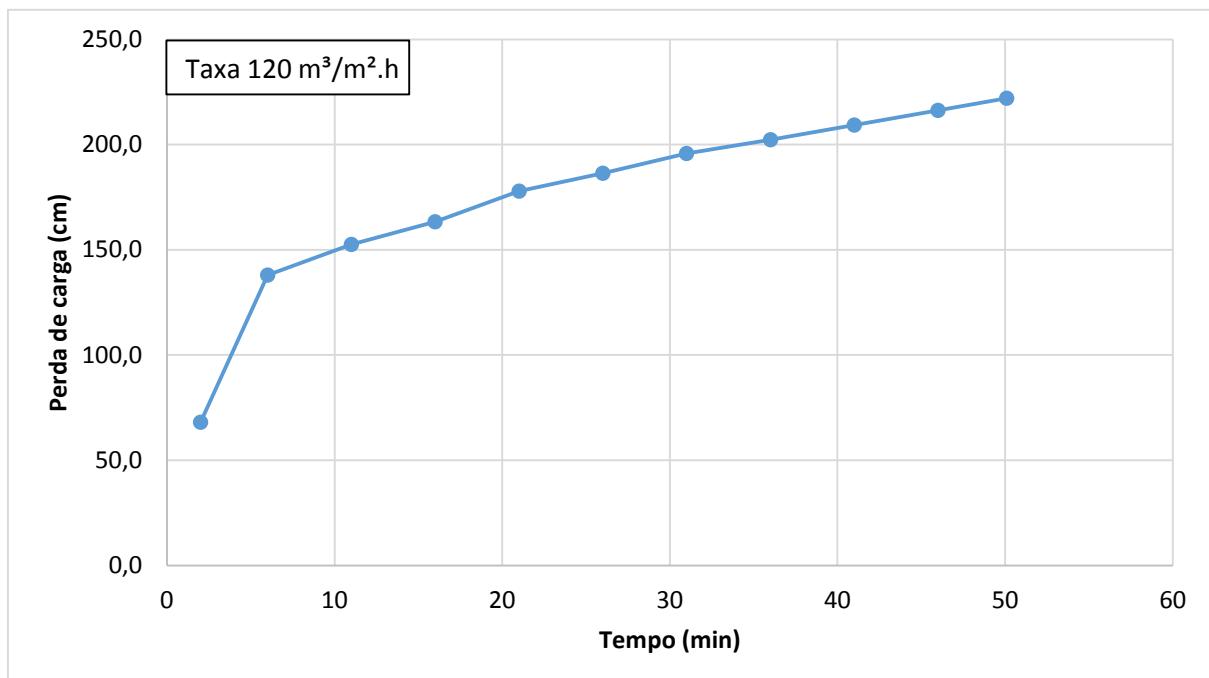


Figura 78 – Perda de carga total do leito para o ensaio com taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ com a lavagem do tipo II

Tabela 45 – Produção bruta e líquida por carreira para o ensaio com taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Perda de carga total (mca)	Tempo de carreira de filtração (min)	Número de carreiras por dia	Volume bruto produzido por carreira (L)	Volume líquido produzido por carreira (L)
				Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	2,22	50,1	28,2	61,7	59,21 56,71

Tabela 46 – Produção diária e número de carreiras por dia para o ensaio com taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

	Volume líquido produzido em 24 horas (L)		Volume utilizado para lavagem em 24 horas		Volume gasto para lavagem/produção total diária	
	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L	Lavagem com 2,5 L	Lavagem com 5,0 L
Empírico	1668,4	1598,0	70,5	140,9	4,05%	8,10%

Na Figura 79 é representada a distribuição de tamanho de partículas na água pré-decantada B, afluente C e efluente D. A composta D teve partículas majoritariamente entre 105,7nm e 1484nm.

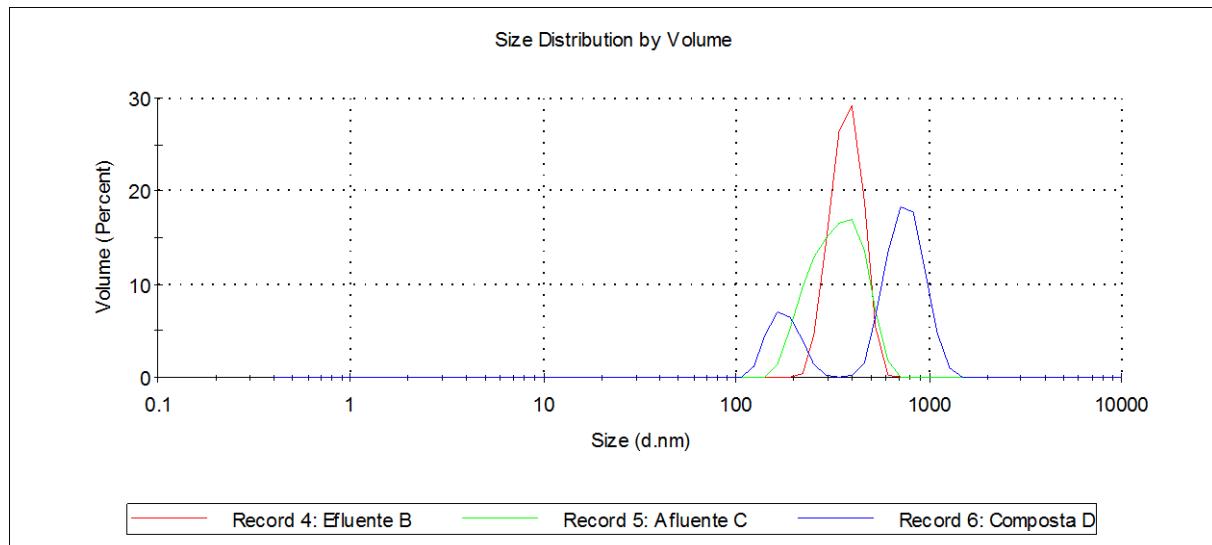


Figura 79 – Gráfico da distribuição de partículas em relação a porcentagem do volume para o ensaio com taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ com a lavagem do tipo II

5.2.4.8 Análise geral das taxas de filtração dos ensaios com lavagem do tipo II

Avaliando as taxas de filtração dos ensaios com lavagem do tipo II foi possível notar que o afluente pouco variou suas características entre os ensaios, excetuando-se o afluente da taxa de $120 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$, na qual possuía melhor qualidade.

Observa-se na Tabela 47 que as maiores remoções se destoam consideravelmente das menores. Nota-se que apesar da taxa de 70 m³/m².h ter apresentado um tempo de carreira alto, a qualidade de seu afluente foi baixa. Já a taxa de 100 m³/m².h apresentou uma boa remoção de turbidez e sólidos suspensos totais, mas pouca remoção de DQO. O pH apresentou uma variação entre os ensaios, por exemplo entre as taxas de filtração de 70 (pH de 7,33 para 7,75) e 100 m³/m².h (pH de 6,90 para 7,47).

Tabela 47 – Resumo das maiores e menores remoções dos ensaios com lavagem do tipo II

	Maior remoção	Taxa da maior remoção	Menor remoção	Taxa da menor remoção
Turbidez	41,89%	100	15,69%	70
Cor aparente	43,51%	120	17,88%	70
SST	39,76%	100	14,95%	70
DQO	33,44%	80	6,53%	100

Observa-se na Figura 80, que nesse caso as altas taxas representaram uma maior produção de água em 24 horas como já esperado. Nota-se ainda que a maior produção em ambos os casos, lavagem com 2,5 L e 5,0 L de água, foi na taxa de 120 m³/m².h.

Percebe-se ainda que há uma tendência da lavagem com 5,0L, da produção diária de uma taxa menor, produzir mais água diariamente do que uma taxa maior, mas isso ocorreria em taxas de filtração superiores daquelas estudadas, pois aumentaria o número de carreiras por dia e consequentemente o volume de água necessário para a lavagem do filtro, como ocorreu no ensaio com lavagem do tipo I. Nota-se ainda que quando o número de carreiras diárias é baixo, o fato de se utilizar 2,5 L ou 5,0 L de água para a lavagem não possui grandes interferências na produtividade em 24 horas, devido à poucas repetições de lavagem por dia.

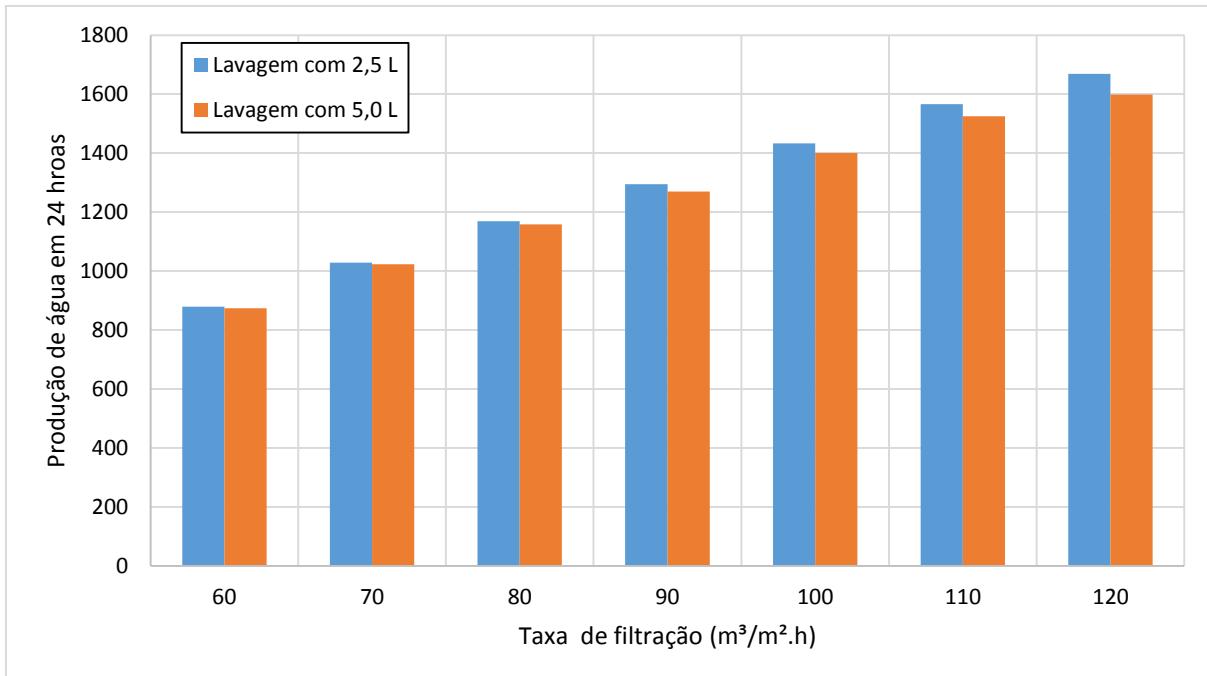


Figura 80 – Relação entre taxa de filtração e produção de água em 24 horas para os ensaios com lavagem do tipo II

Em relação a variação do pH entre o afluente C e o efluente D, imagina-se que ocorreu liberação de CO₂ para a atmosfera devido a movimentação do líquido, aumentando assim o pH, pela dissociação do bicarbonato de sódio. Lembrando que na alimentação do reator anaeróbio (A) é dosado 600 mg/L de bicarbonato de sódio. Seria necessário um estudo mais específico sobre esse assunto para melhor detalhamento.

Em relação a perda de carga, a discussão é similar à dos ensaios com lavagem do tipo I, com uma boa distribuição ao longo de todo o leito.

Em relação ao tamanho de partículas, nota-se que as partículas representativas presentes são inferiores a 7,5 µm, assim como nos ensaios com lavagem do tipo I.

5.2.5 Análise geral dos ensaios

Após algumas lavagens foi notado o desprendimento de fibras de poliéster do meio filtrante, não o suficiente para interferir entre um ensaio e outro, já que foram desprendidas apenas duas fibras durante toda a Etapa II. A depreciação do meio filtrante também foi constatada no trabalho de KIM *et al* (2013). Portanto, seria interessante a realização de um estudo sobre fibras resistentes a esse tipo de ambiente.

Em relação à duração da carreira, percebe-se que as taxas de filtração com lavagem do tipo II tiveram um tempo de duração de carreira quase que o dobro do tempo de duração das carreiras de filtração dos ensaios com lavagem do tipo I, reafirmando que a lavagem com ar e água separadamente é mais efetiva do que a lavagem com a inserção de água e ar juntos, fato também constatado por FAGUNDES (2015). Como o tempo duração de carreira é maior nos ensaios com lavagem do tipo II, consequentemente a quantidade de carreiras diárias de filtração é menor e assim, é menor o volume de água consumido na lavagem.

O aumento da taxa de filtração, não alterou a qualidade do efluente do filtro para a água estudada. A variação da taxa de filtração causa apenas uma diminuição no tempo de duração da carreira de filtração, devido ao aumento da perda de carga ser maior em altas taxas. Tal fato indica que há a possibilidade de se operar com altas taxas, aumentando a produtividade diária de água como mostra a Figura 51 e Figura 80, e manter a qualidade do efluente. Altas taxas resultam em aumento da compacidade das unidades de filtração.

Nota-se que a turbidez foi melhor removida nos ensaios com lavagem do tipo I. Tal fato pode estar relacionado diretamente com a maior presença de turbidez encontrada no afluente desse ensaio, por volta de 15,3 uT, enquanto que no ensaio com lavagem do tipo II a média presente de turbidez no afluente é de 11,2 uT. Sabe-se que a turbidez envolve duas variáveis, presença de colóides e SST, e que tamanhos de partículas diferentes podem caracterizar a mesma turbidez (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Não era esperado que ocorresse a remoção de colóides, pois não houve coagulação. A faixa média do tamanho dos colóides varia de 1 a 1000 nm, portanto abaixo da faixa de remoção da unidade de filtração. Sendo assim, pode-se dizer que a redução da turbidez ocorreu devido à redução de SST.

A remoção de SST foi em torno de 40 % para o ensaio com lavagem do tipo I e 30 % para o ensaio com lavagem do tipo II. Essa diferença pode ter ocorrido pela qualidade do afluente no 3F. O valor do SST ficou abaixo de 30 mg/L para quase todos os ensaios, exceto para as taxas de 70, 100 e 110 m³/m².h utilizando a lavagem do tipo I e a taxa de 70 m³/m².h utilizando a lavagem do tipo II. No que diz respeito à concentração de SST, água voltada para reúso com SST abaixo de 30 mg/L podem ser usados, por exemplo, para uso urbano e industrial, depende além disso da qualidade de outros parâmetros além de SST (BLUM, 2003). No caso da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), efluentes de ETEs com SST de até 30 mg/L pode ser utilizado em diversas aplicações como agricultura e em alguns setores industriais. É importante salientar que os Estados têm autonomia para ditar suas restrições, por exemplo, o estado da Carolina do Norte reduz o valor de SST para 5,0

mg/L de média mensal para uso em campos agrícolas para cultivo que não seja alimento (EPA, 2012).

Ressalta-se aqui que o efluente do reator anaeróbio B continha muitos aglomerados de sólidos (biofilme), vide Figura 81, por isso foi adotado o processo de decantação anterior ao filtro 3F para que não ocorre-se uma obstrução em sua entrada, fato notado em ensaios predecessores aos apresentados neste trabalho.



Figura 81 - Efluente B do reator anaeróbio com conglomerados

A cor aparente se relaciona com a quantidade de matéria orgânica presente na amostra (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Nos ensaios a remoção média de cor aparente foi em torno de 32 % para ambos os ensaios. Ressalta-se novamente que não ocorreu coagulação, caso contrário a remoção seria maior, principalmente em relação à DQO, na qual a remoção foi em torno de 20 %.

Em relação ao pH, foi notado que entre o efluente B, efluente/afluente C e efluente D, ocorreu um aumento do pH que pode ser explicado pela libertação de dióxido de carbono durante o processo de tratamento.

A configuração do tamanho das partículas foi analisada qualitativamente, não tendo o número de partículas removidas e nem o número de partículas residuais. Chegou-se à conclusão que o filtro consegue remover partículas até 7,5 μm , e que provavelmente há uma pequena remoção de partículas menores. Tal fato também foi constatado por LEE (2008a), na qual o filtro de poliamida removeu substancialmente partículas maiores que 8,0 μm . Ressalta-se aqui que o tamanho de cisto de *Cryptosporidium spp.* e cisto de *Giardia spp.* são respectivamente, de 2 a 4 μm e de 6 a 12 μm (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Sendo assim, é interessante em estudos futuros analisar a remoção desses organismos por filtro 3F, através da aplicação prévia de coagulantes.

Em relação a produtividade diária de água nota-se que apesar das altas taxas necessitarem de muitas lavagens por dia, a sua produção de água tratada é alta, até que se chega à um momento que devido ao número alto de lavagens, as altas taxas começam a produzir um volume menor de água por dia do que taxas menores. Sendo assim, definiu-se que a taxa de 110 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ é a taxa ótima para esse meio filtrante e para esse afluente estudado. Não foi escolhida a taxa de 120 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ pelos seguintes motivos: produção de água na lavagem do tipo I com 5,0 L de água de lavagem na taxa de 110 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ foi maior, e a produção de água na lavagem do tipo II com 5,0 L teve pouca diferença entre as taxas de 110 e 1220 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, em torno de 5% menor para a taxa de 110 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ enquanto que o número de carreiras efetuadas pela taxa de 120 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ é em torno de 50% maior que a taxa de 110 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$.

5.2.6 Análise do sistema de tratamento e de fósforo total

Para analisar o rendimento total do sistema, foram realizadas análises para a taxa de filtração de 110 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, definida como ótima, de todas as etapas dos processos de tratamento. Nota-se que alguns dados de DQO estão ausentes. Isso ocorreu por problemas nas análises.

Como já esperado a remoção de fósforo é muito baixa, pois para remoção de fósforo é necessário que se promova a precipitação do mesmo com uso de coagulantes, pois a maioria do composto inorgânico de fósforo são solúveis em água (METCALF e EDDY, 2003).

Tabela 48 - Caracterização para o afluente A, efluente B, afluente C e composta D para a taxa de 110 m³/m².h com a lavagem do tipo II

	Análises						
	Turbidez (uT)	Cor aparente (uH)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Temperatura (°C)	pH	Fósforo total (mg/L)
Afluente A	60,4	956	738,1	198,3	22,5	7,53	18,64
Efluente B	20,3	594	-	67,6	22,5	7,32	18,20
Afluente C	11,2	340	186,0	38,0	22,5	7,24	17,44
Composta D	8,3	215	-	28,5	22,5	7,7	17,32
Remoção total	86,26%	77,51%	-	85,63%	-	-	7,08%

A remoção por volta de 80 % de turbidez, cor aparente e SST mostra uma boa eficiência de remoção, considerando que o reator anaeróbio de fibras flexíveis e o filtro 3F ainda são objetos de estudos.

Sendo assim, é recomendável estudos adicionais utilizando a coagulação do esgoto a ser tratado na fase de decantação ou na fase de coagulação *in line* diretamente para o filtro de fibra flexível.

Ressalta-se que o uso de filtro de fibras flexíveis possui potencial para ser aplicado no Brasil, principalmente devido ao fato de operar em altas taxas, o que possibilita sua instalação em locais com pouco espaço disponível. É importante que novas pesquisas sejam realizadas sobre essa tecnologia verificando o melhor comprimento do leito filtrante, o melhor material a ser utilizado nas fibras, entre outros.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos estudos e experimentos realizados, chegou-se as seguintes conclusões sobre este referido trabalho:

- a) A recuperação do meio filtrante resultou numa diminuição de sua porosidade, através da perda de fios de poliéster, ocorrendo uma diminuição da superfície de contato do leito filtrante entre 7,74% e 9,46%.
- b) Constatou-se uma pequena perda de fibras ao longo do estudo. Não foram perdas significativas, mas em uma estação de tratamento provavelmente a perda seria maior devido à operação mais intensa.
- c) O tempo carreira dos ensaios que anteriormente foram lavados com ar e água separadamente foram maiores que os ensaios com água e ar simultâneos.
- d) Partículas sólidas liberadas pelo reator anaeróbio causou uma alta perda de carga no filtro devido a obstrução da passagem da água. A solução encontrada foi adicionar um decantador antes do processo de filtração.
- e) A variação da velocidade de filtração, entre 60 m/h e 120 m/h, não causou queda significativa na qualidade do afluente do filtro de fibras flexíveis. Sendo assim, a operação de filtros de fibras flexíveis com altas taxas pode ser realizada em unidades mais compactas.
- f) A remoção de turbidez, cor aparente, DQO e SST pelo filtro de fibras flexíveis depende substancialmente da qualidade de entrada da água no filtro e tamanho das partículas.
- g) Há um aumento do pH entre o afluente e efluente do filtro de fibras flexíveis, provavelmente devido à liberação de CO₂ presente no efluente do reator anaeróbio (supersaturado) para o ambiente.
- h) A qualidade relativa de SST encontrada no efluente do filtro de fibras flexíveis é compatível com a qualidade de reúso de água voltada para alguns processos industriais, agricultura ou ainda uso urbano recreativo.
- i) A taxa que apresentou melhores resultados para a configuração de filtro adotada e para esse tipo de afluente foi a taxa de 110 m³/m².h.

Para futuros estudos sobre o uso de FFF, sugere-se:

- a) Verificar se a fixação das fibras nas duas extremidades do leito poderia evitar a formação de nós no meio filtrante em filtros com fibras multifilares.

- b) Determinar quantas carreiras seriam necessárias até que ocorra a primeira recuperação do leito, ou seja, desembaraçar as fibras de poliéster. E se isso é necessário ou não, e ainda determinar o período de vida útil de um leito de fibras flexíveis de poliéster.
- c) Junto com a engenharia de materiais, aprimorar um poliéster ou outro tipo de fibra que resista ou evite a liberação de fibras e fibrilas durante a filtração e a lavagem.
- d) Estudar a coagulação do afluente e verificar a diferença do tempo de carreira e a perda de carga em filtro de fibras flexíveis.
- e) Estudar a remoção de cistos de *Cryptosporidium spp.*, cistos de *Giardia spp.* e fósforo total em filtros de fibras flexíveis.
- f) Avaliar qual é o melhor comprimento para ser utilizado em filtros de fibras flexíveis para a clarificação de esgoto.
- g) Estudar outras porosidades do meio filtrante para a clarificação de água residuária

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES). Reúso da água. São Paulo: ABES. 1992, p.25
- ARBOLEDA, J. Teoria, diseño y control de los processos de claficación del agua. Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Lima: Organización Panamericana de la Salud. 1973, p. 535.
- BEN AIM, R.; HAN, K. B.; WOO, H. J.; MARTEIL, P.; IM, J. H.; KIM, C. W.; HWANG, M.H. An innovative deep bed filter for the tertiary treatment of wastewater. World Filtration Congress, New Orleans, USA. 2004 apud LEE, J. J.; IM, J. J., BEN AIM, R.; KIM, J. R.; POO, K. M.; KIM, C. W. Better understanding of the filtration characteristics in the flexible fibre filter module (3M). Water Science and Technology: Volume 55, n 1-2. 2007, p. 77-83.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, 12 de dezembro de 2011. Dispõe os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, 14 dez. 2011. Seção 1, p. 39-46.
- BLUM, J. R. C. Critérios e padrões de qualidade da água. In MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. Reúso de água. Barueri, SP: Manole. 2003, p. 125-174.
- CHA, J.; LEE, J.; BEN AIM, R.; MOON, T.; HAN, K.; KIM, C. Flexible fibre filter: potential for algae removal. Journal of Water Supply: AQUA 58 - 2. 2009, p. 153-157.
- CHEIS, D. Falta de normas técnicas para reúso de água ainda é um problema no país. TAE, abril/maio 2013, p. 16-19. <<http://www.revistatae.com.br/revistapaginada/issue12/>>. Acessado em 06 de outubro de 2015
- DI BERNARDO, L.; PREZOTTI, J. C. S. Caminhamento da frente de impurezas em meios granulares de filtro operados com taxa constante. 16º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Goiânia-GO. Setembro, 1991.
- DI BERNARDO, L, DANTAS, A. D. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. São Carlos: Rima Editora, 2005, v.2. p.1584.
- DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. Seleção de tecnologias de tratamento de água – volume 1. LDibe / Cubo. 2008, p. 868.

EPA. Guideline for Water Reuse. U.S. Agency for International Development, Washington D. C. 2012.

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

HEPANHOL, I. Poluentes emergentes, saúde pública e reúso potável direto. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier. 2013, p. 501 – 537.

HO, J. H. Anaerobic membrane bioreactor for the treatment of low strength wastewater. Partial Thesis (PhD). Iowa State University. 2007, p. 142.

IVES, K. L. A new concept of filterability. *Prog. Wat. Tech.*, v. 78, n. 5/6. 1978, p. 123 – 137 apud DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. Métodos e técnicas de tratamento de água: volume 1. Rima. 2005, p. 784.

JEANMAIRE, J-P.; SUTY, H.; MARTEIL, P.; BREANT, P.; PEDENAUD P. Application of the flexible fiber filter module (3FM) filter to sea water filtration. *Water Science and Technology*: vol. 56, n 10. 2007, p. 157-165.

ICWE. The Dublin statement and report on the conference and the international conference on water and the environmental development issues for twenty-first century. Genebra: WHO, 1992.

KIM J. J.; YOON, H.; HONG, J.; LEE, T.; WILF, M. Evaluation of new compact pre-treatment system for high turbidity seawater: fiber filter and ultrafiltration. *Desalination* 313. 2013, p. 28-35.

LEE, J. J.; JEONG, M. K.; IM, J. H.; BEHAIM, 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. 2006, p. 59-66.

LEE, J. J.; IM, J. J., BEN AIM, R.; KIM, J. R.; POO, K. M.; KIM, C. W. Better understanding of the filtration characteristics in the flexible fibre filter module (3M). *Water Science and Technology*: Volume 55, n 1-2. 2007, p. 77-83.

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

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

MAUCHAUFFE, S. Application of 3FM technology to pulp and paper waste water filtration. 2010. Disponível em: <<http://www.aquafit4use.eu/userdata/file/Mid-term%20Conference/Session%203%20Advanced%20Treatments/Application%20of%203FM%20to%20pulp%20paper%20ww%20filtration.pdf>>. Acessado em 15 de outubro de 2015.

METCALF & EDDY INC. Waste water engineering: treatment and reuse. Revised by: TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. 4. ed. Nova York. 2003, p.1819.

MORITA, A. K. M. Emprego de filtro de fibra flexível constituído de sisal e de polipropileno na clarificação de água para abastecimento. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2013, p. 165.

NOPENS, I., CAPALOZZA C., VANROLLEGHEM P. A. Stability analysis of a synthetic municipal wastewater. Department of applied mathematics, biometrics and process control. Universiteit Gent. July 2001, p. 22.

REALI, M. A.; SABOGAL PAZ, L. D.; DANIEL, L. A. Tratamento de água para consumo humano. In: CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier. 2013, p. 405 – 453.

SABESP. Água de Reúso. Disponível em <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=569>>. Acessado em 05 de outubro de 2015

SABESP. Tecnologia em águas de reúso e potencial de aplicação em processos industriais: estação de tratamento de esgotos ETE Jesus Netto. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/uploads/file/ap_ass_meio_amb.pdf>. Acessado em 05 de outubro de 2015

TCHOBANOGLOUS, G.; LEVERENZ, H.; NELLOR, M. H. N.; CROOK, J. Direct potable reuse – a path forward. Estados Unidos: Water Reuse Research Foundation. 2011, p. 102.