



UNICAMP

FÁBIO PONCIANO DE DEUS

**EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO NOS PROCESSOS DE
FILTRAÇÃO E RETROLAVAGEM EM FILTROS DE
AREIA PRESSURIZADOS**

CAMPINAS

2014



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

FÁBIO PONCIANO DE DEUS

**EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO NOS PROCESSOS DE
FILTRAÇÃO E RETROLAVAGEM EM FILTROS DE AREIA
PRESSURIZADOS**

Orientador: Prof. Dr. Roberto Testezlaf

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Água e Solo.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO FÁBIO
PONCIANO DE DEUS, E ORIENTADA PELO PROF. DR. ROBERTO TESTEZLAF**

CAMPINAS

2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva – CRB 8/5974

Deus, Fábio Poncioano de, 1985-
D488e Eficiência de remoção nos processos de filtração e retrolavagem em filtros de areia pressurizados / Fábio Ponciano de Deus. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Roberto Testezlaf.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Irrigação na agricultura. 2. Água de irrigação. 3. Engenharia de irrigação. I. Testezlaf, Roberto, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Removal efficiency in pressurized sand filter filtration and backwash processes

Palavras-chave em inglês:

Agricultural irrigation

Water irrigation

Irrigation engineering

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Roberto Testezlaf [Orientador]

André Luiz Teixeira Fernandes

Fernando Braz Tangerino Hernandez

Regina Célia de Matos Pires

Edson Eiji Matsura

Data de defesa: 02-09-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

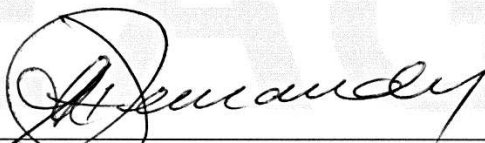
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO NOS PROCESSOS DE FILTRAÇÃO E
RETROLAVAGEM EM FILTROS DE AREIA PRESSURIZADOS**

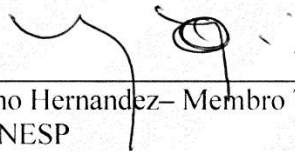
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Fábio Ponciano de Deus**, aprovada pela Comissão Julgadora em 02 de setembro de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Roberto Testezlaf – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



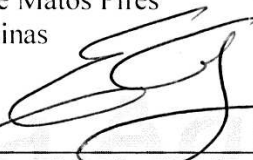
Prof. Dr. André Luiz Teixeira Fernandes – Membro Titular
UNIUBE/Uberaba



Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez – Membro Titular
FEIS/UNESP



Dra. Regina Célia de Matos Pires
IAC/Campinas



Prof. Dr. Edson Eiji Matsura – Membro Titular
FEAGRI/UNICAMP

EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO NOS PROCESSOS DE FILTRAÇÃO E RETROLAVAGEM EM FILTROS DE AREIA PRESSURIZADOS

RESUMO

A dificuldade em se definir parâmetros operacionais nos processos de filtração e retrolavagem em filtros de areia utilizados na irrigação localizada é causada pela complexidade de fixar adequadamente os valores da taxa de filtração e da vazão de retrolavagem a partir das características físicas da areia e dos componentes internos do equipamento. Neste contexto, o presente trabalho visou contribuir com informações técnico-científicas sobre o comportamento da eficiência de remoção nos processos de filtração e retrolavagem de um modelo comercial de filtro de areia para diferentes condições de operação e características físicas da areia, para um determinado nível de contaminação da água. Os ensaios experimentais, realizados em três filtros de areia de um mesmo modelo comercial, basearam-se na utilização combinada de três granulometrias de areia (fina, média e grossa) e quatro taxas de filtração (20, 40, 60 e 75 m³ m⁻² h⁻¹), em três ciclos de filtração (C1, C2 e C3). Os ensaios de filtração tiveram duração fixa de quatro horas, sendo os ensaios de retrolavagem realizados nos leitos contaminados pela filtração, com duração fixa de quinze minutos depois de atingida uma expansão de 25% do leito filtrante. Os parâmetros de perda de pressão e eficiência de remoção em ambos os processos foram avaliados ao longo do tempo de ensaio. De maneira geral, a filtração foi efetiva na remoção de partículas em suspensão na água a partir do tamanho correspondente à areia fina, com a retenção ocorrendo predominantemente na camada superficial do leito filtrante. O valor da eficiência de remoção na filtração aumentou com o incremento da taxa de filtração, com a diminuição da granulometria de areia, e reduzindo a sua efetividade com o tempo de filtração. Na retrolavagem, as velocidades superficiais utilizadas para a manutenção dos 25% de expansão do leito filtrante determinaram os maiores índices de sólidos removidos e de eficiência de limpeza nas camadas dos leitos filtrantes com maior nível de contaminação, com diminuição dos seus valores nos ciclos de filtração posteriores. A metodologia de avaliação da filtração utilizando informações de sólidos retidos na areia se mostrou com maior potencial de representatividade quando comparado à metodologia convencional de coleta pontual de amostras de água.

Palavras-Chave: irrigação localizada, obstrução de emissores, tratamento da água, equipamentos de irrigação.

REMOVAL EFFICIENCY IN PRESSURIZED SAND FILTER FILTRATION AND BACKWASH PROCESSES

ABSTRACT

The difficulty in defining operating parameters in filtration and backwash processes of the sand filter used in localized irrigation is caused by the complexity to set suitably filtration rate and backwash flow from physical characteristics of the sand and of internal components of the equipment. In this context, this work aims to contribute with technical-scientific information about the behavior of the filtration and backwash processes removal efficiency in a commercial model of sand filter for different operation conditions and sand physical characteristics, for a defined water contamination level. Experimental trails, performed in three sand filter of the same commercial model, were based in the combined use of three sand particle sizes (fine, medium and coarse) and four filtration rates (20, 40, 60 e $75 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), in three filtration cycles (C1, C2 e C3). The filtration tests had fixed period of four hours and the backwash trails were performed in the unclean beds produced by filtration, with 15 minutes duration, after reached a filtration bed expansion of 25%. The parameters of pressure loss and removal efficiency in both processes were evaluated over the experimental time. Usually, the filtration was effective to remove suspended water particles up to the size corresponding to fine sand, with predominant action on the surface filter layer. The value of filtration removal efficiency increased with increasing values of the filtration rate, with decreasing of sand particle size and reducing its effectiveness with filtration time. In the backwash process, the superficial velocities used to maintain the filtration layer expansion of the 25% determined highest rates of removed solids and cleaning efficiencies in layers with higher contamination levels, with decreasing values along the cycles. The filtration assessment methodology using values of solids retained in the sand showed the greatest potential of the representativeness in the evaluation process when compared to conventional methods of point water samples collected over time.

Keywords: localized irrigation, emitter clogging, water treatment, irrigation equipment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Tratamento físico da água na irrigação	5
2.2 Filtros de areia pressurizados.....	6
2.2.1 Filtração.....	9
2.2.2 Retrolavagem	12
2.3 Material filtrante	15
2.4 Qualidade física da água	18
2.5 Avaliação de filtros de areia	21
2.5.1 Eficiência de remoção	21
2.5.2 Perda de pressão em filtros de areia	24
2.5.3 Grau de contaminação ou sujidade da camada filtrante	27
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1 Local	30
3.2 Material.....	31
3.2.1 Módulo experimental e equipamentos	31
3.2.2 Material filtrante.....	36
3.2.3 Altura da camada filtrante nos ensaios.....	36
3.3. Metodologia	37
3.3.1. Avaliação do processo de filtração.....	37
3.3.2. Avaliação do processo de retrolavagem.....	39
3.3.3 Parâmetros de avaliação dos ensaios.....	41
3.3.4 Análise Estatística	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 Precipitação pluviométrica durante os ensaios experimentais.....	52
4.2 Sólidos suspensos totais (SST) contidos na água utilizada no experimento.....	52
4.2 Caracterização do material filtrante	60
4.3 Avaliação do processo de filtração	62
4.3.1 Caracterização hidráulica dos filtros de areia no processo de filtração	62

4.3.2 Remoção de sólidos suspensos na filtração pela análise da areia (grau de contaminação ou sujidade da camada filtrante).....	74
4.3.3 Eficiência de remoção na filtração pela análise de SST presentes na água (ER_{SST})	79
4.3.4 Eficiência de remoção no processo de filtração pela análise de SST presentes na areia (ER_{AREIA})	91
4.3.5 Percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas nas águas utilizadas no experimento ($\%V_{DP}$)	93
4.3.6 Eficiência de remoção no processo de filtração por faixas de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP})	96
4.4 Avaliação do processo de retrolavagem	106
4.4.1 Contaminação dos leitos filtrantes antes do processo de retrolavagem	106
4.4.2 Velocidade superficial nos ensaios de retrolavagem.....	107
4.4.3 Caracterização hidráulica dos filtros de areia no processo de retrolavagem.....	107
4.4.4 Remoção de sólidos suspensos na limpeza pela análise da areia	114
4.4.5 Eficiência de limpeza (E_L)	117
5 CONCLUSÕES	121
6 RECOMENDAÇÕES.....	122
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
8 ANEXOS	129

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pai, mãe, irmãs, cunhados, e à minha namorada Camila, pelo amor, amizade e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre presente em todos os momentos da minha vida.

A Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI/UNICAMP, pelo excelente trabalho de formação de recursos humanos e pela disponibilização da infraestrutura e recurso financeiro para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Roberto Testezlaf, pela oportunidade de desenvolvimento do seguinte trabalho, bem como pela excelente orientação.

A FAPESP pelo financiamento a pesquisa.

A Capes e CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

A empresa Hidro Solo Indústria e Comércio pelo incentivo financeiro e estrutural à pesquisa;

Aos professores e aos funcionários da FEAGRI pelo apoio ao desenvolvimento do trabalho. Em especial aos funcionários Gelson Espíndola, Túlio Assunção, Giovani Brota, Sidney Trombeta, Rita de Cassia (Ritinha), Marta Vechi, Fábio Augusto, prof. Dr. Angel Potin entre muitos outros.

Ao professor Dr. Carlos Grosso (FEA/UNICAMP) e à laboratorista Yara Moreno pelo apoio na realização das análises de água do experimento.

Aos meus pais Maurício Vicente de Deus (*in memoriam*) e Lúcia Aparecida Ponciano de Deus, pelo amor. Às minhas irmãs Lilian Flaviane e Karine Angélica, e aos meus cunhados João Paulo Resende e Alessandro Ferreira, pela infinita amizade. À minha namorada Camila Alvarenga pelo carinho diário.

Aos amigos e companheiros de Faculdade: Maycon Diego (Piá), Haroldo Ferreira, Natalia Tuta (Tica), Ivo Zution, Ricardo Magnani Filho, Leo Nazário, Aline Nazário, Daniel Feitosa (Gala), Adriana Ribeiro (Zoio), Flávia dos Santos (Cabs), Danielle Gonçalves (Dani), Gabriela Kurokawa (Gaby), Douglas Batista (Menino Rosa), Eduardo Agnellos (Cajuru), Allan Charles (Chuchu), Marcelo José da Silva (Marcelão), Guilherme Castioni, Michender Werison, Marcio Mesquita, Rhuanito Soranz, entre muitos que a memória não me ajudou a lembrar.

A todos muito obrigado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Faixa de remoção de sólidos suspensos para diferentes tipos de filtro (Fonte: TESTEZLAF, 2006).....	6
Figura 2. Filtro de areia utilizado na irrigação e suas partes constituintes (a) (Adaptado do Catálogo da empresa AMIAD MEDIA FILTERS, 2014); placa difusora tipo plana com bordas (b) e sistema de drenagem do tipo “crepinas cilíndricas” (c) (Fonte: MESQUITA, 2010).	7
Figura 3. Representação do processo de filtração em filtros de areia utilizados na irrigação. (Adaptado do Catálogo da empresa Flow-Guard, 2014).....	9
Figura 4. Representação dos fenômenos de retenção de partículas em suspensão no processo de filtração em filtros de areia (Adaptado de TESTEZLAF et al., 2014).	10
Figura 5. Representação do processo de retrolavagem em filtros de areia utilizados na irrigação. (Adaptado de Flow-Guard, 2014).....	12
Figura 6. Exemplo de curva de distribuição granulométrica com indicativo dos diâmetros D_{10} e D_{60}	16
Figura 7. Concentração relativa em função da profundidade do meio filtrante. (Adaptado de JUSOH et al. (2009)).....	17
Figura 8. Esquema com as frações características das frações que compõem os sólidos totais (ST) contidos nas águas (SSed – sólidos sedimentáveis, SS - sólidos suspensos, STD – sólidos dissolvidos, STV – sólidos voláteis e SF – sólidos fixos) (FONTE: PIVELI e KATO, 2005)	20
Figura 9. Variação da perda de pressão em filtros de areia em função do tempo (min) para três granulometrias diferentes. (Adaptado de HAMAN et al., 1994).....	24
Figura 10. Movimentação da camada de areia observada para a placa difusora original (esquerda) (MESQUITA, 2010) e para as placas difusoras propostas avaliadas (direita) (DEUS et al., 2011).....	26
Figura 11. Perda de pressão na retrolavagem em função da velocidade. (Fonte: GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999).....	27
Figura 12. Campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP), com detalhe da localização do reservatório e do local de instalação dos filtros de areia.	30
Figura 13. Layout de instalação dos filtros de areia e equipamentos em campo.	31

Figura 14. Modelo de filtro de areia avaliado com detalhe da modificação estrutural (visores e aberturas laterais) (a), que apresenta placa difusora do tipo “plana com bordas” (b) e sistema de drenagem do tipo “crepinas cilíndricas” (c) (Fonte: RAMIREZ, 2010).	32
Figura 15. Sensor de vazão instalado na tubulação do módulo experimental.....	33
Figura 16. Detalhes da tomada de pressão tipo integral instalada no módulo experimental.....	33
Figura 17. Transdutores de pressão Motorola, modelo MPX 5500DP, utilizados no experimento.	34
Figura 18. Detalhes do sistema de aquisição de dados formado pelo Laptop (a), placa de aquisição de dados (b) e interface construída a partir do software Labview (c) utilizados no experimento.	35
Figura 19. Módulo experimental de ensaios de filtros de areia com a montagem finalizada.	35
Figura 20. Fluxograma do número total de ensaios experimentais dos processos de filtração e retrolavagem (a) e amostras de água (SST – sólidos suspensos totais e %V _{DP} – percentual em volume de determinada faixa de diâmetro de partículas) e areia (b).	40
Figura 21. Aparato de filtração utilizado na análise de SST (à esquerda), conectado ao erlenmeyer com sílica (centro) e à bomba de sucção (à direita).	42
Figura 22. Calador para amostragem de grãos de sacaria adaptado para realizar amostragem de areia.	42
Figura 23. Detalhe do procedimento da inversão da proveta (a) e do resultado após o procedimento (b).	43
Figura 24. Detalhe do equipamento modelo Mastersizer 2000 (a) e exemplo dos resultados e gráficos gerados na tela do computador (b).	45
Figura 25. Detalhe de um resultado gerado pelo equipamento modelo Mastersizer 2000 em termos de percentual de volume para diferentes tamanhos de partícula em suspensão na água. ...	47
Figura 26. Variabilidade temporal das chuvas ocorridas no intervalo do experimento, com indicação das respectivas datas para cada combinação experimental.	53
Figura 27. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L ⁻¹) na água de entrada durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no primeiro ciclo de filtração.	54

Figura 28. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) na água de saída durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no primeiro ciclo de filtração.	55
Figura 29. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) na água de entrada durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no segundo ciclo de filtração.	56
Figura 30. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) na água de saída durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no segundo ciclo de filtração.	57
Figura 31. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) na água de entrada durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no terceiro ciclo de filtração.	58
Figura 32. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) na água de saída durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no terceiro ciclo de filtração.	59
Figura 33. Curvas granulométricas das areias utilizadas no experimento (G1, G2 e G3).	61
Figura 34. Curvas ajustadas e modelos de regressão para perda de pressão (kPa) em função da taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) no processo de filtração dos filtros de areia sem meio filtrante.	64
Figura 35. Comportamento da variação da perda de pressão (kPa) em função da taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) para o processo de filtração, para diferentes granulometrias de areia, avaliados no início (0 min), e 60, 120, 180 e 240 minutos depois do início.	71
Figura 36. Comportamento da variação da perda de pressão (kPa) em função do tempo de filtração (min), para as combinações experimentais de taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) e granulometria de areia.	73
Figura 37. Remoção de sólidos no processo de filtração pela análise da areia (g), em diferentes camadas do leito filtrante ($\text{MS}_{\text{Fcamada}}$), para as granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), combinadas com diferentes taxas ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) e ciclos de filtração.	75

Figura 38. Remoção de sólidos no processo de filtração em todo o leito filtrante (MS_{Ftotal}) (g), em função das diferentes granulometrias de areia e taxas de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), para os três ciclos de filtração.....	78
Figura 39. Remoção de sólidos no processo de filtração em todo o leito filtrante (MS_{Ftotal}) (g), considerando valor médio entre os ciclos de filtração.....	78
Figura 40. Eficiência de remoção no processo de filtração utilizando SST da água (ER_{SST}) (%) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometrias de areia, para o 1º ciclo de filtração em diferentes tempos de coleta (colunas), para os filtros F1, F2 e F3 (linhas).	80
Figura 41. Eficiência de remoção no processo de filtração utilizando SST da água (ER_{SST}) (%) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometrias de areia, para o 2º ciclo de filtração em diferentes tempos de coleta (colunas), para os filtros F1, F2 e F3 (linhas).	81
Figura 42. Eficiência de remoção no processo de filtração utilizando SST da água (ER_{SST}) (%) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometrias de areia, para o 3º ciclo de filtração em diferentes tempos de coleta (colunas), para os filtros F1, F2 e F3 (linhas).	82
Figura 43. Eficiência de remoção na filtração utilizando SST da água considerando todos os dados coletados no tempo ($ER_{SST\ ciclo}$) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), no 1º ciclo de filtração.	83
Figura 44. Eficiência de remoção na filtração utilizando SST da água considerando todos os dados coletados no tempo ($ER_{SST\ ciclo}$) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), no 2º ciclo de filtração.	86
Figura 45. Eficiência de remoção na filtração utilizando SST da água considerando todos os dados coletados no tempo ($ER_{SST\ ciclo}$) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), no 3º ciclo de filtração.	88
Figura 46. Eficiência de remoção na filtração utilizando SST da água considerando todos os dados coletados no tempo em todos os ciclos de filtração ($ER_{SST\ total}$) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), para os filtros F1, F2 e F3.	89
Figura 47. Variação da eficiência de remoção na filtração utilizando SST presentes na água ($ER_{SST\ total}$) (%) em função da taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometria da areia, a partir do comportamento médio entre filtros considerando todos os dados coletados no tempo e em todos os ciclos de filtração.	90

Figura 48. Eficiência de remoção no processo de filtração utilizando os valores de SST presentes na areia (ER_{AREIA}) (%), para as diferentes combinações de taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração, e granulometrias de areia.	91
Figura 49. Comportamento médio entre filtros do percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água de entrada do sistema ($\%V_{DP}$) (%), para amostras coletadas no início da filtração, para diferentes combinações de granulometria de areia, e taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração.	93
Figura 50. Comportamento médio entre filtros do percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água de entrada no sistema ($\%V_{DP}$) (%), com amostras coletadas no final da filtração, para diferentes combinações de granulometria de areia, e taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração.	94
Figura 51. Variação média da eficiência de remoção no processo de filtração entre filtros de areia, para diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP}) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia, taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração, no início e no fim do processo.	97
Figura 52. Eficiência de remoção no processo de filtração para a faixa de diâmetro de partícula relativa à areia fina (ER_{DP}) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia, taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração, no início e no fim do processo de filtração.	100
Figura 53. Eficiência de remoção no processo de filtração para a faixa de diâmetro de partícula relativa à areia média (ER_{DP}) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia, taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração, no início e no fim do processo de filtração.	101
Figura 54. Contaminação média do leito filtrante antes do processo de retrolavagem (g) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometria de areia.	106
Figura 55. Gráficos e modelos de regressão para perda de pressão (kPa) em função da velocidade superficial ($m h^{-1}$) para o processo de retrolavagem dos filtros de areia sem meio filtrante.	109
Figura 56. Remoção de sólidos no processo de limpeza para diferentes camadas do leito filtrante ($MS_{Rcamada}$) (g), para as granulometrias G1, G2 e G3, combinadas com os diferentes graus de contaminação do processo de filtração.	115
Figura 57. Remoção de sólidos (g) no processo de retrolavagem em todo o leito filtrante (MS_{Rtotal}), em função dos ensaios de filtração que resultaram em diferentes graus de sujidade do leito filtrante (GS1 – TF20, GS2 – TF40, GS3 – TF60 e GS4 – TF75).	116

Figura 58. Eficiência de limpeza (%), em diferentes camadas do leito filtrante (E_{Li}), para diferentes combinações de ciclos de filtração, granulometrias de areia e graus de sujidade.	118
Figura 59. Eficiência de limpeza, considerando todo o leito filtrante, em função de diferentes ciclos de filtração, granulometrias de areia, e graus de sujidade originados dos ensaios de filtração.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Simulação de diferenças nos valores de eficiência de remoção devido à limitação de metodologia de determinação de SST.	21
Tabela 2. Especificações técnicas do transdutor de pressão da Marca Motorola, modelo MPX 5500DP (Fonte: MOTOROLA, 2014).	34
Tabela 3. Dados médios de massa de areia retida (g), e percentuais retidos e que passam nas diferentes peneiras (%), para as granulometrias de areia avaliadas (G1, G2 e G3) ¹	61
Tabela 4. Parâmetros granulométricos das amostras avaliadas ¹	61
Tabela 5. Valores médios e desvio padrão da perda de pressão (kPa) dos filtros de areia sem a presença de meio filtrante na comparação dos filtros pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade.	63
Tabela 6. Valores médios e desvio padrão das taxas de filtração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) utilizadas nos ensaios experimentais com meio filtrante durante todo o período de filtração.	65
Tabela 7. Valores médios de perda de pressão (kPa) no processo de filtração na avaliação dos filtros de areia com meio filtrante pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, para diferentes condições experimentais e tempos de avaliação (min) ¹	67
Tabela 8. Valores da perda de pressão (kPa) dos filtros de areia em diferentes períodos (min) no processo de filtração com comparação pelo teste Tukey ($P < 0,05$) para avaliar a diferença entre granulometrias de areia.	69
Tabela 9. Valores médios da diferença aritmética da perda de pressão (kPa) entre o início e o final no processo de filtração entre filtros de areia, para diferentes granulometrias de areia e taxas de filtração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).	72
Tabela 10. Valores de espessuras úteis da camada filtrante (cm) no processo de filtração para diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$).	77
Tabela 11. Dados médios e desvio padrão do percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água utilizada no experimento ($\%V_{DP}$) (%).	95
Tabela 12. Valores médios de velocidade superficial (V_s) (m h^{-1}) utilizados nos experimentos de retrolavagem para cada granulometria de areia e filtro de areia ¹	107
Tabela 13. Valores médios de perda de pressão (kPa) dos filtros de areia avaliados em diferentes velocidades superficiais (m h^{-1}) na comparação dos filtros pelo teste Tukey ($P < 0,05$) no processo de retrolavagem ¹	108

Tabela 14. Dados médios de perda de pressão (kPa) no processo de retrolavagem em função das diferentes combinações de graus de sujidade do leito filtrante, granulometrias de areia e ciclos de filtração, para todos os filtros de areia avaliados.....	110
Tabela 15. Valores médios da perda de pressão (kPa) durante o processo de retrolavagem e comparação pelo teste Tukey ($P<0,05$) para as diferentes combinações de granulometrias de areia e graus de sujidade da camada filtrante ¹	111
Tabela 16. Valores médios de perda de pressão no processo de retrolavagem (kPa) na utilização de diferentes granulometrias de areia com comparação estatística pelo teste Tukey ($P<0,05$) ¹ .	112
Tabela 17. Valores médios de perda de pressão (kPa) no processo de retrolavagem (contaminações diferenciadas do leito filtrante--GS1, GS2, GS3 e GS4) com comparação estatística pelo teste Tukey ($P<0,05$) ¹ .	113
Tabela 18. Dados de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) contidos no afluente (água de entrada dos filtros) utilizada nos diferentes tratamentos do experimento ¹	129
Tabela 19. Dados de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) contidos no efluente (água de saída dos filtros) utilizada nos diferentes tratamentos do experimento ¹	130
Tabela 20. Análise de regressão da perda de pressão dos filtros vazios (kPa) em função da taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) no processo de filtração para o modelo matemático exponencial.	130
Tabela 21. Análise de regressão da perda de pressão (kPa) em função da taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) para o processo de filtração na aplicação do modelo matemático exponencial em 5 períodos distintos (0, 60, 120, 180 e 240 minutos) durante o tempo de filtração.	131
Tabela 22. Dados de perda de pressão (kPa) média no processo de filtração em função do tempo de filtração (min), para diferentes taxas de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e granulometrias de areia, para os três filtros de areia avaliados.	132
Tabela 23. Análise de variância, ao nível de 5% de probabilidade, aplicado aos dados de perda de pressão (kPa) no processo de filtração em função do tempo de filtração (min), para diferentes combinações de taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e granulometrias de areia ¹	134
Tabela 24. Análise de regressão da perda de pressão (kPa) em função do tempo de filtração (min), para cada filtro de areia avaliado, combinado com as diferentes taxas de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e granulometrias de areia (G) ¹	135

Tabela 25. Dados de massa de sólidos removidos no processo de filtração nas diferentes camadas do leito filtrante ($MS_{Fcamada}$) (g), em função das diferentes combinações de granulometria de areia e taxas de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), para os três ciclos de filtração.	136
Tabela 26. Dados de massa de sólidos removidos no processo de filtração para o leito filtrante por inteiro (MS_{Ftotal}) (g), em função das diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração, para três ciclos de filtração.	137
Tabela 27. Dados de eficiência de remoção no processo de filtração utilizando SST contidos na água (ER_{SST}) (%) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), granulometrias de areia, ciclos de filtração e tempo de coleta das amostras.	137
Tabela 28. Dados de eficiência de remoção no processo de filtração por ciclo, utilizando SST contidos na água ($ER_{SST\ ciclo}$) (%) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), granulometrias de areia, e ciclos de filtração.	138
Tabela 29. Dados de eficiência de remoção total no processo de filtração utilizando SST contidos na água ($ER_{SST\ total}$) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometrias de areia, para os filtros de areia (F1, F2 e F3).	139
Tabela 30. Dados de eficiência de remoção no processo de filtração utilizando os valores de SST presentes na areia (ER_{AREIA}) (%), para as diferentes combinações de taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração, e granulometrias de areia.	139
Tabela 31. Valores médios entre filtros de areia da eficiência de remoção no processo de filtração para diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP}) (%), considerando a combinação de diferentes granulometrias de areia e taxas de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), em diferentes ciclos de filtração, no início e no fim do processo de filtração.	140
Tabela 32. Valores de desvio padrão entre filtros de areia (%) da eficiência de remoção entre filtros no processo de filtração para diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP}), considerando a combinação de diferentes granulometrias de areia e taxas de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), em diferentes ciclos de filtração, no início e no fim do processo de filtração.	142
Tabela 33. Valores de coeficiente de variação entre filtros de areia (%) da eficiência de remoção entre filtros no processo de filtração para diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP}), considerando a combinação de diferentes granulometrias de areia e taxas de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), em diferentes ciclos de filtração, no início e no fim do processo de filtração.	144

Tabela 34. Análise de regressão da perda de pressão (kPa) em função da velocidade superficial (m h^{-1}) para o processo de retrolavagem na aplicação do modelo matemático exponencial.....	146
Tabela 35. Valores médios de perda de pressão (kPa) em diferentes períodos do processo de retrolavagem (min) com comparação estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) ¹	146
Tabela 36. Dados médios de massa de sólidos removidos no processo de retrolavagem nas diferentes camadas do leito filtrante ($\text{MS}_{\text{Rcamada}}$) (g), em função da combinação das diferentes granulometrias de areia, graus de sujidade do leito filtrante e ciclos de filtração.	148
Tabela 37. Dados médios de massa de sólidos removidos no processo de retrolavagem para o leito filtrante por inteiro ($\text{MS}_{\text{Rtotal}}$) (g), em função da combinação das diferentes granulometrias de areia, graus de sujidade do leito filtrante e ciclos de filtração.	149
Tabela 38. Valores médios de eficiência de limpeza (E_{Li}) (%) do processo de retrolavagem para diferentes camadas do leito filtrante, na combinação de diferentes ciclos de filtração, granulometrias de areia e graus de sujidade do leito filtrante.	149
Tabela 39. Valores médios de eficiência de limpeza (E_{L}) (%) do processo de retrolavagem para diferentes combinações de ciclos de filtração, granulometrias de areia e graus de sujidade do leito filtrante.	150

LISTA DE SÍMBOLOS

H – altura do leito filtrante (m)

A – área do filtro (m^2)

K_{pc} – coeficiente

CU – Coeficiente de uniformidade (%)

Co – concentração de partículas no afluente (M L^{-3})

C1 – 1º ciclo de filtração

C2 – 2º ciclo de filtração

C3 – 3º ciclo de filtração

D₁₀ – Diâmetro efetivo médio das partículas de areia (mm)

D₆₀ – Diâmetro da peneira que resulta na passagem de 60% em peso de todo o material avaliado (mm)

ER_L – eficiência de limpeza do processo de retrolavagem para o leito por inteiro (%)

ER_{SST ciclo} – eficiência de remoção de sólidos suspensos totais por ciclo na filtração (%)

ER_{SST total} – eficiência de remoção geral para a combinação entre granulometria de areia e taxa de filtração na filtração (%)

ER_{DP} – eficiência de remoção no processo de filtração para determinada faixa de diâmetro de partículas contidas na água (%)

ER_{AREIA} - eficiência de remoção no processo de filtração utilizando dados da areia (%)

ER_{SST} – eficiência de remoção no processo de filtração utilizando sólidos suspensos totais contidos na água em períodos distintos (%)

ER_{Li} – eficiência de limpeza do processo de retrolavagem para determinada profundidade avaliada na camada filtrante (%)

$\overline{S_{ent}}$ - estimativa da quantidade média de sólidos que entraram nos filtros de areia (g)

FV – fração de volume (mL)

G1 – granulometria de areia fina

G3 – granulometria de areia grossa

G2 – granulometria de areia média

MS_{60F} – massa de sólidos removidos contidos em uma amostra de 60 mL de areia para o processo de filtração (mg)

MS_{60R} – massa de sólidos removidos contidos em uma amostra de 60 mL de areia para o processo de retrolavagem (mg)

$MS_{Fcamada}$ – massa de sólidos removidos contidos na areia em cada fração de volume da camada filtrante para o processo de filtração (mg)

$MS_{Rcamada}$ – massa de sólidos removidos contidos na areia em cada fração de volume da camada filtrante para o processo de retrolavagem (mg)

MS_{Ftotal} – massa de sólidos removidos no processo de filtração contidos na camada filtrante (mg).

MS_{Rtotal} – massa de sólidos removidos no processo de retrolavagem contidos na camada filtrante (mg)

P_1 – massa dos filtros de microfibras antes da filtração (g)

P_2 – massa dos filtros de microfibras depois da filtração (g)

$\overline{SST_{ent}}$ - média nos tempos de amostragem e filtros de areia com relação aos sólidos suspensos totais que entraram nos filtros de areia ($mg\ L^{-1}$)

$\%V_{DP1}$ – percentual com base em volume de determinada faixa de diâmetro de partículas contidas na água antes da passagem no filtro de areia (%)

$\%V_{DP2}$ – percentual com base em volume de determinada faixa de diâmetro de partículas contidas na água depois da passagem no filtro de areia (%)

$\%V_{DP}$ – percentual em volume das faixas de diâmetro de partículas presentes nas amostras de água (%)

H_t – perda de carga em tempo qualquer (L)

H_o – perda de carga inicial, ou seja, no tempo zero (L)

SST – sólidos suspensos totais ($mg\ L^{-1}$)

SST_1 – sólidos suspensos totais antes da passagem da água pelo filtro de areia em determinado período no processo ($mg\ L^{-1}$)

SRA_{aF} – sólidos retidos em uma amostra de 60 mL de areia de determinada profundidade de avaliação antes de realizado o processo de filtração ($mg\ L^{-1}$)

SRA_{dF} – sólidos retidos em uma amostra de 60 mL de areia de determinada profundidade de avaliação depois de realizado o processo de filtração ($mg\ L^{-1}$)

SRA_{aR} – sólidos retidos em uma amostra de 60 mL de areia de determinada profundidade de avaliação antes de realizado o processo de retrolavagem ($mg\ L^{-1}$)

SRA_{dR} – sólidos retidos em uma amostra de 60 mL de areia de determinada profundidade de avaliação depois de realizado o processo de retrolavagem ($mg\ L^{-1}$)

$SRA_{a\ reti}$ – sólidos retidos nas amostras de areia antes da limpeza da camada, para determinada profundidade do leito filtrante ($mg\ L^{-1}$)

$SRA_{d\ reti}$ – sólidos retidos nas amostras de areia depois da limpeza da camada, para determinada profundidade do leito filtrante ($mg\ L^{-1}$)

SST_2 - sólidos suspensos totais depois da passagem da água pelo filtro de areia em determinado período no processo ($mg\ L^{-1}$)

SST_{Ciclo} – sólidos suspensos totais por ciclo ($mg\ L^{-1}$)

TF20 – taxa de filtração de $20\ m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$

TF40 – taxa de filtração de $40\ m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$

TF60 – taxa de filtração de $60\ m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$

TF75 – taxa de filtração de $75\ m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$

TF - taxa de filtração utilizada no ensaio ($m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$).

t – tempo (T)

V_{∞} - velocidade de aproximação ($L\ T^{-1}$)

V – volume utilizando de amostra de água (mL).

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de irrigação localizada são reconhecidos como tecnologias mais eficientes no tocante à aplicação da água e fertilizantes, bem como na geração de incrementos nos níveis de produção e na melhoria da qualidade dos alimentos. Esse potencial econômico e ambiental pode ser colocado em risco, caso as limitações de utilização dos equipamentos que compõem esses sistemas não sejam consideradas tanto no seu projeto como na sua operação em campo. Como os emissores empregados na irrigação localizada se caracterizam por possuírem diâmetros de distribuição de água reduzidos, a susceptibilidade de entupimento aumenta à medida que a qualidade da água diminui, especialmente, se for associada à não utilização de sistemas de tratamento da água. A ocorrência da obstrução desses emissores vai afetar o desempenho hidráulico do sistema, reduzir a uniformidade de distribuição da água, acarretar aumento dos custos operacionais e gerar riscos aos investimentos da atividade.

Dentre os tratamentos e equipamentos existentes para o tratamento da água de irrigação, a filtração é o tratamento físico destinado à remoção de partículas sólidas orgânicas e/ou inorgânicas em suspensão, sendo o filtro de areia o equipamento que se destaca pelo desempenho diferenciado de remoção de matéria orgânica e algas. A operação correta de filtros de areia que induzirá a atingir a eficácia potencial exige o perfeito conhecimento do seu funcionamento, que pode ser dividido em duas operações fundamentais, complementares e distintas: filtração, que consiste no processo de remoção de material em suspensão na água de irrigação mediante a sua passagem pela camada de areia; e a retrolavagem, definida como o processo de limpeza da camada de areia contaminada com partículas retidas, mediante a mudança na direção do fluxo no equipamento.

A filtração é um processo complexo de remoção de partículas da água, resultado dos mecanismos de transporte, aderência e desprendimento existentes em leitos filtrantes, que é influenciado, principalmente, pelas características físicas e químicas das partículas que constituem o leito filtrante e o fluido filtrado, e pela taxa de filtração empregada na sua execução. Os fatores que mais intervêm na inadequação desse processo se referem à dificuldade nas definições do tempo de filtração e dos parâmetros hidráulicos de pressão e vazão de filtragem, associados às características físicas da areia e dos acessórios do equipamento. A observação do processo de filtragem mostra que, a partir do momento que as partículas contaminantes são retidas no leito filtrante, há um acréscimo da resistência oferecida pelo meio filtrante ao fluxo da

água, ocorrendo um aumento na perda de carga do equipamento, que irá alterar a altura manométrica total do sistema e, conseqüentemente, o ponto de operação (vazão e altura manométrica) do sistema motobomba, podendo determinar uma redução na eficiência de bombeamento, aumentando a potência requerida, a energia consumida e o custo energético do empreendimento.

O processo de retrolavagem é efetivado pela fluidização da camada filtrante, onde a remoção das impurezas aderidas ao leito ocorre pela diferença de densidade entre as impurezas e o meio filtrante, sendo que as partículas mais densas ficam dentro do filtro (material filtrante) e as menos densas são expulsas para fora do sistema (sólidos suspensos inorgânicos e orgânicos). A limpeza insuficiente da camada de areia pode reduzir a sua porosidade, devido aos poros manterem-se total ou parcialmente obstruídos pela presença das partículas aderidas, o que causará um aumento na perda de carga do equipamento e redução da eficiência de remoção no processo subsequente de filtração. A realização inadequada da retrolavagem pode ainda determinar curtos períodos de filtração, com aumento na frequência de limpeza; e a formação de aglomerados, que pode favorecer o desprendimento e o deslocamento de partículas aderidas no leito, devido ao aumento da velocidade intersticial, que poderão entupir os emissores e causar oscilações hidráulicas no sistema de irrigação.

A operação incorreta da filtração e da retrolavagem é reflexo da falta de conhecimento dos parâmetros intervenientes nesses processos e de suas inter-relações, tanto por técnicos, quanto pelos produtores rurais (usuários). Como consequência, a não utilização da taxa de filtração ótima, associada à determinada granulometria de areia, resulta em ineficácia do processo do ponto de vista energético e da eficiência de remoção do equipamento; e a aplicação de vazões abaixo da requerida para fluidização do leito filtrante determina a sua limpeza inadequada, comprometendo o processo de filtração do equipamento. Adicionalmente a essas questões, a maioria das informações disponíveis sobre a operação de filtros de areia baseia-se em estudos do comportamento hidráulico com a utilização de água limpa, devido à complexidade de se trabalhar com o comportamento do equipamento na situação de obstrução dos poros do leito filtrante pela retenção dos sólidos suspensos presentes na água de irrigação.

A eficácia dos processos de filtragem e retrolavagem podem ser avaliadas pela determinação e análise da eficiência de remoção do equipamento durante e após as suas realizações. Assumindo condições ideais, um sistema de filtragem deve operar sempre próximo

da máxima eficiência de remoção proporcionada pela vazão de filtração ou de retrolavagem, e associada às características físicas da areia e qualidade da água. Esse parâmetro pode contribuir para a definição das condições operacionais do equipamento (vazão de filtragem e retrolavagem), e para a escolha do material filtrante que será utilizado para condições específicas de cada sistema.

A eficiência de remoção pode ser correlacionada ao grau de contaminação do leito filtrante, também denominado grau de sujidade, pois o aumento da contaminação do meio filtrante está associado ao aumento da eficiência de remoção do equipamento para determinada granulometria de areia e taxa de filtração, até o momento em que a etapa de desprendimento das partículas aderidas inicia-se, alterando as concentrações de sólidos suspensos na saída do sistema de filtragem. Além disso, a magnitude da vazão de limpeza do filtro é diretamente proporcional ao grau de sujidade da camada, ou seja, quanto mais contaminado o elemento filtrante, maiores serão as vazões de retrolavagem necessárias para fluidização do leito.

De maneira geral, a probabilidade de passagem de impurezas pelo filtro de areia para uma dada qualidade de água e granulometria de areia, e que acabam atingindo o sistema de irrigação, aumenta com o incremento da taxa de filtração, e diminui com o aumento do grau de sujidade da camada. Neste contexto, a variação da granulometria da areia, para uma determinada taxa de filtração e qualidade de água, determina a diferenciação dos valores de eficiência de remoção e do grau de sujidade da camada. Da mesma forma, a magnitude da vazão de retrolavagem que determina a expansão do leito filtrante para limpar eficientemente a camada de areia, depende do diâmetro efetivo médio da areia, da altura da camada filtrante, do modelo construtivo do filtro e do grau de sujidade do leito.

Resumindo, a principal causa de insucessos na utilização de filtros de areia na irrigação localizada refere-se ao não entendimento e a não aplicação correta dos parâmetros que afetam a sua operação, no qual os parâmetros de operação: taxa de filtração, velocidade superficial (vazão de retrolavagem), e tempo de filtração e retrolavagem, associados às características físicas do material utilizado como meio filtrante, são os principais fatores que interferem nos valores de eficiência de remoção refletindo na proteção dos sistemas de irrigação.

Dessa forma, estudos foram realizados para avaliar a eficiência de remoção e caracterizar a quantidade e a distribuição de tamanho de partículas removidas em filtros de areia, durante os processos de filtração e retrolavagem, analisando os efeitos combinados de

granulometria de areia, taxa de filtração e ciclos de filtração, para determinado tempo de filtração e retrolavagem. Portanto, essa pesquisa propõe a validação das seguintes hipóteses de trabalho:

- A remoção de partículas no processo de filtração, de determinado modelo comercial de filtro de areia, utilizando como parâmetros os sólidos suspensos totais contidos na água e os sólidos retidos na areia, e as partículas com diferentes faixas de diâmetro presentes na água de irrigação, varia ao longo do tempo de filtração e entre camadas do leito filtrante, aumentando seu valor com a redução da taxa de filtração e da granulometria de areia;
- Os valores da eficiência de limpeza no processo de retrolavagem, para um modelo comercial de filtro de areia, variam com o grau de sujidade da camada filtrante resultante dos tratamentos de filtração, onde quanto maior a contaminação do leito filtrante, menor a eficiência de limpeza no processo de retrolavagem;
- As metodologias de avaliação do processo de filtração baseadas nos dados de sólidos contidos na água e na areia determinam similaridade de magnitude de valores e de comportamento da eficiência de remoção para diferentes condições experimentais.

Buscando contribuir com informações técnico-científicas que proporcionem o entendimento das relações entre as variáveis intervenientes no processo de filtração e retrolavagem, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar a variação da eficiência de remoção nos processos de filtração e retrolavagem de um modelo comercial de filtro de areia, para diferentes condições de operação e características físicas da areia, para um determinado nível de contaminação da água. Para isso, a pesquisa se fundamenta nos seguintes objetivos específicos: a) realizar ensaios de filtração para determinar a eficiência de remoção do equipamento em diferentes ciclos e para diferentes faixas de diâmetro de partículas, relacionando com o grau de contaminação da camada e com a perda de carga, em função da granulometria da areia, da taxa e do tempo de filtração, utilizando água com determinado nível de contaminação; b) realizar ensaios de retrolavagem para determinar a eficiência de remoção ocasionada pela realização desse processo, relacionando com o grau de contaminação do leito (tratamentos de taxa de filtração) e com a granulometria de areia (velocidade superficial), nas condições de meio filtrante contaminado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratamento físico da água na irrigação

O potencial de economia de água e energia dos sistemas de irrigação localizada os enquadra como tecnologias promissoras para um sistema produtivo agrícola mais rentável e ambientalmente sustentável (SCHWANKL, 2007). Contudo, para se atingir o potencial dessa tecnologia e não comprometer o sucesso da sua utilização, as limitações do emprego e operação dos equipamentos constituintes devem ser observadas e contornadas.

A principal limitação do uso de sistemas de irrigação localizada refere-se à necessidade de operá-lo com águas de qualidade adequada. Segundo Testezlaf et al. (2014), o Brasil, por ser um país tropical, que predominantemente utiliza águas superficiais, como rios, lagos, reservatórios e represas, caracterizadas pela elevada carga orgânica e de sedimentos, exige dos técnicos uma preocupação maior no projeto desses sistemas. Essa condição hídrica vai aumentar a probabilidade de entupimento dos emissores do sistema, que apresentam diâmetro de distribuição de água reduzido (POVOA e HILLS, 1994). De acordo com Testezlaf (2008), a obstrução de emissores nos sistemas de irrigação localizada aumenta os custos relacionados à manutenção, operação e substituição de equipamentos, diminuindo a rentabilidade do empreendimento. Neste contexto, o tratamento da água é uma etapa imprescindível para viabilizar o emprego de sistemas de irrigação localizada, podendo requerer tratamentos químicos e/ou físicos, dependendo do tipo e da quantidade de impurezas presentes na água, e do tipo de entupimento dos emissores.

Para problemas de entupimento por partículas físicas suspensas, sejam inorgânicas (areia, silte e argila) e/ou orgânicas (formigas, lesmas, ovos de insetos, larvas, algas, etc.), o tratamento físico é o recomendado, especificamente a filtração, que de acordo com Pizarro Cabello (1996), baseia-se na retenção de sólidos suspensos na água pela passagem forçada da água contra um meio filtrante.

Os filtros de areia, de tela e de disco são os equipamentos destinados à filtração em sistemas de irrigação localizada (BERNARDO et al., 2006). Testezlaf (2006) salienta que cada tipo de filtro possui faixas específicas de remoção (Figura 1), onde, de maneira geral, os filtros de tela e discos são eficientes em reter partículas maiores que 75 µm. Por outro lado, os filtros de areia, com maior faixa de remoção, retêm partículas maiores que 12,5 µm devido à capacidade de coletar esses contaminantes ao longo da trajetória percorrida na camada de areia e da

possibilidade de acumular grandes quantidades de contaminantes antes da realização da limpeza. Além da ampla faixa de remoção, outra vantagem dos filtros de areia em comparação aos demais se refere ao desempenho superior na remoção de matéria orgânica e algas (HAMAN et al., 1994; KELLER e BLIESNER, 1990).

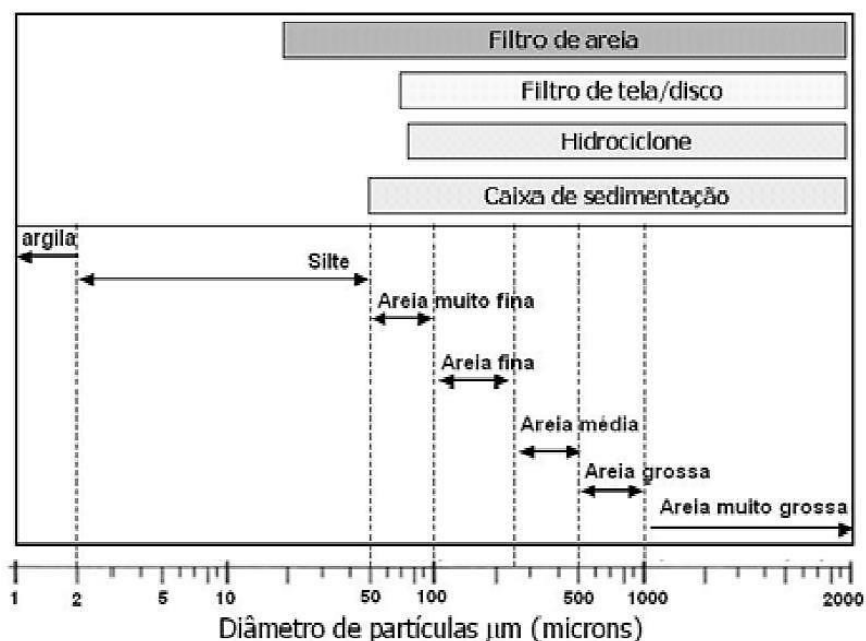


Figura 1. Faixa de remoção de sólidos suspensos para diferentes tipos de filtro (Fonte: TESTEZLAF, 2006).

Em trabalho desenvolvido por Puig-Bargués et al. (2005), foi observado que para águas com alta concentração de sólidos suspensos (176 mg L^{-1}), o filtro de areia apresentou desempenho superior em termos de remoção quando comparado aos filtros de tela e de disco. Contudo, quando a concentração de sólidos suspensos foi menor que 24 mg L^{-1} , não ocorreu diferença estatística entre os filtros.

A prevenção do entupimento dos emissores é a melhor alternativa para o sucesso no uso de sistemas de irrigação localizada. Nesse sentido, o investimento em sistemas de tratamento da água é um item fundamental, no qual se destaca o filtro de areia, considerado a opção mais indicada para os padrões de qualidade dos recursos hídricos disponíveis para utilização no Brasil.

2.2 Filtros de areia pressurizados

Filtros de areia pressurizados são reservatórios cilíndricos metálicos constituídos de aço-carbono, com acabamento externo em resina poliéster para proteção contra os raios ultravioleta, e

acabamento interno em pintura epóxi para tratamento anticorrosivo. A denominação pressurizado surge devido às pressões utilizadas na sua operação, que são superiores a 300 kPa. Estes filtros são preenchidos com uma camada de material poroso particulado denominado camada ou leito filtrante, através do qual, pela passagem forçada da água, removem-se os contaminantes em suspensão na água de irrigação (TESTEZLAF et al., 2014).

São apresentadas na Figura 2 as partes constituintes de um filtro de areia, onde basicamente deve conter uma tubulação de entrada na parte superior (1) e uma de saída na parte inferior (4); uma abertura na parte superior (7) e uma na parte inferior (6) para permitir, respectivamente, o preenchimento e o esvaziamento do filtro com o meio filtrante utilizado (3), bem como realizar a manutenção dos componentes internos; uma placa difusora (2), instalada internamente na parte superior do filtro, com a função de evitar a incidência direta do jato de água sobre a superfície do leito filtrante, reduzindo a velocidade da água e distribuindo homogênea sobre a superfície do leito filtrante; e um sistema de drenagem (5), que direciona a água filtrada para o sistema de irrigação no processo de filtração, e orienta a água na direção da camada no processo de limpeza do filtro.



Figura 2. Filtro de areia utilizado na irrigação e suas partes constituintes (a) (Adaptado do Catálogo da empresa AMIAD MEDIA FILTERS, 2014); placa difusora tipo plana com bordas (b) e sistema de drenagem do tipo “crepinas cilíndricas” (c) (Fonte: MESQUITA, 2010).

Mesquita (2010) expõe que a placa difusora e o sistema de drenagem são as estruturas que influenciam o comportamento energético e de remoção de impurezas dos filtros de areia. Burt (1994) comenta que a distribuição da água proporcionada pela placa difusora dos filtros de areia

não é uniforme sobre superfície da camada, fazendo com que haja movimentação da areia, havendo, geralmente, a formação de montes no centro e vales nas paredes do equipamento. Segundo esse autor, essa movimentação irá criar caminhos preferenciais para a água, reduzindo a eficiência de remoção do equipamento, o que também é confirmado por Phillips (1995). Adicionalmente, Burt (1994) e Mesquita (2010) salientam que a movimentação do leito filtrante proporciona modificação das características hidráulicas do equipamento, observado nos resultados de Deus et al. (2013), que comprovou o efeito da mudança da placa difusora na deformação da superfície da camada e, conseqüentemente, na perda de carga do equipamento.

Com relação ao sistema de drenagem, Mesquita (2010) relata que a sua ruptura física é um dos principais problemas enfrentado pelos irrigantes, que permite a passagem de contaminantes para o sistema de irrigação, reduz o diferencial de pressão do filtro, dificultando a determinação do momento de limpeza do equipamento. Adicionalmente, Santos et al. (2013) salientam que diferentes tipos de sistemas de drenagem determinam comportamentos diferenciados do perfil das linhas de fluxo no interior do equipamento, podendo interferir na expansão do leito filtrante bem como na perda de carga do processo de retrolavagem.

Desse modo, o resultado em termos de remoção de sólidos suspensos e em termos energéticos em filtros de areia é função do projeto da placa difusora e do sistema de drenagem, bem como da correta seleção, instalação e operação do equipamento (HAMAN et al., 1994; TESTEZLAF, 2008; PHILLIPS, 1995).

Pizarro Cabelo (1996) salienta que a seleção de filtros de areia deve ter como base a área filtrada, a granulometria de areia, e a espessura da camada filtrante. Para a seleção do meio filtrante pode-se utilizar o critério da abertura de passagem do emissor, onde o meio filtrante selecionado não deve permitir a passagem de partículas maiores que 1/10 do diâmetro do orifício de passagem do emissor para sistemas de gotejamento, enquanto na microaspersão não se deve permitir a passagem de partículas maiores que 1/5 do diâmetro do orifício de passagem do emissor.

Dessa forma, o dimensionamento e/ou escolha do filtro de areia deve ser realizada considerando equipamentos que sejam mais eficientes no tocante à utilização energética e em remoções de partículas em suspensão compatíveis com a utilização dos sistemas de irrigação.

2.2.1 Filtração

A utilização de filtros de areia consiste na realização da filtração propriamente dita e da retrolavagem, que são duas operações realizadas em filtros de areia, consideradas complementares entre si, e afetadas por variáveis e fatores distintos.

Testezlaf et al. (2014) definem a filtração como sendo a remoção de material em suspensão na água de irrigação pela sua passagem pela camada de areia no sentido descendente, ou seja, da entrada do filtro para o sistema de drenagem (Figura 3).

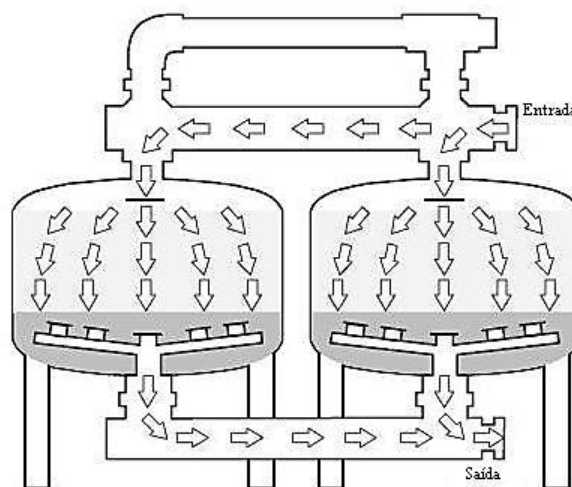


Figura 3. Representação do processo de filtração em filtros de areia utilizados na irrigação. (Adaptado do Catálogo da empresa Flow-Guard, 2014).

A teoria de retenção das partículas em suspensão na água por meios porosos é descrito por Pizarro Cabelo (1996), onde inicialmente as partículas com tamanho superior aos poros do meio filtrante são retidas superficialmente, pelo fenômeno denominado de “peneiramento ou coamento”. As partículas não removidas superficialmente se inserem no interior do leito filtrante, e dependendo da sua velocidade de deslocamento, há a ocorrência da sedimentação das partículas nos poros, processo denominado como “sedimentação”. Por fim, as partículas não removidas por esses dois princípios podem ser removidas da água de irrigação pela existência de forças elétricas entre o material filtrante e os contaminantes, bem como entre contaminantes, sendo este princípio conhecido por “adesão e coesão”, respectivamente. A Figura 4 apresenta uma representação esquemática dos fenômenos presentes no processo de retenção de partículas em suspensão na água.

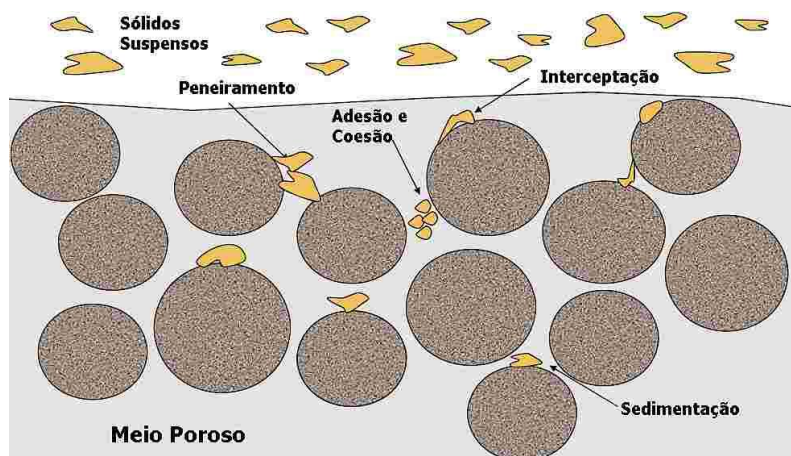


Figura 4. Representação dos fenômenos de retenção de partículas em suspensão no processo de filtração em filtros de areia (Adaptado de TESTEZLAF et al., 2014).

De acordo com Di Bernardo & Dantas (2005), os mecanismos de remoção de partículas em filtros de areia são complexos, podendo ocorrer tanto pela ação superficial do leito quanto pela ação de profundidade, onde as características físicas e químicas da água e do meio filtrante, e a taxa de filtração utilizada, são fatores que influenciam diretamente o comportamento da filtração. Esses autores separam o processo de filtração em três etapas, denominadas sequencialmente por “transporte, aderência e desprendimento”. O mecanismo de “transporte” refere-se à condução das partículas suspensas nas proximidades da superfície do leito filtrante podendo ser removidas superficialmente. A “aderência” é a força de retenção de partículas diferentes devido a existência de força elétrica, contudo, dependendo da magnitude da velocidade da água nos poros do leito filtrante (velocidade intersticial), poderá ocorrer o “desprendimento” da partícula retida no leito filtrante.

O aumento do volume de sólidos retido e depositado no meio filtrante diminui o espaço disponível para o deslocamento da água (diminui os poros), causando aumento da velocidade intersticial e, conseqüentemente, da perda de pressão do equipamento (DI BERNARDO & DANTAS, 2005). Nesse sentido, a previsão do aumento da perda de pressão no decorrer da filtração é essencial no dimensionamento do conjunto motobomba, que irá transmitir a energia necessária à água para superar as resistências do percurso e colocar em funcionamento os equipamentos do sistema de irrigação, evitando variações de pressão e vazão nos emissores e, conseqüentemente, da lâmina de irrigação aplicada.

A principal variável operacional a ser definida no processo de filtração refere-se à taxa de filtração. Esse parâmetro define o comportamento hidráulico e a eficiência de remoção do equipamento. Testezlaf (2008) define a taxa de filtração como a relação entre o deslocamento de determinado volume de água por unidade de tempo e por unidade de área normal à direção do fluxo de filtração.

Phillips (1995) recomenda a utilização de taxas de filtração compreendidas no intervalo de 36,0 a 61,2 m³ m⁻² h⁻¹ para filtros pressurizados de irrigação. De acordo com o autor, valores abaixo da faixa recomendada proporcionam condições para formação de caminhos presenciais no deslocamento da água e dos contaminantes, resultando em baixa remoção de partículas e baixo incremento temporal da perda de carga, que pode prejudicar o acionamento automático da limpeza da camada. Por outro lado, valores acima do recomendado determinam excessiva turbulência do fluido no interior do filtro, que vai causar a movimentação da superfície da camada filtrante alterando o comportamento hidráulico do equipamento e reduzindo a eficiência de remoção (BURT, 1994, MESQUITA, 2010 e DEUS et al., 2013). Vermerein e Jobling (1984) indicaram que quanto menor a taxa de filtração melhor a remoção de partículas, limitando valor máximo de 108 m³ m⁻² h⁻¹, enquanto Pizarro Cabelo (1996) indica o valor correspondente a 60 m³ m⁻² h⁻¹, e Benham e Ross (2002) preconizam valores abaixo de 61,2 m³ m⁻² h⁻¹. Em trabalho desenvolvido por Mesquita (2010) com filtros de areia utilizando água limpa, concluiu-se que a utilização de taxas de filtração entre 20 a 60 m³ m⁻² h⁻¹ proporciona os melhores resultados em termos energéticos (perda de pressão) e menor movimentação da superfície da camada filtrante. Lawrence (2003) recomenda taxas de filtração entre 35 a 60 m³ h⁻¹ m⁻², sendo que os valores maiores podem ser utilizados quando a concentração de contaminantes da água seja menor que 10 ppm de material em suspensão, e que valores menores devem ser aplicados quando a água apresentar valor de concentração igual ou maior a 100 ppm de material em suspensão.

De acordo com Keller e Bliesner (1990), para uma dada qualidade de água e tipo de meio poroso, o tamanho das partículas que passam pelo filtro sem serem retidas aumentam com o incremento da vazão ou taxa de filtração, ou seja, este parâmetro é extremamente importante do ponto de vista da otimização operacional do sistema, havendo a necessidade de desenvolver relações entre este parâmetro e as propriedades do meio filtrante para uma determinada qualidade de água, garantindo a produção de um efluente de qualidade satisfatória para a não ocorrência de obstrução dos emissores do sistema de irrigação.

2.2.2 Retrolavagem

A mudança das características hidráulicas do equipamento (aumento da perda de pressão e diminuição da vazão), associado à possibilidade de diminuição da eficiência de remoção no processo de filtração, determina a necessidade da limpeza do meio filtrante, denominada “retrolavagem”. Ramirez et al. (2011) definem o processo de retrolavagem como sendo o procedimento de conduzir a água filtrada proveniente de um ou mais filtros do conjunto de filtragem, em sentido ascendente (contrário ao processo de filtração), com velocidade suficiente para proporcionar um determinado nível de expansão e revolvimento do leito filtrante e, conseqüentemente, a sua limpeza com a retirada das partículas retidas nessa camada, retornando às condições iniciais de perda de pressão e de eficiência de remoção de camada limpa (Figura 5).

Ramirez (2010) explica a retirada das partículas aderidas ao meio filtrante no processo de retrolavagem ocorre devido à diferença de densidade existente entre as partículas que compõem o meio filtrante (mais densas) e as partículas contaminantes (menos densas), que são conduzidas para fora do equipamento, enquanto a areia permanece no interior do filtro.

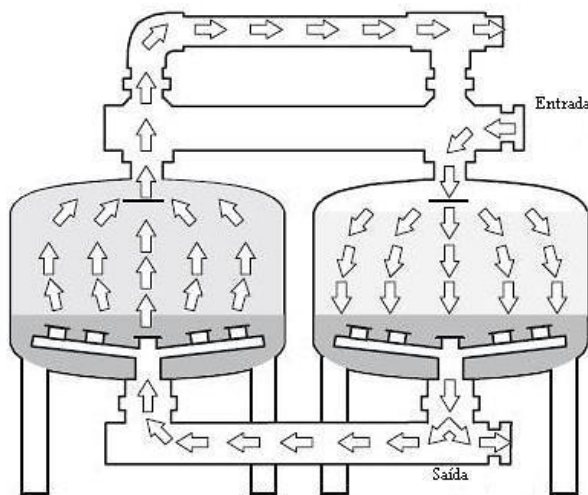


Figura 5. Representação do processo de retrolavagem em filtros de areia utilizados na irrigação. (Adaptado de Flow-Guard, 2014)

O primeiro passo na realização da retrolavagem refere-se na determinação do momento de início do processo. A maioria das recomendações existentes na literatura é baseada na modificação do comportamento da perda de pressão do equipamento. Nakayama e Bucks (1986), em concordância com Keller e Bliesner (1990), definem que para o início da limpeza da camada o valor máximo de perda de pressão na filtração deve ser de 70 kPa, e Dasberg e Bressler (1985)

recomendam 100 kPa. Como diferentes filtros de areia provenientes de diversos fabricantes apresentam comportamentos hidráulicos diferenciados em função dos distintos modelos de componentes internos (MESQUITA et al., 2012), a indicação de valor máximo de perda de pressão no processo de filtração indicado por Nakayama e Bucks (1986) e Keller e Bliesner (1990) possui restrições por não abordar os valores de acordo com as características específicas de cada equipamento. Nesse sentido, Silva et al. (2003) indicam que, independente do modelo de filtro de areia utilizado, deve-se iniciar a retrolavagem quando o aumento de perda de pressão no processo de filtração atingir de 10 a 20% da perda de pressão correspondente às condições de filtro limpo.

O princípio físico da retrolavagem baseia-se na expansão da camada filtrante, denominado processo de fluidização do leito filtrante. De acordo com Gupta e Sathiyamoorthy (1999), a fluidização do leito filtrante é o fenômeno de dar propriedades de um fluido a um leito de partículas sólidas, ocasionado pela passagem da água a uma velocidade tal que proporcione sua expansão até determinada altura, sem a retirada das partículas do meio. De acordo com esses autores, a fluidização de leitos porosos depende das propriedades físicas do fluido (densidade e viscosidade) e da partícula (densidade, tamanho, formato, distribuição, superfície rugosa e porosidade), e das condições operacionais e locais (sentido de fluxo, velocidade de operação, temperatura, pressão, e forças capilares e eletrostáticas).

Especificamente com relação à velocidade superficial, Gupta e Sathiyamoorthy (1999) salientam que seu incremento determina a ocorrência de diferentes regimes de fluidização, denominados sequencialmente com o incremento da seguinte forma: camada fixa – situação onde há escoamento da água pelos poros do meio filtrante, contudo não há levantamento das partículas de areia; fluidização mínima – existe a movimentação e suspensão inicial das partículas pela ocorrência da velocidade mínima de fluidização; fluidização particulada – velocidade acima da mínima de fluidização, resultando em uma fluidização suave com expansão progressiva do leito; fluidização borbulhante – aparecimento de borbulhas deslocando-se em sentido vertical na direção do fluxo; fluidização turbulenta – acontece o rompimento das bolhas formadas no regime anterior com o aparecimento de bolhas menores; transporte pneumático – ocorre o arraste das partículas do leito para fora do filtro. Ramirez (2010) utilizando filtros de areia pressurizados aplicados na irrigação conseguiu caracterizar os quatro primeiros regimes de fluidização.

Testezlaf (2008) salienta que a magnitude da velocidade superficial é função direta do diâmetro efetivo da areia, da altura da camada filtrante e do modelo construtivo do filtro, comprovado experimentalmente por Ramirez (2010), que relatou que para atingir determinado nível de expansão da camada filtrante, a vazão de retrolavagem aumenta proporcionalmente com o aumento da altura da camada do meio filtrante e com o aumento da granulometria da areia. Jusoh et al. (2009) comprovou experimentalmente a relação entre granulometria de areia e velocidade superficial do processo de retrolavagem.

Em termos de recomendação de velocidade superficial, ao contrário da relação estabelecida por Ramirez (2010), Keller e Bliesner (1990) recomendam velocidades superficiais no processo de retrolavagem variando de 25,2 a 36,0 m h⁻¹ para diâmetros efetivos médios da areia variando entre 1,0 a 1,9 mm, e de 50,4 a 61,2 m h⁻¹ para areias com diâmetros efetivos entre 0,82 a 1,0 mm. Ramirez (2010) observou que as vazões de retrolavagem para a condição de regime de fluidização mínima variaram de 28,8 a 36,0 m h⁻¹ para a faixa granulométrica de 0,5 a 1,0 mm; 43,2 a 57,6 m h⁻¹ para 0,8 a 1,2 mm; e 61,2 a 72 m h⁻¹ para 1,0 a 1,5 mm; ou seja, o aumento do tamanho dos grãos de areia proporcionou aumento da velocidade requerida para a ocorrência da fluidização mínima. Para Pizarro Cabelo (1996), a velocidade mínima para o processo de retrolavagem em filtros de areia utilizados em irrigação deve ser de 40 m h⁻¹, independente da granulometria de areia utilizada e do modelo construtivo do filtro.

Mesquita (2010) e Ramirez (2010) afirmam que vazões de retrolavagem insuficientes determinam níveis baixos de expansão e, conseqüentemente, limpezas inadequadas da camada filtrante, acarretando no processo de filtração subsequente diminuição da eficiência de remoção e do tempo de filtração. Por outro lado, de acordo com Testezlaf (2008), vazões excessivas determinam significativa perda de material filtrante, sendo mais evidente em camadas cujo meio filtrante apresente baixo valor de coeficiente de uniformidade com relação ao tamanho das partículas.

Existem várias recomendações sobre percentuais de expansão da camada filtrante para limpeza de filtros, sendo a maioria indicada para filtros lentos. Brouckaert (2004) recomenda expansão da camada em torno de 25%, sendo este valor compreendido no intervalo expresso por Weber (1979) que recomenda a expansão do leito na faixa de 20 a 50%.

Em termos de limpeza do meio filtrante, Richter & Scremin (2006) afirmam que a colisão e a abrasão entre as partículas durante a retrolavagem têm pouca ou nenhuma influencia na

limpeza do meio filtrante, sendo a ação das forças de cisalhamento, resultante do fluxo ascensional da água entre as partículas, a principal responsável pela remoção dos contaminantes aderidos.

A operação incorreta da filtração e da retrolavagem é resultado da falta de um maior entendimento e da aplicação dos parâmetros que afetam a sua operação, interferindo diretamente na eficiência de remoção do equipamento e na proteção contra o entupimento dos emissores dos sistemas de irrigação.

2.3 Material filtrante

Weber (1979) e Wakeman (2007) salientam que o meio filtrante deve ser selecionado de forma a reter quantidade significativa de contaminantes, além de facilitar a limpeza da camada. Mesquita (2010) salienta que a escolha do material filtrante é determinante no comportamento das variáveis do processo, especificamente com relação à remoção de contaminantes, a granulometria do meio filtrante reflete diretamente na sua diferenciação. Em concordância com Haman et al. (1994), Mesquita (2010) também afirma que leitos filtrantes compostos por partículas mais grossas resultam em uma filtração com baixa eficiência, devido ao aumento da ocorrência do transpasse das partículas, resultando em maior tempo de filtração (DI BERNARDO & DANTAS, 2005). Por outro lado, leitos filtrantes compostos por partículas muito finas, apesar de resultar em maiores valores de eficiência de remoção, como salientado por Haman et al. (1994), resultam em alta taxa de obstrução dos poros da camada (principalmente na parte superior da camada), causando aumento da frequência de retrolavagem e diminuição da eficácia do processo de retrolavagem devido à compactação das partículas retidas acima da superfície do leito, com o aumento da resistência à passagem do fluxo ascendente devido formação de um tipo de biofilme (RICHTER & AZEVEDO, 1993).

Testezlaf (2008) recomenda que a escolha do meio filtrante deve ser em função do menor diâmetro de saída do emissor, onde para gotejadores, que possuem menor diâmetro de saída, utiliza-se igualdade entre o diâmetro efetivo médio da areia e o diâmetro de saída do emissor, já para microaspersores assume-se o dobro do diâmetro de saída, sendo essa recomendação adotada por fabricantes de filtros para o setor de irrigação. Haman et al. (1994) salientam que os parâmetros mais importantes na análise de um material filtrante com o intuito de seleção refere-se à determinação do diâmetro efetivo médio das partículas e do coeficiente de uniformidade, no

entanto sua indicação deve basear-se no diâmetro de passagem do emissor, na taxa de filtração, na qualidade da água e em considerações econômicas do projeto.

O “diâmetro efetivo médio das partículas” (D_{10}) refere-se no procedimento de análise granulométrica como sendo o diâmetro da peneira granulométrica que resulta na passagem de 10% em peso de todo o material avaliado. Já o coeficiente de uniformidade (CU) relaciona o diâmetro da peneira que resulta na passagem de 60% em peso de todo o material avaliado (D_{60}) e o diâmetro efetivo médio das partículas (D_{10}). Os valores de coeficiente de uniformidade (CU) recomendados ficam compreendidos entre 1,4 a 1,6, como salientado por Pizarro Cabelo (1996) e em concordância com López (2007) que indica um CU máximo de 1,6. Já Haman et al. (1994) indicam valor máximo de 1,5. É apresentado na Figura 6 uma curva de distribuição granulométrica típica, com indicativos dos diâmetros D_{10} e D_{60} .

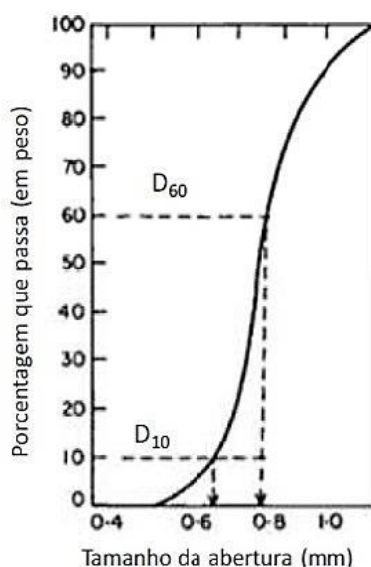


Figura 6. Exemplo de curva de distribuição granulométrica com indicativo dos diâmetros D_{10} e D_{60} .

Além da seleção granulométrica da areia, a determinação do volume a ser adicionado no interior do filtro que definirá a altura que esta ocupará dentro do equipamento é fundamental para definir a sua operação, pois a filtração é efetivada pelo efeito de profundidade, determinando a magnitude dos valores de perda de pressão do equipamento no processo de filtração. Em trabalho realizado por Mesquita et al. (2012), observou-se que o aumento da perda de pressão é diretamente proporcional ao incremento da altura do leito, considerando a mesma granulometria de areia e taxa de filtração. Com relação à retrolavagem, em trabalho de Ramirez (2010)

observou-se que a alteração da altura do leito não alterou a perda de pressão do equipamento, devido à suspensão da camada alterar o valor da porosidade do leito e anular o seu efeito. As recomendações existentes na literatura com relação à altura do leito filtrante em filtros de areia não relacionam esse parâmetro com o desenvolvimento da perda de pressão do equipamento e com o deslocamento de contaminantes na camada. Pizarro Cabelo (1996) indicam alturas de 0,4 a 0,6 m, e Vermerein e Jobling (1984) especificam variações entre 0,5 a 1 m. De maneira geral, quanto maior a altura da camada, maior será a eficiência de remoção, no entanto em se tratando retrolavagem, será necessário um volume vazio para expansão do leito, que, no caso da utilização de uma expansão de 25%, como especificado por Brouckaert (2004), a altura máxima da camada filtrante deverá ser de 75% do corpo do filtro, ou seja, as recomendações devem atender as dimensões de projeto do equipamento.

Procurando determinar uma profundidade denominada “filtração efetiva”, Jusoh et al. (2009) utilizaram uma coluna de filtro experimental para avaliar o efeito de diferentes espessuras de camada filtrante na concentração do efluente do filtro. Esses autores definiram como profundidade efetiva do meio filtrante, a espessura do leito que manteve constante a concentração relativa (relação entre a concentração de entrada do afluente e a concentração de saída do efluente), ou seja, o aumento da altura do leito filtrante a partir desse ponto não proporcionou aumento da eficiência de remoção para o modelo experimental proposto. É apresentado na Figura 7 o gráfico resultante dessa pesquisa, que apresenta o comportamento da concentração relativa em função da profundidade do leito filtrante.

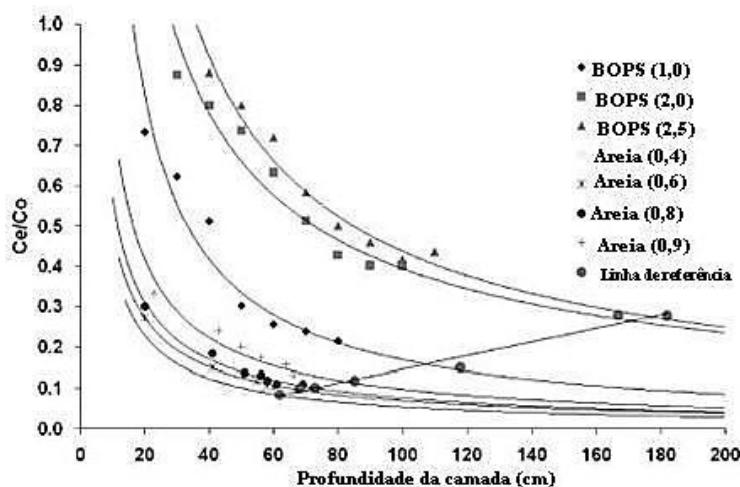


Figura 7. Concentração relativa em função da profundidade do meio filtrante. (Adaptado de JUSOH et al. (2009))

É relatado nessa pesquisa (JUSOH et al., 2009) que o tipo de material filtrante, bem como o tamanho efetivo das partículas, resulta em profundidades denominadas efetivas, diferenciadas do leito filtrante. Quando se utilizou BOPS (*burned oil palm shell*) como material filtrante, atingiu-se profundidades maiores quando comparado à utilização da areia. Com relação ao tamanho efetivo das partículas que compunham o leito, ficou demonstrado que quanto menor seu valor, menores as profundidades efetivas alcançadas.

Para o processo de filtração, as propriedades físicas do material filtrante consideradas mais importantes são o tamanho, a sua distribuição granulométrica (coeficiente de uniformidade) e o formato dos grãos (PHILLIPS, 1995), sendo que, quanto maior o número de arestas afiadas e angulares as partículas apresentarem, maior será a tortuosidade do deslocamento da água, e melhor a retenção de contaminantes e as interações entre partícula e fluido (WAKEMAN, 2007). Clements e Haarhoff (2005) também comentam que a porosidade da camada diminui com o uso, devido à compactação, interferindo diretamente na perda de pressão e na eficiência de remoção do processo de filtração. Já no processo de retrolavagem, a densidade do material utilizado deve ser considerada, pois materiais com menor granulometria e mais leves, exigem menor vazão para fluidização em comparação a materiais mais pesados e com diâmetro maior (TURAN et al., 2003; BROUCKAERT, 2004).

A escolha correta do material filtrante, em termos de granulometria e altura do leito filtrante, associado aos parâmetros de utilização do equipamento (taxa de filtração e velocidade superficial), determina diretamente a qualidade da operação dos filtros de areia.

2.4 Qualidade física da água

A qualidade da água é determinada por indicadores definidos a partir dos seus aspectos físicos, químicos e biológicos. Entre os parâmetros físicos, os sólidos presentes na água correspondem a toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado, no qual tais operações definem as diversas frações de sólidos presentes na água (sólidos totais, em suspensão, dissolvidos, fixos e voláteis). Existem basicamente dois métodos para determinação de sólidos. O primeiro baseia-se na determinação gravimétrica (utilizando-se balança analítica ou de precisão), e outro se baseia no volume, por exemplo, para a determinação de sólidos sedimentáveis (cone Imhoff) (PIVELI e KATO, 2005).

É apresentada na Figura 8 uma representação das frações dos sólidos que podem estar presentes em águas, definidas como:

- **Sólidos totais (ST):** também denominado resíduo total, refere-se ao resíduo que resta na cápsula após a evaporação em banho-maria de uma porção de amostra e sua posterior secagem em estufa a 103 - 105° C.
- **Sólidos em suspensão ou sólidos suspensos (SS):** refere-se à porção dos sólidos totais que fica retida em um filtro que propicia a retenção de partículas de diâmetro maior ou igual a 1,2 µm.
- **Sólidos voláteis (STV):** é a porção dos sólidos (sólidos totais, suspensos ou dissolvidos) que se perde após a ignição ou calcinação da amostra a 550-600° C, durante uma hora para sólidos totais ou dissolvidos voláteis ou 15 minutos para sólidos em suspensão voláteis, em forno mufla.
- **Sólidos fixos (SF):** é a porção dos sólidos (totais, suspensos ou dissolvidos) que resta após a ignição ou calcinação a 550-600° C após uma hora (para sólidos totais ou dissolvidos fixos) ou 15 minutos (para sólidos em suspensão fixos) em forno-mufla.
- **Sólidos sedimentáveis (SSed):** é a porção dos sólidos em suspensão que se sedimenta sob a ação da gravidade durante um período de uma hora, a partir de um litro de amostra mantida em repouso em um cone Imhoff.

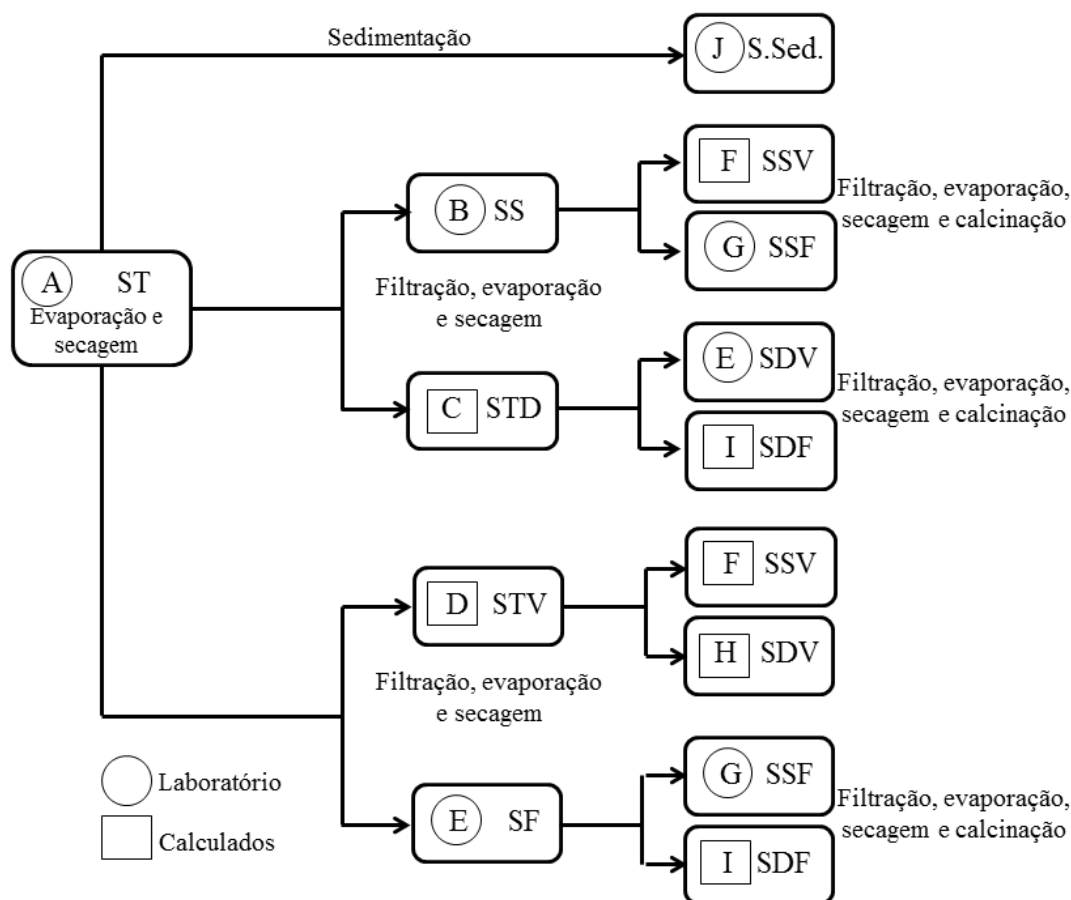


Figura 8. Esquema com as frações características das frações que compõem os sólidos totais (ST) contidos nas águas (SSed – sólidos sedimentáveis, SS - sólidos suspensos, STD – sólidos dissolvidos, STV – sólidos voláteis e SF – sólidos fixos) (FONTE: PIVELI e KATO, 2005) .

De todos os sólidos que podem compor o afluyente de irrigação, os filtros de areia são efetivos na remoção de sólidos em suspensão (TESTEZLAF, 2006), sendo o principal parâmetro utilizado na determinação da eficiência de remoção do processo de filtração do equipamento. Entretanto, a análise laboratorial na determinação dos sólidos em suspensão pode proporcionar estimativas não precisas da eficiência de remoção, pois o filtro utilizado nas análises não retém toda a faixa de diâmetro de partículas (remoção maior ou igual a $1,2 \mu\text{m}$), referente à faixa da argila. Nesse sentido, a Tabela 1 apresenta uma simulação com três situações de filtragem, onde primeiramente ocorre a remoção de argila pela camada filtrante. A segunda situação refere-se à ocorrência do desprendimento e passagem da argila para o sistema de irrigação, e a terceira e última simula uma situação onde não há remoção de partículas de argila.

Pelos resultados da Tabela 1, pode-se afirmar que, apesar da norma Asabe (1994) estabelecer que a eficiência de remoção em filtros de areia pode ser determinada utilizando como parâmetro os sólidos suspensos presentes na água, existe uma limitação inerente ao procedimento laboratorial, que não proporcionará precisão na determinação da eficiência.

Tabela 1. Simulação de diferenças nos valores de eficiência de remoção devido à limitação de metodologia de determinação de SST.

Situação	SST (mg L ⁻¹)				Eficiência de remoção		Conclusão
	Afluente		Efluente				
	Real	Metodologia	Real	Metodologia	Real	Metodologia	
Remoção de argila pelo filtro	200,00	190,00	100,00	98,00	50,00	48,42	Subestimado
Desprendimento de argila pelo filtro	200,00	190,00	100,00	88,00	50,00	53,68	Sobrestimado
Sem remoção de argila pelo filtro	200,00	190,00	100,00	90,00	50,00	52,63	Sobrestimado

2.5 Avaliação de filtros de areia

Nakayama & Bucks (1986) salientam que a eficiência de remoção, a percentagem de entupimento dos emissores e a perda de pressão causada pelo equipamento são os principais parâmetros que devem ser utilizados na avaliação de filtros de areia empregados em sistemas de irrigação.

2.5.1 Eficiência de remoção

Haman et al. (1994) definem a eficiência de remoção no processo de filtração como sendo a habilidade ou capacidade do meio filtrante em remover partículas de determinado tamanho. Pela norma Asabe (1994), matematicamente a eficiência de remoção é baseada nos sólidos suspensos totais contidos no afluente e no efluente, podendo ser utilizado outros parâmetros tal como a turbidez.

$$Er = \left[1 - \frac{SST_2}{SST_1} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

Onde: Er – eficiência de remoção (%); SST₁ – sólidos suspensos totais no afluente do filtro (M L⁻³); e SST₂ – sólidos suspensos totais no efluente do filtro (M L⁻³).

Outra metodologia desenvolvida por Puig-Bargués et al. (2005), também salientada na norma Asabe (1994), refere-se na determinação da eficiência de remoção para diferentes

tamanhos de partículas contidas na água. Ficou demonstrado que quanto maior a partícula contida na água, maior a eficiência de remoção (eficiência de 68,9% para partículas suspensas maiores e 2,7% para partículas menores), sendo observada na pesquisa a ocorrência do desprendimento do leito filtrante de determinados tamanhos de partículas. A vantagem dessa análise em comparação à proposta na norma Asabe (1994) está na possibilidade de determinar a faixa de remoção do equipamento, pois a análise utilizando sólidos suspensos, por ser uma análise que compõem valores de todas as faixas de diâmetro de partículas, impossibilita a determinação da faixa de efetiva remoção dos filtros de areia como é apresentado na Figura 1.

Haman et al. (1994) e Kau & Lawler (1995) comentaram que a eficiência de remoção é afetada pela granulometria do material filtrante, pela altura da camada, e pela taxa de filtração utilizada, onde os maiores valores de eficiência de remoção do equipamento são alcançados com a diminuição da granulometria e da taxa de filtração, e com o aumento da altura do leito filtrante. Verma & Mancl (2001), ao avaliarem o desempenho de filtros de areia, observaram que o tamanho efetivo da areia e a altura da camada foram os fatores que mais contribuíram para a melhoria da qualidade de efluente produzido. Adicionalmente, Kau & Lawler (1995) salientam que, apesar da maior granulometria do leito resultar em menores eficiências de remoção, esta promove uma remoção de partículas mais uniforme entre as camadas do leito filtrante em comparação às granulometrias mais finas. Por outro lado, o uso de granulometrias menores resulta em retrolavagens mais frequentes, devido à maior capacidade de retenção de contaminantes. Vermerein & Jobling (1984) indicaram que além da espessura da camada e da vazão, a pressão que a água exerce sobre a superfície filtrante afeta a eficiência de remoção do equipamento.

Em trabalho de Magalhães et al. (2006) conduzido com filtros lentos denominados orgânicos, observou-se que a eficiência de remoção aumentou com o tempo de filtração devido à obstrução gradativa dos poros da camada. No entanto, esse processo ocasionou uma diminuição significativa da taxa de filtração e aumento da perda de pressão no equipamento. Apesar de se tratar de um filtro com características operacionais distintas dos filtros de areia utilizados na irrigação, o processo possui o mesmo princípio físico e, em trabalho de Lima et al. (2010), realizado em filtros de areia utilizados na irrigação, observou-se também diminuição da taxa de filtração à medida que os poros do meio filtrante eram obstruídos.

Outra variável que interfere na eficiência de remoção da filtração em filtros de areia é a qualidade do afluente utilizado que, segundo Puig-Bargués et al. (2005), é determinante para se atingir eficiências adequadas à utilização na irrigação. Segundo os autores, o aumento da concentração de sólidos suspensos devido à mudança do tipo de afluente determinou aumento da eficiência de remoção em filtros de areia. De acordo com Haman et al. (1994), uma possível forma de variação do afluente pode ser causada por alterações das condições climáticas no decorrer do ano, determinando que a qualidade da água, principalmente a de origem superficial, varie com o clima. Em trabalho de Ribeiro et al. (2005), avaliando a variabilidade temporal da qualidade da água no desempenho de filtros de disco e manta sintética não tecida utilizados na irrigação por gotejamento, foi observado que os parâmetros biológicos da água foram os que apresentaram maior coeficiente de variação, especificamente relacionados à concentração dos níveis de bactéria.

Staden & Haarhoff (2004), avaliando o processo de limpeza em filtros de areia, observaram que a fração biológica nos poros do meio filtrante, depois da retrolavagem, é relativamente alta (50% do depósito específico total), evidenciando a ineficiência do processo de retrolavagem para esta condição de estudo. Os autores comentam que as altas concentrações de nutrientes na superfície da água associadas a elevadas temperaturas, estimulam à formação de biofilme no meio dos grãos, afetando o comportamento mecânico da expansão da camada no processo de retrolavagem. Ramirez (2010) em avaliação de filtros de areia em propriedades próximas à região de Campinas – SP identificou que o uso de baixas vazões de retrolavagem, associadas à utilização de alturas de camadas que não possibilitaram a ocorrência da fluidização do leito, determinaram ineficiência na limpeza do leito filtrante dos filtros de areia avaliados.

A eficiência de remoção, tanto no processo de filtração como na retrolavagem, é o parâmetro de avaliação recomendado para filtros de areia, onde na filtração varia em função da granulometria de areia, da taxa de filtração, da altura da camada filtrante, bem como da qualidade da água utilizada. Na retrolavagem, a expansão do leito filtrante e a velocidade superficial da água, são os principais parâmetros que influenciam na eficiência de limpeza do equipamento. Em termos de recomendação metodológica para determinação da eficiência de remoção, o entendimento da eficiência de filtração para diferentes tamanhos de partículas permite determinar além da magnitude da eficiência, a faixa de efetiva remoção.

2.5.2 Perda de pressão em filtros de areia

- **Processo de filtração**

De acordo com Jusoh et al. (2009), quando a água passa através dos poros de um meio granular, perdas de energia ocorrem devido à fricção (ou resistência) do fluido e da superfície do meio. Além disso, perdas podem ocorrer em função da contração e da expansão do fluido nos poros, devido à sua desuniformidade. O processo de determinação da perda de pressão em filtros de areia torna-se complexo devido a variabilidade da qualidade da água, que pode alterar significativamente o seu comportamento, e outras variáveis envolvidas no processo. Haman et al. (1994) preconizam que o comportamento da perda de carga com o tempo em filtros de areia deveria ser utilizado para a seleção desse equipamento para determinada aplicação (qualidade de água, granulometria de areia e taxa de filtração). É apresentada na Figura 9 a variação da perda de pressão no processo de filtração em filtros de areia em função do tempo, para diferentes granulometrias de areia.

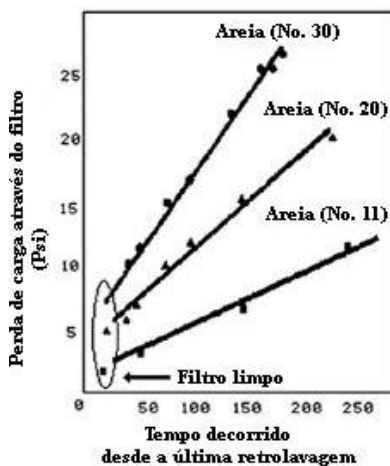


Figura 9. Variação da perda de pressão em filtros de areia em função do tempo (min) para três granulometrias diferentes. (Adaptado de HAMAN et al., 1994).

Pela figura é possível verificar que a perda de carga aumenta com o tempo à medida que as impurezas se acumulam na camada e, quanto menor a granulometria da areia maior será o coeficiente angular da reta, evidenciando o comportamento diferenciado para as granulometrias avaliadas. Em trabalho em escala de laboratório desenvolvido por Cunningham et al. (1991), avaliou-se o comportamento hidrodinâmico em meios porosos com acumulação de biofilme, e observaram que o aumento do biofilme resultou na diminuição da porosidade (50 a 96%) e da

permeabilidade (92 a 98%), aumentando substancialmente o fator de atrito do escoamento nesse meio.

O conhecimento do comportamento hidráulico de filtros de areia na situação de filtro limpo fornece o valor de perda de pressão inicial e disponibiliza o limite das perdas que podem ser admitidas no processo de filtragem com o acúmulo de impurezas, contribuindo para definir o momento de realização do processo de retrolavagem pelo critério do diferencial de perda de carga (CHANG et al., 1999; MESQUITA, 2010).

Em trabalho desenvolvido por Mesquita et al. (2012), que confirmou os resultados obtidos por Burt (2010), observou-se que na condição de utilização de água limpa (sem sólidos suspensos) no processo de filtração em filtros de areia, o tipo de componente interno do equipamento afeta o valor de perda de pressão e interage de forma diferenciada com relação à granulometria e a altura da camada de areia, modificando as características hidráulicas de funcionamento. Nesses estudos, a perda de pressão para os filtros de areia ensaiados foi diretamente proporcional ao aumento da taxa de filtração e da altura do leito filtrante, e inversamente proporcional ao incremento da granulometria da areia.

Deus et al. (2013) avaliaram a influência da placa difusora no comportamento hidráulico de um modelo comercial de filtro de areia, e observaram que o modelo proposto de placa difusora acarretou maior perda de pressão quando ensaiado sem meio filtrante e, no entanto, apresentou perda de pressão praticamente idêntica à placa difusora original quando operado na presença de meio filtrante, devido a menor movimentação causada na superfície da camada de areia (Figura 10). Esse resultado pode ser explicado por afirmações de Burt (1994) e Mesquita (2010), que preconizam que o condicionamento do movimento do afluente é resultado do direcionamento da água às paredes do filtro, ação que causa movimentação e deslocamento das partículas de areia, havendo a criação de caminhos preferenciais para a filtragem, alterando o comportamento hidráulico do equipamento.



Figura 10. Movimentação da camada de areia observada para a placa difusora original (esquerda) (MESQUITA, 2010) e para as placas difusoras propostas avaliadas (direita) (DEUS et al., 2011)

Como as condições das águas superficiais utilizadas na irrigação no Brasil se caracterizam pela presença significativa de sólidos em suspensão, de origem mineral ou orgânica, a variação da perda de pressão não é constante para uma determinada taxa de filtração, altura e granulometria de areia, havendo um incremento com o tempo, como salientado anteriormente nos resultados de Haman et al. (1994). Di Bernardo & Dantas (2005) salientam que o comportamento da perda de carga ao longo do tempo para um filtro em operação pode ser descrito pela seguinte equação:

$$H_t = H_o + (K_{pc} \cdot V_{\infty} \cdot C_o \cdot t) \quad (2)$$

Onde: H_t – perda de carga em um tempo qualquer (L); H_o – perda de carga inicial, ou seja, no tempo zero (L); K_{pc} – coeficiente ($L^3 M^{-1}$); V_{∞} - velocidade de aproximação ($L T^{-1}$); C_o – concentração de partículas no afluente ($M L^{-3}$); e t – tempo (T).

- **Processo de retrolavagem**

Com relação à retrolavagem, Richter & Scremin (2006) em concordância com Gupta & Sathiyamoorthy (1999), assumiram teoricamente que a perda de pressão no meio filtrante deve ser igual ao peso das partículas na água para o caso do leito filtrante fluidizado, ou seja, a variação da perda de pressão durante a limpeza do filtro atende um comportamento característico (Figura 11), onde, a partir de uma determinada velocidade superficial ou vazão de retrolavagem, a perda de pressão é constante.

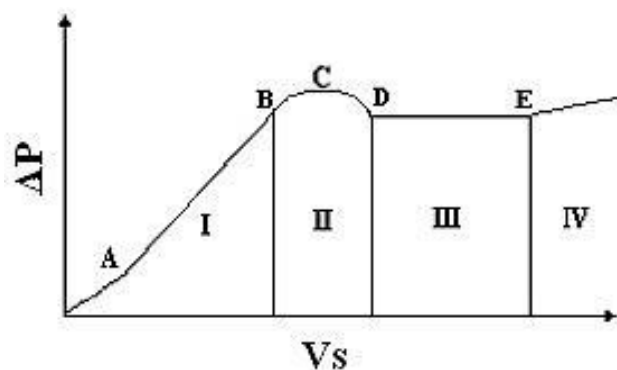


Figura 11. Perda de pressão na retrolavagem em função da velocidade. (Fonte: GUPTA & SATHIYAMOORTHY, 1999)

Tomando a Figura 11 como referência, Gupta & Sathiyamoorthy (1999) salientam que as partículas no intervalo A-B (Região I) estão estáticas, onde o aumento da perda de pressão em função da velocidade de escoamento é linear. Na região II existe a igualdade entre a perda de pressão e o peso das partículas, onde a velocidade no ponto C é denominada “velocidade mínima de fluidização”, definida como a velocidade onde a perda de pressão e o empuxo estão em equilíbrio com o peso aparente das partículas. A região III é caracterizada por apresentar aumento da agitação com a perda de pressão mantendo-se constante, e a região IV apresenta o arraste das partículas do sistema.

Estudando o comportamento hidráulico de filtros de areia não contaminados (limpos) durante o processo de retrolavagem, Ramirez (2010) observou que a perda de pressão gerada pelos componentes internos, é maior que a perda gerada pelo meio filtrante, fato também observado por Burt (2010). Assim, para um determinado modelo de filtro e vazão de retrolavagem, a perda de pressão apresentou-se constante, sendo influenciada apenas pelas estruturas internas do equipamento (placa difusora e crepinas). Outra observação feita por Ramirez (2010), referente às condições do meio filtrante, foi que a altura da camada, bem como a granulometria da areia, não modificaram o comportamento hidráulico dos filtros de areia avaliados.

2.5.3 Grau de contaminação ou sujidade da camada filtrante

De acordo com Testezlaf et al. (2014), a avaliação de filtros de areia também pode ser realizada pela determinação da quantidade de sujeira ou partículas retida no processo de filtração, bem como, do remanescente de partículas após o processo de retrolavagem. Esse procedimento

de determinação é denominado grau de sujidade da camada filtrante. A análise da quantidade de partículas aderidas ao meio filtrante, antes e após o processo de retrolavagem, permite determinar a eficiência de limpeza. Adicionalmente, sabendo-se a quantidade total de sólidos que ficaram retidas no meio filtrante, e que entraram no filtro, pela relação, pode-se determinar a eficiência de remoção global da filtração.

A norma Asabe (1994) preconiza a análise dos resíduos filtrados e acumulados depois da retrolavagem para cada vazão utilizada, com o objetivo de determinar o percentual de resíduo remanescente no meio filtrante. Essas análises devem ser determinadas pela extração de quatro amostras (duas perto do centro e duas nas laterais do tanque), sendo pelo menos em 5 cm de diâmetro na profundidade total do meio filtrante. De acordo com a norma, essas amostras devem ser avaliadas em função do teor de matéria orgânica, silte, argila, areia, entre outros. O procedimento recomendado requer secagem, peneiramento, e medição do volume e tamanho do material que não estava no meio filtrante antes do início da filtração, sendo comparado à análise de tamanho de partícula do meio filtrante anteriormente determinada para caracterização do material.

Outra norma de avaliação da quantidade de resíduo remanescente no meio filtrante foi descrita por Standen & Haarhoff (2004), que tinham como primeiro objetivo comparar métodos de extração das impurezas dos depósitos dos grãos do meio poroso, para avaliar a facilidade e reprodutividade dos métodos de determinação da sujidade. O segundo objetivo dessa pesquisa era caracterizar os tipos de depósitos que sofreram separação pelos métodos propostos, quantificando o material retido no meio. No primeiro objetivo, seis métodos foram avaliados: “redemoinho de mão”; “agitador violento”; “inversão da proveta”; “agitador orbital”; “testador de jarra”; e “agitação magnética”, sendo que os métodos de agitação magnética e inversão da proveta atingiram os critérios de facilidade e reprodutividade. De maneira geral, cada um desses métodos foi escolhido com base na independência do operador e da velocidade de agitação. De acordo com o autor, o método da agitação magnética foi mais efetivo quando comparado à inversão da proveta, mas, como ele não está disponível em todos os laboratórios, é possível utilizar com confiabilidade o método da inversão do cilindro. Para o segundo objetivo, avaliou-se quatro métodos baseados na combinação da aplicação ou não de ácido solúvel e na volatilização ou não do material (550° C).

A determinação do grau de sujidade em quantidade e em função da profundidade do leito filtrante, poderá apresentar o efeito da granulometria da areia e da taxa de filtração na eficiência de remoção de sólidos suspensos na água de irrigação, indicando o deslocamento dos contaminantes na camada. Adicionalmente, a determinação da quantidade de impurezas aderidas ao meio filtrante proporcionará a determinação da eficiência de limpeza do equipamento.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

O experimento foi composto por atividades de campo e de laboratório. As atividades de campo foram desenvolvidas no Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), localizada no município de Campinas, SP, 22°48'57" de latitude sul, 47°03'33" de longitude oeste, altitude média de 640 metros (Figura 12). O clima local é classificado como de transição entre Cwa e Cfa, considerado tropical de altitude com inverno seco e verão úmido (classificação Koppen). As atividades laboratoriais foram realizadas nos Laboratórios de Hidráulica e Irrigação e de Saneamento da FEAGRI, e no Laboratório de Microestrutura de Alimentos do Departamento de Planejamento Alimentar e Nutrição da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEM), também pertencentes à Universidade Estadual de Campinas.

A água utilizada no experimento era proveniente de um reservatório (açude) existente próximo ao local do experimento, que recebe água de uma microbacia com solo classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (EMBRAPA, 1999), utilizado para atender às exigências de irrigação das atividades do campo experimental.



Figura 12. Campo experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP), com detalhe da localização do reservatório e do local de instalação dos filtros de areia.

3.2 Material

A pesquisa foi dividida em duas etapas distintas, porém complementares e subsequentes. A primeira etapa referiu-se aos ensaios do processo de filtração, onde os filtros de areia funcionaram por um determinado tempo de operação e, posteriormente, iniciava-se a segunda etapa dos ensaios referente à execução do processo de retrolavagem dos filtros de areia.

3.2.1 Módulo experimental e equipamentos

O módulo experimental foi montado com os três filtros de areia, instalados em uma configuração em paralelo, sendo alimentado por única adutora, com a finalidade de garantir a entrada da mesma qualidade de afluente em todos os equipamentos (Figura 13).

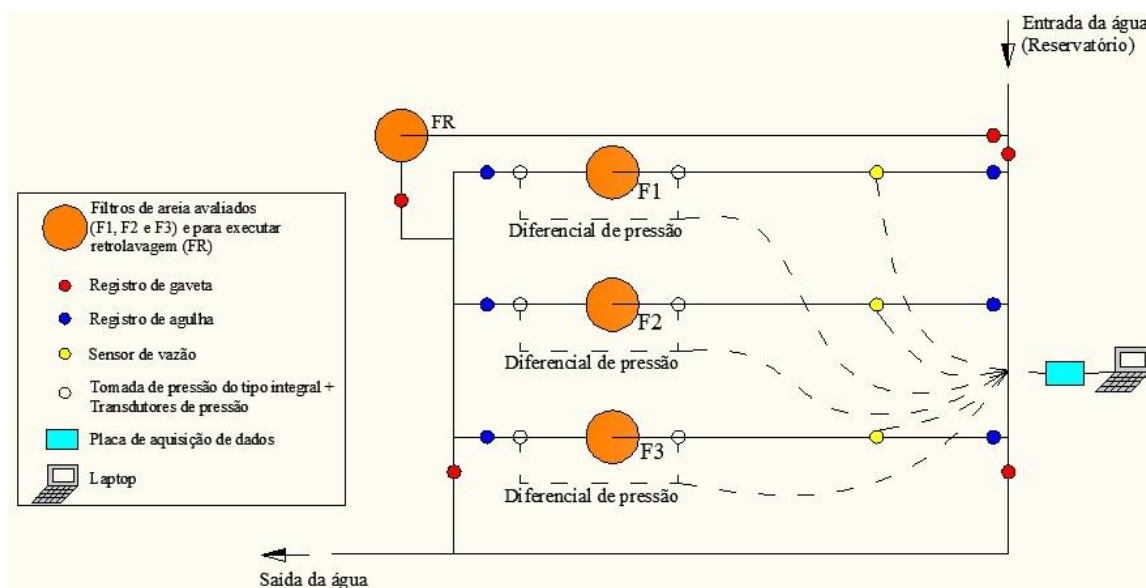


Figura 13. Layout de instalação dos filtros de areia e equipamentos em campo.

O módulo experimental era constituído das seguintes partes:

- **Filtros de areia** - o filtro avaliado era da marca Hidrosolo, modelo FA07, com as seguintes características e dimensões estruturais (Figura 14): diâmetro e altura do corpo de 0,4 e 0,6 m respectivamente; sistema de drenos do tipo “crepinas cilíndricas”; placa difusora do tipo “plana com bordas”; pressão máxima de serviço de 686,5 kPa (aproximadamente 70 m.c.a); e taxa de filtração recomendada pelo fabricante na faixa de 23,9 a 167,1 m³ m⁻² h⁻¹.

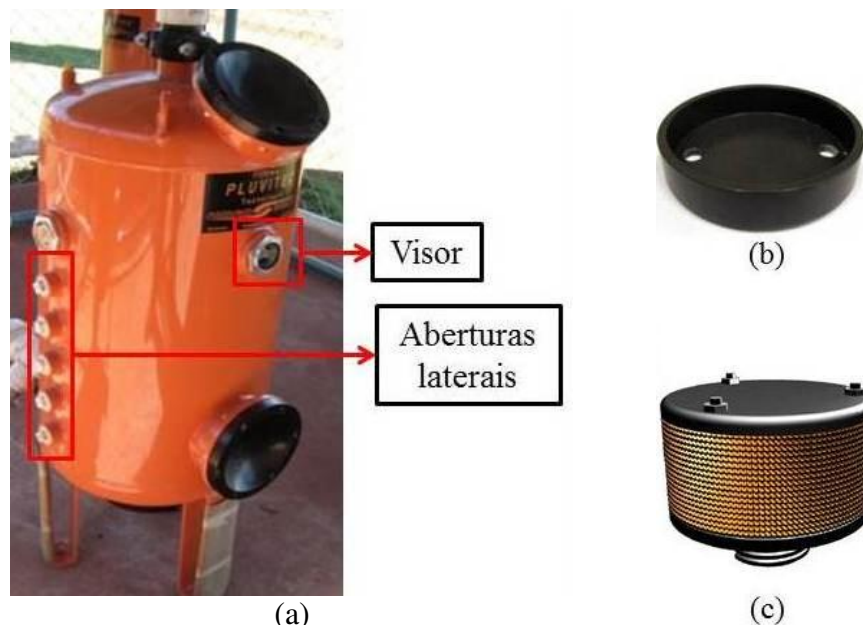


Figura 14. Modelo de filtro de areia avaliado com detalhe da modificação estrutural (visores e aberturas laterais) (a), que apresenta placa difusora do tipo “plana com bordas” (b) e sistema de drenagem do tipo “crepinas cilíndricas” (c) (Fonte: RAMIREZ, 2010).

O módulo experimental era composto por quatro filtros de areia deste modelo, sendo três (F1, F2 e F3) destinados aos ensaios experimentais (filtração e retrolavagem), e um destinado a executar a filtração da água para realização da retrolavagem ou limpeza dos três filtros ensaiados (FR).

Para execução dos ensaios, os filtros de areia foram modificados para possibilitar a realização das análises requeridas no experimento (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Primeiramente, foram abertos furos rosqueáveis em cinco alturas do corpo do filtro com fechamento por parafusos (sendo que apenas quatro furos foram utilizados nos ensaios), para permitir a amostragem de areia no interior dos filtros, antes e após os processos de filtração e retrolavagem. Adicionalmente, foram instalados nos três filtros avaliados quatro visores de nível resistente à alta pressão, na altura relativa a 25% de expansão do leito filtrante (43,75 cm em relação ao nível das crepinas), para possibilitar o monitoramento e controle do processo de retrolavagem.

- **Registros de agulha e de gaveta** – foram instalados na entrada e saída de cada filtro, registros de agulha (totalizando seis registros desse tipo), para proporcionar o controle e a variação precisa dos valores de vazão de filtração e retrolavagem durante os ensaios.

Adicionalmente, registros de gaveta foram instalados na entrada e saída do módulo experimental para a operacionalização dos ensaios de filtração e retrolavagem.

- **Sensor de vazão** – foram utilizados três sensores de vazão do tipo eletromagnético, marca Georg Fischer Signet e modelo 2551 (Figura 15), um para cada filtro avaliado, instalados de acordo com norma Asabe (1994) de posicionamento de sensores de vazão.



Figura 15. Sensor de vazão instalado na tubulação do módulo experimental.

- **Tomada de pressão do tipo integral** – foram construídas tomadas de pressão do tipo integral (Figura 16), que foram instaladas antes e após cada filtro de areia avaliado (totalizando seis dispositivos), atendendo a norma Asabe (1994) de posicionamento nas tubulações.

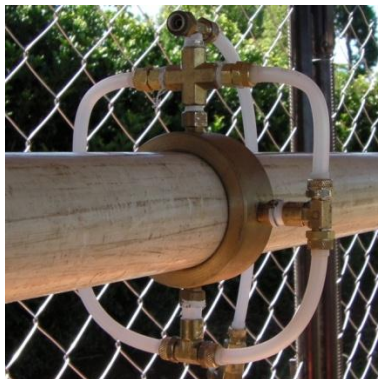


Figura 16. Detalhes da tomada de pressão tipo integral instalada no módulo experimental.

- **Transdutores de pressão** – para o monitoramento da variação da pressão durante a realização dos ensaios foram utilizados seis transdutores de pressão da marca Motorola, modelo MPX 5500DP (Figura 17), sendo instalados dois sensores por filtro (um antes e outro após o filtro). Esses sensores recebiam as pressões atuantes nas tubulações por meio mangueiras conectadas às tomadas de pressão tipo integral. A Tabela 2 apresenta as especificações técnicas do sensor de pressão utilizado no experimento.

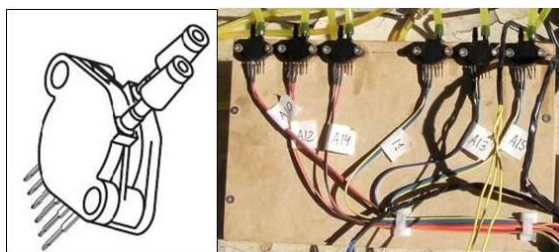


Figura 17. Transdutores de pressão Motorola, modelo MPX 5500DP, utilizados no experimento.

Tabela 2. Especificações técnicas do transdutor de pressão da Marca Motorola, modelo MPX 5500DP (Fonte: MOTOROLA, 2014).

Característica	Valor
Faixa de pressão (kPa)	0 – 500
Tensão de alimentação (V)	4,75 – 5,25
Corrente de alimentação (mA)	Máximo de 10
Tensão de saída para mínima pressão nominal (V)	0,088 – 0,313
Tensão de saída para máxima pressão nominal (V)	4,587 – 4,813
Variação de tensão de saída entre a máxima e a mínima pressão nominal (V)	4,50
Acurácia	Máxima de $\pm 2,5\%$
Sensibilidade (mV/kPa)	9,0
Tempo de resposta (ms)	1
Função de transferência	$P \text{ (kPa)} = 111,11 \cdot V_{out} \text{ (V)} - 22,22$

- **Sistema de aquisição de dados** – os valores das variáveis de diferencial de pressão e vazão geradas no experimento, eram adquiridos por um sistema de aquisição de dados constituído de uma placa de aquisição de dados da National Instruments (módulo USB-6341 da série X), conectada a um laptop (marca DELL e modelo Inspiron 5110) e gerenciada por uma interface computacional desenvolvida no software Labview (Figura 18).

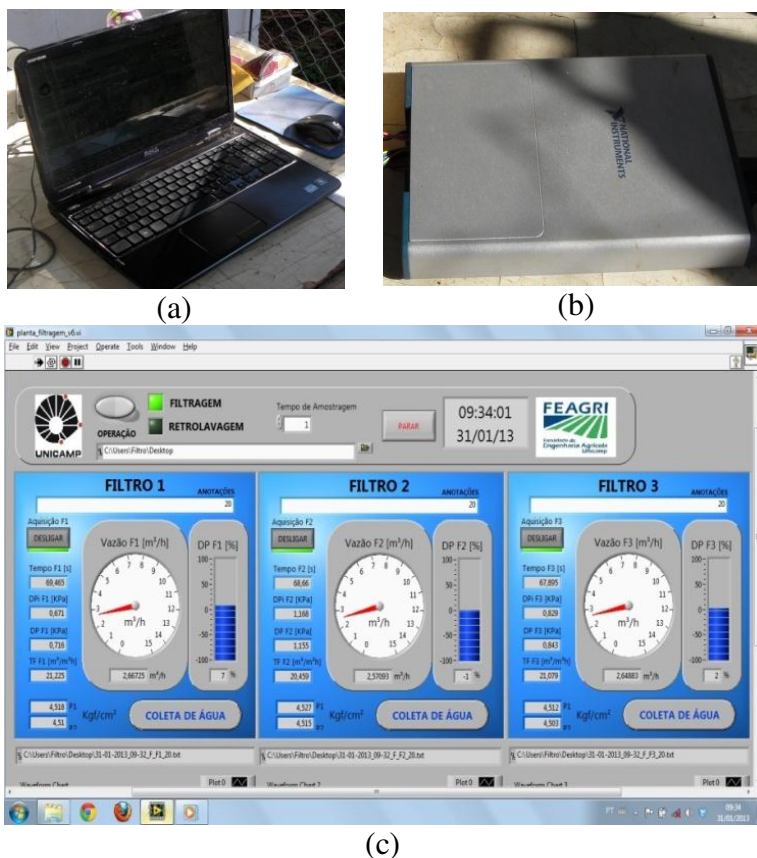


Figura 18. Detalhes do sistema de aquisição de dados formado pelo Laptop (a), placa de aquisição de dados (b) e interface construída a partir do software Labview (c) utilizados no experimento.

Na Figura 19 é apresentada uma visão geral do módulo experimental com os equipamentos alocados e montados.



Figura 19. Módulo experimental de ensaios de filtros de areia com a montagem finalizada.

3.2.2 Material filtrante

O material filtrante utilizado nos ensaios foi a areia de sílica, fornecido pela indústria TeoTokus Indústria e Comércio Ltda., em três granulometrias diferentes, denominadas por fina (G1), média (G2) e grossa (G3), cuja distribuição granulométrica foi determinada pela aplicação da norma ABNT (1990), utilizando peneiras de tamanho 0,42; 0,50; 0,60; 0,71; 0,85; 1,00; 1,19; 1,40; 1,70; 2,00 e 2,36 mm.

Para a determinação da granulometria de cada areia, foi inicialmente retirada uma amostra de aproximadamente 100 g de uma amostra de 1000 g de areia seca em estufa a 105° C durante 3 horas, que foi passada em peneiras montadas sequencialmente em ordem decrescente em um agitador mecânico. Após 60 agitações, a massa de areia retida em cada peneira foi pesada para determinação do percentual de retenção pontual e acumulado. Esse procedimento foi repetido três vezes para cada amostra de areia avaliada.

Com os valores médios de massa retida em cada peneira foram determinadas as curvas granulométricas das três amostras de areia utilizadas no experimento, das quais foram retirados os valores de diâmetro efetivo - D_{10} (diâmetro de abertura da peneira que permite a passagem de 10% do material), de diâmetro D_{60} (diâmetro de abertura da peneira que permite a passagem de 60% do material) e estimado o valor do coeficiente de uniformidade da areia – CU, de acordo com a seguinte equação.

$$CU = \frac{D_{60}}{D_{10}} .100 \quad (3)$$

Onde: CU - coeficiente de uniformidade da areia (%), D_{60} - diâmetro de abertura da peneira que permite a passagem de 60% do material (mm), e D_{10} - diâmetro de abertura da peneira que permite a passagem de 10% do material (mm).

3.2.3 Altura da camada filtrante nos ensaios

A definição da altura da camada filtrante baseou-se na recomendação fornecida pelo fabricante, sendo definido o valor de 0,35 m, com uma expansão calculada da camada filtrante na ordem de 0,0875 m (25% da altura da camada). Dessa forma, a altura da camada filtrante ficou compreendida entre 0,35 m no processo de filtração e 0,4375 m no processo de retrolavagem.

O valor utilizado não ficou compreendido nos intervalos de valores recomendados por alguns autores para o processo de filtração, como: 0,5 a 1,0 m indicado por Vermerein & Jobling

(1984) e 0,4 a 0,6 m de acordo com Pizarro Cabelo (1996). Como o modelo de filtro de areia avaliado possui altura de corpo de 0,60 m, o fabricante limitou a altura da camada em 0,35 m, respeitando a possibilidade de atingir diversas alturas na expansão da camada no processo de retrolavagem.

3.3. Metodologia

3.3.1. Avaliação do processo de filtração

Os ensaios de filtração foram realizados visando determinar a eficiência de remoção do equipamento em diferentes ciclos e tempos de ensaio, no uso de água com determinado nível de contaminação. Os sólidos suspensos totais contidos na água, os sólidos retidos na areia, e o percentual em volume para diferentes faixas de diâmetro de partículas foram base para a determinação da eficiência. Essas informações foram relacionadas com o grau de contaminação da camada e com a perda de pressão, em função da granulometria de areia e da taxa de filtração utilizada.

Dessa forma, os ensaios relacionados ao processo de filtração constituíram-se na combinação de três granulometrias de areia (G1 - fina, G2 - média e G3 - grossa), quatro valores de taxa de filtração (TF20, TF40, TF60 e TF80), em três diferentes ciclos subsequentes de filtração (C1, C2 e C3) utilizando a mesma areia, para os três filtros de areia avaliados (F1, F2 e F3). A avaliação da filtração baseou-se na determinação da eficiência de remoção de cada ensaio e no monitoramento da variação temporal do diferencial de pressão em cada filtro. Cada ciclo de filtração teve duração fixa de 4 horas, determinada a partir de ensaios preliminares que apontaram o critério de fixação do tempo de filtração como a alternativa que determinava igualdade do volume de contaminantes nos ensaios com mesma taxa de filtração entre filtros.

As taxas de filtração utilizadas nos ensaios basearam-se nos limites recomendados pela literatura, sendo os valores de 20, 40, 60 e 75 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$, denominados respectivamente por TF20, TF40, TF60 e TF75 (VERMEREIN & JOBLING, 1984; ASABE, 1993; PIZARRO CABELO, 1996 e BENHAM & ROSS, 2002). Inicialmente se pretendia utilizar a taxa de filtração de 80, contudo quando se iniciou os ensaios com meio filtrante, devido ao aumento da resistência por ele oferecido, o sistema de bombeamento proporcionou uma taxa de filtração máxima de 75 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$, correspondente a uma vazão de 9,42 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$. Para os ensaios iniciais com filtros sem meio

filtrante, onde se pretendia conhecer individualmente cada filtro, utilizou-se as taxas de filtração de 20, 40, 60 e 80 m³ m⁻² h⁻¹.

A eficiência de remoção estimada tendo a água como base de cálculo foi determinada para cada condição de ensaio utilizando dois parâmetros distintos: pela quantificação dos sólidos suspensos totais contidos na água (SST) e pela determinação do percentual em volume das faixas de diâmetro de partículas presentes nas amostras de água (% V_{DP}).

Para a determinação da eficiência de remoção utilizando SST da água foram coletadas seis amostras de água por ciclo de filtração e por filtro de areia. As amostras eram retiradas antes da passagem pelo filtro, para caracterizar a qualidade do afluente, e após a sua passagem pela camada filtrante, para quantificar as partículas retidas no filtro, em três períodos distintos durante o processo de filtração (Início - 0 h, meio - 2 h e fim - 4 h).

Na avaliação da eficiência de remoção utilizando resultados do percentual em volume das faixas de diâmetro de partículas presentes nas amostras de água, foram coletadas quatro amostras de água por ciclo e por filtro de areia, sendo uma amostra coletada antes e outra após a passagem da água pelo filtro, em dois períodos distintos durante o processo de filtração (Início - 0 h e fim - 4 h).

Adicionalmente nos ensaios de filtração, foram realizadas coletas de areia no perfil do leito filtrante, antes e após cada ciclo de filtração, ou seja, na situação com filtro limpo e sujo respectivamente, para se determinar a massa de sólidos removidos pela areia para as diferentes condições de ensaio (combinação entre granulometria de areia e taxa de filtração). Com os dados de sólidos removidos no processo de filtração pela análise da areia, determinou-se a eficiência de remoção no processo, relacionando a quantidade de sólidos retidos e quantidade de sólidos que entraram no sistema. Além desse parâmetro, foi determinada a espessura útil da camada filtrante para os diferentes tratamentos, definida como a altura da camada filtrante que proporcionou algum nível de remoção de partículas, ou seja, que gerou valores positivos de remoção de sólidos.

As amostras de areia eram coletadas nas aberturas laterais do corpo do filtro em quatro pontos no perfil horizontal da camada, igualmente distanciados, sendo a amostra final de cada altura composta pelas amostras dos três filtros de areia ensaiados. Neste contexto, cada ciclo de filtração resultou em oito amostras de areia (amostra composta dos três filtros de areia avaliados), sendo quatro antes e quatro depois do processo de filtração, totalizando 24 amostras por ensaio experimental (ensaio experimental compreende os três ciclos de filtração).

Com o intuito de remover contaminantes das areias utilizadas no experimento, antes dos ensaios experimentais, ou seja, antes do primeiro dia de experimento (Ciclo 1), eram realizadas retrolavagens de quinze minutos para cada filtro de areia avaliado, estabelecendo sempre, independentemente da granulometria de areia, uma expansão de 25% da altura do leito filtrante.

3.3.2. Avaliação do processo de retrolavagem

Após a realização de cada ciclo de filtração, executados com as granulometrias de areia e taxas de filtração definidas para os tratamentos, eram realizados os ensaios de retrolavagem com o objetivo de determinar a eficiência de remoção do processo (eficiência de limpeza), relacionando com o grau de contaminação ou sujidade do leito (tratamentos de taxa de filtração) e com a granulometria de areia, nas condições de meio filtrante contaminado.

Dessa forma os ensaios de retrolavagem ou de limpeza da camada foram executados buscando em todos os ensaios atingir o nível de expansão da camada filtrante de 25% da altura original do leito, de acordo com orientações de Brouckaert (2004). Para atingir essa condição foram determinados em ensaios preliminares os valores de velocidade superficial necessários para expandir a camada para determinada granulometria. A velocidade superficial (relação entre vazão e área transversal de passagem da água pelo filtro de areia) ou taxa de retrolavagem foi registrada e armazenada pelo sistema de aquisição de dados utilizado do experimento.

Para a avaliação do processo de retrolavagem, realizou-se a determinação da eficiência de limpeza a partir da quantidade relativa de sólidos removidos no processo, ou seja, a razão entre a quantidade sólidos removidos do processo de retrolavagem, e a quantidade de sólidos presentes na camada filtrante antes da limpeza. Essa estimativa foi realizada em profundidade no leito filtrante e, posteriormente, estimada para toda a espessura da camada filtrante. Adicionalmente, foi monitorada a variação temporal da perda de pressão nos filtros e determinado os valores de velocidade superficial para os diferentes ensaios do processo de filtração.

Na Figura 20 é apresentado um fluxograma resumido das variáveis avaliadas nos processos de filtração e retrolavagem, bem como o número total de ensaios experimentais e amostras de água (SST e $\%V_{DP}$) e areia.

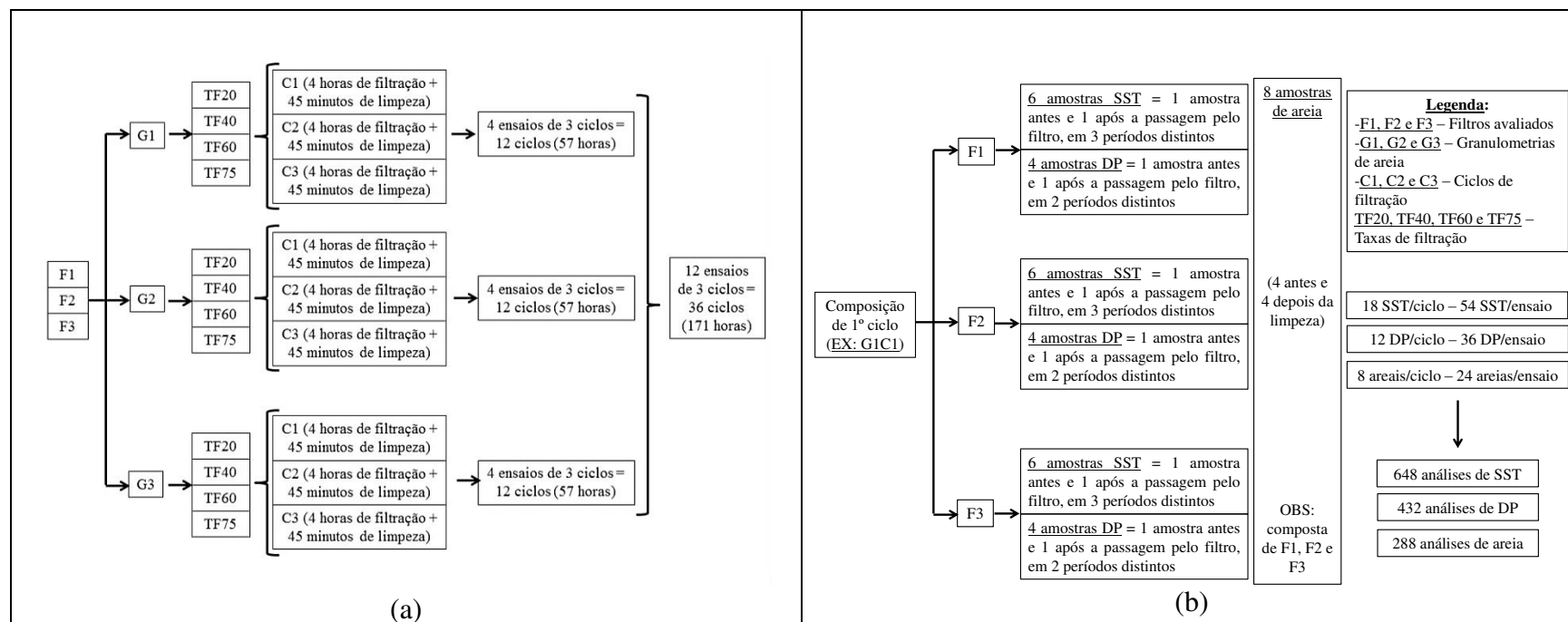


Figura 20. Fluxograma do número total de ensaios experimentais dos processos de filtração e retrolavagem (a) e amostras de água (SST – sólidos suspensos totais e %V_{DP} – percentual em volume de determinada faixa de diâmetro de partículas) e areia (b).

3.3.3 Parâmetros de avaliação dos ensaios

3.3.3.1. Sólidos suspensos totais (SST)

As análises de sólidos suspensos totais (SST) foram realizadas no Laboratório de Saneamento Rural da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP. Nesse laboratório foram analisadas tanto as amostras de água proveniente do processo de filtração, como as amostras de água provenientes da determinação dos sólidos retidos na areia para os processos de filtração e retrolavagem. Para isso a metodologia de determinação baseou-se na norma "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater" (APHA, 1995), que define o seguinte procedimento metodológico:

1. Inicialmente, para determinação de SST foi adquirida a quantidade necessária de filtros de microfibras, com 47 mm de diâmetro e 0,45 µm de tamanho médio de poros;
2. Antes da execução das análises, os filtros de microfibras foram secos em estufa a 100°C por 1 hora, para remoção da umidade adquirida pelo equilíbrio com o ambiente;
3. Os filtros secos foram resfriados em dessecador por 15 minutos e, posteriormente, determinadas as suas massas em balança de precisão (P_1);
4. Os filtros foram alocados em aparato de filtração, que era conectado à sílica e a uma bomba de sucção (Figura 21), que recebeu um volume de água filtrado (V) de 300 mL, provenientes do processo de filtração e de 100 mL para as águas provenientes da determinação dos sólidos retidos na areia;

OBS: utilizou-se volume maior para as amostras de água provenientes do processo de filtração devido à baixa concentração de sólidos retidos nos filtros quando foi utilizado volume de 100 mL em testes preliminares.

5. Após receber a amostra de água, os filtros eram secos em estufa a 100°C por 2 horas, esfriados novamente por 15 minutos em dessecador e, posteriormente determinados a sua massa, obtendo o valor de P_2 .

Os valores da concentração de sólidos suspensos totais (SST) presentes nas amostras avaliadas foram estimados pela seguinte fórmula (equação 2):

$$SST = 10^6 \cdot \left(\frac{P_2 - P_1}{V} \right) \quad (4)$$

Onde: SST – concentração de sólidos suspensos totais (mg L^{-1}), P_1 - massa do filtro de microfibra antes da filtração da amostra de água (g), P_2 - massa do filtro de microfibra depois da filtração da amostra de água (g), e V - volume utilizado de amostra de água (mL).



Figura 21. Aparato de filtração utilizado na análise de SST (à esquerda), conectado ao erlenmeyer com sílica (centro) e à bomba de sucção (à direita).

A partir dos valores encontrados para este parâmetro nas amostras de água foram determinados os valores da eficiência de remoção nos processos de filtração e retrolavagem.

3.3.3.2. Determinação de sólidos retidos na areia (SRA)

Para a determinação dos sólidos retidos no material filtrante foi utilizado o procedimento de remoção dos sólidos proposto por Staden & Haarhoff (2004), que recomenda o método denominado "inversão da proveta". Esse método apresenta as seguintes etapas de execução:

1. Retirar amostra composta de areia com volume aproximado de 60 mL, nas diferentes profundidades da camada filtrante (detalhe das aberturas laterais dos filtros na Figura 14), utilizando um calador de amostragem de grãos em sacaria, adaptado para essa função (Figura 22). As amostragens para essa determinação foram realizadas antes e após a realização dos processos de filtração e retrolavagem;



Figura 22. Calador para amostragem de grãos de sacaria adaptado para realizar amostragem de areia.

2. Colocar a amostra de areia em uma proveta com 250 mL de volume juntamente com a adição de 100 mL de água limpa;

3. Vedar a proveta e executar a sua inversão (proveta + 60 mL de areia + 100 mL de água) por 20 vezes, pausando entre intervalos para permitir que a areia se acomode no fundo (Figura 23);

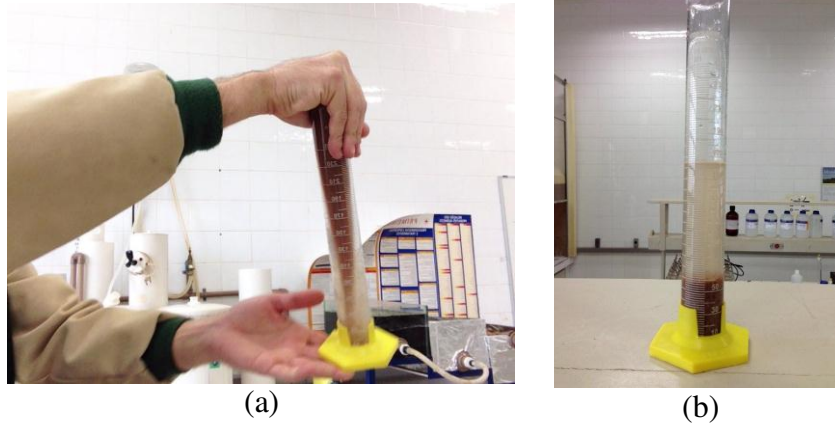


Figura 23. Detalhe do procedimento da inversão da proveta (a) e do resultado após o procedimento (b).

4. Drenar o líquido resultante da inversão em um recipiente limpo com volume de 500 mL;
5. Repetir os itens anteriores (2 a 4) por mais quatro vezes, resultando em um volume total de 500 mL de água com sólidos retidos na areia;
6. Coletar uma amostra homogênea de 100 mL para determinação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) presente.

- **Estimativa da massa de sólidos removidos nos processos de filtração e retrolavagem contidos na areia**

Para a determinação da massa de sólidos removidos nos processos de filtração e retrolavagem nas amostras de areia, foram executados os seguintes passos:

1. Primeiramente determinou-se a massa de sólidos removidos contidos em uma amostra de 60 mL de areia para os processos de filtração (MS_{60_F}) e retrolavagem (MS_{60_R}), para cada profundidade avaliada (total de quatro profundidades) e condição de ensaio, utilizando as equações 5 e 6, respectivamente:

$$MS_{60_F} = (SRA_{d_F} - SRA_{a_F}) \cdot V \quad (5)$$

$$MS_{60_R} = (SRA_{a_R} - SRA_{d_R}) \cdot V \quad (6)$$

Onde: MS_{60F} e MS_{60R} - massa de sólidos removidos (mg) contidos em uma amostra de 60 mL para determinada profundidade no leito filtrante, para os processos de filtração e retrolavagem respectivamente, SRA_{dF} e SRA_{dR} - sólidos retidos (mg L^{-1}) em uma amostra de 60 mL de areia de determinada profundidade de avaliação depois de realizados os processos de filtração e retrolavagem respectivamente, SRA_{aF} e SRA_{aR} - sólidos retidos (mg L^{-1}) em uma amostra de 60 mL de areia de determinada profundidade de avaliação, antes de iniciar o processos de filtração e retrolavagem respectivamente, V - volume de amostra utilizado na determinação dos sólidos suspensos totais, ou seja 0,1 L.

2. O volume de areia coletado (60 mL) representa um volume maior da espessura amostrada, denominada por fração de volume (FV), que foi determinada pela seguinte equação:

$$FV = 10^6 \cdot A \cdot \frac{H}{4} \quad (7)$$

Onde: FV - fração de volume (mL), A - área do filtro (m^2), e H - altura do leito filtrante (m).
OBS: o número 4 refere-se ao número de aberturas laterais ou amostragens feitas em profundidade

Substituindo os valores de área do filtro ($A = 0,1256 \text{ m}^2$) e altura do leito filtrante ($H = 0,35 \text{ m}$), determinou-se o valor de fração de volume.

$$FV = 10^6 \cdot A \cdot \frac{H}{4} = 10^6 \cdot 0,1256 \cdot \frac{0,35}{4} = 10.995,57 \text{ mL}$$

3. Posteriormente, determinou-se a massa de sólidos removidos contidos na areia em cada fração de volume da camada filtrante para os processos de filtração ($MS_{Fcamada}$) e retrolavagem ($MS_{Rcamada}$):

$$MS_{Fcamada} = \frac{FV}{60 \cdot 1000} \cdot MS_{60F} = \frac{10995,57}{60 \cdot 1000} \cdot MS_{60F} = 0,183 \cdot MS_{60F} \quad (8)$$

$$MS_{Rcamada} = \frac{FV}{60 \cdot 1000} \cdot MS_{60R} = \frac{10995,57}{60 \cdot 1000} \cdot MS_{60R} = 0,183 \cdot MS_{60R} \quad (9)$$

Onde: $MS_{Fcamada}$ e $MS_{Rcamada}$ - massa de sólidos removidos contidos na areia em cada fração de volume da camada filtrante para os processos de filtração e retrolavagem respectivamente (g); e MS_{60F} e MS_{60R} - massa de sólidos removidos contidos em uma amostra de 60 mL para determinada profundidade no leito filtrante, para os processos de filtração e retrolavagem respectivamente (mg).

4. Somando-se os valores de sólidos removidos contidos em cada fração de volume, determinou-se a massa de sólidos removidos por toda camada filtrante para os processos de filtração ($MS_{F_{total}}$) e retrolavagem ($MS_{R_{total}}$), utilizando as equações 8 e 9, respectivamente:

$$MS_{F_{total}} = \sum_{l=1}^4 MS_{F_{camada}} \quad (10)$$

$$MS_{R_{total}} = \sum_{l=1}^4 MS_{R_{camada}} \quad (11)$$

Onde: $MS_{F_{total}}$ e $MS_{R_{total}}$ - massa de sólidos removidos nos processos de filtração e retrolavagem respectivamente, contidos na camada filtrante (g); e $MS_{F_{camada}}$ e $MS_{R_{camada}}$ - massa de sólidos removidos contidos na areia em cada fração de volume da camada filtrante para os processos de filtração e retrolavagem respectivamente (g).

3.3.3.3. Diâmetro das partículas contidas na água (% V_{DP})

Visando quantificar a eficiência de remoção por faixas de tamanho de partículas dos sólidos suspensos presentes nas amostras de água, foram determinados os percentuais de volume relativo de diferentes faixas de diâmetros de partículas das amostras de água dos ensaios de filtração no equipamento modelo Mastersizer 2000, da empresa Malvern Instruments, existente no Laboratório de Microestrutura de Alimentos do Departamento de Planejamento Alimentar e Nutrição da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) da UNICAMP. Esse equipamento opera na faixa de determinação do tamanho de partículas de 0,02 a 2000 μm (Figura 24), e analisaram as amostras de água geradas nos processo de filtração, coletadas no início e no fim de cada ciclo de filtração.



Figura 24. Detalhe do equipamento modelo Mastersizer 2000 (a) e exemplo dos resultados e gráficos gerados na tela do computador (b).

O procedimento utilizado na determinação das faixas de diâmetro de partículas presentes nas amostras de água foi o seguinte:

1. Inicialmente era realizada a limpeza do equipamento para a remoção de qualquer contaminante residual de análises anterior;
2. O equipamento era então calibrado com água padrão sem sólidos suspensos, sendo utilizada nesse caso, água filtrada do abastecimento público do município de Campinas – SP;
3. Após a calibração, uma amostra homogeneizada de água coletada nos experimentos era inserida por vez no equipamento, com um volume aproximado de 1000 mL;
4. Após a espera de um tempo fixo de 1 minuto para o equipamento atingir o equilíbrio, as análises eram realizadas. Para cada amostra de água analisada eram geradas cinco leituras médias, permitindo o descarte de leituras discrepantes e estimar a média geral para a amostra. A Figura 25 apresenta um exemplo do formato dos resultados produzidos pelo equipamento;
5. Após cada análise, os resultados eram armazenados no microcomputador, que também executava o gerenciamento do processo de leitura;
6. Finalmente, o volume de água analisado era drenado do equipamento que era novamente limpo e calibrado para realização de novas leituras.

A partir dos resultados obtidos nessas análises, era realizado o agrupamento dos percentuais em faixas com denominações conhecidas, tais como: $< 2 \mu\text{m}$ (argila); $2 - 60 \mu\text{m}$ (silte); $60 - 200 \mu\text{m}$ (areia fina); $200 - 600 \mu\text{m}$ (areia média); e $600 - 2000 \mu\text{m}$ (areia grossa). Dessa forma, foi estimado o percentual em volume de cada faixa de diâmetro de partículas, antes e após a passagem nos filtros de areia, em dois períodos distintos no processo de filtração (início – 0 h e no fim – 4 h), para cada combinação de granulometria de areia e taxa de filtração. Com essas informações foram estimados os valores de eficiência de remoção no processo de filtração para diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água.

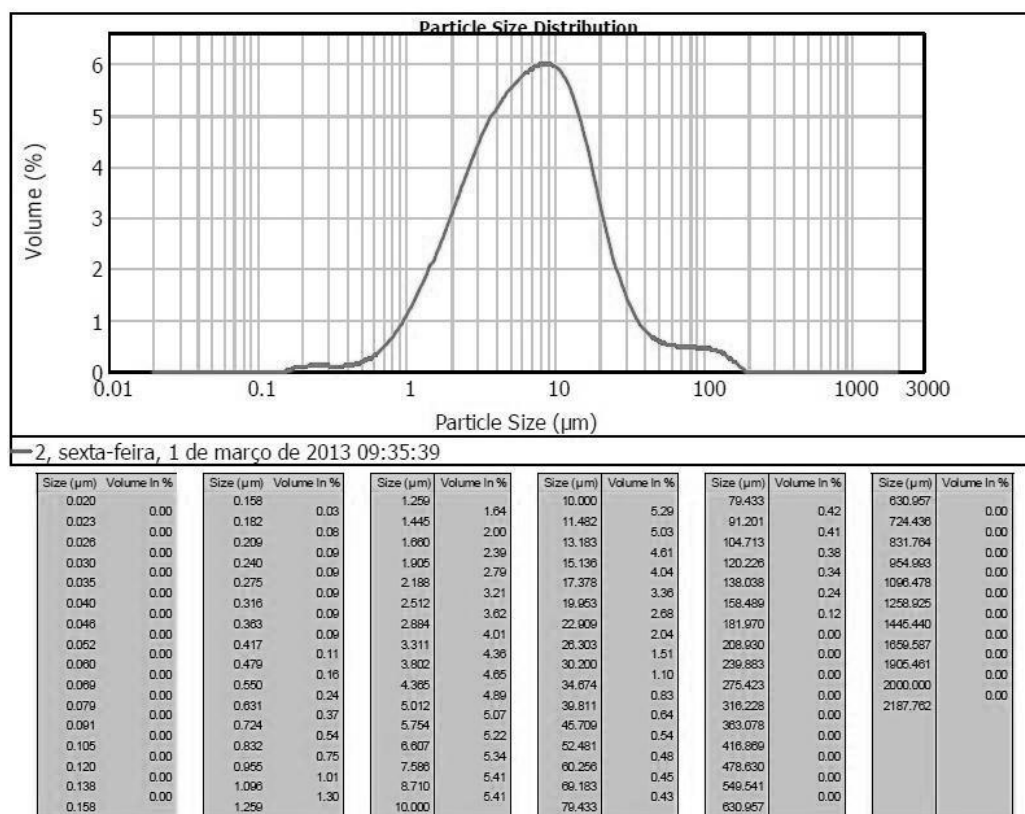


Figura 25. Detalhe de um resultado gerado pelo equipamento modelo Mastersizer 2000 em termos de percentual de volume para diferentes tamanhos de partícula em suspensão na água.

3.3.3.4. Eficiência de remoção

A eficiência de remoção foi o principal parâmetro utilizado para avaliar os processos de filtração e retrolavagem nos ensaios dos filtros de areia, a partir dos valores de concentração de sólidos suspensos totais (SST) contidos tanto em amostras de água dos ensaios como a partir de sólidos retidos em amostras de areia (SRA). Adicionalmente, esse parâmetro também foi determinado a partir do percentual em volume de determinada faixa de diâmetro de partículas contidas nas amostras de água.

- **Filtração**

A estimativa da eficiência de remoção no processo de filtração baseou-se na quantidade removida de sólidos suspensos totais (SST) da água, bem como com base no percentual em volume removido de determinada faixa de diâmetro de partículas contidas na água ($\%V_{DP}$).

Para determinação da eficiência de remoção no processo de filtração utilizando sólidos suspensos totais contidos na água (ER_{SST}), a seguinte equação foi utilizada:

$$ER_{SST} = \left(1 - \frac{SST_2}{SST_1}\right) \cdot 100 \quad (12)$$

Onde: ER_{SST} - eficiência de remoção no processo de filtração utilizando sólidos suspensos totais contidos na água (SST) como parâmetro de avaliação, em períodos distintos (%), SST_1 - sólidos suspensos totais antes da passagem da água pelo filtro de areia, em determinado período no processo (mgL^{-1}), e SST_2 - sólidos suspensos totais depois da passagem da água pelo filtro de areia, em determinado período no processo (mg L^{-1}).

Posteriormente com os valores de sólidos suspensos totais (SST) nos três períodos de cada ciclo de filtração, antes e após a passagem da água pelos filtros de areia, determinou-se a quantidade total de sólidos suspensos totais por ciclo (SST_{ciclo}), obtendo apenas um valor de eficiência de remoção de sólidos suspensos totais por ciclo ($ER_{SST_{ciclo}}$). Da mesma forma, considerando a quantidade total de SST de todos os períodos e ciclos de filtração, determinou-se a eficiência de remoção geral para a combinação entre granulometria de areia e taxa de filtração ($ER_{SST_{total}}$).

A avaliação da eficiência de remoção utilizando as análises de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP}) foi realizada com duas amostras temporais (início - tempo 0 h, e fim - tempo 4 h), com o objetivo de identificar variações no processo de desprendimento de partículas no processo de filtração, como caracterizado por Di Bernardo & Dantas (2005).

Para estimativa da eficiência de remoção no processo de filtração utilizando o percentual em volume de determinada faixa de diâmetro de partículas (ER_{DP}), utilizou-se a seguinte equação:

$$ER_{DP} = \left(1 - \frac{\%V_{DP_2}}{\%V_{DP_1}}\right) \cdot 100 \quad (13)$$

Onde: ER_{DP} - eficiência de remoção no processo de filtração para determinada faixa de diâmetro de partículas contidas na água (%), $\%V_{DP_1}$ - percentual com base em volume de determinada faixa de diâmetro de partículas contidas na água antes da passagem no filtro de areia (%), e $\%V_{DP_2}$ - percentual com base em volume de determinada faixa de diâmetro de partículas contidas na água após a passagem no filtro de areia (%).

Utilizando os dados de sólidos retidos nas areias (SRA) (etapa descrita no item 3.3.3.2), foi realizada a estimativa da eficiência de remoção no processo de filtração pela avaliação da areia. Para isso estimou-se a massa média de sólidos que passaram pelos filtros em cada ensaio ($\overline{S_{ent}}$), e a massa total de sólidos removidos contida na areia ($MS_{F_{total}}$). A seguinte equação foi utilizada para estimar a eficiência de remoção no processo de filtração, utilizando dados da areia.

$$ER_{AREIA} = \left(\frac{MS_{F_{total}}}{\overline{S_{ent}}} \right) \cdot 100 \quad (14)$$

Onde: ER_{AREIA} - eficiência de remoção no processo de filtração utilizando dados da areia (%), $MS_{F_{total}}$ - massa total de sólidos removida contida na areia (g), e $\overline{S_{ent}}$ - estimativa da quantidade média de sólidos que entraram nos filtros de areia (g).

A determinação da quantidade média de sólidos que passaram pelos filtros de areia em cada ensaio experimental foi determinada pela seguinte equação:

$$\overline{S_{ent}} = 10^{-3} \cdot TF \cdot A \cdot t \cdot \overline{SST_{ent}} \quad (15)$$

Onde: $\overline{S_{ent}}$ - estimativa da quantidade média de sólidos que passaram pelos filtros de areia (g), TF - taxa de filtração utilizada no ensaio ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$), A - área do filtro (m^2), t - tempo de filtração (h), e $\overline{SST_{ent}}$ - média nos tempos de amostragem e filtros de areia com relação aos sólidos suspensos totais que entraram nos filtros de areia ($mg \cdot L^{-1}$).

- **Retrolavagem**

A avaliação da eficiência de limpeza do leito filtrante foi realizada a partir dos dados de sólidos retidos na areia (SRA). Como foram realizadas amostragens de areia em profundidade no leito filtrante, antes e após o processo de retrolavagem, pela diferença de valores é possível estimar a eficiência de limpeza do processo por profundidade e para a camada total.

A seguinte equação foi utilizada para estimar a eficiência de limpeza para diferentes profundidades na camada filtrante:

$$E_{Li} = \left(1 - \frac{SRA_{dret_i}}{SRA_{aret_i}} \right) \cdot 100 \quad (16)$$

Onde: E_{Li} - eficiência de limpeza para determinada profundidade avaliada na camada filtrante (%), SRA_{dret_i} - sólidos retidos nas amostras de areia depois da limpeza da camada, para

determinada profundidade no leito filtrante (mg L^{-1}), $SRA_{a\text{ret}_i}$ – sólidos retidos nas amostras de areia antes da limpeza da camada, para determinada profundidade do leito filtrante (mg L^{-1}).

A estimativa da eficiência de limpeza, para o leito filtrante por inteiro, foi realizada pelo somatório da quantidade de sólidos nas diferentes profundidades, antes e após a limpeza da camada, como expressa a seguinte equação:

$$E_L = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^4 SRA_{d\text{ret}_i}}{\sum_{i=1}^4 SRA_{a\text{ret}_i}} \right) \cdot 100 \quad (17)$$

Onde: E_L – eficiência de limpeza para o leito por inteiro (%), $\sum_{i=1}^4 SRA_{d\text{ret}_i}$ – somatório dos sólidos retidos nas amostras de areia coletadas em profundidade no leito depois do processo de retrolavagem (mg L^{-1}), $\sum_{i=1}^4 SRA_{a\text{ret}_i}$ – somatório dos sólidos retidos nas amostras de areia coletadas em profundidade no leito antes do processo de retrolavagem (mg L^{-1}).

3.3.3.5. Caracterização hidráulica dos filtros de areia nos processos de filtração e retrolavagem

A caracterização hidráulica do processo de filtração iniciou-se pela realização dos ensaios com os filtros de areia na condição de filtro vazio, objetivando conhecer individualmente cada equipamento, e compará-los pela variação da perda de pressão em função da taxa de filtração (20, 40, 60 e $80 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), ajustando os dados ao modelo exponencial, proposto por Mesquita et al. (2012). Estes ensaios foram repetidos três vezes para cada valor de taxa de filtração. Para os ensaios executados com a presença de meio filtrante, a perda de pressão na filtração foi avaliada em função do tempo de filtração, para as diferentes combinações de granulometria de areia, taxa de filtração e filtros de areia, sendo os três ciclos de filtração considerados repetições experimentais. Para isso realizou-se análises de regressão para avaliar o modelo matemático que melhor represente o comportamento temporal do processo.

Posteriormente, para os tempos de filtração de 0, 60, 120, 180 e 240 min, realizou-se a avaliação da perda de pressão com o intuito avaliar a influência dos filtros de areia e das granulometrias utilizadas na variação desse parâmetro. Adicionalmente, para cada tempo de filtração avaliado, avaliou-se o ajuste da perda de pressão em função da taxa de filtração, no qual se utilizou o modelo exponencial de acordo com recomendações de Mesquita et al. (2012).

A caracterização hidráulica do processo de retrolavagem também foi realizada inicialmente com ensaios sem o meio filtrante, objetivando comparar os equipamentos nesse modo de operação, quando se avaliou a perda de pressão em função da velocidade superficial, utilizando os valores de 20, 40, 60, 80 e 100 m h⁻¹, repetidos três vezes. Da mesma forma que no processo de filtração, seguindo orientações de Ramirez (2010), ajustaram-se os dados ao modelo matemático exponencial. Para os ensaios com os filtros preenchidos com meio filtrante, analisou-se a influência do tempo de retrolavagem, do equipamento, da granulometria de areia (velocidades superficiais diferentes), e dos diferentes níveis de contaminação resultantes dos tratamentos de taxa de filtração, denominados GS1, GS2 GS3 e GS4 para os tratamentos TF20, TF40, TF60 e TF75, respectivamente.

3.3.4 Análise Estatística

Os dados de eficiência de remoção em ambos os processos (filtração e retrolavagem) foram analisados graficamente, uma vez que houve variabilidade dos dados entre os filtros de areia (caso no uso de SST da água e %V_{DP}) e as amostras de areia terem sido compostas entre filtros de areia, não havendo repetibilidade para aplicação de testes estatísticos.

Já os dados de perda de pressão nos processos de filtração e retrolavagem foram analisados estatisticamente cujos ciclos de filtração foram considerados repetições, no qual o utilizou-se o teste Tukey (P<0,05) para avaliação dos fatores qualitativos (filtros e granulometrias de areia, e graus de sujidade do processo de filtração) e a análise de regressão para avaliação dos fatores quantitativos (taxa e tempo de filtração, e velocidade superficial). O software Sigmaplot 11.0 foi utilizado para auxiliar as análises.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Precipitação pluviométrica durante os ensaios experimentais

Como a água utilizada nos ensaios experimentais era oriunda da microbacia hidrográfica onde o módulo foi instalado, a sua qualidade dependia das precipitações pluviométricas que ocorreram antes e durante a realização da pesquisa. Pela Figura 26 é possível observar a variação temporal da chuva durante o período experimental, permitindo associar a ocorrência desses eventos com a variação dos valores de sólidos suspensos totais (SST).

Pode-se observar que os ensaios experimentais iniciais, abrangendo os tratamentos de taxa de filtração TF20 com todas as granulometrias (G1, G2 e G3), e adicionalmente os tratamentos utilizando TF40 com as granulometrias de areia G1 e G2 e TF60 com a granulometria G1, foram realizados após a ocorrência de eventos de chuva. Esses eventos podem alterar a quantidade de sólidos suspensos totais da fonte onde foi captada a água, aumentando a variabilidade desse parâmetro durante o experimento.

4.2 Sólidos suspensos totais (SST) contidos na água utilizada no experimento

É apresentado nas Tabelas 18 e 19 no Anexo os valores de concentração de SST presentes na água utilizada durante os ensaios, na entrada e na saída dos filtros, respectivamente. O comportamento da variação da concentração de SST em função dos tratamentos realizados pode ser observado nas Figuras 27, 29 e 31 para os dados de entrada, e nas Figuras 28, 30 e 32 para os dados de saída dos filtros.

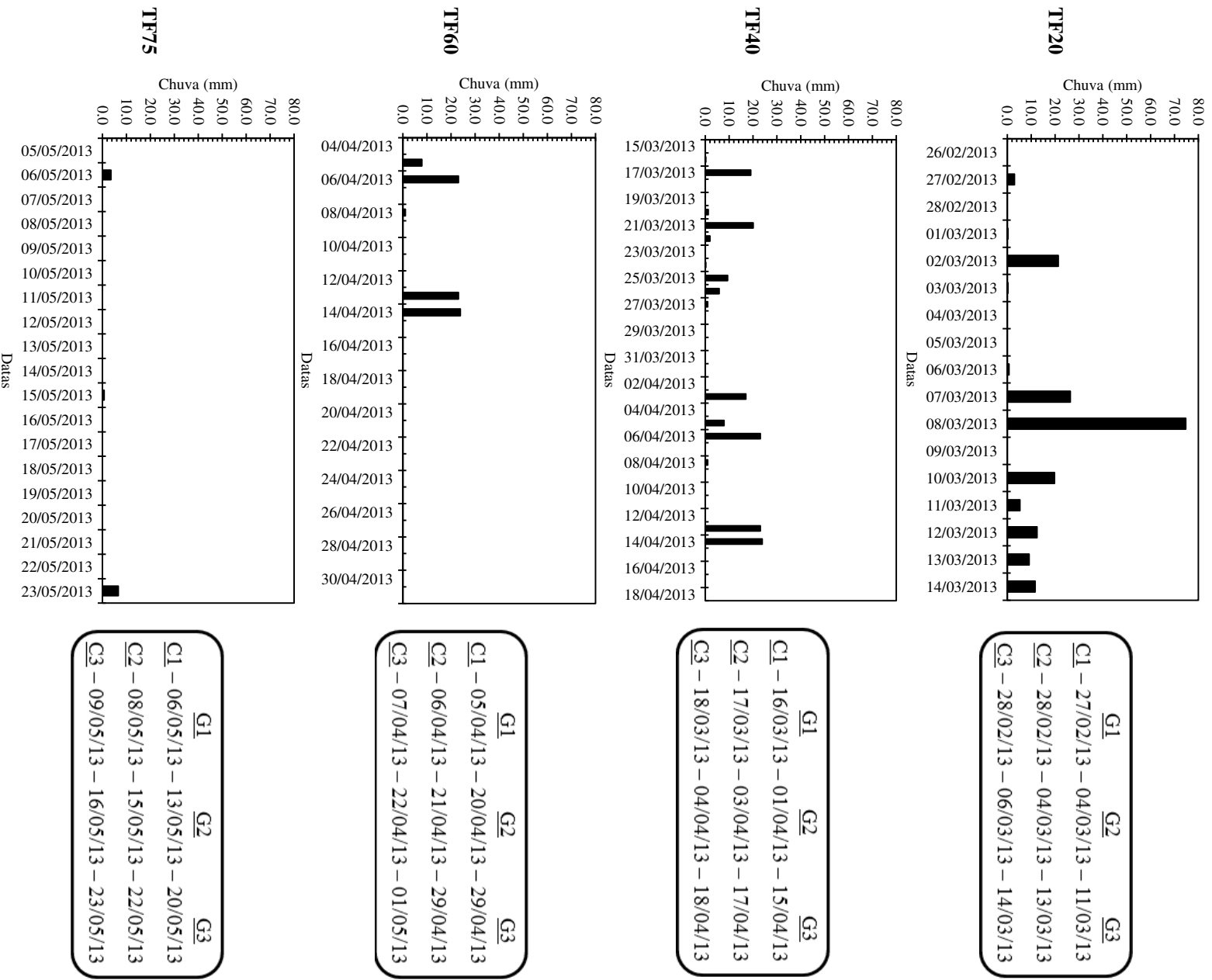


Figura 26. Variabilidade temporal das chuvas ocorridas no intervalo do experimento, com indicação das respectivas datas para cada combinação experimental.

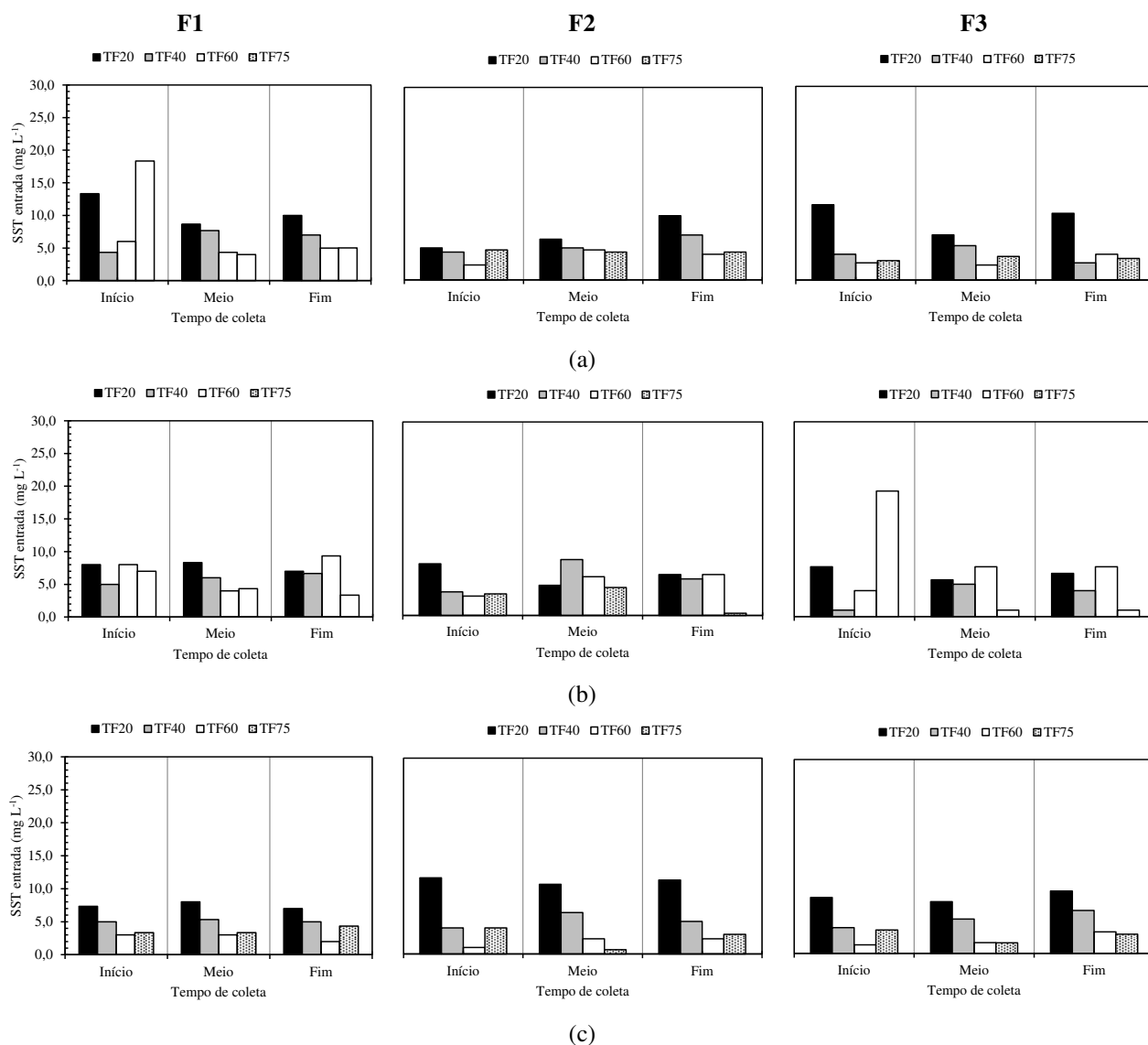


Figura 27. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) na água de entrada durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no primeiro ciclo de filtração.

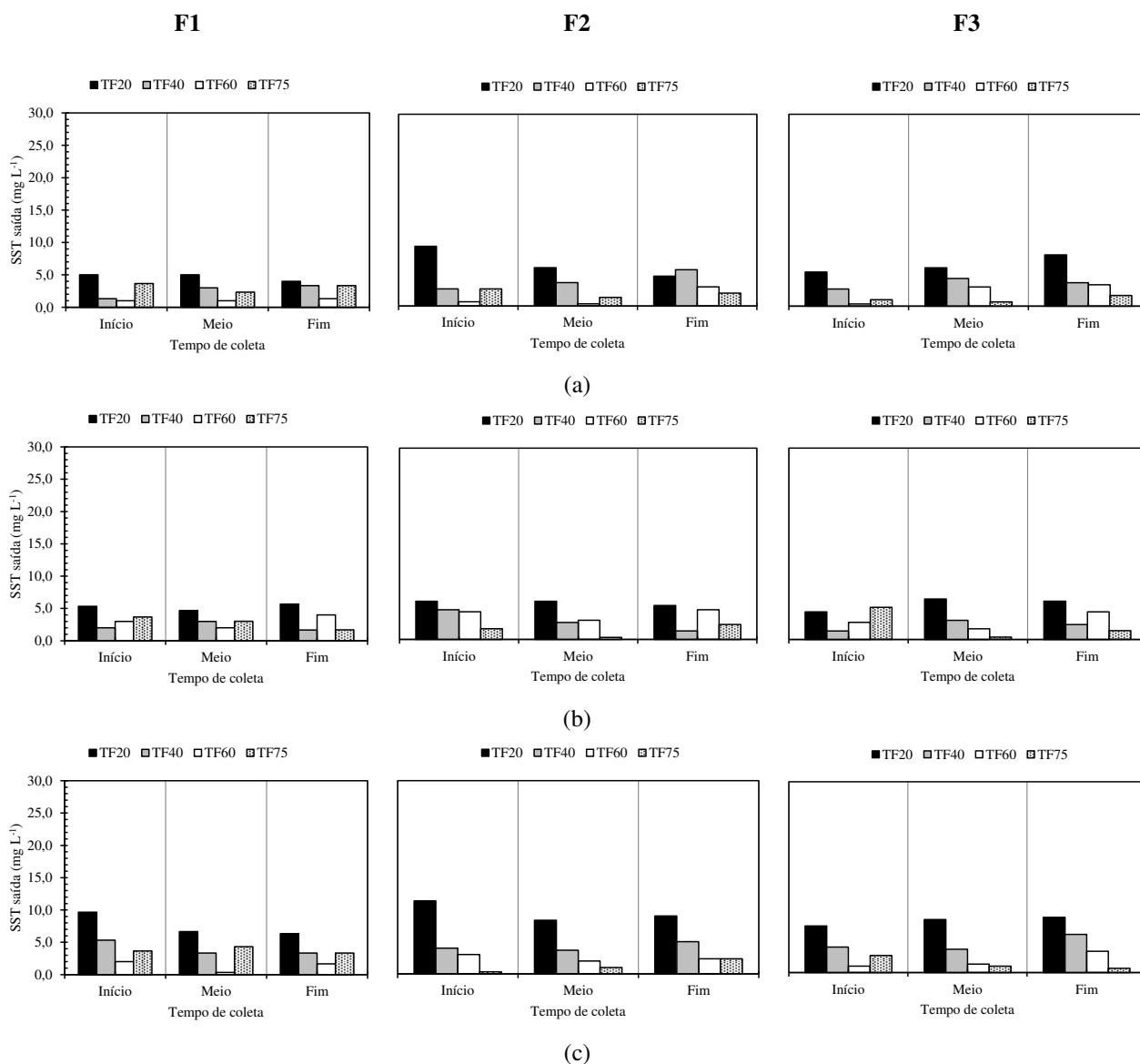


Figura 28. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L⁻¹) na água de saída durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no primeiro ciclo de filtração.

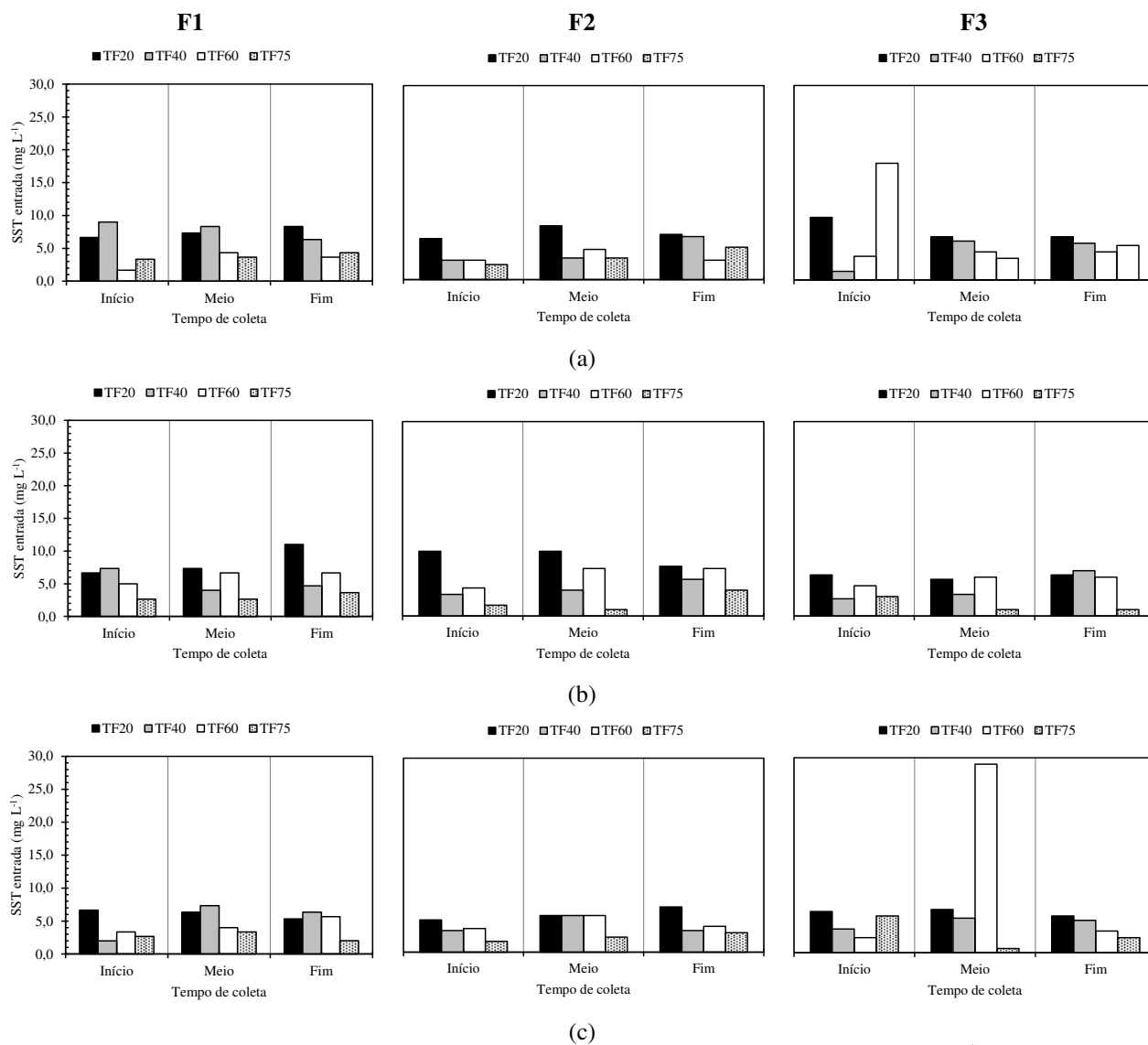


Figura 29. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L⁻¹) na água de entrada durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no segundo ciclo de filtração.

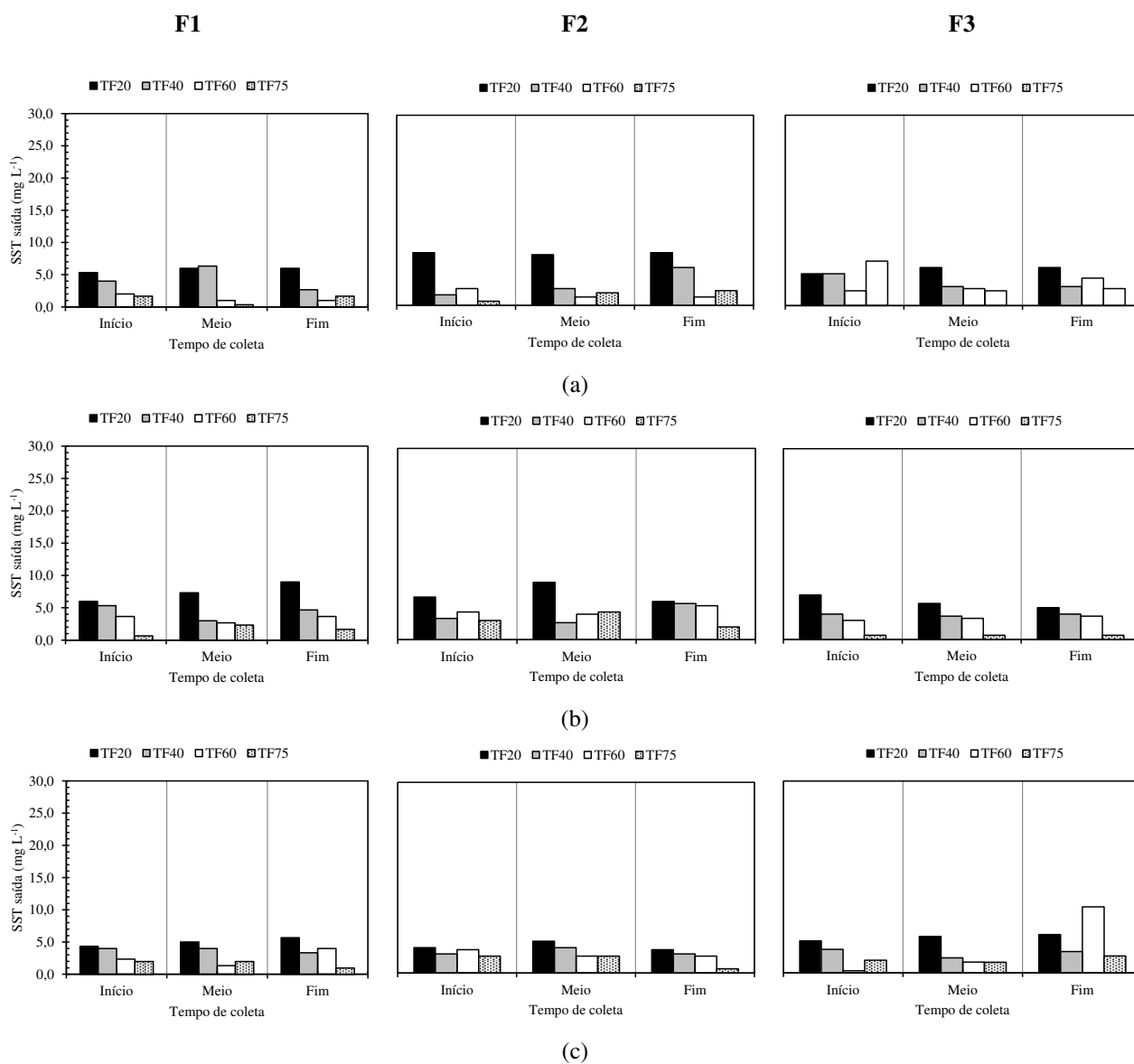


Figura 30. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L⁻¹) na água de saída durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no segundo ciclo de filtração.

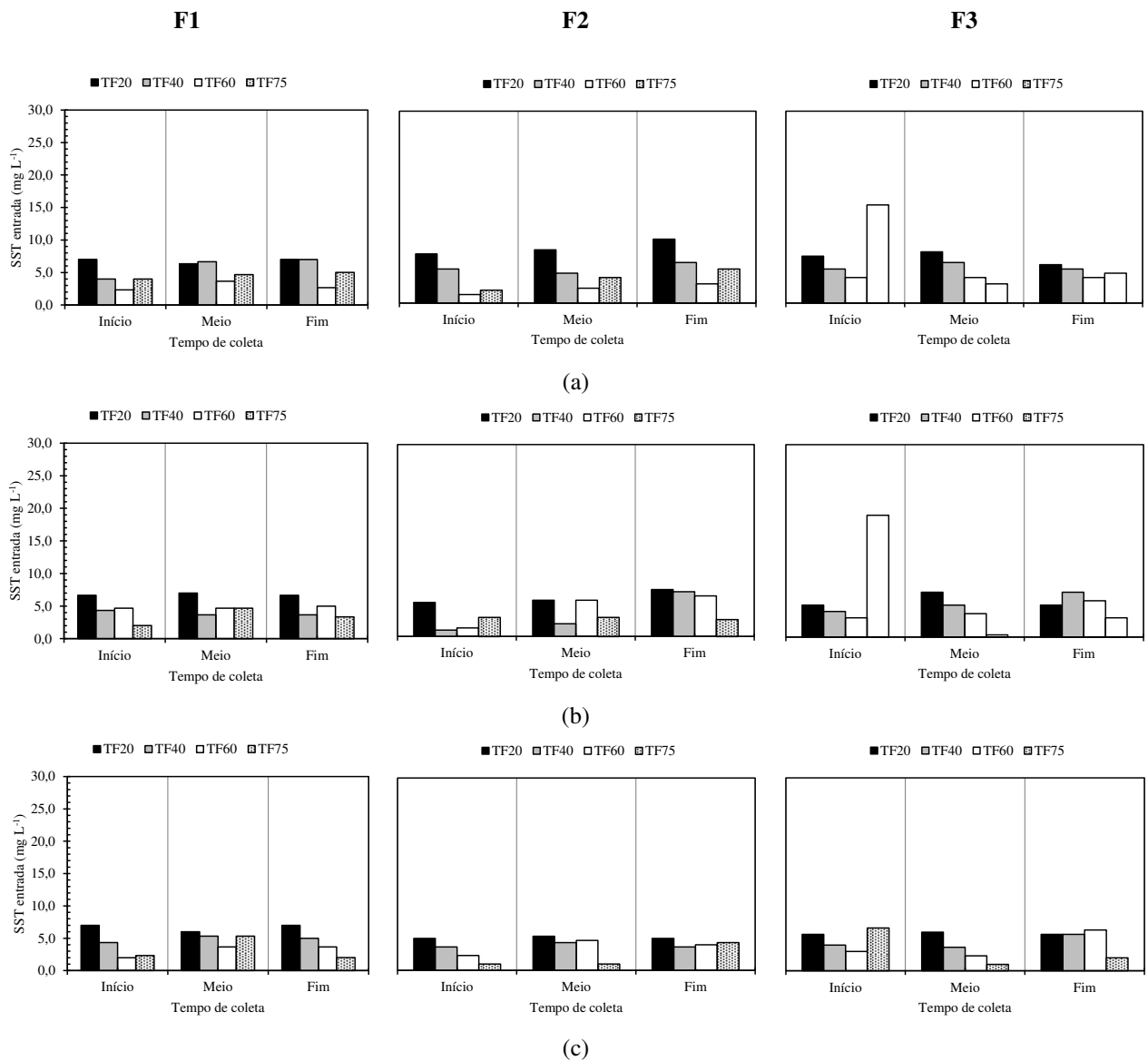


Figura 31. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) na água de entrada durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no terceiro ciclo de filtração.

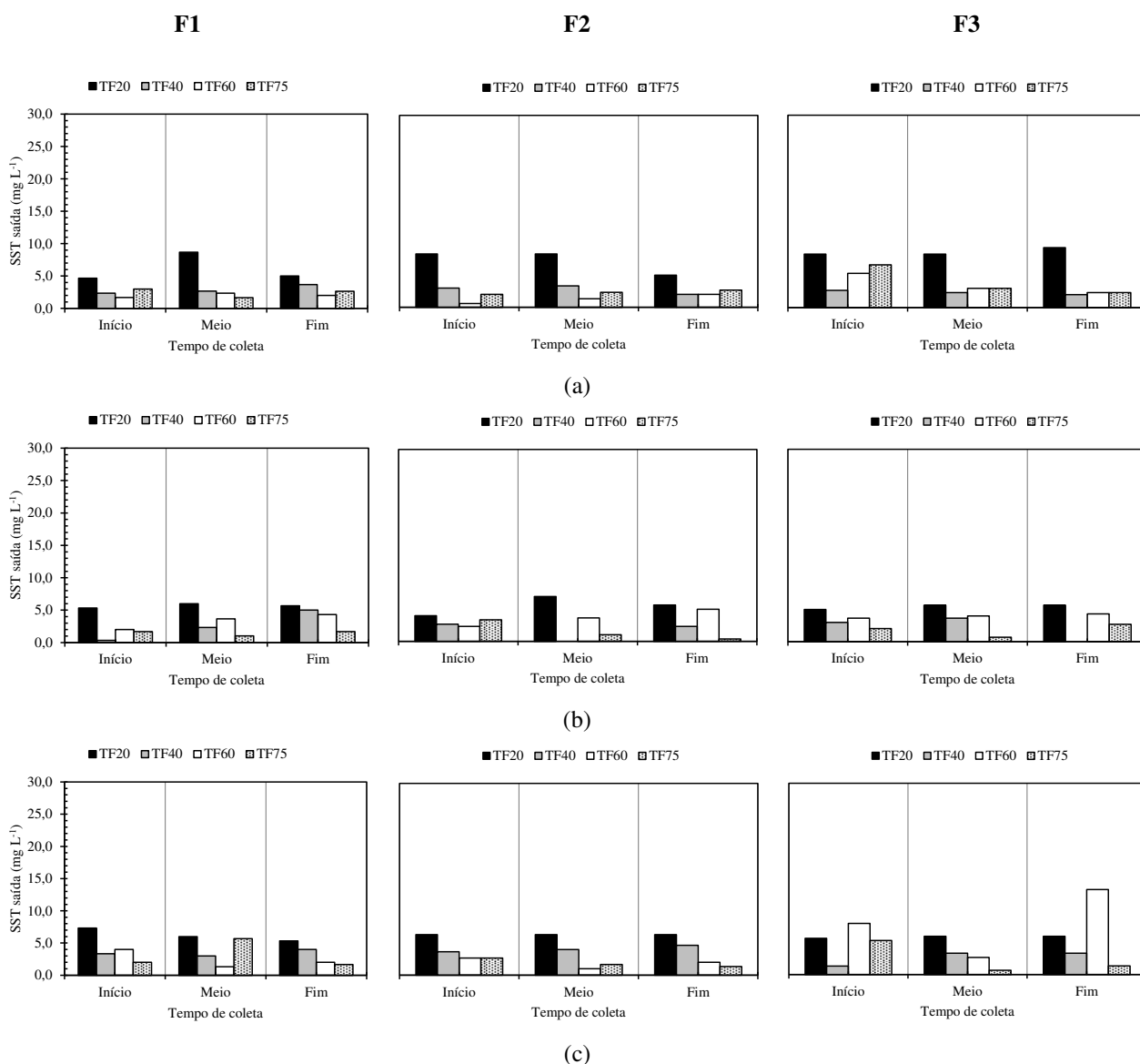


Figura 32. Variação da concentração de sólidos suspensos totais (SST) (mg L⁻¹) na água de saída durante os ensaios para diferentes momentos de coleta, para as diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), no terceiro ciclo de filtração.

A premissa inicial do presente trabalho é de que a quantidade de sólidos suspensos totais presente na água utilizada no experimento fosse constante ou que apresentasse pouca variação no decorrer do trabalho. No entanto, observou-se variação sistemática dos valores de SST presentes na água de entrada nos filtros (em todos os ciclos de filtração, filtros de areia e tempos de coleta), mostrando que os tratamentos de menor taxa de filtração foram realizados com qualidade de água que apresentava maiores valores de SST em comparação aos tratamentos de maior taxa de filtração.

A variação observada está associada com a ocorrência dos eventos de chuva (salientados no item 4.1), onde nos ensaios referentes à taxa de filtração TF20 (combinação com as granulometrias G1, G2 e G3), e em quase todas as situações com a taxa TF40 (combinação com G1 e G2), foram observados os maiores valores de SST devido à ocorrência de precipitação anterior e no momento dos ensaios. Neste sentido, pode-se afirmar que a qualidade da água utilizada nos ensaios experimentais não foi constante, o que deve ser considerado na comparação dos resultados da eficiência de remoção do equipamento para as diferentes condições ensaiadas. Representando a qualidade da água utilizada no experimento (entrada) em termos de sólidos suspensos totais (SST) médio, obteve-se o valor de $5,20 \pm 3,09 \text{ mg L}^{-1}$ (máximo de $19,00 \text{ mg L}^{-1}$ e mínimo de 1 mg L^{-1}), com um coeficiente de variação de 59,42%. De acordo com classificação de Bucks et al. (1979), a água utilizada no experimento oferece baixo risco ao entupimento de emissores ($< 50 \text{ mg L}^{-1}$).

4.2 Caracterização do material filtrante

São apresentadas na Tabela 3 as análises granulométricas das areias utilizadas no experimento (G1, G2 e G3), com os dados médios de massa de areia retida nas peneiras e os valores dos percentuais de massa retida e que passam por elas. Pela Figura 33 podem-se observar as curvas granulométricas das areias avaliadas.

Pela Tabela 4 são observados os valores dos diâmetros característicos D_{60} , D_{10} e do coeficiente CU para cada granulometria de areia utilizada no experimento.

Tabela 3. Dados médios de massa de areia retida (g), e percentuais retidos e que passam nas diferentes peneiras (%), para as granulometrias de areia avaliadas (G1, G2 e G3)¹.

Malha (mm)	G1			G2			G3		
	Massa retida (g)	% retida	% passa	Massa retida (g)	% retida	% passa	Massa retida (g)	% retida	% passa
2,36	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,08	0,08	99,92
2,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	3,01	3,00	96,92
1,70	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	10,19	10,15	86,77
1,40	0,61	0,61	99,39	0,38	0,37	99,63	22,14	22,06	64,71
1,19	0,97	0,97	98,42	1,11	1,10	98,53	29,27	29,16	35,55
1,00	1,22	1,21	97,21	35,12	34,69	63,84	27,79	27,69	7,86
0,85	1,53	1,53	95,68	42,77	42,25	21,60	3,22	3,21	4,65
0,71	44,81	44,70	50,98	18,76	18,53	3,07	2,56	2,55	2,09
0,60	33,20	33,12	17,87	2,33	2,30	0,76	0,93	0,93	1,16
0,50	17,38	17,34	0,53	0,55	0,54	0,22	0,84	0,84	0,33
0,42	0,53	0,53	0,00	0,22	0,22	0,00	0,33	0,33	0,00

¹ – Malha: abertura das peneiras utilizadas; % retida: percentual da massa de areia retida em cada peneira; % passa: percentual acumulado de massa de areia que passa em cada peneira.

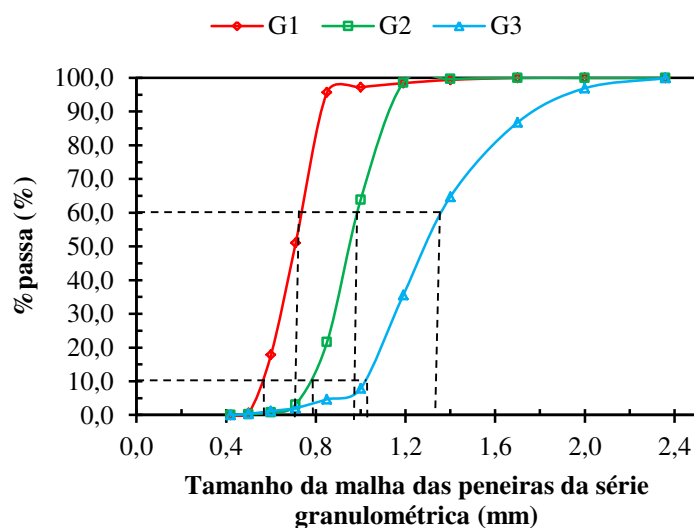


Figura 33. Curvas granulométricas das areias utilizadas no experimento (G1, G2 e G3).

Tabela 4. Parâmetros granulométricos das amostras avaliadas¹.

Granulometria de areia	D ₁₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	CU
G1	0,55	0,74	1,34
G2	0,77	0,99	1,28
G3	1,01	1,37	1,36

¹D₁₀: diâmetro efetivo; D₆₀: diâmetro de abertura da peneira que permite a passagem de 60% do material; CU: coeficiente de uniformidade.

De acordo com Pizarro Cabelo (1996), no processo de filtração, as partículas em suspensão na água, a partir de 1/12 a 1/10 do diâmetro efetivo do meio filtrante, ficarão retidas no meio filtrante. Neste contexto, a granulometria fina (G1) apresenta uma capacidade de remoção de partículas com diâmetros a partir de 0,046 a 0,055 mm (46 a 55 μm), representando o limite inferior do intervalo para partículas classificadas como silte. Da mesma forma, para a areia com granulometria média (G2) haverá remoção de partículas com diâmetros a partir de 0,064 a 0,077 mm (64 a 77 μm), e para a granulometria grossa (G3) a partir de 0,084 a 0,101 mm (84 a 101 μm), o que representa para ambas areias a retenção iniciando no limite inferior do intervalo relativo a partículas classificadas como areia fina.

Os valores encontrados para o coeficiente de uniformidade das areias avaliadas estão abaixo do limite recomendado na literatura (1,4 a 1,6), garantindo a homogeneidade do material e aumentando a possibilidade de sua permanência no interior do equipamento no momento da retrolavagem (HAMAN et al., 1994; PIZARRO CABELO, 1996). Ramirez (2010) afirma que quanto maior é o valor do coeficiente de uniformidade do meio filtrante, mais elevado é a propensão de saída da areia do filtro, devido à presença de partículas de tamanhos diferenciados que atingem diferentes níveis de expansão para a mesma velocidade superficial.

4.3 Avaliação do processo de filtração

A avaliação do processo de filtração consistiu na determinação da eficiência de remoção a partir dos valores de sólidos suspensos totais e do percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas presentes na água, e na análise de remoção pelos dados de sólidos retidos na areia (SRA) (grau de contaminação ou de sujidade da camada filtrante). Concomitantemente avaliou-se o comportamento hidráulico dos equipamentos para o padrão de qualidade de água utilizada.

4.3.1 Caracterização hidráulica dos filtros de areia no processo de filtração

Inicialmente foi realizada a caracterização hidráulica dos filtros de areia na condição de filtro vazio, objetivando conhecer individualmente cada equipamento na variação da taxa de filtração. Já no processo de filtração com meio filtrante, foi avaliada a influência da granulometria de areia bem como da taxa de filtração, e a variabilidade temporal da perda de pressão e da taxa de filtração.

a) Caracterização hidráulica dos filtros de areia vazios no processo de filtração

É apresentado na Tabela 5 os valores médios de perda de pressão (kPa) e o resultado da comparação estatística pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade para os filtros operando sem a presença da areia no seu interior.

Tabela 5. Valores médios e desvio padrão da perda de pressão (kPa) dos filtros de areia sem a presença de meio filtrante na comparação dos filtros pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Filtros de areia	Taxa de filtração			
	TF20	TF40	TF60	TF80
F1	0,77 ±0,04 b	3,15 ±0,12 a	7,14 ±0,21 a	12,70 ±0,29 a
F2	1,09 ±0,05 a	2,55 ±0,10 c	4,61 ±0,18 c	7,96 ±0,22 c
F3	0,82 ±0,02 b	2,73 ±0,06 b	5,83 ±0,11 b	10,02 ±0,17 b

Obs.: Médias seguidas por letras diferentes entre filtros de areia para cada taxa de filtração diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Observou-se que para todas as taxas de filtração, exceto para $20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (F1=F3 e menor que F2), os filtros ensaiados apresentaram perdas de pressão estatisticamente diferentes entre si, apresentando a seguinte ordem decrescente de valores: F1>F3>F2.

Considerando que essa diferença de comportamento entre filtros vai permanecer mesmo com a presença de meio filtrante, pode-se afirmar que, em operações onde o processo de retrolavagem é iniciado a partir de um determinado percentual de perda de pressão do filtro limpo, como salientado por Silva et al. (2003), o comportamento diferenciado de perda de pressão para determinado modelo de filtro no processo de filtração vai acarretar diferentes graus de contaminação do meio filtrante, afetando assim a eficiência de remoção dos filtros. Por exemplo, se o critério para início da retrolavagem for de 20% da perda de pressão inicial, considerando a taxa de filtração de $60 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, o filtro F1 (filtro com maior perda de pressão) teria que aumentar sua perda de pressão em torno de 1,43 kPa, enquanto o filtro F2 (filtro com menor perda de pressão) teria que aumentar sua perda de pressão em torno de 0,92 kPa (valor 55% menor) para iniciar a retrolavagem. Essa diferenciação resultaria em um maior tempo de filtração para o filtro F1, resultando em diminuição da eficiência de remoção à medida que as retrolavagens não sejam realizadas. Esse resultado orientou a escolha da metodologia utilizada na

pesquisa, na qual se definiu a realização do processo de filtração com duração fixa de 4 horas, ao invés do uso do diferencial de pressão.

Pela Tabela 20 no Anexo são apresentados os valores da análise de regressão da perda de pressão em função da taxa de filtração, no processo de filtração, para cada filtro avaliado na condição de filtro vazio, no qual se aplicou o modelo exponencial, recomendado por Mesquita et al. (2012), como o melhor modelo de ajuste do equipamento. De acordo com a análise de variância e com os valores de coeficiente de determinação, pode-se observar que os dados experimentais se adequaram significativamente ao modelo exponencial em todos os filtros de areia. São apresentadas na Figura 34 as curvas ajustadas ao modelo exponencial para os três filtros avaliados na condição de filtros vazios.

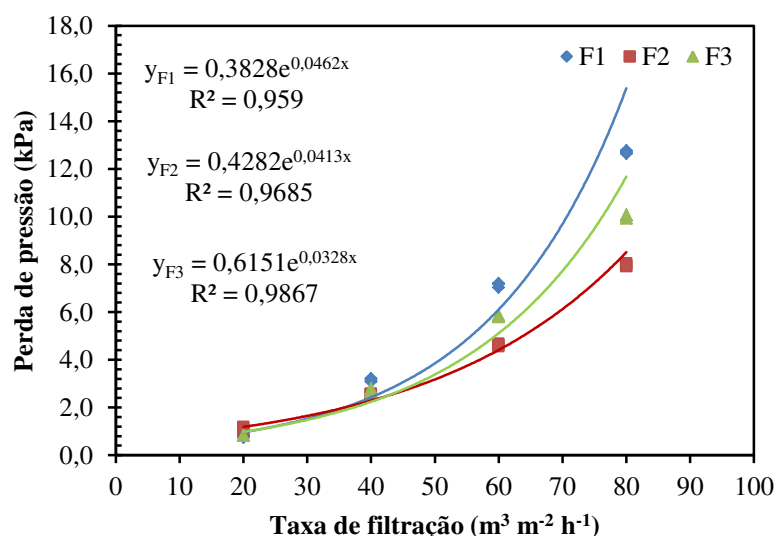


Figura 34. Curvas ajustadas e modelos de regressão para perda de pressão (kPa) em função da taxa de filtração (m³ m⁻² h⁻¹) no processo de filtração dos filtros de areia sem meio filtrante.

Observava-se pela Figura 34 que até a taxa de filtração com valor de 40 m³ m⁻² h⁻¹ os filtros apresentam comportamento similar na variação da perda de pressão pela taxa de filtração. A partir deste valor, o filtro F1 apresentou valores superiores de perda de pressão com relação aos demais filtros, sendo seguido dos filtros F3 e F2.

Apesar dos filtros ensaiados serem do mesmo modelo e fabricante, é possível que o processo de fabricação não tenha sido realizado de forma uniforme, promovendo comportamentos hidráulicos diferenciados. Em trabalho desenvolvido por Deus et al. (2013), verificou-se que a modificação das dimensões da placa difusora determinou perdas de pressão diferenciadas, ou seja, processos de fabricação não uniformes acarretam comportamentos

hidráulicos diferenciados nos filtros de areia, e consequentemente podem afetar a operação e, hipoteticamente, a eficiência de remoção do mesmo.

b) Taxas de filtração utilizadas nos ensaios experimentais com meio filtrante

É apresentado na Tabela 6 os valores médios e o desvio padrão das taxas de filtração utilizadas nos ensaios experimentais com meio filtrante, considerando as leituras de vazão coletadas durante todo período de filtração.

Tabela 6. Valores médios e desvio padrão das taxas de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) utilizadas nos ensaios experimentais com meio filtrante durante todo o período de filtração.

Filtros	Granulometria da areia	Ciclo de filtração	Tratamento de taxa de filtração			
			TF20	TF40	TF60	TF75
F1	G1	C1	19,31±0,61	39,66±0,60	59,99±0,82	74,74±1,00
		C2	19,21±0,61	40,18±2,27	59,92±0,74	75,14±0,99
		C3	19,55±0,43	39,90±1,70	60,15±0,77	75,22±0,90
	G2	C1	19,87±0,47	40,25±0,83	60,38±0,77	75,46±0,97
		C2	19,60±0,64	40,50±0,72	60,42±0,76	75,03±0,86
		C3	19,84±0,56	40,10±0,67	60,24±0,66	75,06±0,96
	G3	C1	19,67±0,48	40,92±0,55	60,60±0,72	75,42±0,89
		C2	20,27±0,55	40,40±0,69	60,78±0,90	75,59±0,90
		C3	20,20±0,78	40,41±0,76	60,05±0,70	75,16±0,88
F2	G1	C1	20,10±0,61	39,88±0,92	59,36±0,78	76,64±1,22
		C2	19,29±0,60	40,17±0,62	60,03±0,79	74,78±1,04
		C3	20,44±0,44	39,85±0,61	60,12±0,81	74,60±0,98
	G2	C1	19,93±0,46	40,43±0,86	59,49±0,76	74,86±1,01
		C2	19,71±0,43	40,15±0,65	60,06±0,84	74,93±0,95
		C3	19,91±0,44	40,38±0,66	59,85±0,81	75,14±1,01
	G3	C1	20,11±0,45	40,15±0,58	60,10±0,81	75,28±0,98
		C2	20,33±0,44	40,11±0,59	59,92±0,94	75,19±0,98
		C3	20,10±0,44	40,28±0,65	60,27±0,79	75,11±0,92
F3	G1	C1	20,40±0,41	40,01±0,96	59,51±0,84	75,51±1,31
		C2	21,09±0,42	40,32±0,71	59,71±0,81	75,45±1,07
		C3	20,14±0,40	40,12±0,60	59,95±0,78	75,68±1,11
	G2	C1	20,31±0,42	40,26±0,67	59,94±0,91	75,57±1,13
		C2	20,95±0,41	40,46±0,57	60,20±0,88	75,55±1,11
		C3	20,76±0,43	39,95±0,56	60,06±0,92	75,27±1,16
	G3	C1	19,79±0,44	40,62±0,62	60,17±0,87	75,75±1,08
		C2	20,49±0,41	40,06±0,66	60,96±0,98	75,46±1,07
		C3	20,05±0,36	40,36±0,60	59,75±0,86	75,83±1,08

Nessa tabela pode-se observar baixa variabilidade das taxas de filtração no decorrer do tempo, sendo que o maior valor de coeficiente de variação (3,86%) foi observado para o Filtro F1

no 3º ciclo, no uso do tratamento G3TF20. Neste contexto, pôde-se considerar que os ensaios apresentaram repetições com o mesmo valor de taxa de filtração, não sendo, dessa forma, fonte de variabilidade para as suas comparações.

c) Caracterização hidráulica dos filtros de areia preenchidos com meio filtrante no processo de filtração

Pela Tabela 7 são apresentados os valores médios de perda de pressão no processo de filtração para os ensaios com filtros de areia preenchidos com meio filtrante com diferentes granulometrias, comparados pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Essa avaliação foi realizada para diferentes combinações de granulometria de areia e taxas de filtração, em cinco momentos diferentes no decorrer do processo de filtração (0, 60, 120, 180 e 240 minutos).

Pela Tabela 7, é possível observar que a granulometria de areia mais fina (G1) combinada com todas as taxas de filtração, com exceção de algumas condições de ensaio (60 min TF75, 120 min TF40 e 180 min TF40), não apresentou diferença estatística entre os filtros de areia avaliados no decorrer do processo de filtração.

Com relação ao uso da granulometria de areia média (G2), já se observou diferença estatística entre os filtros de areia, onde apenas nos tempos 0, 60 e 120 min observou-se algumas condições de ensaio sem diferença significativa (TF20 e TF75). O filtro de areia F2 apresentou, para várias condições de ensaio, maior valor de perda de pressão, seguido dos filtros F1 e F3, respectivamente, com exceção da taxa de filtração TF60, onde esse filtro apresentou os menores valores de perda de pressão em comparação com os demais.

Na utilização da granulometria G3, apesar de algumas condições de ensaio apresentar diferenciação estatística, observou-se que na maioria das situações não houve diferença estatística entre os filtros de areia em termos de perda de pressão, considerando todos os tempos avaliados.

Tabela 7. Valores médios de perda de pressão (kPa) no processo de filtração na avaliação dos filtros de areia com meio filtrante pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, para diferentes condições experimentais e tempos de avaliação (min)¹.

Tempo (min)	Granulometria de areia	Filtro de areia	TF20	TF40	TF60	TF75
0	G1	F1	5,51 ns	13,05 ns	22,64 ns	32,35 ns
		F2				
		F3				
	G2	F1	3,64 b	8,44 b	16,37 b	24,05 ns
		F2	4,14 a	9,52 a	16,07 b	
		F3	3,64 b	6,51 c	17,06 a	
	G3	F1	2,22 a	6,48 ns	11,69 ns	16,28 b
		F2	2,73 a			18,13 a
		F3	1,81 b			17,83 a
60	G1	F1	5,96 ns	15,14 ns	25,79 ns	34,22 b
		F2				35,42 b
		F3				37,18 a
	G2	F1	3,96 ns	9,10 b	17,51 b	25,56 ns
		F2		10,07 a	17,41 b	
		F3		7,16 c	18,51 a	
	G3	F1	2,24 ns	6,78 ns	12,18 ns	17,08 b
		F2				18,82 a
		F3				18,26 a
120	G1	F1	6,57 ns	17,74 b	29,86 ns	40,71 ns
		F2		19,16 a		
		F3		18,55 a		
	G2	F1	4,01 b	9,97 a	19,89 b	28,28 ns
		F2	4,45 a	10,98 a	19,51 b	
		F3	4,16 b	7,92 b	21,13 a	
	G3	F1	2,31 ns	7,23 a	12,91 ns	17,97 b
		F2		7,62 a		19,62 a
		F3		6,95 b		18,76 a
180	G1	F1	7,14 ns	21,20 b	33,58 ns	46,08 ns
		F2		22,66 a		
		F3		22,25 a		
	G2	F1	4,13 b	10,96 a	22,03 b	31,97 a
		F2	4,61 a	12,00 a	21,46 b	33,21 a
		F3	4,34 b	9,01 b	23,41 a	28,61 b

¹Médias seguidas por letras diferentes entre filtros de areia diferem entre si pelo teste Tukey (P<0,05). ns – não significativo.

Tabela 7. Continuação

180	G3	F1	2,39 ns	7,75 b	13,65 ns	18,94 b
		F2		8,14 a		20,56 a
		F3		7,30 b		19,15 b
240	G1	F1	7,72 ns	25,79 ns	36,70 ns	50,45 ns
		F2				
		F3				
	G2	F1	4,32 b	12,18 a	23,87 b	35,37 a
		F2	4,88 a	13,20 a	23,28 b	37,11 a
		F3	4,67 a	10,28 b	25,50 a	29,93 b
	G3	F1	2,62 ns	8,31 a	14,26 ns	19,66 b
		F2		8,55 a		21,32 a
		F3		7,69 b		19,48 b

¹Médias seguidas por letras diferentes entre filtros de areia diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$). ns – não significativo.

De maneira geral, corroborando com os resultados da avaliação realizada sem meio filtrante, verificou-se que na presença do meio filtrante, na maioria das condições experimentais, houve diferenciação estatística entre eles.

d) Influência da granulometria de areia na perda de pressão do processo de filtração

Pela Tabela 8 é apresentado o resultado do teste Tukey ($P < 0,05$) na avaliação da influência da granulometria de areia em termos de perda de pressão no processo de filtração, em diferentes momentos do processo de filtração (0, 60, 120, 180 e 240 minutos), para cada filtro de areia e taxa de filtração.

Tabela 8. Valores da perda de pressão (kPa) dos filtros de areia em diferentes períodos (min) no processo de filtração com comparação pelo teste Tukey ($P < 0,05$) para avaliar a diferença entre granulometrias de areia.

Tempo (min)	Filtro de areia	Granulometria de areia	Taxa de filtração			
			TF20	TF40	TF60	TF75
0	F1	G1	5,31 a	12,93 a	22,88 a	31,48 a
		G2	3,66 a	8,44 b	16,37 b	23,41 b
		G3	2,22 b	6,34 c	11,27 b	16,27 c
	F2	G1	6,00 a	13,46 a	23,05 a	32,20 a
		G2	4,14 b	9,52 b	16,13 b	24,11 b
		G3	2,73 c	6,78 c	11,72 b	18,12 c
	F3	G1	5,23 a	12,78 a	22,04 a	33,39 a
		G2	3,64 b	6,51 b	17,06 b	24,63 b
		G3	1,80 c	6,31 b	12,00 c	17,83 c
60	F1	G1	5,59 a	14,62 a	25,82 a	34,22 a
		G2	3,72 b	9,10 b	17,51 b	24,98 b
		G3	2,24 b	6,69 c	11,69 c	17,08 c
	F2	G1	6,44 a	15,69 a	26,10 a	35,42 a
		G2	4,39 b	10,07 b	17,41 b	25,90 b
		G3	2,72 b	7,05 c	12,32 c	18,82 c
	F3	G1	5,77 a	15,11 a	25,45 a	37,18 a
		G2	3,76 b	7,16 b	18,51 b	25,80 b
		G3	1,83 c	6,59 b	12,52 c	18,26 c
120	F1	G1	6,22 a	17,74 a	29,76 a	39,30 a
		G2	4,02 b	9,97 b	19,89 b	28,12 b
		G3	2,34 b	7,23 c	12,35 c	17,97 c
	F2	G1	7,01 a	19,16 a	30,12 a	41,58 a
		G2	4,45 b	10,98 b	19,51 b	29,28 b
		G3	2,77 c	7,62 c	13,18 c	19,62 c
	F3	G1	6,45 a	18,83 a	29,64 a	41,24 a
		G2	4,16 b	8,12 b	21,13 b	27,44 b
		G3	1,87 c	6,91 b	13,20 c	18,76 c
180	F1	G1	6,77 a	21,20 a	33,30 a	45,28 a
		G2	4,14 b	10,96 b	22,03 b	31,90 b
		G3	2,34 b	7,75 c	13,04 c	19,10 b
	F2	G1	7,61 a	22,66 a	33,86 a	48,44 a
		G2	4,61 b	12,00 b	21,46 b	33,21 b
		G3	2,89 b	8,14 c	14,03 c	20,56 c

Médias seguidas por letras diferentes entre granulometrias de areia diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Tabela 8. Continuação.

180	F3	G1	7,11 a	22,25 a	33,58 a	44,64 a
		G2	4,34 b	9,01 b	23,41 b	28,61 b
		G3	1,97 c	7,30 c	13,88 c	19,15 c
240	F1	G1	7,37 a	24,95 a	36,35 a	49,90 a
		G2	4,37 b	12,18 b	23,87 b	35,77 b
		G3	2,43 b	8,31 c	13,66 c	19,71 b
	F2	G1	8,07 a	26,56 a	37,00 a	54,01 a
		G2	4,82 b	13,20 b	23,28 b	37,11 b
		G3	3,00 b	8,55 c	14,72 c	21,32 c
	F3	G1	7,79 a	25,85 a	36,75 a	47,81 a
		G2	4,67 b	10,28 b	25,50 b	29,93 b
		G3	2,10 c	7,69 c	14,40 c	19,48 c

Médias seguidas por letras diferentes entre granulometrias de areia diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Pode-se observar para todas as taxas de filtração e tempos de filtração, que quanto menor a granulometria de areia, maior a perda de pressão proporcionada pelo sistema. Este resultado está em concordância com os resultados encontrados por Mesquita et al. (2012).

Adicionalmente, observou-se que com o decorrer do tempo de filtração, as diferenças numéricas existentes entre os valores de perda de pressão relativos às diferentes granulometrias de areia aumentam, assim como para o incremento da taxa de filtração. O aumento da diferença de perda de pressão entre granulometrias com o tempo e com o aumento da taxa de filtração pode ser explicado pelo aumento da remoção de contaminantes, que será abordado posteriormente.

e) Influência da taxa de filtração na perda de pressão do processo de filtração

É apresentada na Tabela 21 no Anexo a análise de regressão da perda de pressão no processo de filtração em função da taxa de filtração, para cada filtro de areia avaliado para os cinco tempos de filtração (0, 60, 120, 180 e 240 minutos). Pela Figura 35 são apresentados os gráficos e equações da variação da perda de pressão em função da taxa de filtração em diferentes tempos no processo de filtração para cada condição avaliada.

Pela Tabela 9 são apresentados os valores médios da diferença da perda de pressão entre o início e o final do processo de filtração entre filtros de areia para diferentes combinações de granulometria de areia e taxas de filtração.

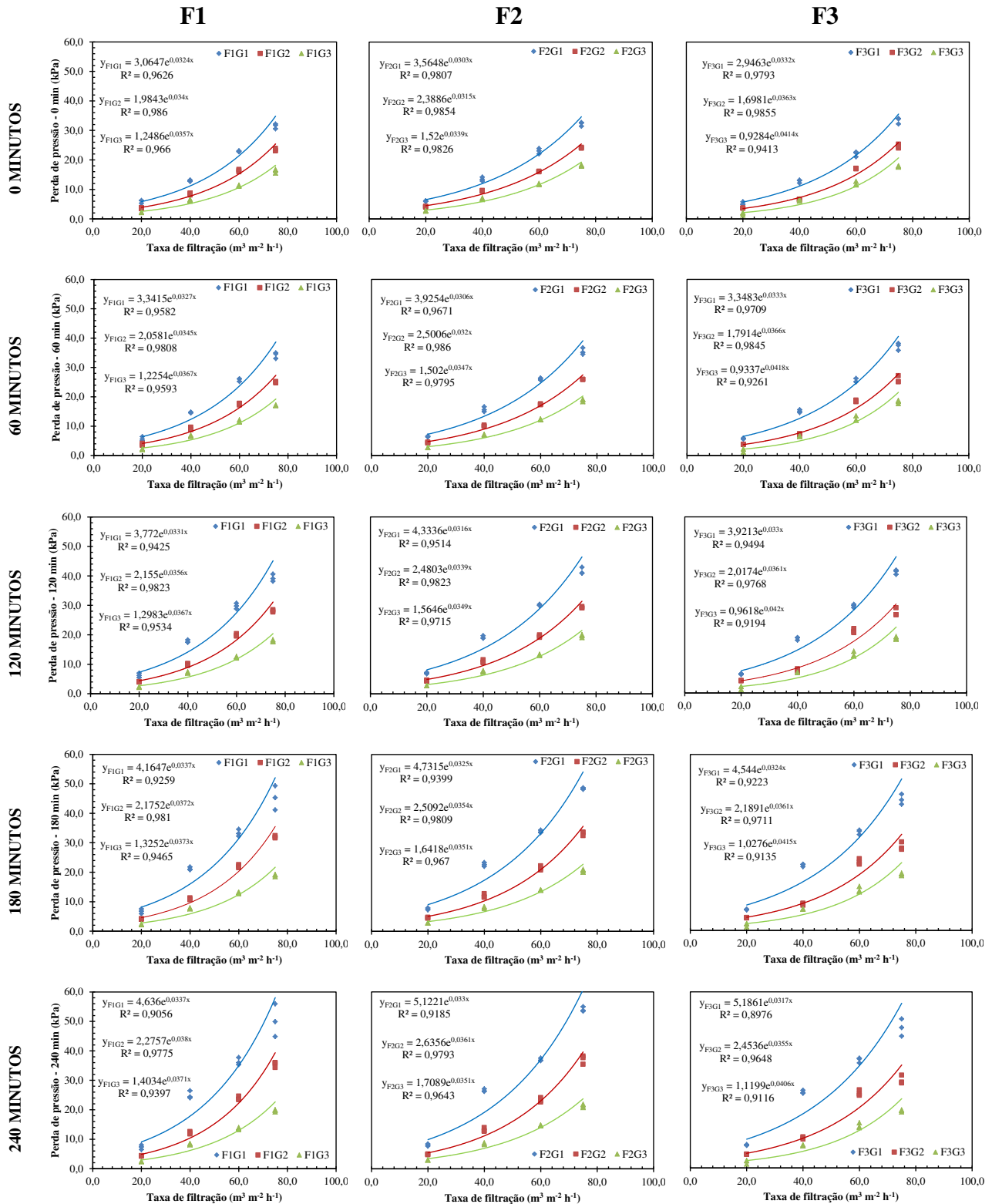


Figura 35. Comportamento da variação da perda de pressão (kPa) em função da taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) para o processo de filtração, para diferentes granulometrias de areia, avaliados no início (0 min), e 60, 120, 180 e 240 minutos depois do início.

Tabela 9. Valores médios da diferença aritmética da perda de pressão (kPa) entre o início e o final no processo de filtração entre filtros de areia, para diferentes granulometrias de areia e taxas de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

Taxa de filtração	Granulometria de areia		
	G1	G2	G3
TF20	2,2	0,8	0,2
TF40	12,7	3,8	1,7
TF60	14,1	7,7	2,6
TF75	18,2	9,9	2,7

Pode-se observar que para determinada granulometria de areia, o aumento da taxa de filtração proporcionou aumento da diferença entre os valores de perda de pressão entre o início e o final do processo e, adicionalmente, para cada taxa de filtração, verificou-se que a granulometria mais fina causou maior incremento da perda de pressão entre o início e o final do processo quando comparado às granulometrias mais grossas (G2 e G3). Essas observações podem estar atreladas à possibilidade das maiores taxas de filtração, associadas às menores granulometrias de areia, promoverem maior remoção de partículas da água.

Com relação ao modelo matemático proposto, pode-se observar que para todas as condições experimentais, os dados de perda de pressão em função da taxa de filtração se ajustaram adequadamente ao modelo, mostrando valores de coeficiente de determinação (R^2) entre 89,75 a 98,60%, onde na maioria dos casos os melhores ajustes foram observados no uso da granulometria G2, sendo seguida respectivamente por G3 e G1. Resultados semelhantes podem ser observados nos trabalhos desenvolvidos por Deus et al. (2013) e Mesquita et al. (2012).

Analizando o coeficiente “b” do modelo exponencial proposto ($y = a.e^{b.x}$), pode-se observar tendência de aumento do seu valor com o tempo, ou seja, aumento da inclinação da curva, sendo um indicativo de aumento da contaminação do leito com o tempo.

f) Variação temporal da perda de pressão no processo de filtração

A Tabela 22 no Anexo apresenta os dados médios de perda de pressão dos três filtros de areia avaliados em função do tempo, para diferentes combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia, e as Tabelas 23 e 24, também no Anexo, apresentam respectivamente a análise de variância e de regressão da perda de pressão em função do tempo de filtração, onde se pode observar influência do tempo de filtração na perda de pressão em todos os tratamentos, com

exceção apenas dos tratamentos F1G1TF20 e F3G3TF20. Observa-se nessas tabelas que na maioria das condições de ensaio, o modelo linear foi aquele em que os dados melhor se ajustaram, com exceção dos tratamentos G1TF40, G2TF75 e G3TF20 para o filtro F1, e G1TF40, G1TF75 e G2TF75 para o filtro F2, e para o filtro F3, o tratamento G1TF40.

É apresentada na Figura 36 a variação temporal da perda de pressão dos filtros de areia avaliados no processo de filtração, na combinação de diferentes taxas de filtração e granulometrias de areia.

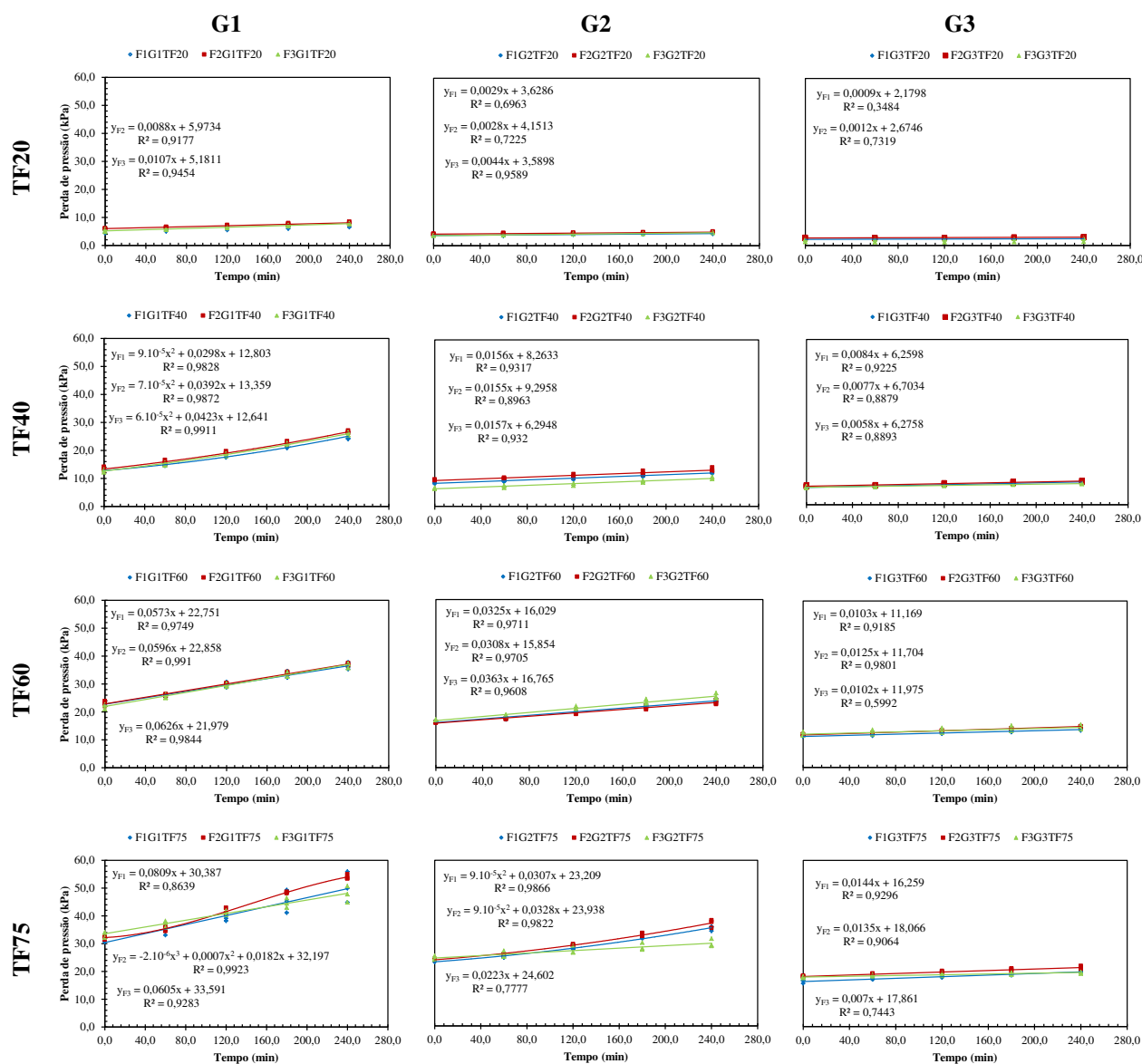


Figura 36. Comportamento da variação da perda de pressão (kPa) em função do tempo de filtração (min), para as combinações experimentais de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometria de areia.

Pode-se verificar nas figuras a ocorrência do aumento do valor da perda de pressão com o tempo no processo de filtração pela modificação da inclinação das curvas com o incremento da taxa de filtração para a mesma granulometria de areia e, também, com relação à diminuição da granulometria de areia para a mesma taxa de filtração. Haman et al. (1994) mostraram comportamento idêntico, mas para taxa de filtração constante e alterando-se a granulometria de areia, sendo que as granulometrias mais finas apresentaram maior inclinação das curvas, bem como maior valor de perda de pressão inicial em comparação às granulometrias mais grossas.

Em média, a maior granulometria de areia associada à menor taxa de filtração proporcionou variação da perda de pressão entre 2,25 kPa e 2,50 kPa entre o início e o final da filtração, ou seja, um acréscimo de 0,25 kPa. Já no uso da menor granulometria de areia, associada à maior taxa de filtração, observou-se variação da perda de pressão de 32,36 kPa no início a 50,69 kPa no final do processo, resultando em uma diferença de 18,33 kPa. Essa diferença entre os tratamentos pode estar associada à diferenciação de eficiência de remoção entre eles, onde tratamentos com menor granulometria associados ao uso de maiores taxas de filtração proporcionam maior remoção de partículas.

4.3.2 Remoção de sólidos suspensos na filtração pela análise da areia (grau de contaminação ou sujidade da camada filtrante)

É apresentada na Figura 37 a variação dos valores de massa de sólidos removidos no processo de filtração nas diferentes camadas do leito filtrante ($MS_{F_{camada}}$), para as diferentes combinações de granulometria de areia e taxas de filtração nos três ciclos de filtração, sendo que os dados originais estão apresentados na Tabela 25 do Anexo.

É possível observar pelas figuras a diminuição da quantidade de sólidos removidos com o aumento da granulometria de areia para determinada taxa de filtração em todas as camadas avaliadas do leito filtrante, corroborando com observações de Haman et al (1994), que salientam que a remoção é inversamente proporcional à granulometria de areia.

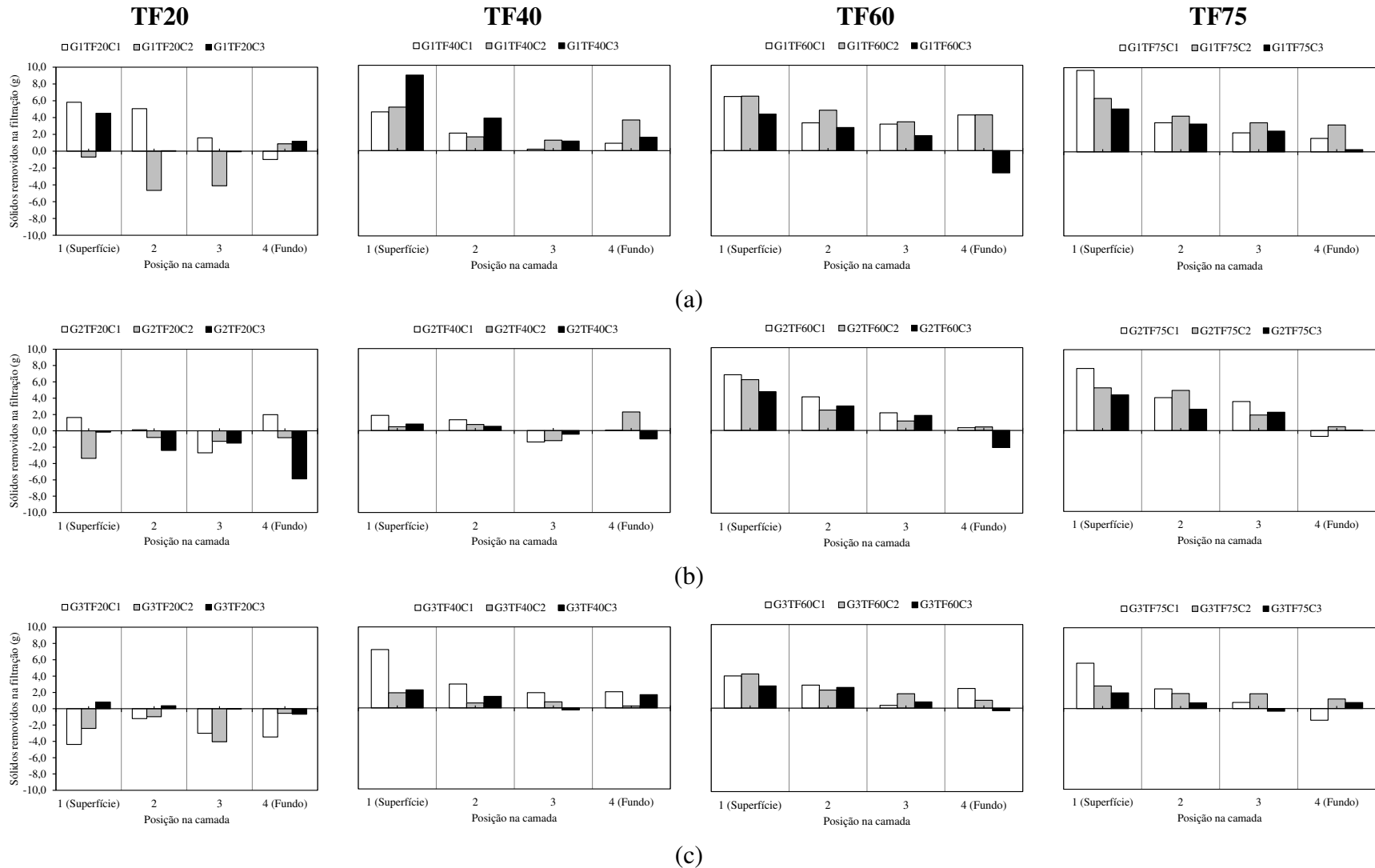


Figura 37. Remoção de sólidos no processo de filtração pela análise da areia (g), em diferentes camadas do leito filtrante ($MS_{Fcamada}$), para as granulometrias de areia G1 (a), G2 (b) e G3 (c), combinadas com diferentes taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração.

Analisando os resultados de cada granulometria de areia, com a ressalva que a quantidade de SST presentes na água dos ensaios não ser constante, verificou-se um aumento da remoção de sólidos com o aumento da taxa de filtração em todas as camadas avaliadas do leito filtrante, sendo esse comportamento mais evidente na granulometria de areia G1, e menos para G3. Especificamente com relação à combinação da taxa de filtração TF20 com as granulometrias de areia G2 e G3 (ensaios com maiores valores de SST da água), não se observou remoção de sólidos em todas as camadas avaliadas, com a possibilidade de ter havido transpasse de partículas, sejam aquelas presentes na água, ou aquelas aderidas e desprendidas do meio filtrante (DI BERNARDO & DANTAS, 2005).

Além do fato dos ensaios relativos à taxa de filtração mais baixa (TF20 e TF40) terem sido realizados com maiores concentrações de SST na água devido aos eventos de precipitação pluviométrica, esses valores de taxas podem ter possibilitado a ocorrência de propriedades hidrodinâmicas às partículas contidas na água que possibilitaram à criação de caminhos de baixa resistência ao deslocamento das partículas (caminhos preferenciais), não ocorrendo a sua remoção.

A maior taxa de filtração (TF75) proporcionou a ocorrência de propriedades para que as partículas fossem removidas por colisão com a camada superficial, além do fato dos índices de SST serem menores nesses ensaios experimentais. O resultado está em concordância com observações de Phillips (1995), que indicou uma faixa de 36 a 61,2 m³ m⁻² h⁻¹ de taxa de filtração para se atingir o melhor desempenho dos filtros de areia em termos de remoção, evidenciando que valores inferiores de taxa de filtração pode haver a possibilidade de se criar caminhos preferenciais na camada, enquanto valores acima podem proporcionar a movimentação excessiva da superfície do leito filtrante, promovendo a diminuição da eficácia do equipamento em termos de remoção e energeticamente, como salientado também no trabalho de Deus et al. (2013).

Comparando a quantidade de sólidos removidos nas diferentes camadas do leito filtrante, observou-se que a camada superficial (1) apresentou maior retenção de sólidos no processo de filtração, sendo responsável pelo processo denominado “peneiramento ou coamento”, como salientado por Pizarro Cabelo (1996). Essa diferenciação fica mais evidente com o aumento da taxa de filtração para determinada granulometria de areia, do que com o aumento da granulometria da areia para determinado valor de taxa de filtração. Em algumas camadas, observam-se valores negativos, referindo-se às partículas contidas na areia que se deslocaram

para outras camadas ou para fora do equipamento. Considerando como referência os valores positivos de remoção, determinaram-se as espessuras úteis da camada filtrante, ou seja, as espessuras que contribuíram para a remoção de partículas (Tabela 10).

Tabela 10. Valores de espessuras úteis da camada filtrante (cm) no processo de filtração para diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$).

Taxa de filtração	Granulometria de areia		
	G1	G2	G3
TF20	(1) - 8,75 cm	---- ¹	--- ¹
TF40	(4) - 35,0 cm	(2) - 17,5 cm	(4) - 35,0 cm
TF60	(4) - 35,0 cm	(3) - 26,25 cm	(3) - 26,25 cm
TF75	(4) - 35,0 cm	(3) - 26,25 cm	(3) - 26,25 cm

¹Tratamentos que não apresentaram espessura útil.

A espessura útil da camada filtrante na remoção de sólidos aumenta com o incremento da taxa de filtração para uma mesma granulometria de areia e com a diminuição da granulometria de areia para uma mesma taxa de filtração. A combinação da maior taxa de filtração com a menor granulometria de areia possibilitou a ocorrência de propriedades hidrodinâmicas à água e às partículas, no qual praticamente toda a camada filtrante contribuiu para a remoção dos contaminantes presentes na água. Essa observação diverge dos comentários de Jusoh et al. (2009) que relata que quanto menor o tamanho das partículas do leito filtrante menores as profundidades efetivas alcançadas.

Ao comparar os resultados entre os ciclos de filtração, observou-se uma variabilidade excessiva dos resultados, mas havendo uma tendência de menores valores de sólidos removidos para os ciclos de filtração posteriores.

Na Tabela 26 no Anexo são apresentados os dados de massa de sólidos removidos no processo de filtração considerando todo o leito filtrante ($MS_{F_{total}}$), ou seja, o somatório dos resultados de todas as camadas filtrantes avaliadas. Pela Figura 38 é possível observar esse comportamento em função da diferenciação da granulometria de areia e da taxa de filtração, para cada ciclo de filtração.

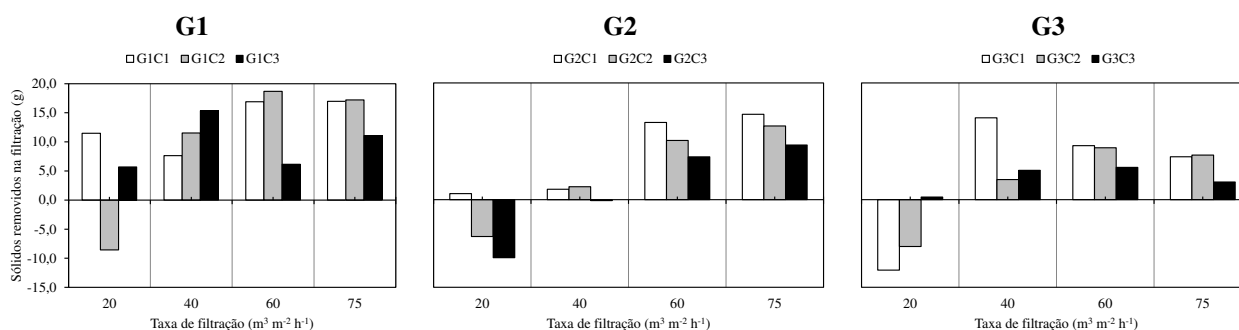


Figura 38. Remoção de sólidos no processo de filtração em todo o leito filtrante (MS_{Ftotal}) (g), em função das diferentes granulometrias de areia e taxas de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), para os três ciclos de filtração.

Pode-se observar pelas figuras, o mesmo comportamento da análise realizada por camada do leito filtrante, ou seja, para determinada taxa de filtração, o aumento da granulometria da areia proporcionou diminuição da quantidade de sólidos removidos, com exceção do tratamento relativo à taxa de filtração TF40, onde a granulometria G2 removeu uma menor quantidade de sólidos em comparação à granulometria G3. Independente do fato que os tratamentos receberam quantidades diferenciadas de SST, o incremento da taxa de filtração para determinada granulometria de areia proporcionou aumento na quantidade removida de sólidos, sendo esse incremento menor à medida que se aumenta a granulometria de areia, ou seja, granulometrias mais finas proporcionaram maiores diferenças de remoção no aumento da taxa de filtração, quando comparados às granulometrias mais grossas. Considerando a média dos valores entre os ciclos de filtração, fica mais evidente o comportamento comentado anteriormente, que é ilustrado Figura 39.

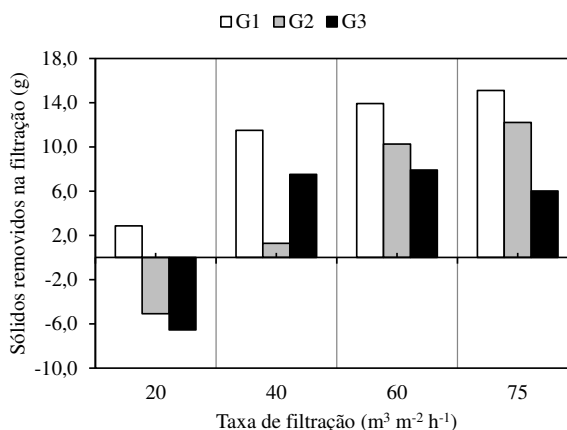


Figura 39. Remoção de sólidos no processo de filtração em todo o leito filtrante (MS_{Ftotal}) (g), considerando valor médio entre os ciclos de filtração.

Os resultados demonstraram que a redução da granulometria de areia, associado ao aumento da taxa de filtração, proporcionam maior grau de contaminação ou de sujeira da camada filtrante, especialmente na camada superficial do leito filtrante.

4.3.3 Eficiência de remoção na filtração pela análise de SST presentes na água (ER_{SST})

A Tabela 27 no Anexo apresenta os dados estimados de eficiência de remoção no processo de filtração (ER_{SST}) utilizando como parâmetro a determinação dos sólidos suspensos totais (SST) contidos na água, para as diferentes combinações de granulometria de areia, taxa de filtração, ciclos de filtração e tempos de coleta, para cada um dos três filtros de areia avaliados. O comportamento do processo de remoção na filtração para esse parâmetro pode ser observado nas Figuras 40, 41 e 42, que representam, respectivamente, o primeiro, segundo e terceiro ciclo de filtração. Os dados tabelados que apresentaram valores negativos de eficiência de remoção não foram apresentados nas figuras para melhor visualização dos resultados, sendo considerados como eficiência de remoção zero.

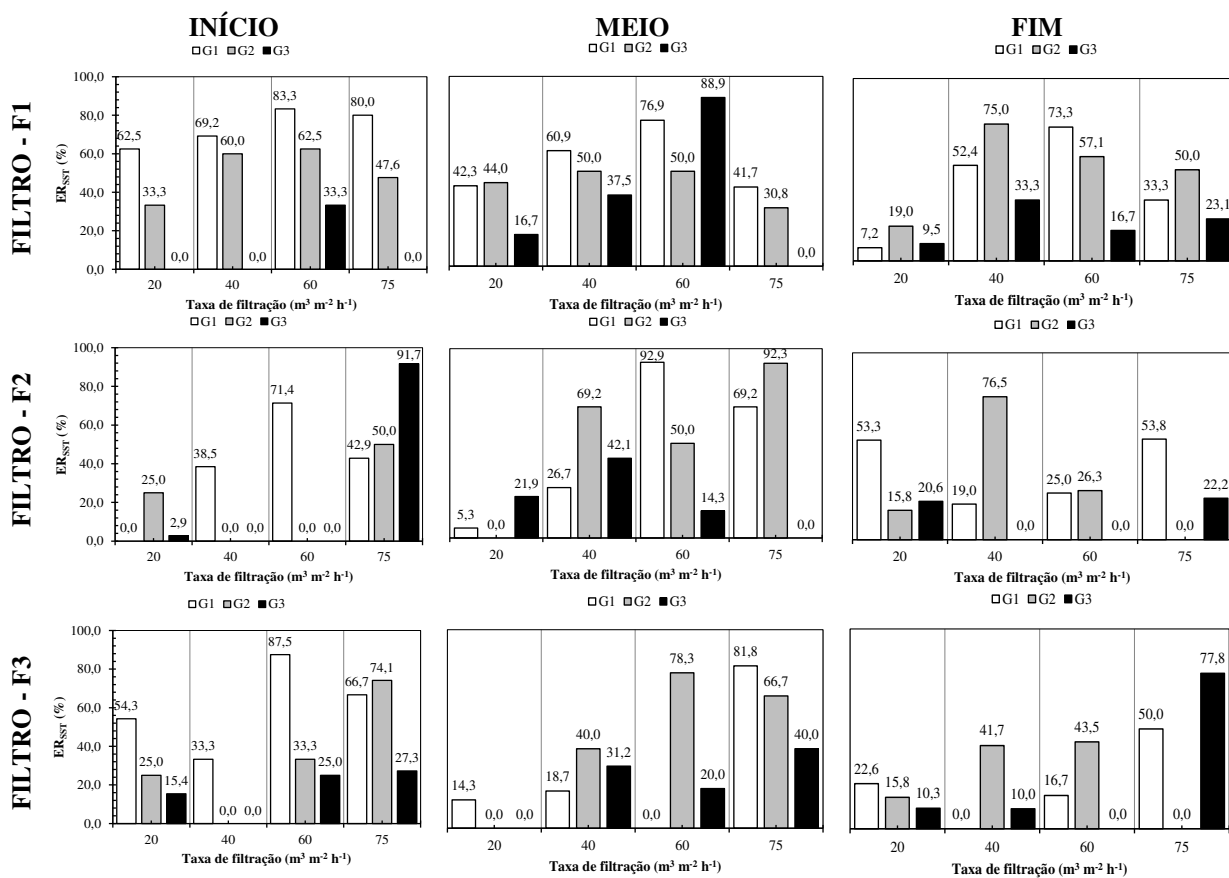


Figura 40. Eficiência de remoção no processo de filtração utilizando SST da água (ER_{SST}) (%) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometrias de areia, para o 1º ciclo de filtração em diferentes tempos de coleta (colunas), para os filtros F1, F2 e F3 (linhas).

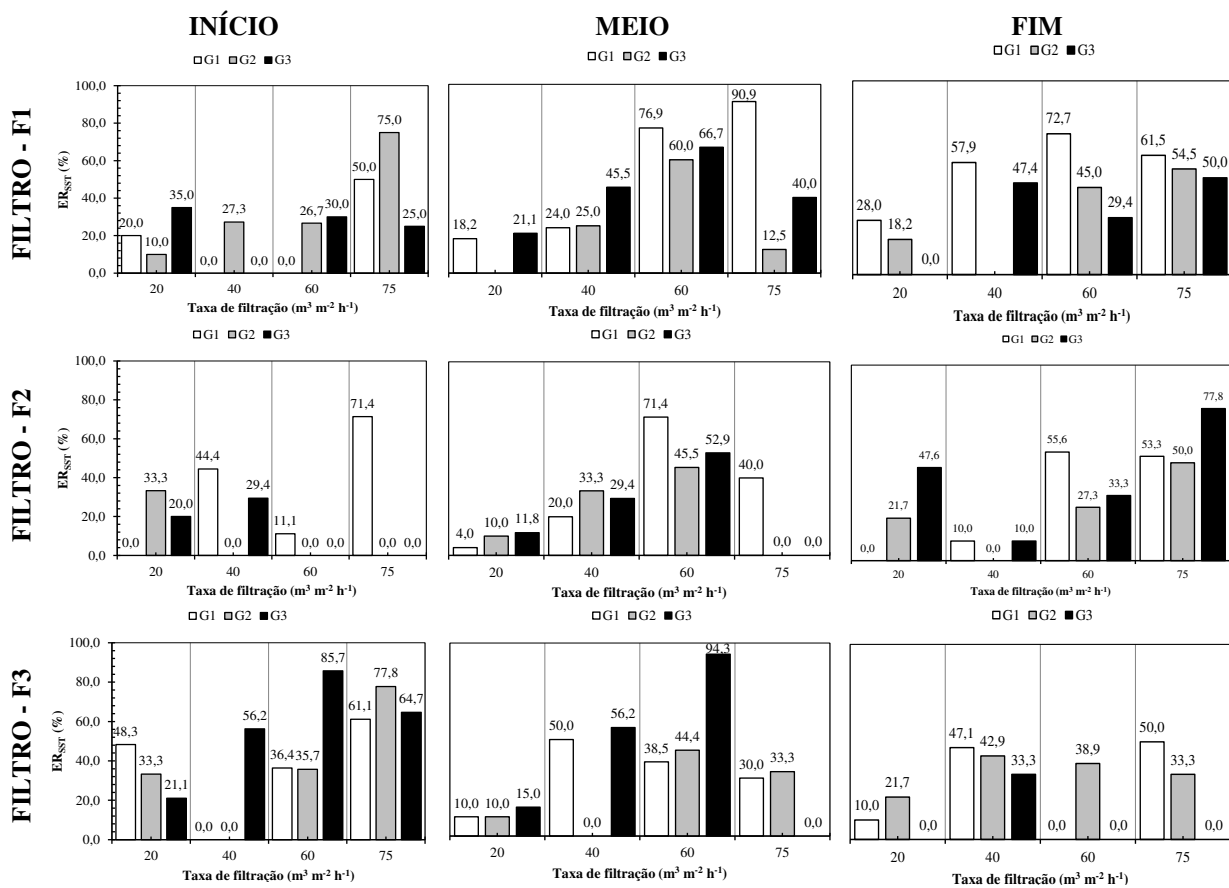


Figura 41. Eficiência de remoção no processo de filtração utilizando SST da água (ER_{SST}) (%) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometrias de areia, para o 2º ciclo de filtração em diferentes tempos de coleta (colunas), para os filtros F1, F2 e F3 (linhas).

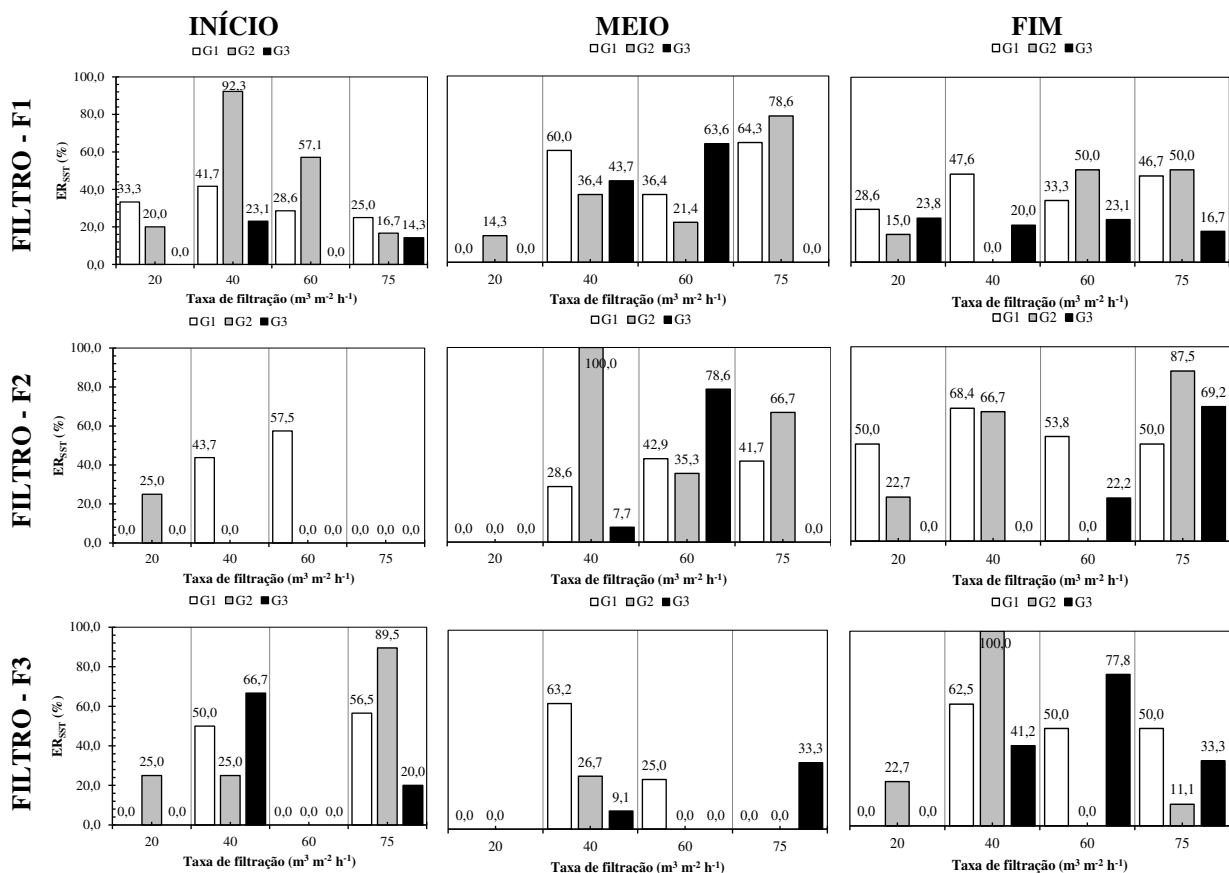


Figura 42. Eficiência de remoção no processo de filtração utilizando SST da água (ER_{SST}) (%) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometrias de areia, para o 3º ciclo de filtração em diferentes tempos de coleta (colunas), para os filtros F1, F2 e F3 (linhas).

a) Análise dos resultados do 1º ciclo de filtração

Comparando os filtros de areia avaliados (F1, F2 e F3) no 1º ciclo de filtração para as mesmas condições experimentais, observou-se variabilidade dos valores de ER_{SST} entre eles, o que motivou analisar os resultados de cada filtro de areia de forma individual, sem considerá-los como repetições experimentais.

Com base nos dados coletados no início da filtração (Figura 40), o tratamento que proporcionou maior ER_{SST} em F1 foi G1TF60 (83,3%), em F2 foi G3TF75 (91,7%) e em F3 foi G1TF60 (87,5%). No meio do processo, apesar de se manterem os maiores valores de taxa de filtração, os tratamentos que proporcionaram maior ER_{SST} foram diferentes do ocorrido no início, onde para F1 o melhor tratamento foi G3TF60 (88,9%), para F2 foi G1TF60 (92,9%) e para F3 foi G1TF75 (81,8%). Os tratamentos que apresentaram maior valor de ER_{SST} no início do processo apresentaram redução da remoção no meio do processo, sendo que os tratamentos com

maiores valores no meio do processo, desde o começo da filtração, observa-se incremento dos valores de ER_{SST} no tempo. Já no fim do processo, verificou-se que o tratamento G2TF40 para os filtros F1 e F2 (75% e 76,5% respectivamente), e G3TF75 para o filtro F3 (77,8%), proporcionaram os maiores valores de ER_{SST} , que são tratamentos distintos dos que obtiveram maior eficiência de remoção no início e no meio do processo de filtração. Os tratamentos que atingiram os maiores valores de ER_{SST} no fim do primeiro ciclo, quando considerados desde o início do processo, mostraram aumento da ER_{SST} até o fim do processo.

Analisando a ER_{SST} em função da taxa de filtração, observou-se incremento da remoção com o aumento da taxa de filtração em todos os períodos de avaliação (início, meio e fim do processo), principalmente entre TF60 e TF75, dependendo da combinação com a granulometria de areia. Essa faixa de valores de taxa de filtração está em concordância com o sugerido por Pizarro Cabelo (1996) e Benham & Ross (2002). Salienta-se, nesse caso, a possibilidade da influência da diferenciação entre tratamentos de taxa de filtração com relação à qualidade da água de cada ensaio, onde as taxas TF20 e TF40 utilizaram afluente com maior índice de SST, podendo ter isso resultado em diminuição da eficiência de remoção do tratamento.

Para melhor visualização da influência da taxa de filtração na eficiência de remoção, agrupou-se o conjunto de dados de sólidos suspensos dos três tempos de coleta por um valor médio, resultando em uma única informação de eficiência de remoção por ciclo. Os dados de eficiência de remoção na filtração que representam os ciclos de filtração ($ER_{SST \text{ ciclos}}$) estão no Anexo (Tabela 28), e a Figura 43 ilustra seu comportamento especificamente para o 1º ciclo de filtração.

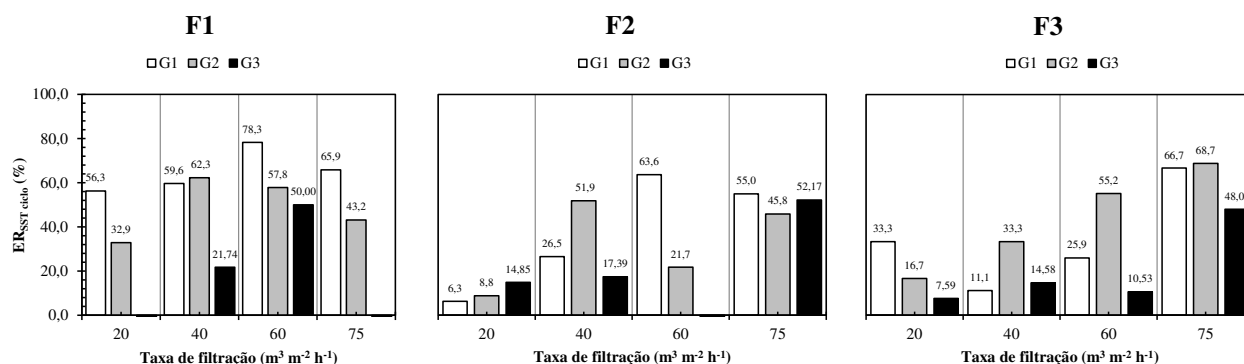


Figura 43. Eficiência de remoção na filtração utilizando SST da água considerando todos os dados coletados no tempo ($ER_{SST \text{ ciclo}}$) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), no 1º ciclo de filtração.

Para F1 houve um aumento de $ER_{SST \text{ ciclo}}$ com a taxa de filtração até TF60 utilizando G1 (78,3%) e G3 (50%), e até TF40 utilizando G2 (62,3%). Adicionalmente observou-se que para todas as taxas de filtração utilizadas em F1, a granulometria G1 possibilitou a ocorrência dos maiores valores de eficiência de remoção em relação às demais granulometrias avaliadas, sendo seguida das granulometrias G2 e G3. Esse comportamento está em concordância com as afirmações de Haman et al. (1994), onde a areia com menor granulometria proporciona maior remoção de partículas no processo de filtração em filtros de areia.

Em F2 também se observou incremento de $ER_{SST \text{ ciclo}}$ com a taxa de filtração, comportamento similar ao filtro F1 para G1 (TF60 – $ER_{SST \text{ ciclo}} = 63,6\%$) e G2 (TF40 - $ER_{SST \text{ ciclo}} = 51,9\%$), diferindo para G3 (52,17%), onde o aumento ocorreu até TF75. Com relação à granulometria de areia, observou-se que a granulometria mais fina (G1) promoveu maiores valores de eficiência apenas para as taxas de filtração TF60 e TF75. Em TF20 a granulometria G3 promoveu maior remoção de partículas e em TF40 a granulometria G2.

No filtro F3, especificamente na utilização da granulometria G1, não foi observado incremento da eficiência com a taxa de filtração como nos filtros F1 e F2. No entanto, observou-se que TF75 promoveu a maior remoção de partículas (66,7%) para essa granulometria. Analisando as granulometrias G2 (68,7%) e G3 (48%), também se observou incremento de $ER_{SST \text{ ciclo}}$ até TF75, concordando com o observado nos filtros F1 e F2. Em termos de granulometria, G2 promoveu os maiores valores de $ER_{SST \text{ ciclo}}$ para todas as taxas de filtração, com exceção da taxa TF20, onde a granulometria G1 apresentou remoção superior.

No primeiro ciclo de filtração, os filtros não apresentaram semelhança em termos de eficiência de remoção no processo de filtração, onde os tratamentos que apresentaram os maiores valores de ER_{SST} variaram no tempo. As maiores taxas de filtração, associadas às menores granulometrias de areia, promoveram maiores valores de eficiência de remoção de sólidos no 1º ciclo de filtração, contudo salienta-se a possibilidade de interferência da diferenciação da qualidade de água durante a realização do experimento, que pode ter reduzido a remoção dos tratamentos com menores taxas de filtração.

b) Análise dos resultados do 2º ciclo de filtração

No segundo ciclo de filtração também se observou variação dos filtros de areia com relação aos valores de ER_{SST} entre os tratamentos avaliados, sendo necessário compará-los individualmente.

No processo de filtração avaliado no início do segundo ciclo de ensaios, observou-se que o tratamento que proporcionou maior valor de ER_{SST} em F1 foi G2TF75 (75%), em F2 foi G1TF75 (71,4%), e em F3 foi G3TF60 (85,7%) (Figura 41). Ao analisar o comportamento da remoção no meio do processo de filtração, o tratamento G1TF75 em F1 atingiu a maior ER_{SST} (90,9%), em F2 foi G1TF60 (71,4%), e em F3 foi G3TF60 (94,3%). Salienta-se que os tratamentos com maiores valores de ER_{SST} no início do processo, apresentaram redução de ER_{SST} para F1 e F2 e aumento para F3, quando avaliados na metade da sua realização. Por outro lado, os tratamentos que apresentaram maior ER_{SST} no meio da filtração, mostraram um incremento de ER_{SST} a partir do início da filtração, para todos os filtros avaliados. Na avaliação realizada no final da filtração, F1 atingiu a maior ER_{SST} com o tratamento G1TF60 (72,7%), F2 com G3TF75 (77,8%) e F3 com G1TF75 (50%). Analogamente, considerando esses tratamentos desde o início da filtração, observou-se um aumento da remoção com o decorrer do tempo para os filtros F1 e F2, e diminuição para F3.

Com relação à influência da taxa de filtração na ER_{SST} , observou-se o mesmo comportamento ocorrido no 1º ciclo de filtração, onde em todos os momentos de avaliação houve um incremento de ER_{SST} com o aumento da taxa de filtração, com exceção da granulometria G3 que apresentou valores máximos para TF60, nos três filtros. Salienta-se que esses resultados podem ter sido afetados pelo fato das menores taxas de filtração terem utilizado afluente com maior índice de SST, gerando mudanças no processo de remoção de partículas.

Com as informações de SST no tempo total de filtração (valor médio) extraíram-se valores representativos do segundo ciclo de filtração, cujos dados podem ser observados na Tabela 28 no Anexo, e o seu comportamento ilustrado na Figura 44.

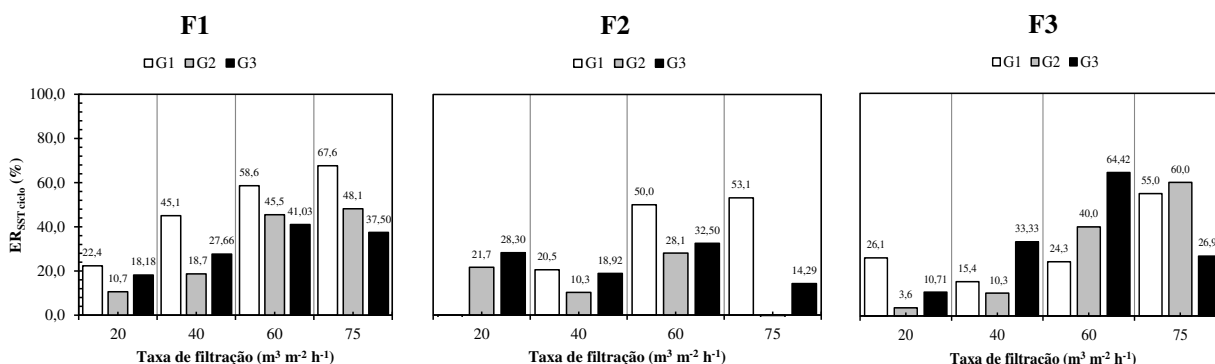


Figura 44. Eficiência de remoção na filtração utilizando SST da água considerando todos os dados coletados no tempo ($ER_{SST \text{ ciclo}}$) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$), no 2º ciclo de filtração.

Pode-se observar para todos os filtros, um aumento de $ER_{SST \text{ ciclo}}$ com o aumento da taxa de filtração, onde para F1 utilizando G1 (67,6%) e G2 (48,1%), o aumento ocorreu até a taxa de filtração TF75, e para G3 (41,03%) ocorreu até TF60. Considerando o efeito da granulometria de areia, observou-se que a menor granulometria (G1), para todas as taxas de filtração, foi a que proporcionou os maiores valores de $ER_{SST \text{ ciclo}}$ em comparação com as demais granulometrias de areia no filtro F1.

Em F2 observou-se o comportamento característico de aumento de $ER_{SST \text{ ciclo}}$ com a taxa de filtração apenas na utilização da granulometria G1 (53,1%), onde o aumento ocorreu até o limite do tratamento de taxa de filtração TF75. Para as granulometrias G2 (28,1%) e G3 (32,5%), a maior eficiência de remoção foi atingida utilizando a taxa de filtração TF60. Como em F1, a granulometria G1 proporcionou as maiores eficiências de remoção em todas as taxas de filtração, com exceção da taxa TF20, onde não se observou remoção no uso da granulometria G1. Essa observação esta em concordância com o relato de Phillips (1995), que salienta que o uso de menores valores de taxa de filtração pode proporcionar a criação de caminhos preferenciais no leito filtrante no deslocamento da água e das partículas suspensas, diminuindo a probabilidade das partículas serem removidas. Contudo, salienta-se que parte dessa observação neste trabalho pode ser em decorrência da utilização de afluentes com qualidades diferenciadas, onde nos ensaios com TF20 e TF40 a quantidade de SST foi maior.

Em F3 o aumento de $ER_{SST \text{ ciclo}}$ com a taxa de filtração ocorreu até TF75 para G1 (55%) e G2 (60%), e até TF60 para G3 (64,42%). Diferentemente do observado nos demais filtros (F1 e

F2), esse equipamento mostrou uma tendência das maiores granulometrias de areia em proporcionar maiores eficiências de remoção, especialmente para a taxa de filtração TF60.

Analogamente ao 1º ciclo de filtração, o ponto de máxima eficiência de remoção de SST no segundo ciclo de filtração varia no decorrer da filtração e entre tratamentos. Adicionalmente, o aumento da taxa de filtração associado com a redução da granulometria de areia proporcionou aumento da eficiência de remoção de SST, contudo, a afirmativa da influência da taxa de filtração na remoção de sólidos só é garantida caso comprove-se não haver influência da variação de SST observada neste experimento.

c) Análise dos resultados do 3º ciclo de filtração

No 3º ciclo de filtração, o comportamento diferenciado da ER_{SST} entre os filtros de areia avaliados se manteve idêntico aos demais dias de ensaio, requerendo que a análise fosse realizada de forma individualizada por filtro.

Na avaliação realizada no início da filtração do 3º ciclo (Figura 42) observou-se que o maior valor de ER_{SST} em F1 (92,3%) foi atingido pelo tratamento G2TF40, em F2 (57,5%) pelo tratamento G1TF60, e em F3 (89,5%) pelo tratamento G2TF75. Para a análise realizada no meio do processo de filtração, o tratamento G2TF75 (78,6%) proporcionou o maior valor de ER_{SST} em F1, G2TF40 (100,0%) em F2, e G1TF40 (63,2%) em F3. Na análise realizada no final do processo de filtração, observou-se que F1 atingiu o valor máximo de ER_{SST} (50%) para dois tratamentos (G2TF60 e G2TF75), em F2 no tratamento G2TF75 (87,5%) e no F3 em G2TF40 (100,0%). Avaliando os tratamentos que atingiram os maiores valores no final do ensaio, em todo o período de teste, é possível observar que eles apresentaram aumento do valor da ER_{SST} com o tempo. Contrariamente, os melhores tratamentos do início da filtração, apresentaram redução da remoção com o tempo de filtração.

Com relação à variação da ER_{SST} em função da taxa de filtração, salienta-se que parte dessa influência pode estar atrelada ao fato dos tratamentos com menores taxas de filtração terem sido realizados com maiores índices de SST, o que pode gerar uma redução na eficiência de remoção desses tratamentos. Contudo, observou-se o mesmo comportamento nos dois primeiros ciclos de filtração, onde o incremento a taxa de filtração determinou um aumento na eficiência de remoção de SST. Para melhor visualização das informações de ER_{SST} no 3º ciclo de filtração em

função da taxa de filtração, a Figura 45 mostra o seu comportamento, estando os dados correspondentes apresentados na Tabela 28 no Anexo.

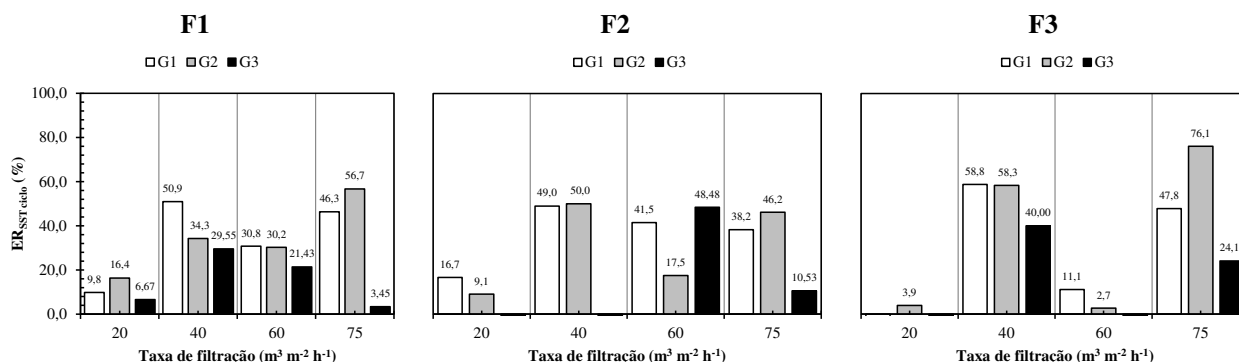


Figura 45. Eficiência de remoção na filtração utilizando SST da água considerando todos os dados coletados no tempo ($ER_{SST\ ciclo}$) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), no 3º ciclo de filtração.

Na Figura 45 é possível observar tendência de aumento da $ER_{SST\ ciclo}$ com a taxa de filtração, sendo que em algumas condições experimentais observaram-se pontos com diminuição dos valores, com posterior incremento (todos para TF60, sendo F1G1, F2G2, e F3G1 e F3G2), ou seja, o aumento da eficiência de remoção não foi semelhante ao observado nos ciclos de filtração anteriores. Para F1 observou-se aumento da remoção até TF40 para G1 (50,9%) e G3 (29,55%), e para G2 esse aumento foi observado até TF75 (56,7%). Para F2, o aumento da remoção ocorreu até TF40 para G1 (49%) e G2 (50%), e até TF60 para G3 (48,8%). Em F3 para G1 (58,8%) e G3 (40%) o aumento ocorreu até TF40, e até TF75 para G2 (76,1%). Diferentemente do ocorrido nos dois primeiros ciclos de filtração para todos os filtros de areia avaliados, observou-se que a granulometria G2 foi a que proporcionou maior remoção no 3º ciclo de filtração, sendo seguido das granulometrias G1 e G3 respectivamente.

Comparando a eficiência de remoção entre os ciclos de filtração, observou-se que no uso da granulometria mais fina (G1) há diminuição dos valores de remoção com o passar dos ciclos de filtração, e na medida em que se aumenta a granulometria, esse comportamento se altera. Para G2 ainda se observou diminuição, com exceção dos tratamentos F1G2TF75, F3G2TF20 e F3G2TF60, e para G3 já não se observou diminuição.

Como nos demais ciclos de filtração, pode-se verificar que o valor de eficiência de remoção é variável no tempo e entre ciclos de filtração, onde, de maneira geral, as maiores taxas de filtração proporcionam maiores remoções e, dependendo do tempo e do ciclo de filtração,

pode-se ter diferentes indicações de granulometria de areia para atingir o máximo valor de eficiência de remoção. Da mesma forma, a influência da taxa de filtração só pode ser confirmada comprovando não haver influência do aumento dos índices de SST observados nos tratamentos de menor taxa de filtração.

d) Análise dos resultados para a eficiência de remoção total ($ER_{SST\ total}$)

Na análise desse tópico foram consideradas todas as informações de sólidos suspensos totais de todos os tempos de coleta e ciclos de filtração, resultando em um único valor de eficiência de remoção para cada combinação de granulometria de areia e taxa de filtração, sendo que na

Tabela 29 no Anexo são apresentados os valores encontrados, e pela Figura 46 pode-se visualizar o comportamento da variação desse parâmetro para diferentes valores de taxa de filtração.

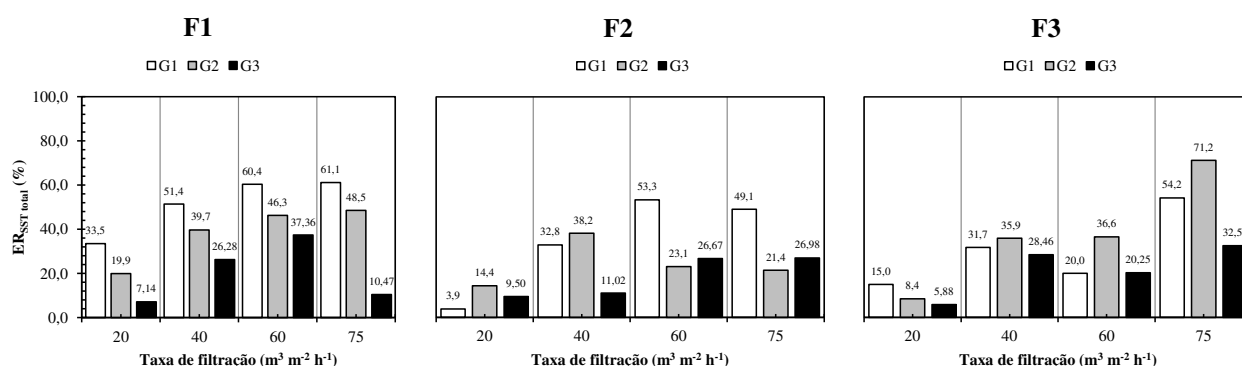


Figura 46. Eficiência de remoção na filtração utilizando SST da água considerando todos os dados coletados no tempo em todos os ciclos de filtração ($ER_{SST\ total}$) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração ($m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$), para os filtros F1, F2 e F3.

Analisando os resultados apresentados pelo filtro F1, observou-se aumento da $ER_{SST\ total}$ até TF75 para as granulometrias G1 (61,1%) e G2 (48,5%), sendo que para G3 (37,36%) esse aumento foi observado até TF60, com decréscimo posterior. No filtro F2, observou-se aumento da remoção até TF75 apenas para G3 (26,88%), sendo que para G1 (53,3%) esse aumento foi observado até TF60, reduzindo em TF75, e para G2 o aumento foi observado até TF40 (38,2%), com decréscimo nos maiores valores de TF. Observando os resultados de F3 verificou-se aumento da remoção até TF75 para todas as granulometrias avaliadas, onde para G1 atingiu-se 54,2% de eficiência, G2 alcançou 71,2%, e G3 atingiu 32,5%.

Apesar da variabilidade existente entre filtros, apresenta-se na Figura 47, a variação da $ER_{SST\ total}$ em função da taxa de filtração para as três granulometrias de areia a partir do valor médio entre filtros de areia, mostrando um comportamento do sistema de filtragem nos ensaios realizados.

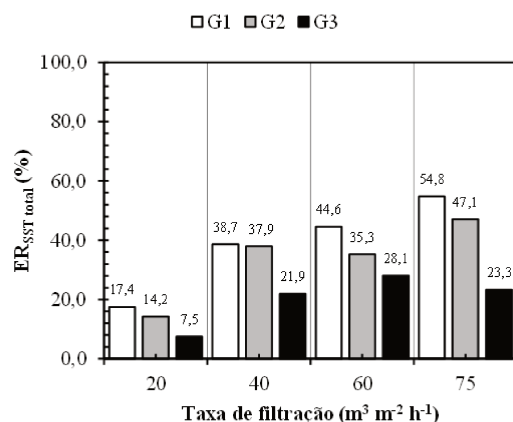


Figura 47. Variação da eficiência de remoção na filtração utilizando SST presentes na água ($ER_{SST\ total}$) (%) em função da taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e granulometria da areia, a partir do comportamento médio entre filtros considerando todos os dados coletados no tempo e em todos os ciclos de filtração.

Para o sistema de filtragem (composição dos filtros F1, F2 e F3), observou-se aumento da $ER_{SST\ total}$ até TF75 na utilização da granulometria de areia G1 e G2, e até TF60 no uso da granulometria de areia mais grossa (G3). No uso da granulometria G2, apesar de se observar uma redução em TF60, considerou-se essa diferença não significativa pela variabilidade dos dados.

A análise de eficiência de remoção na filtração, realizada a partir dos valores de SST presentes na água, mostrou que o aumento da taxa de filtração associada à diminuição da granulometria de areia promoveu aumento das remoções das partículas suspensas.

e) Limitações da análise

Como observado anteriormente, a quantidade de sólidos suspensos totais (SST) variou no decorrer dos ensaios experimentais em função da ocorrência pontual de eventos de chuva na área de abastecimento do reservatório utilizado no trabalho. Os ensaios dos tratamentos com menores valores de taxa de filtração (TF20 e TF40) foram realizados com afluentes com maior concentração de SST, o que pode interferir nos valores de eficiência de remoção, limitando a validação da influência da alteração da taxa de filtração na variação dos valores de eficiência de remoção. Os resultados do trabalho desenvolvido por Puig-Bargués et al. (2005), que utilizaram

efluente tratado de estação de esgoto, onde a contaminação biológica prevalece sobre a física, demonstraram que a filtração de águas com maiores concentrações de sólidos suspensos atingem maiores valores de eficiência de remoção em filtros de areia, diferentemente do encontrado nesse trabalho, onde predominou a contaminação física, e houve diminuição dos valores de eficiência. Posteriormente, será abordada nesse documento a análise da eficiência de remoção para diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água, que contribuirá na discussão dessa influência.

4.3.4 Eficiência de remoção no processo de filtração pela análise de SST presentes na areia (ER_{AREIA})

Além de trazer uma nova proposta de análise de desempenho para filtros de areia, a avaliação da eficiência de remoção do processo de filtração pela análise de SST presentes na areia proporciona uma avaliação global do processo para cada tratamento. Essa estimativa busca contornar o problema da representatividade de amostras pontuais de água realizadas no decorrer do tempo de filtração. Neste contexto, a Tabela 30 no Anexo apresenta os valores de eficiência de remoção no processo de filtração utilizando as informações de SST contidos na areia (ER_{AREIA}), para as diferentes combinações experimentais de taxa de filtração e granulometria de areia, em diferentes ciclos de filtração, podendo seu comportamento ser observado pela Figura 48.

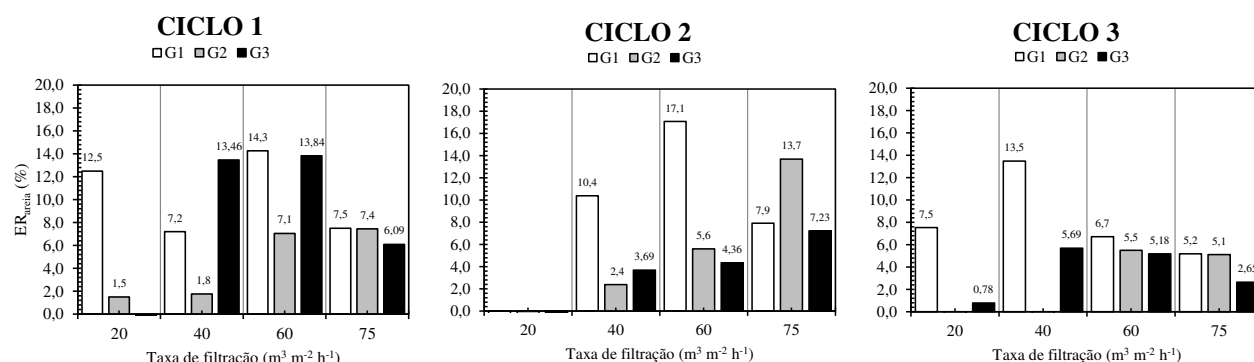


Figura 48. Eficiência de remoção no processo de filtração utilizando os valores de SST presentes na areia (ER_{AREIA}) (%), para as diferentes combinações de taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração, e granulometrias de areia.

Pela Figura 48 é possível observar que todas as condições experimentais apresentaram baixos valores de eficiência de remoção quando comparados com os valores obtidos utilizando a água como referência, com o maior resultado sendo alcançado pelo tratamento G1TF60, no

segundo ciclo de filtração (17,1%). Em termos de comportamento da variação da ER_{AREIA} , é possível observar que, fixando a granulometria de areia, o valor ER_{AREIA} aumenta com o aumento da taxa de filtração, sendo seu valor diferenciado para cada ciclo de filtração. Considerando o 1º ciclo de filtração, observou-se incremento da ER_{AREIA} até a taxa de filtração TF60 no uso das granulometrias de areia G1 e G3. Já com o uso da granulometria média (G2), esse aumento foi observado até o limite do tratamento de taxa de filtração (TF75). Observa-se que no uso da granulometria G1 houve primeiramente um decréscimo dos valores de ER_{AREIA} até TF40, com posterior incremento até TF60.

No 2º ciclo de ensaio, observou-se que os valores de ER_{AREIA} aumentaram para a G1 até TF60, e G2 e G3 até TF75. No último ciclo (3º ciclo), a variação dos valores de ER_{AREIA} mostrou aumento até TF40 para G1 e G3, e até TF60 para G2. Salienta-se que, a confirmação da influência da taxa de filtração na eficiência de remoção está atrelada à sustentação da não interferência da variação dos valores de SST nos tratamentos de taxa de filtração TF20 e TF40.

Adicionalmente, verificou-se na Figura 48 que, considerando a mesma taxa de filtração, observou-se que no 1º ciclo de filtração, na maioria dos casos, a granulometria de areia mais fina (G1) proporcionou os maiores valores de remoção, sendo seguido das granulometrias G2 e G3. A exceção observada trata-se dos tratamentos TF40, onde G3 apresentou o maior valor, e TF60, com $G3 > G2$. No 2º ciclo de filtração observou-se a mesma tendência, com exceção dos tratamentos TF40, com $G3 > G2$ e TF75, com $G2 > G1$. No último ciclo de filtração (3º ciclo), observou-se, sem exceção, que ER_{AREIA} no uso da granulometria G1 atingiu os maiores valores de remoção, sendo seguido respectivamente pelas granulometrias G2 e G3.

Apesar da concordância dos resultados desse tópico com as análises dos tópicos anteriores, onde a diminuição da granulometria de areia, associada ao aumento da taxa de filtração, proporcionaram aumento da eficiência de remoção da filtração utilizando como parâmetro os SST contidos na areia (ER_{AREIA}), a magnitude dos valores encontrados para esse tipo de parâmetro foi consideravelmente menor, colocando em tese a representatividade da avaliação da eficiência de remoção do processo de filtração mediante a utilização de amostras pontuais de água, que porventura podem não representar a eficiência de remoção real do processo.

4.3.5 Percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas nas águas utilizadas no experimento (% V_{DP})

É apresentando nas Figuras 49 e 50 o percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água de entrada do sistema para as diferentes condições experimentais (combinações de granulometria de areia, e taxas e ciclos de filtração) para as amostras coletadas no início e no final do processo de filtração, respectivamente.

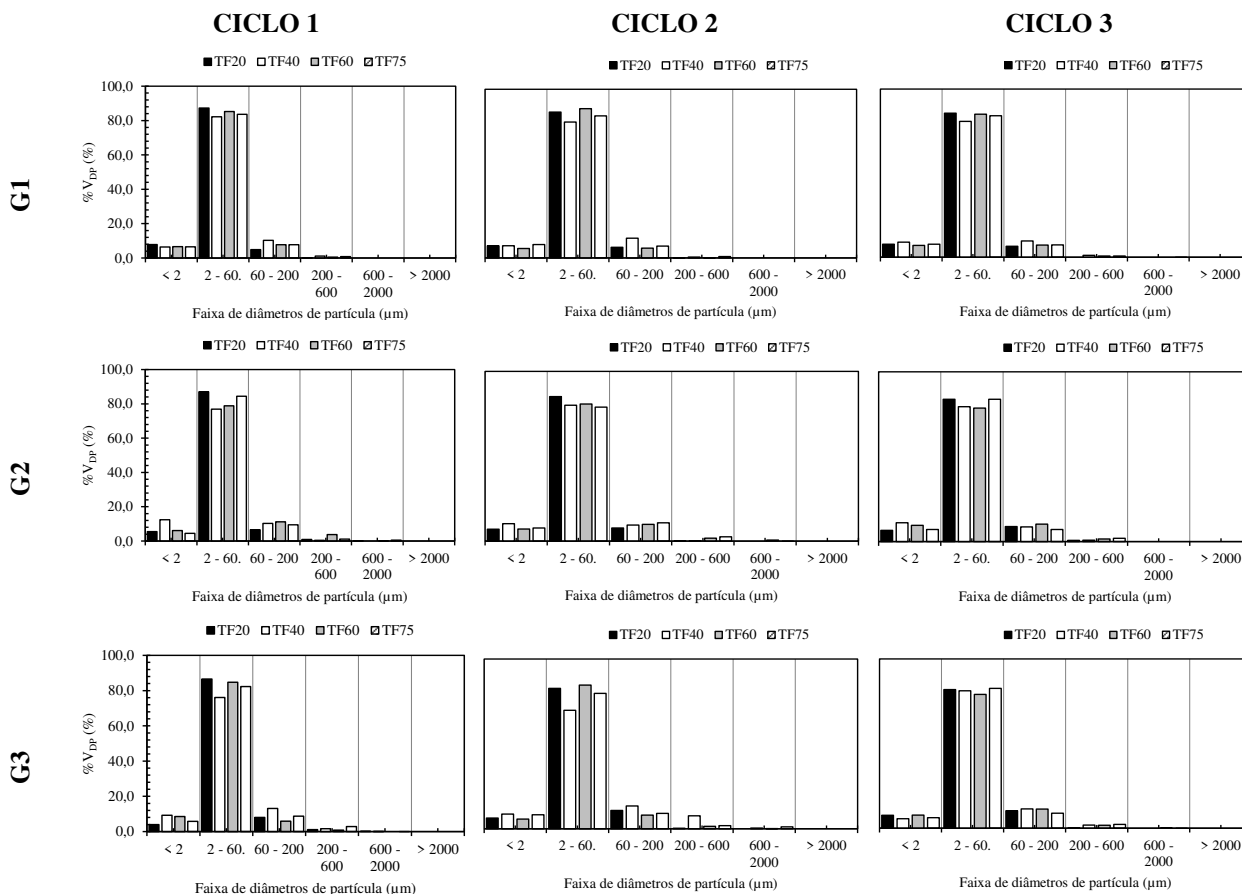


Figura 49. Comportamento médio entre filtros do percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água de entrada do sistema (% V_{DP}) (%), para amostras coletadas no início da filtração, para diferentes combinações de granulometria de areia, e taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração.

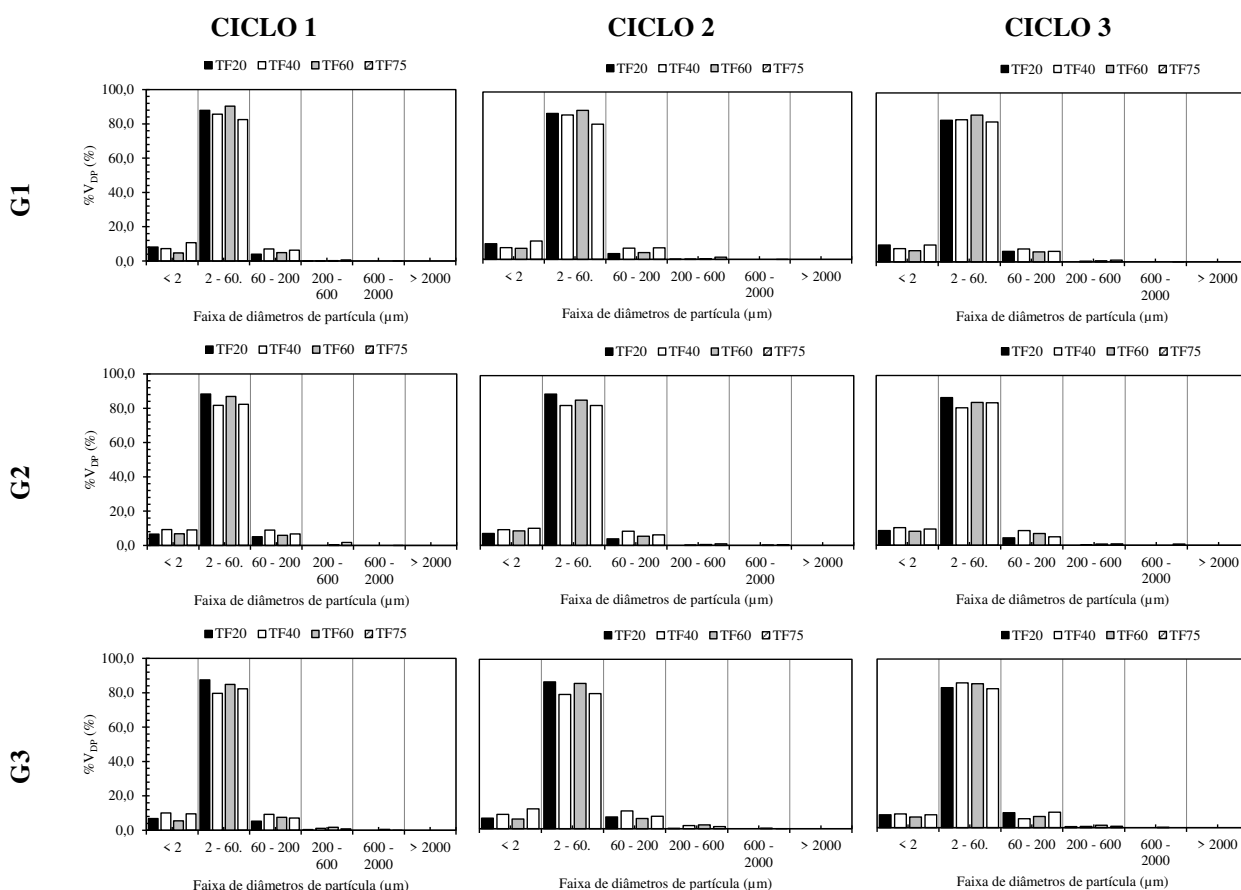


Figura 50. Comportamento médio entre filtros do percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água de entrada no sistema ($\%V_{DP}$ (%)), com amostras coletadas no final da filtração, para diferentes combinações de granulometria de areia, e taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração.

Pelas Figuras 49 e 50, é possível verificar a baixa variabilidade nos valores dos percentuais referentes a cada faixa de diâmetro de partículas em função da combinação dos tratamentos de taxa de filtração, granulometrias de areia e ciclos de filtração. Dessa forma, é possível afirmar que a concentração em volume do tamanho das partículas presentes na água dos ensaios foi constante entre os ensaios. Essa conclusão auxiliará a complementar a interpretação referente à variação eficiência de remoção em função da taxa de filtração que foram até aqui abordadas nos resultados anteriores.

São apresentados na Tabela 11 os valores médios e o desvio padrão do percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas encontradas na água de entrada do sistema, para cada filtro de areia avaliado, sendo o seu comportamento da sua variação mostrada na **Erro!**

Fonte de referência não encontrada..

Tabela 11. Dados médios e desvio padrão do percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água utilizada no experimento (% V_{DP}) (%).

Faixa de diâmetro de partícula (µm)	F1	F2	F3	Média entre filtros
< 2	7,59 (±2,43)	7,81 (±1,73)	7,96 (±2,32)	7,79 (±0,19)
2 - 60.	83,91 (±4,21)	82,89 (±4,23)	83,53 (±4,61)	83,44 (±0,51)
60 - 200	7,42 (±3,14)	8,10 (±3,05)	7,61 (±2,88)	7,71 (±0,35)
200 - 600	0,89 (±1,62)	1,11 (±1,30)	0,85 (±1,15)	0,95 (±0,14)
600 - 2000	0,13 (±0,51)	0,11 (±0,33)	0,03 (±0,13)	0,09 (±0,05)
> 2000	---	---	---	---

Diferentemente dos dados de sólidos suspensos totais da água ter sido diferente e maiores para os tratamentos de taxa de filtração TF20 e TF40, pode-se observar baixa variabilidade dos dados de percentual em volume de diâmetro de partículas entre todos os tratamentos. Apesar dos tratamentos de taxa de filtração TF20 e TF40 terem utilizado afluentes com maior massa de sólidos para determinado volume, isso não refletiu em diferenças em termos de percentual de volume de determinada faixa, mantendo a distribuição de partículas nas diferentes faixas de diâmetro de partículas.

Com base na média entre filtros, pode-se observar que em volume, a faixa referente ao silte (2 – 60 µm), corresponde a 83,44%. Em ordem decrescente, observou-se percentual em volume da faixa referente à argila (< 2 µm = 7,79%) e à areia fina (60 – 200 µm = 7,71%), seguido da faixa referente à areia média (200 – 600 µm = 0,95%) e, posteriormente, à areia grossa (600 – 2000 µm = 0,09%). Com relação à faixa do pedregulho, não foi observado nenhum volume correspondente.

Em resultado de trabalho de Puig-Bargués et al. (2005), no qual se avaliou a eficiência de remoção de partículas por tamanho de partículas, o maior percentual em termos de partículas estava inserido em partículas menores que 14 µm, ou seja, dentro da faixa relativa ao silte, estando em concordância com o percentual observado no presente trabalho.

O comportamento do percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água de saída do sistema é variável em função do tratamento utilizado (taxa de filtração combinada com determinada granulometria de areia em determinado ciclo de filtração, no início ou no final do processo de filtração). Esse comportamento será discutido no próximo tópico, referente à eficiência de remoção desse parâmetro.

4.3.6 Eficiência de remoção no processo de filtração por faixas de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP})

Da mesma forma que ocorreu com os valores de percentual em volume de diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água de entrada no sistema durante os ensaios, os valores estimados de eficiência de remoção apresentaram baixa variabilidade, permitindo a análise dos tratamentos pelo valor médio entre os filtros de areia. As Tabelas 31, 32 e 33 no anexo apresentam respectivamente os valores médios, o devido padrão e o coeficiente de variação da ER_{DP} , e a Figura 51 ilustra a variação dessa variável nas condições experimentais avaliadas.

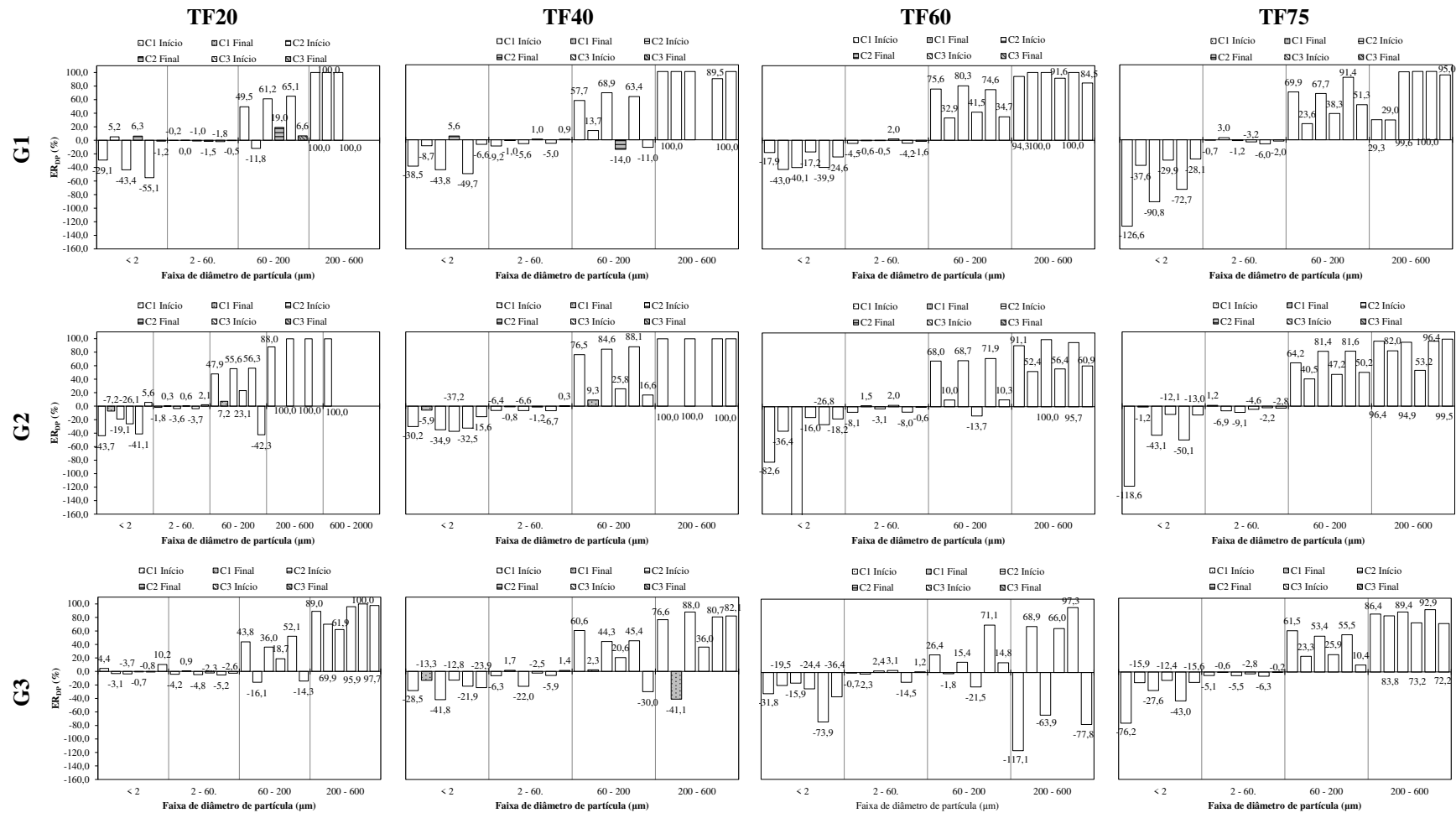


Figura 51. Variação média da eficiência de remoção no processo de filtração entre filtros de areia, para diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP}) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia, taxas ($m^3 m^{-2} h^{-1}$) e ciclos de filtração, no início e no fim do processo.

a) Análise da ER_{DP} nas diferentes faixas de diâmetro de partículas

Em todos os ensaios experimentais (combinação dos tratamentos de taxa de filtração, granulometria de areia, ciclo de filtração e tempo de coleta), é possível observar diferenças nos valores de ER_{DP} para as diferentes faixas de diâmetro de partículas, sendo que quanto maior era o diâmetro da partícula contida na água, maior foi o valor da eficiência de remoção dessa respectiva faixa.

Nas faixas de tamanho de partículas referentes à argila e ao silte, observaram-se valores negativos de ER_{DP} , o que significa que a quantidade de partículas dentro dessa classificação que saíam do equipamento no instante da amostragem era maior que a quantidade que entrava no filtro, provavelmente devido à ocorrência da etapa de desprendimento de partículas aderidas anteriormente ao meio filtrante antes do início do processo de filtração (DI BERNARDO & DANTAS, 2005). Nas situações para esses tamanhos de partículas onde se observou valores positivos de ER_{DP} , sua magnitude foi menor que os valores de eficiência das faixas com diâmetro de partículas maiores (areia fina, média e grossa). Neste contexto, pode afirmar que a faixa de diâmetro de partícula compreendida entre $<2 \mu\text{m}$ até $60 \mu\text{m}$ (argila e silte), considerando o afluente do experimento, não foi removida por este modelo de filtro de areia empregando as granulometrias de areia e taxas de filtração avaliadas.

Pizarro Cabelo (1996) salienta que a remoção de partículas em suspensão na água ocorre em partículas de determinado tamanho, no qual se estabeleceu o limite inferior como sendo igual a 1/12 a 1/10 do diâmetro efetivo do meio filtrante. Com base no diâmetro efetivo das areias avaliadas no experimento, para G1 a remoção de partículas é efetiva a partir de partículas com tamanho de 46 a 55 μm (limite inferior das partículas classificadas como silte), para G2 o limite inferior é de 64 a 77 μm , e para G3 é de 84 a 101 μm (ambas com limite inferior referente à areia fina). Contudo, mesmo tendo o limite inferior indicado para remoção de partículas de silte, a areia mais fina (G1) não foi capaz de reter esse tamanho de partícula da água de entrada do sistema.

Pela magnitude dos valores de eficiência de remoção apresentado para as faixas relativas à areia fina, média e grossa, comprova-se que as partículas de maior tamanho contidas na água possuem maior possibilidade de serem removidas. Apesar do indicativo da faixa da areia grossa, observou-se apenas um tratamento com a existência desses dados, que se refere ao tratamento G2TF20C1.

Os resultados da ER_{DP} estão em concordância com as observações de Testezlaf (2008), onde afirma que o filtro de areia é efetivo na faixa de remoção que vai desde parte da fração de silte até areia grossa, também confirmado por Dasberg & Bressler (1985). De acordo com os resultados encontrados por Puig-Bargués et al. (2005), no qual também foi avaliada a eficiência de remoção de partículas de diversos tamanhos, verificou-se que o filtro de areia apresentou eficiência de remoção positiva a partir de 25 μm , atingindo 100% de eficiência a partir do diâmetro de partícula igual a 125 μm . Estes resultados estão em concordância com o observado nesse experimento, onde se observou que as maiores remoções ocorreram a partir da faixa da areia fina, no qual o diâmetro de 125 μm se insere. A partir dos resultados encontrados é possível afirmar que o modelo de filtro de areia avaliado, operando com as taxas de filtração e granulometrias propostas, foi efetivo na remoção de partículas suspensas contidas na água compreendidas a partir da areia fina, ou seja, a partir de 60 μm .

Para melhor entendimento da influência das variáveis do experimento (taxa de filtração, granulometria de areia, ciclo de filtração e tempo de coleta) na ER_{DP} , serão abordados a seguir essa influência nas faixas referentes à areia fina e média, tendo em vista que a faixa referente à argila e ao silte não apresentou remoção no processo, e a faixa referente à areia grossa não gerou informações para todas as condições experimentais. Para melhor visualização do comportamento da variação ER_{DP} nas faixas da areia fina e média, no início e final da filtração, em função dos parâmetros avaliados no experimento, são apresentadas as Figuras 52 e 53, que representam a variação dos valores de ER_{DP} para areia fina e média, respectivamente. Salienta-se que alguns tratamentos de areia média não apresentaram informações de ER_{DP} , tal como: “Início da filtração” (G1TF20C3 e G2TF20C3), e “final” (G2TF20C1, G2TF40C1, G1TF40C2, G1TF40C2, G2TF20C2, G2TF40C2, G1TF20C3 e G2TF20C3). No caso dessas figuras, os valores negativos de ER_{DP} foram considerados iguais à zero para melhor visualização do processo.

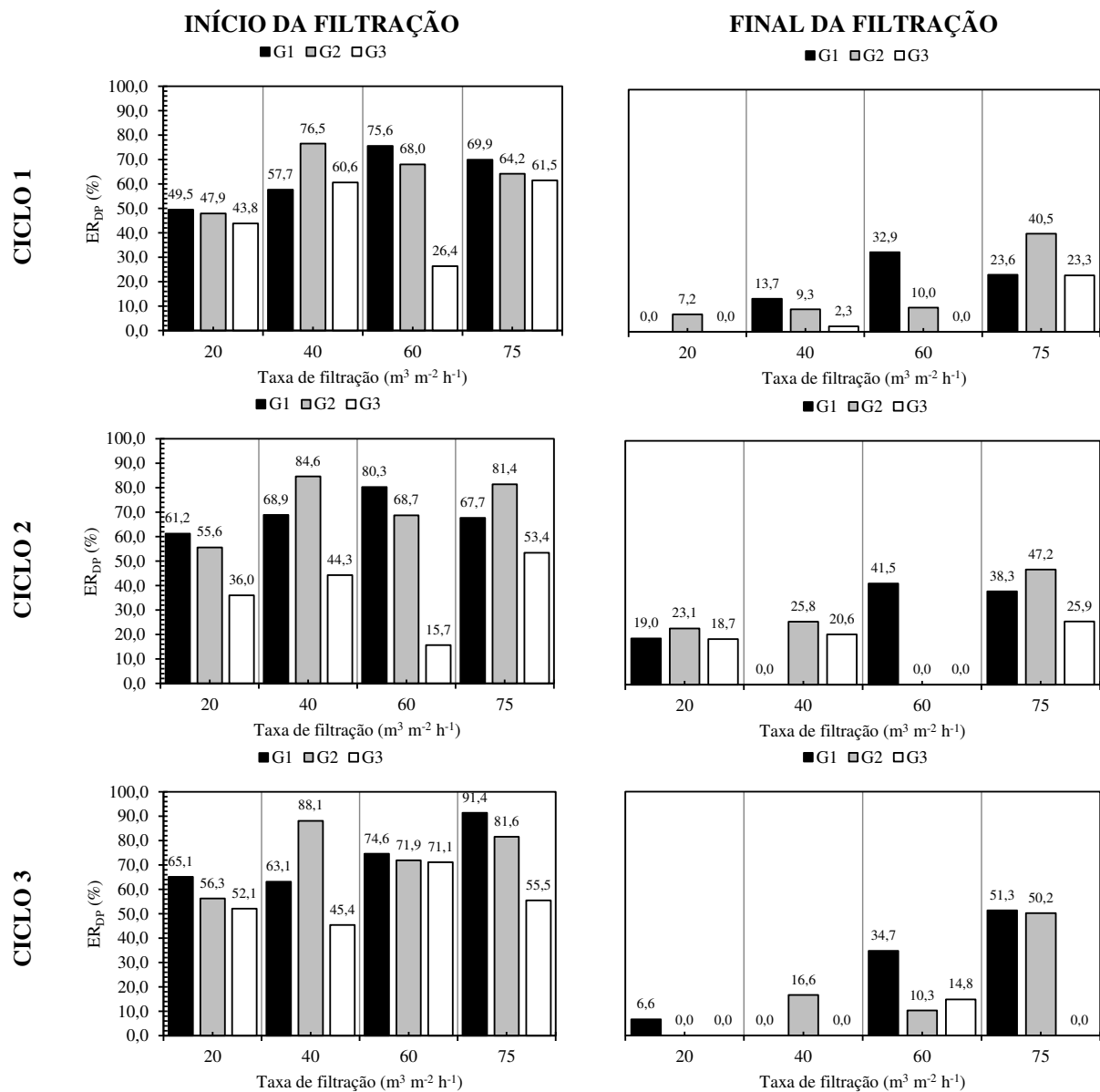


Figura 52. Eficiência de remoção no processo de filtração para a faixa de diâmetro de partícula relativa à areia fina (ER_{DP}) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia, taxas ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e ciclos de filtração, no início e no fim do processo de filtração.

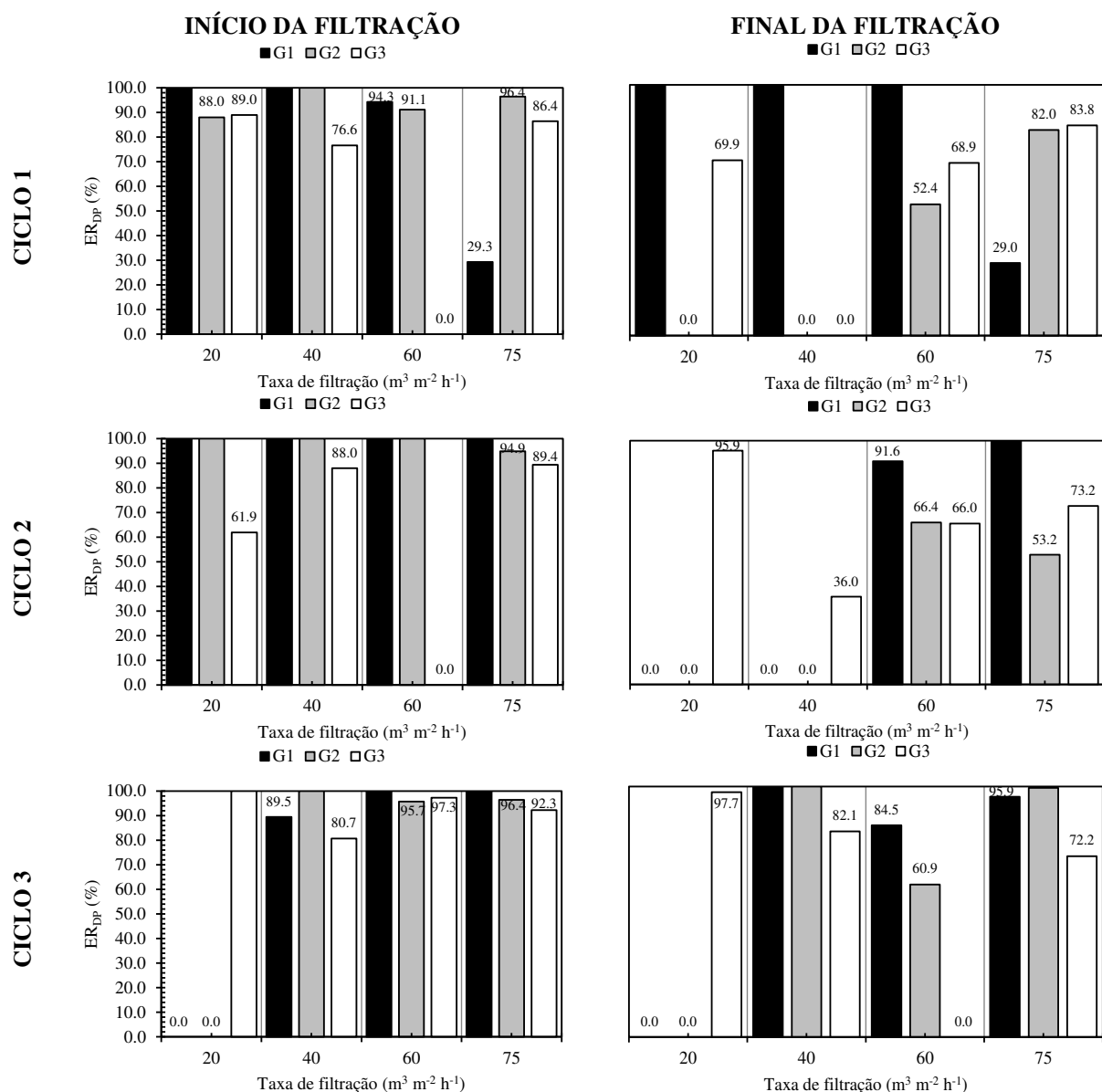


Figura 53. Eficiência de remoção no processo de filtração para a faixa de diâmetro de partícula relativa à areia média (ER_{DP}) (%), para diferentes combinações de granulometria de areia, taxas ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e ciclos de filtração, no início e no fim do processo de filtração.

b) Efeito da taxa de filtração na ER_{DP}

• 1º Ciclo de Filtração

Baseado nos resultados provenientes da coleta do início e do final da filtração observou-se que, de um modo geral, a ER_{DP} referente à faixa da areia fina aumentou com o incremento da taxa de filtração para todas as granulometrias de areia avaliadas (Figura 52). Para a granulometria

G1, o melhor resultado, tanto no início (68,0%), quanto no final do processo (32,9%), foi relativo ao uso da taxa de filtração TF60, com posterior decréscimo da ER_{DP} para TF75. Para as granulometrias G2 e G3 no início, a taxa TF40 proporcionou o ponto máximo de remoção (76,5 e 60,6% respectivamente), já com a amostragem no final do processo o ponto de máxima se deslocou para TF75 (40,5 e 23,3% respectivamente).

Com relação à faixa relativa à areia média (Figura 53), tanto no início quanto no final da filtração, com exceção de alguns tratamentos que apresentaram valores discrepantes (G1TF75: -29,3%, G3TF60: -117,1%, G3TF40: -41,1%), observou-se que a taxa de filtração não influenciou na diferenciação dos valores de ER_{DP} , apresentando valores superiores a 76% e 52,4% no início e no final do processo respectivamente.

Para o 1º ciclo de filtração, a influência da taxa de filtração nos valores de ER_{DP} ocorre em função da faixa de diâmetro de partícula avaliada, ou seja, quanto menor a partícula contida na água, mais evidente é a influência da taxa de filtração na remoção de partículas, apresentando pontos de máxima ER_{DP} diferenciados em função da combinação da taxa de filtração com a granulometria de areia. No presente trabalho, partículas de maior diâmetro são removidas para toda a faixa de taxa de filtração avaliada.

- **2º Ciclo de Filtração**

Analisando a faixa relativa à areia fina (Figura 52), com base nas informações da primeira coleta das amostras de água (início da filtração), observou-se para todas as granulometrias de areia uma tendência de aumento dos valores de ER_{DP} com o incremento da taxa de filtração. Com exceção de alguns tratamentos que apresentaram informações discrepantes (G2TF60: 68,7%, e G3TF60: 15,4%), no uso da granulometria G1, o tratamento que proporcionou maior remoção de partículas correspondentes à areia fina foi relativo à taxa de filtração TF60 (80,3%), para G2 observou-se TF40 (84,6%), e para G3 a taxa TF75 (53,4%). Já para análise feita com dados do final da filtração, observou-se a ocorrência do mesmo tratamento no uso das granulometrias G1 (TF60: 41,5%) e G3 (TF75: 25,9%), e para a granulometria média (G2) observou-se que a taxa de filtração que promoveu a maior remoção de areia fina foi o tratamento relativo à TF75 (25,9%). Com exceção da granulometria G3, observou-se o mesmo comportamento do ocorrido no primeiro ciclo de filtração, onde o melhor tratamento de taxa de filtração se manteve no uso da granulometria G1, e deslocou-se de TF40 para TF75 no uso da granulometria G2.

Analisando a retenção referente à faixa da areia média (Figura 53), tanto no início quanto no final do processo de filtração, observou-se que apenas no uso da granulometria de areia mais grossa (G3) como meio filtrante, houve modificação dos valores de ER_{DP} em função da taxa de filtração. De maneira geral é possível observar a tendência de aumento dos valores da ER_{DP} com o incremento da taxa de filtração baseado nos resultados do início do processo, com exceção do valor discrepante de G3TF60, e com maior valor alcançado pelo tratamento TF75 (89,4%). No final da filtração o comportamento foi diferenciado, onde se observou diminuição da ER_{DP} com o aumento da taxa de filtração, sendo o maior valor atingido no uso da taxa de filtração TF20 (95,9%).

No 2º ciclo de filtração, com exceção dos tratamentos associados à granulometria de areia G3 (no início e no final da filtração), observou-se que, como no 1º ciclo de filtração, a influência da taxa de filtração nos valores de ER_{DP} ocorre em função da faixa de diâmetro de partícula avaliada, ou seja, quanto menor a partícula contida na água, mais evidente é a influência da taxa de filtração na remoção de partículas, apresentando pontos de máxima ER_{DP} diferenciados em função da combinação da taxa de filtração com a granulometria de areia.

- **3º Ciclo de Filtração**

Iniciando a análise pela faixa correspondente à areia fina (Figura 52), observou-se no início da filtração evidente influência da taxa de filtração nos valores de ER_{DP} , com tendência de aumento da remoção de partículas de areia fina com seu incremento. O ponto máximo de ER_{DP} no uso da granulometria de areia G1 foi atingido pela taxa de filtração TF75 (91,4%), pela G2 no uso da taxa TF40 (88,1%), e por fim para a granulometria G3 atingiu-se 71,1% de remoção no uso da taxa de filtração TF60. No final da filtração os pontos de máxima eficiência se mantiveram para as granulometrias G1 (TF75: 51,3%) e G3 (TF60: 14,8%), alterando no uso da granulometria G2 que passou da taxa TF40 para TF75 (50,2%).

Com relação à remoção de areia média no terceiro ciclo de filtração (Figura 53), observou-se a influência da taxa de filtração apenas no uso da granulometria mais grossa (G3), no final do processo de filtração. De maneira geral observou-se tendência de diminuição dos valores de ER_{DP} com o aumento da taxa de filtração, com maior valor de remoção atingido com a taxa de filtração TF20 (97,7%).

Nesse ciclo de filtração também é observado que a influência da taxa de filtração é efetiva para diâmetros de partícula menores, onde quanto maior o diâmetro da partícula menor a influência na remoção. A exceção nesse caso foi observada na avaliação da faixa correspondente à areia média, onde a granulometria de areia mais grossa no final do processo de filtração mostrou haver influência da taxa de filtração na ER_{DP} .

c) Influência da granulometria de areia do leito filtrante na ER_{DP}

É possível observar em todos os ciclos de filtração, tanto no início quanto no final do processo, para todas as taxas de filtração avaliadas, bem como na avaliação das faixas de diâmetro de partículas referentes à areia fina e média, que a diminuição da granulometria de areia do leito filtrante proporcionou aumento da eficiência de remoção das partículas, fato também observado nas análises anteriores de SST contidas na água e na areia, também salientado por Haman et al. (1994). Algumas exceções foram observadas, onde os valores não corroboraram com a tendência acima salientada (“areia fina” tem-se C1TF40, C2TF40, C2TF75 e C3TF40 no início da filtração, e C1TF20 e TF75, C2TF20, TF40 e TF75, e C3TF40 no final. Para a “areia média” tem-se C1TF75 e C3TF40 no início, e C1, C2 e C3 em TF75 no final da filtração).

d) Efeito do ciclo de filtração sobre a ER_{DP}

Iniciando a análise pela faixa retenção correspondente à areia fina (Figura 52), observou-se a ocorrência da variação dos valores de ER_{DP} no decorrer dos ciclos de filtração. Com base nas informações coletadas no início do processo de filtração, observou-se aumento dos valores de ER_{DP} no decorrer dos ciclos, para as granulometrias de areia G1 e G2 combinadas com todas as taxas de filtração avaliadas (exceção dos tratamentos TF40 e TF60 com a granulometria G1). Para a granulometria de areia mais grossa (G3) observou-se comportamento diferenciado, onde do 1º para o 2º ciclo houve diminuição da remoção para esse tamanho de partículas e, posteriormente, observou-se um aumento nesse valor. Essas observações mostraram pelo menos no início do processo de filtração, que com o uso do meio filtrante este adquiri propriedades que aumentam a capacidade de remoção de partículas correspondentes à de areia fina. Já no final do processo de filtração, é possível observar para todas as combinações de taxa de filtração e granulometria de areia que não há comportamento definido, sendo que em alguns casos

observou-se aumento da remoção até o 2º ciclo com posterior decréscimo, e em outros é possível observar diminuição da remoção com posterior incremento.

Com relação à variação de ER_{DP} referente à faixa correspondente à areia média (Figura 53), observou-se influência do ciclo de filtração apenas no final da filtração na utilização da granulometria de areia mais grossa (G3), onde para as taxas de filtração TF20 e TF40 apresentaram aumento da remoção no decorrer dos ciclos de filtração e para as taxas TF60 e TF75 diminuição dos valores de ER_{DP} .

e) Efeito do tempo de filtração ou do momento de coleta na ER_{DP}

Com relação à eficiência de remoção de partículas de areia fina (Figura 52), é possível observar, em todas as combinações de taxa de filtração e granulometrias de areia e para todos os ciclos de filtração, que ocorreu diminuição dos valores de ER_{DP} com o passar do tempo de filtração. Essa observação evidencia a ocorrência do desprendimento de partículas, uma das etapas do processo de filtração em filtros de areia salientado por Di Bernardo & Dantas (2005).

Já com relação às informações de ER_{DP} de areia média, no uso da granulometria de areia mais fina (G1) observou-se não haver variação temporal da remoção de partículas de areia média, bem como no uso da granulometria de areia média (G2) nas duas menores taxas de filtração (TF20 e TF40). Para os tratamentos G2TF60 e G2TF75, e para todas as combinações de taxa de filtração com a granulometria de areia G3, observou-se que a remoção de partículas de areia média diminuiu com o tempo de filtração, com exceção dos tratamentos: G2TF75C3, G3TF20C2, G3TF40C3, G3TF60C1 e G3TF60C2.

f) Considerações finais

O modelo de filtro de areia avaliado com o afluente disponível para os ensaios e operando com as taxas de filtração e granulometrias de areia propostas se mostrou efetivo na remoção de partículas compreendidas a partir do tamanho correspondente à areia fina. Dentro da faixa de remoção encontrada para o equipamento, verificou-se que quanto menor a partícula contida na água, maior a influência da taxa de filtração na sua remoção. O incremento da taxa (dentro da faixa de influência), e a diminuição da granulometria de areia, proporcionam aumento da ER_{DP} , alterando seu valor entre os ciclos, e diminuindo a remoção com o tempo de filtração para as menores partículas contidas na água.

4.4 Avaliação do processo de retrolavagem

Os ensaios de retrolavagem foram executados nos leitos filtrantes contaminadas de forma diferenciada pela aplicação de diferentes taxas de filtração nos tratamentos de filtração, que denominados na avaliação de retrolavagem pelo grau de sujidade GS1, GS2, GS3 e GS4, correspondentes aos tratamentos de taxa de filtração TF20, TF40, TF60 e TF75, respectivamente.

4.4.1 Contaminação dos leitos filtrantes antes do processo de retrolavagem

Utilizando as informações presentes no item 4.3.2, referente ao grau de sujidade da camada filtrante, pode-se concluir que os tratamentos com a granulometria de areia mais fina, associado à utilização das maiores taxas de filtração, proporcionaram maior contaminação do leito filtrante anterior ao processo de retrolavagem (Figura 38). Estimando a média entre ciclos de filtração, tem-se pela Figura 54 os valores médios de sólidos removidos na filtração anterior ao processo de retrolavagem.

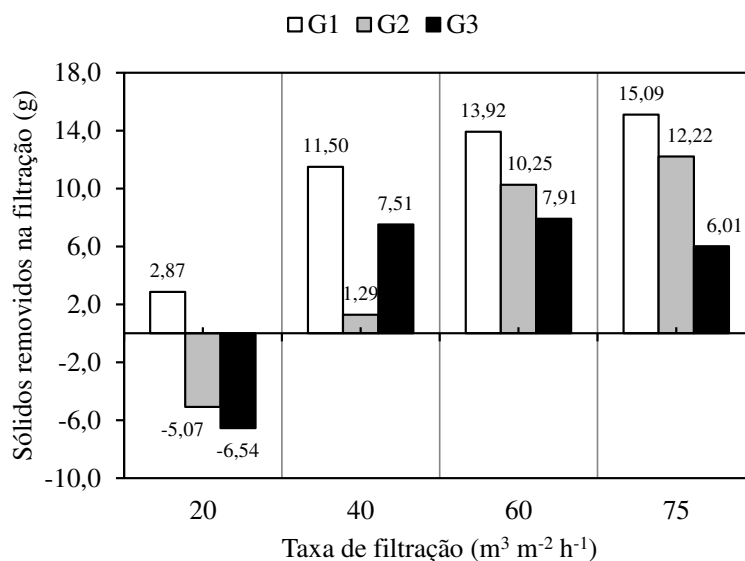


Figura 54. Contaminação média do leito filtrante antes do processo de retrolavagem (g) para diferentes combinações de taxa de filtração (m³ m⁻² h⁻¹) e granulometria de areia.

Nesse sentido, o grau de sujidade GS1, referente ao tratamento de taxa de filtração TF20, variou de -6,54 g para G3; -5,07 g para G2; e 2,87 g para G1. Para GS2 (TF40) temos 7,51 g (G3), 1,29 g (G2) e 11,50 g (G1). GS3 (TF60) apresentou 7,91 g (G3), 10,25 g (G2) e 13,92 g (G1). E, para GS4 (TF75) mostrou 6,01 g (G3), 12,22 (G2) e 15,09 g (G1).

4.4.2 Velocidade superficial nos ensaios de retrolavagem

Os ensaios de retrolavagem foram executados para manter uma expansão do leito filtrante em torno de 25% de acordo com orientações de Brouckaert (2004). Como o meio filtrante utilizado nos ensaios possuíam granulometrias diferentes, para manter o mesmo nível de expansão foi necessário o aumento da velocidade superficial, como preconizado por Ramirez (2010). É apresentada na Tabela 12 a velocidade superficial média utilizada para cada granulometria e filtro de areia.

Tabela 12. Valores médios de velocidade superficial (V_s) (m h^{-1}) utilizados nos experimentos de retrolavagem para cada granulometria de areia e filtro de areia¹.

Granulometria	Filtro - F1		Filtro - F2		Filtro - F3	
	V_s (m h^{-1})	CV (%)	V_s (m h^{-1})	CV (%)	V_s (m h^{-1})	CV (%)
G1	80,40	0,90	79,57	0,52	79,41	0,78
G2	95,74	1,42	95,20	1,75	93,76	2,38
G3	93,18	3,24	92,18	3,38	91,36	3,21

¹CV – coeficiente de variação.

Pode-se observar baixa variabilidade dos dados de velocidade superficial, onde o valor máximo foi observado para o tratamento utilizando a granulometria de areia G3 com o filtro de areia F2 (3,38%). É importante salientar que com os ensaios experimentais correspondentes a granulometria G3 não foi possível atingir totalmente os 25% de expansão da camada filtrante, pelo fato da bomba centrífuga do módulo não proporcionar a vazão necessária para a fluidização a nesse nível.

4.4.3 Caracterização hidráulica dos filtros de areia no processo de retrolavagem

Da mesma forma que na avaliação da filtração, no processo de retrolavagem realizou-se a caracterização hidráulica dos filtros de areia na condição de filtro vazio, com objetivo de obter informações isoladas de cada equipamento com a variação da velocidade superficial. No uso dos equipamentos com meio filtrante, avaliou-se a variabilidade temporal da perda de pressão e da velocidade superficial durante os ensaios de retrolavagem, bem como a influência da granulometria de areia e dos diferentes níveis de contaminação alcançados pelos tratamentos de filtração (GS1, GS2, GS3 e GS4) na variação da perda de pressão durante a limpeza do leito filtrante.

a) Caracterização hidráulica dos filtros de areia vazios no processo de retrolavagem

Na Tabela 13 são apresentados os valores de perda de pressão correspondentes aos ensaios dos filtros de areia sem meio filtrante e com escoamento com a direção coincidente com a retrolavagem, para as velocidades superficiais de 20, 40, 60, 80 e 100 m h⁻¹.

Tabela 13. Valores médios de perda de pressão (kPa) dos filtros de areia avaliados em diferentes velocidades superficiais (m h⁻¹) na comparação dos filtros pelo teste Tukey (P<0,05) no processo de retrolavagem¹.

Filtro de areia	Velocidade superficial				
	20 m h ⁻¹	40 m h ⁻¹	60 m h ⁻¹	80 m h ⁻¹	100 m h ⁻¹
F1	0,33 a	2,14 b	4,76 b	7,86 b	15,22 b
F2	0,38 a	2,77 a	5,63 a	9,32 a	15,90 a
F3	0,63 a	2,54 a	4,91 b	8,98 a	13,33 c

¹: Médias seguidas por letras diferentes entre filtros de areia diferem entre si pelo teste Tukey (P<0,05).

Pode-se observar na Tabela 13, que apenas para a velocidade superficial de 20 m h⁻¹ não houve diferenciação estatística entre os valores de perda de pressão para os filtros ensaiados. Com o aumento do valor das velocidades superficiais observou-se a existência de diferenciação estatística, com uma tendência dos filtros F2 e F3 apresentarem os maiores valores de perda de pressão. Para 100 m h⁻¹ observou-se que o filtro F2 foi o que apresentou maior valor de perda de pressão, sendo seguido pelos filtros F1 e F3 respectivamente. Análogo aos resultados de Deus et al. (2013), que avaliaram a influência das dimensões da placa difusora no comportamento hidráulico do processo de filtração de determinado modelo de filtro de areia, pode-se afirmar que crepinas ou sistemas de drenagem com diferentes dimensões podem determinar resistências distintas ao fluxo no processo de retrolavagem, atribuindo perdas de pressão diferenciadas. Essas dimensões podem ser resultado do processo de fabricação dos acessórios internos, ou também causadas pela disposição das peças no momento da montagem do sistema de drenagem. Especificamente com relação à crepina do modelo de filtro de areia avaliado, pode-se verificar que o nível da pressão de aperto do seu corpo na sua montagem pode determinar áreas de aberturas diferenciadas, que podem afetar o desempenho hidráulico do equipamento.

Seguindo orientações de Ramirez (2010), ajustou-se o modelo exponencial aos dados de perda de pressão em função da velocidade superficial, podendo-se pela Figura 55 observar a variação dos valores e pela Tabela 34 no Anexo a análise de regressão.

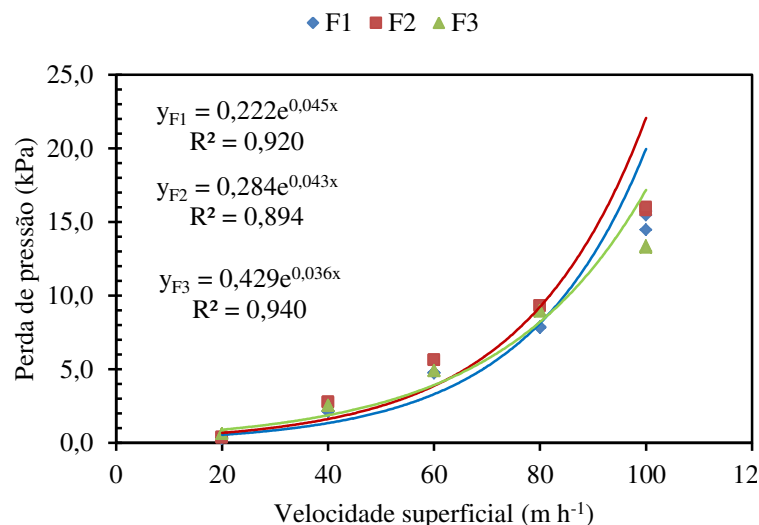


Figura 55. Gráficos e modelos de regressão para perda de pressão (kPa) em função da velocidade superficial (m h⁻¹) para o processo de retrolavagem dos filtros de areia sem meio filtrante.

Fica evidente pela Figura 55 a diferenciação da perda de pressão do filtro F2 a partir da velocidade superficial de 80 m h⁻¹, sendo seguido dos filtros F1 e F3 respectivamente. Adicionalmente pode-se observar que os dados ajustaram estatisticamente ao modelo proposto por Ramirez (2010), podendo representar no mínimo 90% da variabilidade dos dados de acordo com o valor dos coeficientes de determinação alcançados em cada filtro.

b) Variabilidade temporal da perda de pressão no processo de retrolavagem

A Tabela 35 no Anexo apresenta os resultados da avaliação da perda de pressão durante o processo de retrolavagem para diferentes tempos de análise. Como não houve diferença estatística entre as condições experimentais avaliadas, são apresentados na Tabela 14 os valores médios de perda de pressão no processo de retrolavagem para diferentes combinações.

A hipótese inicial desse estudo era de que, devido à diferenciação na quantidade de partículas aderidas à camada filtrante nos diferentes ensaios de filtração (GS1, GS2, GS3 e GS4), seria gerada uma resistência adicional ao escoamento na retrolavagem, podendo haver diferenciação da perda de pressão no tempo, à medida que a camada filtrante fosse limpa. No entanto, não se observou modificação da perda de pressão no decorrer do tempo de retrolavagem, para nenhuma combinação de granulometria de areia e grau de sujidade da camada.

Tabela 14. Dados médios de perda de pressão (kPa) no processo de retrolavagem em função das diferentes combinações de graus de sujidade do leito filtrante, granulometrias de areia e ciclos de filtração, para todos os filtros de areia avaliados.

Graus de sujidade	Ciclo de filtração	Granulometria - G1			Granulometria - G2			Granulometria - G3		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
GS1	1	12,62	14,06	13,52	17,71	21,68	17,94	17,12	21,43	18,86
	2	12,25	15,01	13,46	17,54	21,90	18,11	17,01	20,95	18,62
	3	12,92	15,19	13,34	17,33	21,35	18,22	16,78	20,78	18,41
GS2	1	12,65	16,54	13,62	17,57	22,56	18,52	13,32	17,84	14,36
	2	12,38	15,53	13,78	17,91	22,74	18,58	14,92	19,87	16,38
	3	12,76	16,05	13,77	17,57	22,48	18,20	17,37	22,51	19,23
GS3	1	12,75	16,72	13,81	17,04	21,81	18,49	17,30	22,16	18,85
	2	13,01	16,52	13,67	16,58	21,23	18,02	16,77	21,64	17,75
	3	13,01	16,24	13,41	16,90	21,77	18,52	16,17	20,48	17,70
GS4	1	12,75	16,67	14,81	17,42	23,12	18,40	15,99	21,45	17,55
	2	13,77	17,15	14,48	17,43	23,09	18,69	16,81	21,77	18,55
	3	12,56	17,01	14,54	16,38	21,76	17,98	16,88	21,66	18,48

c) Caracterização hidráulica dos filtros de areia com meio filtrante no processo de retrolavagem

Diferentemente da caracterização hidráulica com os filtros vazios, na avaliação hidráulica dos equipamentos na retrolavagem com a presença do meio filtrante, não se variou a velocidade superficial da água. Neste caso, o valor da velocidade superficial empregado foi resultado da necessidade de expansão do leito filtrante de 25% para as diferentes granulometrias de areia avaliadas. Na Tabela 15 estão os valores médios de perda de pressão no processo de retrolavagem, para os filtros de areia avaliados, comparados estatisticamente pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Tabela 15. Valores médios da perda de pressão (kPa) durante o processo de retrolavagem e comparação pelo teste Tukey ($P < 0,05$) para as diferentes combinações de granulometrias de areia e graus de sujidade da camada filtrante¹.

Granulometria de areia	Filtro de areia	Grau de sujidade			
		GS1	GS2	GS3	GS4
G1	F1	12,60 b	12,60 c	12,92 c	13,03 c
	F2	14,76 a	16,04 a	16,49 a	16,94 a
	F3	13,44 b	13,72 b	13,63 b	14,61 b
G2	F1	17,52 c	17,68 c	16,84 c	17,07 b
	F2	21,64 a	22,59 a	21,60 a	22,65 a
	F3	18,09 b	18,43 b	18,34 b	18,36 b
G3	F1	16,97 c	15,20 a	16,75 b	16,56 c
	F2	21,05 a	20,07 a	21,42 a	21,63 a
	F3	18,63 b	16,66 a	18,10 b	18,19 b

¹Médias seguidas por letras diferentes entre filtros de areia para determinada granulometria de areia e grau de sujidade diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Pela Tabela 15, pode-se observar diferenciação estatística em quase todos os tratamentos, com exceção do tratamento para a areia G3 na condição GS2. De maneira geral, observou-se que o filtro F2, semelhante ao ensaio sem meio filtrante, apresentou os maiores valores de perda de pressão, sendo seguido dos filtros F1 e F3 respectivamente.

d) Influência da granulometria de areia na perda de pressão do processo de retrolavagem

Como relatado no item 4.4.2, para se obter o mesmo nível de expansão no leito filtrante em todos os ensaios de retrolavagem, adequaram-se velocidades superficiais específicas para cada granulometria de areia, onde as maiores granulometrias necessitaram de maiores valores de velocidade superficial. Entretanto, a velocidade superficial exigida na utilização da granulometria mais grossa (G3) não foi atingida por restrições do sistema de bombeamento utilizado. Na Tabela 16 estão os valores médios de perda de pressão no processo de retrolavagem e os resultados da comparação de médias pelo teste Tukey ($P > 0,05$) na avaliação da granulometria de areia.

Tabela 16. Valores médios de perda de pressão no processo de retrolavagem (kPa) na utilização de diferentes granulometrias de areia com comparação estatística pelo teste Tukey ($P < 0,05$)¹.

Filtro de areia	Granulometria	Grau de sujidade			
		GS1	GS2	GS3	GS4
F1	G1	12,60 b	12,60 b	12,92 b	13,03 b
	G2	17,52 a	17,68 a	16,84 a	17,07 a
	G3	16,97 a	15,20 a	16,75 a	16,56 a
F2	G1	14,76 b	16,04 b	16,49 b	16,94 b
	G2	21,64 a	22,59 a	21,60 a	22,65 a
	G3	21,05 a	20,07 a	21,42 a	21,63 a
F3	G1	13,44 c	13,72 b	13,63 b	14,61 b
	G2	18,09 b	18,43 a	18,34 a	18,36 a
	G3	18,63 a	16,66 a	18,10 a	18,19 a

¹Médias seguidas por letras diferentes entre granulometrias de areia, para determinado filtro de areia, diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Como a velocidade superficial na utilização da granulometria de areia mais grossa (G3) foi limitada pelo sistema de bombeamento, observou-se correspondência na perda de pressão do equipamento, com igualdade entre os valores para as granulometrias de areia G2 e G3, devido à utilização de valores próximos de velocidade superficial (G2 - média de $94,9 \text{ m h}^{-1}$; G3 - média de $92,24 \text{ m h}^{-1}$).

Em concordância com as observações do trabalho de Ramirez (2010), observou-se para todos os filtros de areia avaliados que, o aumento da granulometria de areia entre G1 e G2 proporcionou aumento da perda de pressão no processo de retrolavagem, pois para a manutenção da expansão do leito filtrante em 25%, houve a necessidade de aumento da velocidade superficial da água. Esse aumento na perda de pressão foi em média de 4,49 kPa para F1; 6,09 kPa para F2, e para F3 foi de 4,45 kPa.

Nesse sentido, o projetista de sistemas de irrigação deve prever que o irrigante pode alterar a granulometria do meio filtrante de seus filtros de areia, e caso isso não seja planejado, tal mudança poderá comprometer a eficiência de limpeza dos equipamentos, devido não atingir níveis de expansão adequados.

e) **Influência dos diferentes níveis de contaminação na perda de pressão do processo de retrolavagem**

Como o aumento da taxa de filtração no processo de filtração promoveu incremento da contaminação do leito filtrante, esperava-se que esse comportamento proporcionasse resultados

diferenciados em termos de perda de pressão no processo de retrolavagem. Neste contexto, realizou-se teste estatístico para verificar o efeito do nível de contaminação ou grau de sujidade do processo de filtração (GS1, GS2, GS3 e GS4) sobre a perda de pressão do processo de retrolavagem, que está apresentado na Tabela 17.

Tabela 17. Valores médios de perda de pressão (kPa) no processo de retrolavagem (contaminações diferenciadas do leito filtrante--GS1, GS2, GS3 e GS4) com comparação estatística pelo teste Tukey ($P<0,05$)¹.

Filtro de areia	Grau de sujidade	Granulometria de areia		
		G1	G2	G3
F1	GS1	12,60 a	17,52 a	16,97 a
	GS2	12,60 a	17,68 a	15,20 a
	GS3	12,92 a	16,84 a	16,75 a
	GS4	13,03 a	17,07 a	16,56 a
F2	GS1	14,76 b	21,64 a	21,05 a
	GS2	16,04 a	22,59 a	20,07 a
	GS3	16,49 a	21,60 a	21,42 a
	GS4	16,94 a	22,65 a	21,63 a
F3	GS1	13,44 b	18,09 a	18,63 a
	GS2	13,72 b	18,43 a	16,66 a
	GS3	13,63 b	18,34 a	18,10 a
	GS4	14,61 a	18,36 a	18,19 a

¹Médias seguidas por letras diferentes entre graus de sujidade para determinada granulometria e filtro de areia diferem entre si pelo teste Tukey ($P<0,05$).

Pela Tabela 17 é possível verificar a existência de diferença estatística nos valores de perda de pressão, apenas na utilização da granulometria de areia mais fina (G1), nos filtros de areia F2 e F3. Esse resultado está em concordância com o mencionado no item referente à avaliação do processo de filtração, onde a granulometria de areia mais fina (G1), associada ao uso das maiores taxas de filtração, proporcionaram maior remoção de partículas (maior contaminação do leito filtrante), afetando o comportamento hidráulico dos filtros no processo de retrolavagem, onde os tratamentos com maior remoção no processo de filtração causaram maior perda de pressão na limpeza, fato também salientado por Richter & Azevedo (1993).

4.4.4 Remoção de sólidos suspensos na limpeza pela análise da areia

Na Tabela 36 no Anexo estão os dados médios da massa de sólidos removidos no processo de retrolavagem nas diferentes camadas do leito filtrante ($MS_{R_{camada}}$), resultante dos ensaios experimentais de retrolavagem combinando as granulometrias de areia (G1, G2 e G3) e os diferentes graus de contaminação dos ensaios de filtração (GS1, GS2, GS3 e GS4) em três ciclos de filtração (C1, C2 e C3). A Figura 56 ilustra a variação desse parâmetro nas diferentes condições experimentais avaliadas.

Os ensaios de filtração que proporcionaram maiores remoções de sólidos (maior grau de sujidade), por exemplo, G1TF75 (menor granulometria associada à maior taxa de filtração), proporcionaram as maiores quantidades de SST removidos no processo de retrolavagem. Adicionalmente, foi possível observar que o aumento da granulometria de areia proporcionou maiores diferenças de remoção entre os valores de grau de sujidade, ou seja, para a granulometria G1 observou-se maior uniformidade de remoção de sólidos entre os ensaios de filtração e profundidade da camada, enquanto para a granulometria G3 houve maior diferenciação entre esses tratamentos.

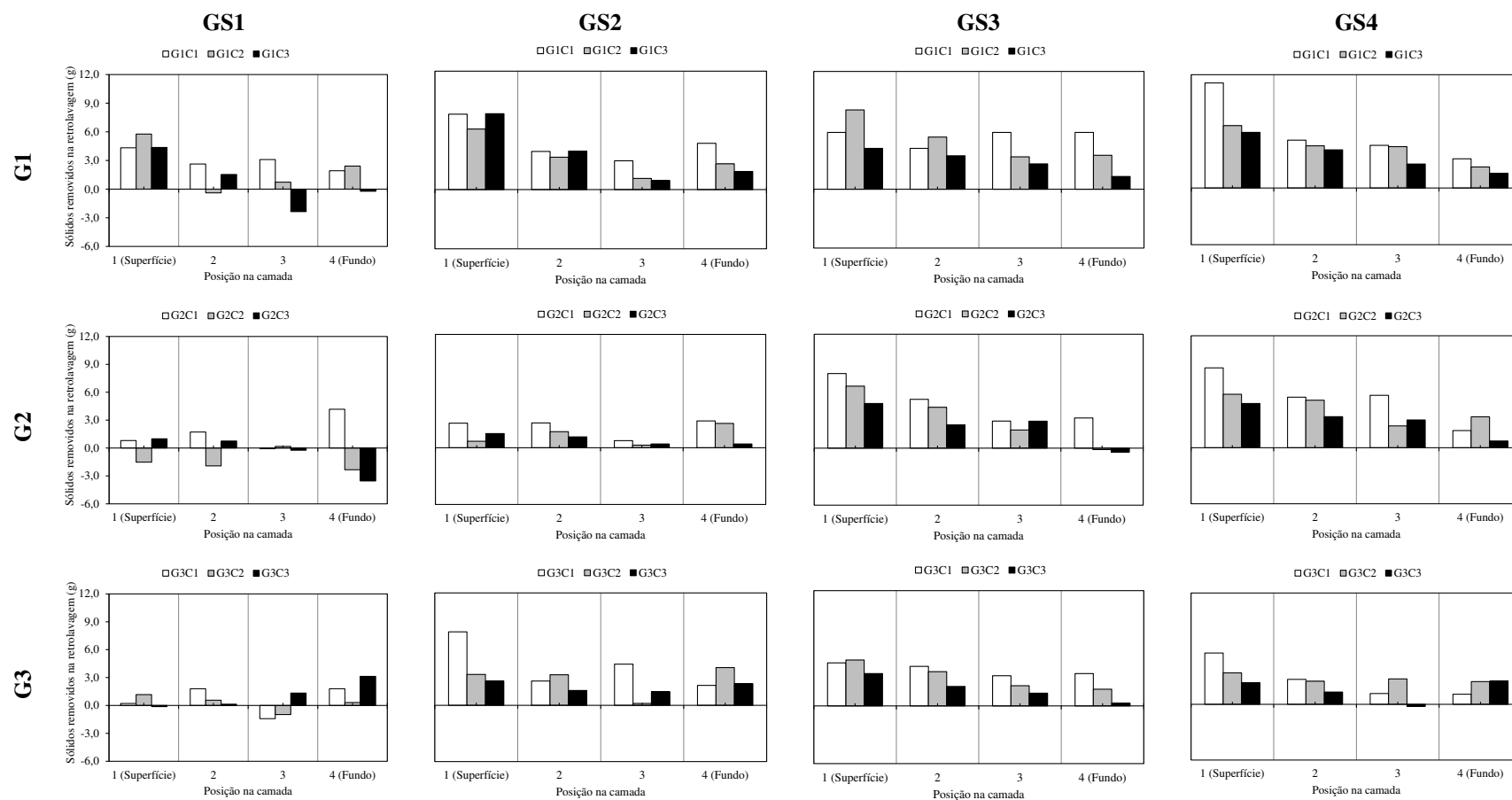


Figura 56. Remoção de sólidos no processo de limpeza para diferentes camadas do leito filtrante ($MS_{Rcamada}$) (g), para as granulometrias G1, G2 e G3, combinadas com os diferentes graus de contaminação do processo de filtração.

Com relação à remoção de sólidos nas diferentes camadas do leito filtrante, observou-se que predominantemente as camadas mais superficiais apresentaram maiores remoções no processo de retrolavagem. Isso se deve ao fato dessas camadas possuírem maiores quantidades de partículas aderidas na filtração, e por proporcionarem menor resistência ao deslocamento dos contaminantes no fluxo ascendente da água. Além disso, o nível de expansão proposto no experimento pode não ter ocorrido uniformemente em toda a camada filtrante, podendo as camadas mais profundas do leito não terem sido expandidas suficientemente, comprometendo a remoção das partículas. Utilizando fluidodinâmica computacional (CFD) na avaliação das linhas de fluxo no processo de retrolavagem, para o modelo de filtro avaliado neste trabalho, Mesquita (2014) observou a não ocorrência de fluxo em regiões próximas às crepinas, comprometendo a expansão uniforme do leito filtrante.

Avaliando a remoção entre ciclos de filtração, observou-se tendência de diminuição da remoção com o passar dos ciclos. Em outras palavras, com o uso constante de determinado meio filtrante, submetidos às taxas de filtração propostas, para essa qualidade de água, haverá aumento da dificuldade da limpeza do leito filtrante com o passar do tempo, havendo diminuição na eficiência de remoção na limpeza e nos ciclos de filtração posteriores, como observado nos resultados deste trabalho.

Na Tabela 37 do Anexo são apresentados os dados experimentais de massa de sólidos removidos no processo de retrolavagem, considerando todo o leito filtrante pela somatória da massa de sólidos em todas as camadas (MS_{Rtotal}), sendo ilustrado na Figura 57 o seu comportamento para os diferentes graus de sujidade combinados com as granulometrias de areia.

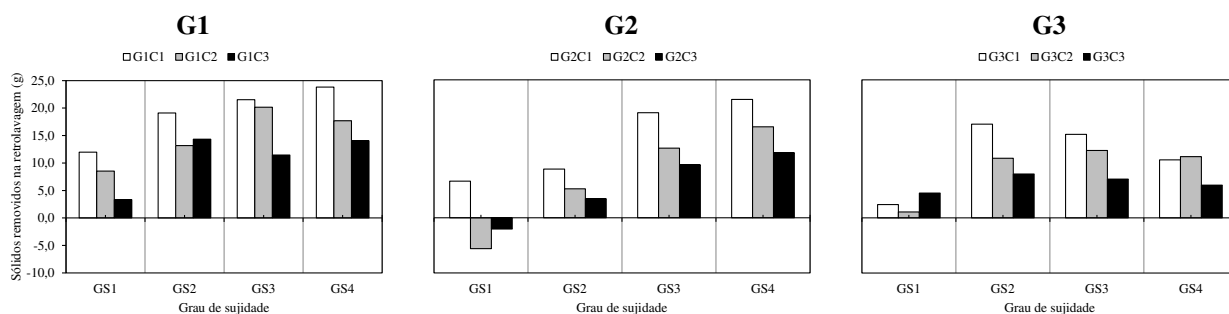


Figura 57. Remoção de sólidos (g) no processo de retrolavagem em todo o leito filtrante (MS_{Rtotal}), em função dos ensaios de filtração que resultaram em diferentes graus de sujidade do leito filtrante (GS1 – TF20, GS2 – TF40, GS3 – TF60 e GS4 – TF75).

Pode-se observar que os ensaios de filtração que proporcionaram maior contaminação do leito filtrante (GS3 - TF60 e GS4 - TF75), ocorreram maiores remoções de sólidos na limpeza para todas as granulometrias de areia utilizadas. Para a granulometria G3 observou-se aumento da remoção até GS3 com decréscimo para GS4, e para as demais granulometrias observou-se aumento até GS4.

4.4.5 Eficiência de limpeza (E_L)

Na Figura 58 é apresentado o comportamento da variação da eficiência de limpeza do processo de retrolavagem estimada para diferentes camadas do leito filtrante (E_L), na combinação de diferentes ciclos de filtração, granulometrias de areia e graus de sujidade do leito filtrante, sendo que os dados utilizados nesses gráficos se encontram na Tabela 38 do Anexo.

Pela Figura 58 é possível verificar que, independentemente do ciclo de filtração, da camada do leito filtrante avaliada e da granulometria de areia utilizada, que os maiores valores de eficiência de limpeza foram encontrados para os ensaios que apresentaram maior grau de sujidade do leito filtrante. Como relatado anteriormente, esse comportamento pode estar ligado ao fato das maiores taxas de filtração utilizadas no processo de filtração terem proporcionado maior retenção de partículas (maior grau de sujidade) facilmente removidas no processo de retrolavagem quando comparamos com os resultados dos tratamentos de taxa de filtração com valores inferiores.

Outro fato que se pode observar, tanto pela Tabela 38 no Anexo, quanto pela Figura 58, refere-se ao fato de as camadas mais superficiais apresentarem maiores valores de eficiência de limpeza. Esse fato pode estar associado à maior quantidade de partículas retidas no leito filtrante no processo de filtração (grau de sujidade), onde, de acordo com os resultados descritos anteriormente, as camadas mais superficiais predominaram no processo de retenção no processo de filtração, apresentando maiores quantidades de partículas retidas quando comparadas às camadas mais profundas. Adicionalmente, pode-se ponderar de que o nível de expansão atingido nos ensaios de retrolavagem não possibilitou a limpeza das camadas mais profundas do leito filtrante, possivelmente devido à expansão não ter ocorrido de forma homogênea em toda a sua espessura (MESQUITA, 2014).

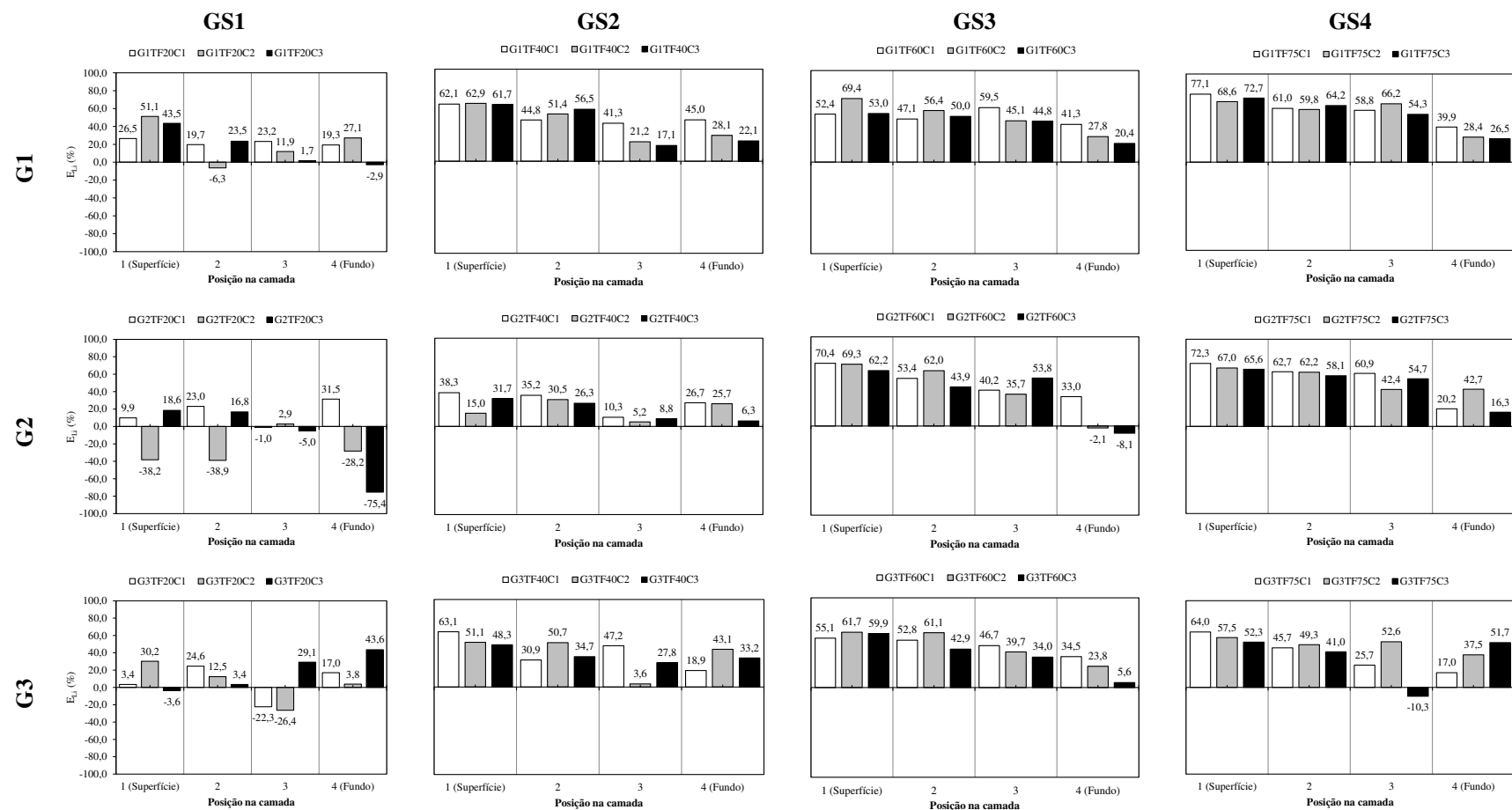


Figura 58. Eficiência de limpeza (%), em diferentes camadas do leito filtrante (E_{Li}), para diferentes combinações de ciclos de filtração, granulometrias de areia e graus de sujidade.

Com os dados da Tabela 39 disponível no Anexo, foi gerada a Figura 59 que relaciona os valores de eficiência de limpeza (E_L) em função dos graus de sujidade dos ensaios de filtração considerando as informações de todo o leito filtrante. Dessa forma, foi possível interpretar a influência do ciclo de filtração e da granulometria de areia nos valores de eficiência de limpeza, além de ficar mais evidente o comportamento salientado anteriormente com relação ao efeito do grau de sujidade originados nos ensaios de filtração.

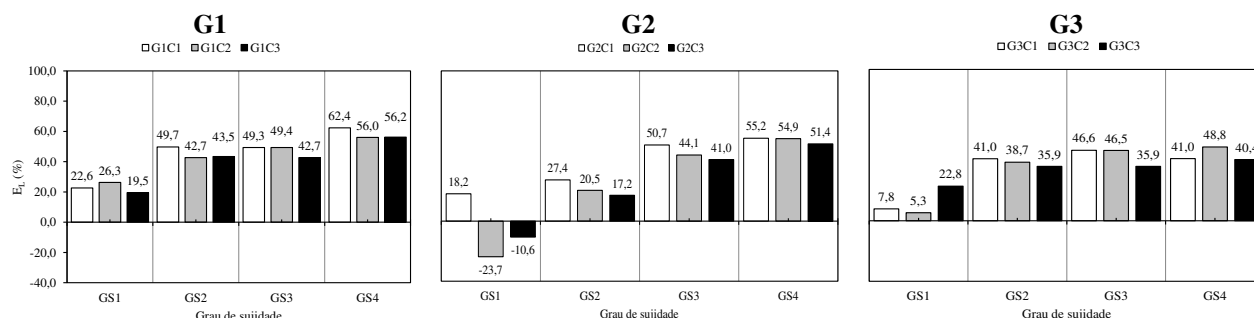


Figura 59. Eficiência de limpeza, considerando todo o leito filtrante, em função de diferentes ciclos de filtração, granulometrias de areia, e graus de sujidade originados dos ensaios de filtração.

Comparando os resultados entre ciclos de filtração, observou-se tendência de diminuição da eficiência de limpeza no decorrer dos dias de ensaio (ciclos de filtração), considerando todas as combinações de granulometria de areia e graus de sujidade dos ensaios de filtração. Como mencionado anteriormente, à medida que o leito filtrante é utilizado, observa-se aumento da dificuldade de limpeza do leito filtrante, podendo afetar a eficiência de remoção dos processos de filtração posteriores, como observado em determinadas situações no item referente à avaliação dos ensaios de filtração.

Com relação a influência da granulometria de areia na E_L , observou-se valores similares, com exceção do tratamento de filtração que gerou o grau de sujidade GS1, onde a granulometria G2 apresentou os menores valores de E_L . Apesar dos ensaios de retrolavagem para a granulometria de areia mais grossa (G3) não ter sido executado com velocidades superficiais que permitissem atingir o mesmo nível de expansão das outras granulometrias avaliadas, observou-se pela magnitude dos valores não ter ocorrido influência quando comparado aos valores atingidos pelas demais granulometrias de areia.

A contaminação diferenciada do leito filtrante nos ensaios de filtração geraram comportamentos diferenciados na limpeza da camada, onde a maior a contaminação do leito

(grau de sujidade), determinou a maior eficiência de limpeza da camada. Adicionalmente, as camadas mais superficiais apresentam maior eficiência de limpeza devido à expansão heterogênea das camadas proporcionada pelo equipamento, associada à diferenciação da quantidade de partículas aderidas nas diferentes camadas do leito anteriormente ao processo de retrolavagem. Por fim, no decorrer do uso do equipamento houve a diminuição da E_L ou aumento da dificuldade de limpeza do meio filtrante, que vai afetar a eficiência de remoção do processo de filtração dos ciclos posteriores.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos ensaios realizados sob as condições experimentais existentes, é possível ter as seguintes conclusões referentes às hipóteses propostas:

- O modelo de filtro de areia avaliado com o afluente disponível nos ensaios de filtração foi efetivo na remoção de partículas em suspensão na água a partir do tamanho correspondente à areia fina, com atuação predominante na superfície da camada filtrante, sendo que o valor de eficiência de remoção aumentou com o incremento da taxa de filtração, com a diminuição da granulometria de areia, e reduzindo a sua efetividade com o tempo de filtração.
- As velocidades superficiais utilizadas para a manutenção dos 25% de expansão do leito filtrante determinaram no processo de retrolavagem, maiores índices de sólidos removidos e de eficiência de limpeza nas camadas com maior nível de contaminação, que diminuíram seus valores com os ciclos, devido à diferenciação de contaminação em si, combinada à expansão heterogênea das camadas proporcionada pelo equipamento.
- A metodologia de avaliação da filtração utilizando informações de sólidos retidos na areia se mostrou com maior potencial de representatividade na avaliação do processo quando comparado à metodologia convencional de coleta pontual da água.

Neste contexto, a primeira hipótese da pesquisa, que preconizava que a remoção de partículas no processo de filtração variava no tempo e nas camadas do leito filtrante, aumentando seu valor com a redução da taxa de filtração e da granulometria de areia, foi parcialmente validada, pois o aumento da taxa de filtração proporcionou aumento da remoção de partículas. A segunda hipótese não foi validada, pois os leitos filtrantes que apresentavam maior índice de contaminação resultaram em maiores índices de limpeza no processo de retrolavagem. Finalmente, a terceira hipótese também foi parcialmente validada, devido ao fato que as metodologias de avaliação do processo de filtração utilizando SST da água e da areia apesar de terem apresentado semelhança de comportamento, não apresentaram similaridade de magnitude dos valores.

6 RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento do presente trabalho deixou algumas questões em aberto que são oferecidas como recomendações para a continuidade de trabalhos futuros relacionados com o tema:

- Seria desejável avaliar a influência da movimentação excessiva da camada filtrante na eficiência de remoção do processo de filtração em filtros de areia, com a comparação de diferentes modelos de placa difusora, para determinada qualidade de água;
- Deve-se comparar o desempenho do modelo de filtro de areia utilizado na presente pesquisa com outros modelos comerciais, avaliando o efeito construtivo sobre a remoção de outros parâmetros físico-químicos da água que interferem na vida útil dos emissores dos sistemas de irrigação localizada. Deve-se incluir nessa avaliação a determinação da uniformidade de aplicação e o grau de entupimento dos emissores operando por um período de tempo de irrigação real. Pode-se incluir nessa avaliação a variação da altura do leito filtrante, bem como para diversos tipos de afluente com diferentes cargas de sólidos em suspensão;
- Com o intuito de contornar o problema da representatividade da coleta de águas no decorrer do experimento de filtração, recomenda-se a realização de ensaios experimentais no qual se adapte um leitor automático de sólidos em meio fluido na entrada e na saída dos filtros, possibilitando o entendimento tanto do processo de filtração, quanto da retrolavagem, durante todo o período de avaliação, comparando com as informações contidas na areia;
- A visualização da expansão do leito filtrante no processo de retrolavagem da forma proposta nessa pesquisa se mostrou imprecisa devido a não uniformidade de expansão proporcionada pelas crepinas do equipamento, e dificultada pela necessidade de instalação de visores nos filtros, que pode comprometer a resistência do equipamento e aumentar os riscos de acidente na sua operação. Nesse sentido, deve-se desenvolver e avaliar a precisão de um sensor de expansão de leitos filtrantes para filtros de areia, visando avaliar o efeito de diferentes percentuais de expansão da camada filtrante na eficiência de limpeza de todo o leito e para diferentes camadas de areia, bem como as eficiências de remoção dos processos de filtração subsequentes;

- Como no presente trabalho foi realizada a determinação da eficiência de remoção no processo de filtração para diferentes faixas de diâmetro de partículas presentes na água, recomenda-se, como complementação, a realização da avaliação do percentual de diferentes faixas de diâmetro de partículas dos sólidos retidos nas areias nos ensaios dos processos de filtração e retrolavagem em filtros de areia;
- Avaliar a aplicação das metodologias de avaliação estudadas na pesquisa em propriedades rurais que utilizam filtros de areia, avaliando adicionalmente os sistemas de irrigação instalados;
- A origem das areias utilizadas como meio filtrante podem determinar o uso de materiais filtrantes diferenciados do ponto de vista de impurezas aderidas à mesma. Neste experimento foi observado que a areia utilizada no trabalho apresentava significativa quantidade de partículas aderidas ao meio, que pode comprometer o estudo da eficiência de remoção dos processos de filtração. Diante disso, deve-se avaliar a sujidade do leito filtrante nos processos de filtração e retrolavagem utilizando água limpa, ou seja, sem a presença de sólidos suspensos totais, possibilitando a compreensão do grau de sujidade inicial das areias comercialmente utilizadas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19. ed., Washington D.C.: APHA/AWWA/WPCF. 1995. 798p.

AMERICAN SOCIETY AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS – ASABE EP405.1. **Design and installation of microirrigation systems**. St. Joseph, MI, dec-1993. 6p.

AMERICAN SOCIETY AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS - ASABE ANSI/ASAE S539 **Media filters for irrigation —Testing and performance reporting**, march 1994.

AMIAD MEDIA FILTERS - Catálogo. Disponível em <<http://www.amiad.com.br>>. Acesso em Julho/2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. EB 2097: **Material filtrante: Areia, antracito e pedregulho – Especificação**. 1990.

BENHAM, B.; ROSS, B. **Filtration, Treatment, and Maintenance**: Considerations for Micro-Irrigation Systems. Virginia Cooperative Extension. 2002 (PUBLICATION 442-757).

BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, UFV, 2006. 625p.

BROUCKAERT, M. B. **Hydrodynamic detachment of deposited particles in fluidized bed filter backwashing**. 383p. Dissertation Degree Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering. Georgia Institute of Technology, Georgia. 2004.

BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S.; GILBERT, R. G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural and Water Management**, Netherlands, v. 2, n. 2. p. 149-162, 1979.

BURT, C. M. Media tanks for filtration part I: Tank sizing and media selection. **Irrigation Journal**, p. 15 - 17, 1994.

BURT, C. M. **Hydraulics of commercial sand media filter tanks used for agricultural drip irrigation: criteria for energy efficiency**. San Luis Obispo: Irrigation Training and Research Center, 2010, 35 p. Disponível em: www.itrc.org/reports/mediafilters.htm. Acesso em: setembro de 2010.

CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura). **Clima de Campinas**. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-de-campinas.html>>. Acesso em Novembro de 2013.

CHANG, M., TRUSSELL, R., GUZMAN, V., MARTINEZ, J., DELANEY, C., Laboratory studies on clean bed head loss of filter media. **Acqua**, v.49, p.137-145, 1999.

CLEMENTS, M.; HAARHOFF, J. Filter media expansion during backwash: The effect of biological activity. In: **Water Institute of South Africa (WISA) Biennial Conference**. 2005, v. 30, n. 5, p. 51-55.

CUNNINGHAM, A. B.; CHARACKLIS, W. G.; ABEDEEN, F.; CRAWFORD, D. Influence of biofilm accumulation on porous media hydrodynamics. **Environmental Science & Technology**.v.25, p. 1305-1311, 1991.

DASBERG, S.; BRESSLER, E. **Drip irrigation manual**. Bet Dagan: International Irrigation Information Center, 1985. 95 p.

DEUS, F. P.; MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; BIZARI, D. R. Efeito das dimensões do difusor no comportamento hidráulico de um modelo comercial de filtro de areia. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá – MT, 2011.

DEUS, F. P.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Efeito das dimensões da placa difusora no comportamento hidráulico de um modelo comercial de filtro de areia. **Engenharia Agrícola**, v.33, p.560-568, 2013.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rima Editora, 2ª edição, 2005, 1565 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999.412 p.

FLOW-GUARD Filtration Products - Catálogo. Disponível em<<http://www.fresnovalves.com>>.Acesso em Julho/2011.

GUPTA, C. K.; SATHIYAMOORTHY, D. **Fluid bed technology in materials processing**. New York. 1999., p. 1-125.

HAMAN, D. Z.; SMAJSTRLA, A. G.; ZAZUETA, F. S. **Media filters for trickle irrigation in Florida**. Gainesville: University of Florida, 1994. 5 p. (Fact Sheet AE-57)

JUSOH, A.; NORAAINI, A. G.; HALIM, A. G.; NORSANI, W. N. Effective depth, initial head loss and backwashing criteria as the key factors of burned oil palm shell (BOPS) granular filtration. **Desalination and Water Treatment**, v. 10, p. 80-86, 2009.

KAU, S. M.; LAWLER, D. F. Dynamics of dep-bed filtration: velocity, depth, and media. **Journal of Environmental Engineering**, v. 121, n.12, p. 850-859, 1995.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

LAWRENCE, J. S. **Filtration and particulate removal**. Encyclopedia of Water Science. 2.ed. University of California, California USA, 2003. p.289-293.

LIMA, R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M.; BARBOZA, G. C.; MOURA, R. S. Associação de filtros versus filtro de disco de 155 mesh na remoção de sólidos suspensos e ferro na água para sistema de irrigação localizada. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39., 2010, Vitória. **Anais...** Vitória – ES, 2010.

LÓPEZ, T. M. **Riego localizado: diseño de instalaciones**. 2 ed. Vicente J. Montesinos. Valencia. 2007, 255 p.

MAGALHÃES, M. A.; MATOS, A. T.; DENÍCULE, W.; TINOCO, I. F. F. Operação de filtros orgânicos utilizados nos tratamentos de águas residuárias de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 10, n. 2, p. 472-478, 2006.

MESQUITA, M. **Desenvolvimento tecnológico de um filtro de areia para irrigação localizada**. 2014. 169 f. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

MESQUITA, M. **Avaliação dos componentes hidráulicos e do material filtrante em filtros de areia utilizados na irrigação**. 2010. 120 f. Tese (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; RAMIREZ, J.C.S. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. **Agricultural Water Management**, v.115, p.178-185, 2012.

MOTOROLA – Catálogo. Disponível em <
<http://pdf.datasheetcatalog.net/datasheet/motorola/MPX5500.pdf>> Acesso em Julho/2014.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D.A. **Trickle Irrigation for crop production: design, operation and management**. Elsevier Science Publishers.1986, p.383.

PHILLIPS, K. P. Long-term operation of microirrigation filtration systems: successes, failures and operational solutions. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 15, 1995, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ASAE, 1995. p. 579-585.

PIVELI, R. P. ; KATO, M. T. **Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos**.1. ed. São Paulo/SP: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. v. 01. 285p.

PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. 3.ed. Madrid: Mundi Prensa, 1996. 513p.

POVOA, A. F.; HILLS, D. J. Sensitivity of microirrigation system pressure to emitter plugging and lateral line perforations. **Transactions of the ASAE**, v.37, n.3, p.793-799, 1994.

PUIG-BARGUÉS, J. P.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F. R. Effluent particle removal by microirrigation system filters. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 3, n. 2, p. 182-191, 2005.

RAMIREZ, J. C. S. **Efeito das características granulométricas e da altura da camada filtrante no processo de retrolavagem em filtros de areia**. 2010. 159p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

RAMIREZ, J.C.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.6, p.1226-1237, 2011.

RIBEIRO, T. A. P.; AIROLDI, R. P. S.; PATERNIANI, J. E. S.; SILVA, M. J. M. Variação temporal da qualidade da água no desempenho de filtros utilizados na irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p. 450-456, 2005.

RICHTER, A. C.; AZEVEDO, J. M. N. **Tratamento de água tecnologia atualizada**. Ed. Blucher. SP. 332p. 1993.

RICHTER, C.; SCREMIN, P. R. **Lavagem de filtros**. 2006. Disponível em: <http://www.cepis.org.pe/bvsacd/scan/007926/07926-21.pdf>. Acesso em: Maio de 2011.

SANTOS, M. B.; MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R. Aplicação de túnel de vento na avaliação de linhas de fluxo geradas por crepinas de filtros de areia. **Engenharia Agrícola**, v.33, n.3, p.548-559, 2013.

SCHWANKL, L. J. Surface drip irrigation. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for crop production**. Califórnia: University of Califórnia, 2007, p. 431-472.

SILVA, L. G. F.; MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M. Irrigação localizada. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Piracicaba: SBEA, 2003. v.2, Cap.12, p.259-309. (Série Engenharia Agrícola).

STADEN, S. J. V.; HAARHOFF, J. A standard test for filter media cleanliness. **Water SA**, v. 30, n. 1, p. 81-88, 2004.

TESTEZLAF, R. Técnicas de filtragem para irrigação. In: Simpósio de Citricultura Irrigada, 6., 2006, Bebedouro. **Anais...** Bebedouro, SP: GTACC, 2006. p. 1-43.

TESTEZLAF, R. Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática. **Revista Engenharia Agrícola**, v.28, n.3, p.604-613, 2008.

TESTEZLAF, R.; DEUS, F. P.; MESQUITA, M. **Filtros de areia na irrigação localizada**. Campinas (SP): Unicamp, 2014. 66p.

TURAN, M.; SABAH, E.; GULSEN, H. Influence of media characteristic on energy dissipation in filter backwashing. **Environmental Science & Technology**, v. 37, n. 18, p. 4288-4292, 2003.

VERMA, A.; MANCL, K. **Empirical models of effectiveness of single pass sand filters for wastewater treatment.** In: On-Site Wastewater Treatment: Proc. 9th Natl. Symp. on Individual and Small Community Sewage Systems, March 2001, Texas, USA, St. Joseph , p. 11-14.

VERMEREIN, L.; JOBLING, G. A. **Localized Irrigation.** Irrigation and Drainage Paper 36. Rome, Italy: FAO. 1984. 203p.

WAKEMAN, R. The influence of particle properties on filtration. **Separation and purification technology.** v. 58, p. 234-241, 2007.

WEBER. JR. W. J. **Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos.** Ed Reverte. Versión Español. Barcelona. 1979.

8 ANEXOS

Tabela 18. Dados de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) contidos no afluente (água de entrada dos filtros) utilizada nos diferentes tratamentos do experimento¹.

Ciclo de filtração	G	Tc	Filtro - F1				Filtro - F2				Filtro - F3			
			TF20	TF40	TF60	TF75	TF20	TF40	TF60	TF75	TF20	TF40	TF60	TF75
C1	G1	Início	13,33	4,33	6,00	18,33	5,00	4,33	2,33	4,67	11,67	4,00	2,67	3,00
		Meio	8,67	7,67	4,33	4,00	6,33	5,00	4,67	4,33	7,00	5,33	2,33	3,67
		Fim	10,00	7,00	5,00	5,00	10,00	7,00	4,00	4,33	10,33	2,67	4,00	3,33
	G2	Início	8,00	5,00	8,00	7,00	8,00	3,67	3,00	3,33	7,67	1,00	4,00	19,33
		Meio	8,33	6,00	4,00	4,33	4,67	8,67	6,00	4,33	5,67	5,00	7,67	1,00
		Fim	7,00	6,67	9,33	3,33	6,33	5,67	6,33	0,33	6,67	4,00	7,67	1,00
	G3	Início	7,33	5,00	3,00	3,33	11,67	4,00	1,00	4,00	8,67	4,00	1,33	3,67
		Meio	8,00	5,33	3,00	3,33	10,67	6,33	2,33	0,67	8,00	5,33	1,67	1,67
		Fim	7,00	5,00	2,00	4,33	11,33	5,00	2,33	3,00	9,67	6,67	3,33	3,00
C2	G1	Início	6,67	9,00	1,67	3,33	6,33	3,00	3,00	2,33	9,67	1,33	3,67	18,00
		Meio	7,33	8,33	4,33	3,67	8,33	3,33	4,67	3,33	6,67	6,00	4,33	3,33
		Fim	8,33	6,33	3,67	4,33	7,00	6,67	3,00	5,00	6,67	5,67	4,33	5,33
	G2	Início	6,67	7,33	5,00	2,67	10,00	3,33	4,33	1,67	6,33	2,67	4,67	3,00
		Meio	7,33	4,00	6,67	2,67	10,00	4,00	7,33	1,00	5,67	3,33	6,00	1,00
		Fim	11,00	4,67	6,67	3,67	7,67	5,67	7,33	4,00	6,33	7,00	6,00	1,00
	G3	Início	6,67	2,00	3,33	2,67	5,00	3,33	3,67	1,67	6,33	3,67	2,33	5,67
		Meio	6,33	7,33	4,00	3,33	5,67	5,67	5,67	2,33	6,67	5,33	29,00	0,67
		Fim	5,33	6,33	5,67	2,00	7,00	3,33	4,00	3,00	5,67	5,00	3,33	2,33
C3	G1	Início	7,00	4,00	2,33	4,00	7,67	5,33	1,33	2,00	7,33	5,33	4,00	15,33
		Meio	6,33	6,67	3,67	4,67	8,33	4,67	2,33	4,00	8,00	6,33	4,00	3,00
		Fim	7,00	7,00	2,67	5,00	10,00	6,33	3,00	5,33	6,00	5,33	4,00	4,67
	G2	Início	6,67	4,33	4,67	2,00	5,33	1,00	1,33	3,00	5,00	4,00	3,00	19,00
		Meio	7,00	3,67	4,67	4,67	5,67	2,00	5,67	3,00	7,00	5,00	3,67	0,33
		Fim	6,67	3,67	5,00	3,33	7,33	7,00	6,33	2,67	5,00	7,00	5,67	3,00
	G3	Início	7,00	4,33	2,00	2,33	5,00	3,67	2,33	1,00	5,67	4,00	3,00	6,67
		Meio	6,00	5,33	3,67	5,33	5,33	4,33	4,67	1,00	6,00	3,67	2,33	1,00
		Fim	7,00	5,00	3,67	2,00	5,00	3,67	4,00	4,33	5,67	5,67	6,33	2,00

1 – G: Granulometria de areia; Tc: Tempo de coleta; TF20, TF40, TF60 e TF75: tratamentos de taxa de filtração.

Tabela 19. Dados de sólidos suspensos totais (SST) (mg L^{-1}) contidos no efluente (água de saída dos filtros) utilizada nos diferentes tratamentos do experimento¹.

Ciclo de filtração	G	Tc	Filtro - F1				Filtro - F2				Filtro - F3			
			TF20	TF40	TF60	TF75	TF20	TF40	TF60	TF75	TF20	TF40	TF60	TF75
C1	G1	Início	5,00	1,33	1,00	3,67	9,33	2,67	0,67	2,67	5,33	2,67	0,33	1,00
		Meio	5,00	3,00	1,00	2,33	6,00	3,67	0,33	1,33	6,00	4,33	3,00	0,67
		Fim	4,00	3,33	1,33	3,33	4,67	5,67	3,00	2,00	8,00	3,67	3,33	1,67
	G2	Início	5,33	2,00	3,00	3,67	6,00	4,67	4,33	1,67	4,33	1,33	2,67	5,00
		Meio	4,67	3,00	2,00	3,00	6,00	2,67	3,00	0,33	6,33	3,00	1,67	0,33
		Fim	5,67	1,67	4,00	1,67	5,33	1,33	4,67	2,33	6,00	2,33	4,33	1,33
	G3	Início	9,67	5,33	2,00	3,67	11,33	4,00	3,00	0,33	7,33	4,00	1,00	2,67
		Meio	6,67	3,33	0,33	4,33	8,33	3,67	2,00	1,00	8,33	3,67	1,33	1,00
		Fim	6,33	3,33	1,67	3,33	9,00	5,00	2,33	2,33	8,67	6,00	3,33	0,67
C2	G1	Início	5,33	4,00	2,00	1,67	8,33	1,67	2,67	0,67	5,00	5,00	2,33	7,00
		Meio	6,00	6,33	1,00	0,33	8,00	2,67	1,33	2,00	6,00	3,00	2,67	2,33
		Fim	6,00	2,67	1,00	1,67	8,33	6,00	1,33	2,33	6,00	3,00	4,33	2,67
	G2	Início	6,00	5,33	3,67	0,67	6,67	3,33	4,33	3,00	7,00	4,00	3,00	0,67
		Meio	7,33	3,00	2,67	2,33	9,00	2,67	4,00	4,33	5,67	3,67	3,33	0,67
		Fim	9,00	4,67	3,67	1,67	6,00	5,67	5,33	2,00	5,00	4,00	3,67	0,67
	G3	Início	4,33	4,00	2,33	2,00	4,00	3,00	3,67	2,67	5,00	3,67	0,33	2,00
		Meio	5,00	4,00	1,33	2,00	5,00	4,00	2,67	2,67	5,67	2,33	1,67	1,67
		Fim	5,67	3,33	4,00	1,00	3,67	3,00	2,67	0,67	6,00	3,33	10,33	2,67
C3	G1	Início	4,67	2,33	1,67	3,00	8,33	3,00	0,57	2,00	8,33	2,67	5,33	6,67
		Meio	8,67	2,67	2,33	1,67	8,33	3,33	1,33	2,33	8,33	2,33	3,00	3,00
		Fim	5,00	3,67	2,00	2,67	5,00	2,00	2,00	2,67	9,33	2,00	2,33	2,33
	G2	Início	5,33	0,33	2,00	1,67	4,00	2,67	2,33	3,33	5,00	3,00	3,67	2,00
		Meio	6,00	2,33	3,67	1,00	7,00	0,00	3,67	1,00	5,67	3,67	4,00	0,67
		Fim	5,67	5,00	4,33	1,67	5,67	2,33	5,00	0,33	5,67	0,00	4,33	2,67
	G3	Início	7,33	3,33	4,00	2,00	6,33	3,67	2,67	2,67	5,67	1,33	8,00	5,33
		Meio	6,00	3,00	1,33	5,67	6,33	4,00	1,00	1,67	6,00	3,33	2,67	0,67
		Fim	5,33	4,00	2,00	1,67	6,33	4,67	2,00	1,33	6,00	3,33	13,33	1,33

1 – G: Granulometria de areia; Tc: Tempo de coleta; TF20, TF40, TF60 e TF75: tratamentos de taxa de filtração.

Tabela 20. Análise de regressão da perda de pressão dos filtros vazios (kPa) em função da taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) no processo de filtração para o modelo matemático exponencial.

Modelo	Grau de liberdade	Filtro - F1		Filtro - F2		Filtro - F3	
		Quadrado médio	R ² (%)	Quadrado médio	R ² (%)	Quadrado médio	R ² (%)
Exponencial	1	12,78*	95,90	6,47*	98,67	10,24*	96,85
Erro	10	0,054	-	0,009	-	0,033	-
Total	11	-	-	-	-	-	-

Obs.: * - significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 21. Análise de regressão da perda de pressão (kPa) em função da taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) para o processo de filtração na aplicação do modelo matemático exponencial em 5 períodos distintos (0, 60, 120, 180 e 240 minutos) durante o tempo de filtração.

Granulometria de areia	Tempo de filtração	Filtro - F1		Filtro - F2		Filtro - F3	
		Quadrado médio	R ² (%)	Quadrado médio	R ² (%)	Quadrado médio	R ² (%)
G1	Início (0 min)	5,41*	96,26	4,74*	98,06	5,69*	97,92
	Erro	0,021	-	0,0093	-	0,012	-
	60 min	5,50*	95,82	4,84*	96,71	5,70*	97,09
	Erro	0,024	-	0,016	-	0,017	-
	120 min	5,65*	94,25	5,16*	95,14	5,60*	94,94
	Erro	0,034	-	0,026	-	0,030	-
	180 min	5,85*	92,59	5,44*	93,99	5,41*	92,23
	Erro	0,047	-	0,034	-	0,046	-
	240 min	5,85*	90,56	5,61*	91,85	5,20*	89,75
	Erro	0,061	-	0,05	-	0,059	-
G2	Início (0 min)	5,96*	98,60	5,13*	98,54	6,81*	98,55
	Erro	0,0085	-	0,0076	-	0,01	-
	60 min	6,13*	98,08	5,26*	98,60	6,89*	98,45
	Erro	0,012	-	0,0074	-	0,01	-
	120 min	6,53*	98,23	5,91*	98,23	6,74*	97,67
	Erro	0,012	-	0,011	-	0,016	-
	180 min	7,15*	98,10	6,45*	98,09	6,72*	97,11
	Erro	0,014	-	0,012	-	0,02	-
	240 min	7,45*	97,75	6,74*	97,93	6,48*	96,48
	Erro	0,017	-	0,014	-	0,024	-
G3	Início (0 min)	6,57*	96,60	5,92*	98,26	8,83*	94,13
	Erro	0,023	-	0,01	-	0,055	-
	60 min	6,95*	95,93	6,21*	97,95	9,02*	92,60
	Erro	0,029	-	0,013	-	0,072	-
	120 min	6,95*	95,34	6,30*	97,14	9,09*	91,94
	Erro	0,034	-	0,018	-	0,079	-
	180 min	7,16*	94,65	6,34*	96,70	8,89*	91,35
	Erro	0,04	-	0,022	-	0,084	-
	240 min	7,10*	93,97	6,35*	96,42	8,52*	91,16
	Erro	0,045	-	0,023	-	0,083	-

Obs.: * - significativo a 5% de probabilidade, ns – não significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 22. Dados de perda de pressão (kPa) média no processo de filtração em função do tempo de filtração (min), para diferentes taxas de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e granulometrias de areia, para os três filtros de areia avaliados.

Taxa de filtração	Ciclo de filtração	Tempo (min)	Granulometria - G1			Granulometria - G2			Granulometria - G3		
			F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
TF20	C1	0	6,26	6,15	5,05	3,45	4,22	3,60	2,22	2,63	1,99
		60	6,41	6,30	5,89	3,44	4,54	3,70	2,24	2,66	2,16
		120	7,01	6,77	6,59	4,08	4,68	4,22	2,34	2,77	2,20
		180	7,56	7,28	7,28	4,02	4,79	4,24	2,41	2,91	2,33
		240	8,06	7,66	7,95	4,37	5,05	4,61	2,43	3,02	2,50
	C2	0	4,35	5,91	5,78	3,81	3,97	3,68	2,11	2,71	2,13
		60	4,98	6,44	5,88	3,72	4,39	3,82	2,02	2,73	2,16
		120	5,48	6,99	6,51	4,02	4,39	4,10	2,13	2,80	2,22
		180	5,96	7,62	7,05	4,24	4,61	4,42	2,19	2,89	2,34
		240	6,49	8,07	7,70	4,40	4,82	4,73	2,35	3,00	2,46
	C3	0	5,31	5,96	4,87	3,66	4,24	3,64	2,33	2,85	1,29
		60	5,59	6,61	5,55	4,16	4,21	3,77	2,29	2,72	1,17
		120	6,22	7,26	6,24	3,92	4,28	4,18	2,38	2,75	1,19
		180	6,77	7,94	6,99	4,14	4,42	4,37	2,34	2,86	1,24
		240	7,38	8,44	7,71	4,20	4,77	4,66	2,46	2,95	1,34
TF40	C1	0	12,69	13,40	12,16	8,07	9,65	6,51	6,63	6,54	6,18
		60	14,58	14,94	14,62	9,63	10,30	7,43	6,95	6,87	6,51
		120	17,48	18,87	17,97	10,26	11,58	8,20	7,43	7,32	6,91
		180	20,85	22,06	21,71	11,32	12,78	9,31	7,89	7,78	7,28
		240	24,35	26,22	25,46	12,61	13,98	10,60	8,30	8,22	7,59
	C2	0	12,92	12,82	13,00	8,51	9,34	6,70	6,01	6,71	6,02
		60	14,79	15,56	15,10	8,88	10,01	7,37	6,58	7,08	6,48
		120	18,27	18,90	18,85	10,11	10,77	8,13	7,32	7,69	6,91
		180	21,76	22,61	22,44	10,94	11,68	9,13	7,81	8,29	7,26
		240	26,47	26,39	26,46	12,19	12,88	10,39	8,55	8,73	7,92

Tabela 22. Continuação.

TF40	C3	0	13,18	14,18	13,14	8,75	9,57	6,31	6,36	7,10	6,74
		60	14,49	16,59	15,61	8,78	9,90	6,67	6,53	7,19	6,78
		120	17,48	19,70	18,83	9,54	10,58	7,42	6,96	7,87	7,03
		180	20,99	23,31	22,59	10,63	11,53	8,58	7,55	8,37	7,37
		240	24,04	27,08	25,65	11,74	12,75	9,85	8,09	8,70	7,55
TF60	C1	0	23,04	22,04	21,06	16,37	16,13	16,95	11,27	11,72	11,51
		60	26,16	25,70	25,01	17,79	17,62	18,87	11,54	12,44	12,01
		120	30,72	30,35	29,73	20,37	19,96	21,92	12,30	13,39	12,84
		180	34,55	34,34	33,86	22,59	22,21	24,45	13,18	14,10	13,53
		240	37,75	37,49	37,16	24,61	24,15	26,59	13,78	14,78	14,05
	C2	0	22,88	23,05	22,40	15,97	16,13	17,08	11,42	11,71	12,79
		60	26,08	26,38	26,22	17,14	17,26	18,26	12,16	12,14	13,53
		120	29,78	30,07	30,17	19,75	19,44	20,95	12,66	13,06	14,21
		180	33,12	33,73	34,20	21,99	21,39	23,21	13,23	14,07	15,00
		240	36,01	36,67	37,36	23,59	23,06	25,18	13,93	14,83	15,38
	C3	0	22,77	23,87	22,65	16,77	15,96	17,14	11,07	12,00	11,71
		60	25,23	26,24	25,11	17,60	17,34	18,40	11,37	12,37	12,04
		120	28,78	29,93	29,02	19,55	19,12	20,51	12,11	13,09	12,55
		180	32,22	33,50	32,67	21,52	20,79	22,57	12,72	13,91	13,13
		240	35,30	36,84	35,75	23,41	22,63	24,74	13,29	14,55	13,73
TF75	C1	0	32,15	32,68	32,17	23,08	23,95	25,36	16,48	18,36	17,97
		60	34,96	36,65	35,81	24,73	25,87	27,17	17,01	19,13	18,36
		120	38,20	42,90	41,49	27,72	29,10	29,00	17,96	20,06	18,78
		180	41,11	48,48	46,43	31,90	33,66	30,16	19,22	21,00	19,22
		240	44,86	53,41	50,75	35,77	38,24	31,60	20,04	21,88	19,63

Tabela 22. Continuação.

TF75	C2	0	31,75	32,51	34,04	23,26	24,28	24,01	15,57	18,14	17,54
		60	34,66	35,12	38,17	25,22	25,90	25,11	17,03	19,00	17,67
		120	40,60	40,93	41,86	28,54	29,61	26,66	18,33	19,72	18,28
		180	49,32	48,68	44,50	32,41	33,49	28,05	19,10	20,60	18,70
		240	55,95	54,97	47,80	35,99	37,62	29,26	19,71	21,30	19,09
	C3	0	30,53	31,42	33,95	23,88	24,09	24,53	16,77	17,87	17,98
		60	33,03	34,49	37,55	24,98	25,91	25,13	17,19	18,34	18,76
		120	39,09	40,91	40,38	28,11	29,12	26,66	17,64	19,09	19,24
		180	45,29	48,15	42,99	31,60	32,48	27,63	18,50	20,07	19,52
		240	49,90	53,64	44,88	34,35	35,46	28,94	19,24	20,78	19,73

Tabela 23. Análise de variância, ao nível de 5% de probabilidade, aplicado aos dados de perda de pressão (kPa) no processo de filtração em função do tempo de filtração (min), para diferentes combinações de taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e granulometrias de areia¹.

Filtro de areia	Granulometria de areia	Quadrado médio			
		TF20	TF40	TF60	TF75
F1	G1	1,96ns	71,51*	88,83*	179,04*
	G2	0,23*	6,62*	28,86*	73,06*
	G3	0,023*	1,90*	2,86*	5,60*
F2	G1	2,08*	83,19*	96,20*	243,46*
	G2	0,22*	6,59*	25,69*	84,64*
	G3	0,042*	1,63*	4,30*	4,96*
F3	G1	3,12*	83,75*	106,04*	99,09*
	G2	0,53*	6,76*	35,80*	13,52*
	G3	0,044ns	0,90*	2,82*	1,32*

¹ * - significativo a 5% de probabilidade, ns – não significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 24. Análise de regressão da perda de pressão (kPa) em função do tempo de filtração (min), para cada filtro de areia avaliado, combinado com as diferentes taxas de filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) e granulometrias de areia (G)¹.

Filtro	G	Modelo	TF20		TF40		TF60		TF75	
			QM	R ² (%)	QM	R ² (%)	QM	R ² (%)	QM	R ² (%)
F1	G1	1	-	-	281,33*	96,81	354,56*	97,49	706,74*	86,39
		2	-	-	142,80*	98,28	177,28ns	97,49	356,47ns	87,15
		3	-	-	95,38ns	98,41	118,41ns	97,67	238,72ns	87,54
	G2	1	0,90*	69,63	26,15*	93,17	114,35*	97,11	286,92*	97,28
		2	0,90ns	69,63	13,24ns	94,37	57,32ns	97,35	145,50*	98,66
		3	0,30ns	69,66	8,83ns	94,37	38,45ns	97,96	97,41ns	99,07
	G3	1	0,079*	34,84	7,56*	92,25	11,40*	91,85	22,37*	92,96
		2	0,044*	38,72	3,80ns	92,65	5,72ns	92,13	11,20ns	92,97
		3	0,030*	39,43	2,53ns	92,74	3,82ns	92,33	7,47ns	93,11
F2	G1	1	8,31*	91,77	330,01*	97,99	384,09*	99,10	962,21*	98,05
		2	4,16ns	91,77	166,23*	98,72	192,05ns	99,10	484,23*	98,68
		3	2,78ns	92,03	110,89ns	98,78	128,25ns	99,27	324,61*	99,23
	G2	1	0,87*	72,25	25,91*	89,63	102,34*	97,05	332,89*	96,80
		2	0,44ns	72,68	13,17ns	91,15	51,24ns	97,18	168,88*	98,22
		3	0,30ns	74,63	8,78ns	91,18	34,24ns	97,42	112,85ns	98,45
	G3	1	0,15*	73,19	6,44*	88,79	17,01*	98,01	19,78*	90,64
		2	0,083ns	82,76	3,23ns	88,94	8,52ns	98,17	9,90ns	90,70
		3	0,0565ns	84,41	2,17ns	89,70	5,70ns	98,62	6,61ns	90,80
F3	G1	1	12,45*	94,54	332,91*	98,62	423,32*	98,44	395,43*	92,83
		2	6,23ns	94,66	167,28*	99,11	211,72ns	98,47	198,11ns	93,01
		3	4,16ns	94,69	111,66ns	99,24	141,38ns	98,63	132,10ns	93,03
	G2	1	2,08*	95,89	26,48*	93,20	142,36*	96,08	53,94*	77,77
		2	0,09ns	4,93	13,51ns	95,07	71,27ns	96,20	26,97ns	77,78
		3	0,69ns	96,48	9,01ns	95,08	47,70ns	96,57	17,99ns	77,82
	G3	1	-	-	3,59*	88,93	11,26*	59,92	5,26*	74,43
		2	-	-	1,80ns	89,17	5,63ns	59,92	2,64ns	74,71
		3	-	-	1,20ns	89,20	3,76ns	60,11	1,76ns	74,76

¹ * - significativo a 5% de probabilidade, ns – não significativo a 5% de probabilidade, QM – quadrado médio. ¹ – 1, 2 e 3: modelos matemáticos linear, polinomial de 2º grau e polinomial de 3º grau respectivamente.

Tabela 25. Dados de massa de sólidos removidos no processo de filtração nas diferentes camadas do leito filtrante ($MS_{Fcamada}$) (g), em função das diferentes combinações de granulometria de areia e taxas de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), para os três ciclos de filtração.

Granulometria	Taxa de filtração	Profundidade	Ciclo de filtração		
			C1	C2	C3
G1	TF20	1	5,83	-0,70	4,51
		2	5,06	-4,65	0,05
		3	1,59	-4,11	-0,05
		4	-0,99	0,88	1,19
	TF40	1	4,54	5,09	8,85
		2	2,05	1,61	3,81
		3	0,16	1,23	1,12
		4	0,86	3,59	1,58
	TF60	1	6,34	6,38	4,29
		2	3,26	4,75	2,71
		3	3,12	3,37	1,76
		4	4,18	4,20	-2,60
	75	1	9,68	6,34	5,09
		2	3,45	4,23	3,30
		3	2,25	3,45	2,46
		4	1,59	3,19	0,26
G2	TF20	1	1,63	-3,37	-0,16
		2	0,13	-0,81	-2,40
		3	-2,69	-1,28	-1,50
		4	1,98	-0,84	-5,88
	TF40	1	1,85	0,46	0,79
		2	1,32	0,73	0,51
		3	-1,39	-1,23	-0,44
		4	0,02	2,27	-1,03
	TF60	1	6,73	6,14	4,67
		2	4,05	2,46	2,95
		3	2,13	1,14	1,81
		4	0,33	0,42	-2,07
	TF75	1	7,68	5,28	4,42
		2	4,07	4,97	2,64
		3	3,59	1,92	2,27
		4	-0,71	0,48	0,05
G3	TF20	1	-4,38	-2,42	0,82
		2	-1,21	-0,97	0,37
		3	-3,01	-4,05	-0,05
		4	-3,46	-0,57	-0,68
	TF40	1	7,20	1,87	2,24
		2	2,95	0,60	1,43
		3	1,89	0,75	-0,26
		4	2,00	0,24	1,63
	TF60	1	3,85	4,09	2,66
		2	2,75	2,16	2,47

Tabela 25. Continuação.

G3	TF60	3	0,33	1,72	0,73
		4	2,35	0,93	-0,31
	TF75	1	5,61	2,79	1,94
		2	2,44	1,85	0,70
		3	0,75	1,83	-0,33
		4	-1,45	1,17	0,73

Tabela 26. Dados de massa de sólidos removidos no processo de filtração para o leito filtrante por inteiro (MS_{Ftotal}) (g), em função das diferentes combinações de granulometria de areia e taxa de filtração, para três ciclos de filtração.

Granulometria	Taxa de filtração	Ciclos de filtração		
		C1	C2	C3
G1	TF20	11,49	-8,58	5,70
	TF40	7,62	11,53	15,36
	TF60	16,90	18,69	6,16
	TF75	16,97	17,21	11,11
G2	TF20	1,04	-6,30	-9,95
	TF40	1,80	2,24	-0,16
	TF60	13,23	10,15	7,37
	TF75	14,62	12,64	9,38
G3	TF20	-12,06	-8,01	0,46
	TF40	14,04	3,46	5,04
	TF60	9,27	8,91	5,55
	TF75	7,35	7,64	3,04

Tabela 27. Dados de eficiência de remoção no processo de filtração utilizando SST contidos na água (ER_{SST}) (%) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), granulometrias de areia, ciclos de filtração e tempo de coleta das amostras.

Taxa de filtração	Ciclo	Tempo	Granulometria - G1			Granulometria - G2			Granulometria - G3		
			F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
TF20	C1	Início	62,5	-86,7	54,3	33,3	25,0	25,0	-31,8	2,9	15,4
		Meio	42,3	5,3	14,3	44,0	-28,6	-28,6	16,7	21,9	-4,2
		Fim	7,2	53,3	22,6	19,0	15,8	15,8	9,5	20,6	10,3
	C2	Início	20,0	-31,6	48,3	10,0	33,3	33,3	35,0	20,0	21,1
		Meio	18,2	4,0	10,0	0,0	10,0	10,0	21,1	11,8	15,0
		Fim	28,0	-19,0	10,0	18,2	21,7	21,7	-6,3	47,6	-5,9
	C3	Início	33,3	-8,7	-13,6	20,0	25,0	25,0	-4,8	-26,7	0,0
		Meio	-36,8	0,0	-4,2	14,3	-23,5	-23,5	0,0	-18,8	0,0
		Fim	28,6	50,0	-55,6	15,0	22,7	22,7	23,8	-26,7	-5,9
TF40	C1	Início	69,2	38,5	33,3	60,0	-27,3	-33,3	-6,7	0,0	0,0
		Meio	60,9	26,7	18,7	50,0	69,2	40,0	37,5	42,1	31,2
		Fim	52,4	19,0	-37,5	75,0	76,5	41,7	33,3	0,0	10,0
	C2	Início	55,6	44,4	-275,0	27,3	0,0	-50,0	-100,0	10,0	0,0
		Meio	24,0	20,0	50,0	25,0	33,3	-10,0	45,5	29,4	56,2

Tabela 27. Continuação.

TF40	C2	Fim	57,9	10,0	47,1	0,0	0,0	42,9	47,4	10,0	33,3
	C3	Início	41,7	43,7	50,0	92,3	-166,7	25,0	23,1	0,0	66,7
		Meio	60,0	28,6	63,2	36,4	100,0	26,7	43,7	7,7	9,1
		Fim	47,6	68,4	62,5	-36,4	66,7	100,0	20,0	-27,3	41,2
TF60	C1	Início	83,3	71,4	87,5	62,5	-44,4	33,3	33,3	-200,0	25,0
		Meio	76,9	92,9	-28,6	50,0	50,0	78,3	88,9	14,3	20,0
		Fim	73,3	25,0	16,7	57,1	26,3	43,5	16,7	0,0	0,0
	C2	Início	-20,0	11,1	36,4	26,7	0,0	35,7	30,0	0,0	85,7
		Meio	76,9	71,4	38,5	60,0	45,5	44,4	66,7	52,9	94,3
		Fim	72,7	55,6	0,0	45,0	27,3	38,9	29,4	33,3	-210,0
	C3	Início	28,6	57,5	-33,3	57,1	-75,0	-22,2	-100,0	-14,3	-166,7
		Meio	36,4	42,9	25,0	21,4	35,3	-9,1	63,6	78,6	-14,3
		Fim	25,0	33,3	41,7	13,3	21,1	23,5	45,5	50,0	-110,5
TF75	C1	Início	80,0	42,9	66,7	47,6	50,0	74,1	-10,0	91,7	27,3
		Meio	41,7	69,2	81,8	30,8	92,3	66,7	-30,0	-50,0	40,0
		Fim	33,3	53,8	50,0	50,0	-600,0	-33,3	23,1	22,2	77,8
	C2	Início	50,0	71,4	61,1	75,0	-80,0	77,8	25,0	-60,0	64,7
		Meio	90,9	40,0	30,0	12,5	-333,3	33,3	40,0	-14,3	-150,0
		Fim	61,5	53,3	50,0	54,5	50,0	33,3	50,0	77,8	-14,3
	C3	Início	25,0	0,0	56,5	16,7	-11,1	89,5	14,3	-166,7	20,0
		Meio	64,3	41,7	0,0	78,6	66,7	-100,0	-6,2	-66,7	33,3
		Fim	46,7	50,0	50,0	50,0	87,5	11,1	16,7	69,2	33,3

Tabela 28. Dados de eficiência de remoção no processo de filtração por ciclo, utilizando SST contidos na água ($ER_{SST \text{ ciclo}} \text{ (}\%)$) para diferentes combinações de taxa de filtração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), granulometrias de areia, e ciclos de filtração.

Ciclo de filtração	Taxa de filtração	Filtro F1			Filtro F2			Filtro F3		
		G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
C1	TF20	56,25	32,86	-1,49	6,25	8,77	14,85	33,33	16,67	7,59
	TF40	59,65	62,26	21,74	26,53	51,85	17,39	11,11	33,33	14,58
	TF60	78,26	57,81	50,00	63,64	21,74	-29,41	25,93	55,17	10,53
	TF75	65,85	43,18	-3,03	55,00	45,83	52,17	66,67	68,75	48,00
C2	TF20	22,39	10,67	18,18	-13,85	21,69	28,30	26,09	3,64	10,71
	TF40	45,07	18,75	27,66	20,51	10,26	18,92	15,38	10,26	33,33
	TF60	58,62	45,45	41,03	50,00	28,07	32,50	24,32	40,00	64,42
	TF75	67,65	48,15	37,50	53,12	-40,00	14,29	55,00	60,00	26,92
C3	TF20	9,84	16,39	6,67	16,67	9,09	-23,91	-21,88	3,92	-1,92
	TF40	50,94	34,29	29,55	48,98	50,00	-5,71	58,82	58,33	40,00
	TF60	30,77	30,23	21,43	41,50	17,50	48,48	11,11	2,70	-105,71
	TF75	46,34	56,67	3,45	38,24	46,15	10,53	47,83	76,12	24,14

Tabela 29. Dados de eficiência de remoção total no processo de filtração utilizando SST contidos na água ($ER_{SST\ total}$) para diferentes combinações de taxa de filtração ($m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$) e granulometrias de areia, para os filtros de areia (F1, F2 e F3).

Taxas de filtração	Granulometria - G1			Granulometria - G2			Granulometria - G3		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
TF20	33,48	3,86	15,00	19,90	14,36	8,43	7,14	9,50	5,88
TF40	51,38	32,85	31,75	39,71	38,21	35,90	26,28	11,02	28,46
TF60	60,40	53,29	20,00	46,30	23,08	36,55	37,36	26,67	20,25
TF75	61,15	49,06	54,19	48,51	21,43	71,23	10,47	26,98	32,50

Tabela 30. Dados de eficiência de remoção no processo de filtração utilizando os valores de SST presentes na areia (ER_{AREIA}) (%), para as diferentes combinações de taxas ($m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$) e ciclos de filtração, e granulometrias de areia.

Ciclos de filtração	Taxas de filtração	Granulometria		
		G1	G2	G3
C1	TF20	12,49	1,50	-13,11
	TF40	7,21	1,76	13,46
	TF60	14,27	7,05	13,84
	TF75	7,50	7,44	6,09
C2	TF20	-11,46	-7,95	-13,11
	TF40	10,39	2,38	3,69
	TF60	17,08	5,61	4,36
	TF75	7,91	13,69	7,23
C3	TF20	7,54	-16,00	0,78
	TF40	13,48	-0,20	5,69
	TF60	6,72	5,50	5,18
	TF75	5,18	5,12	2,65

Tabela 31. Valores médios entre filtros de areia da eficiência de remoção no processo de filtração para diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP}) (%), considerando a combinação de diferentes granulometrias de areia e taxas de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), em diferentes ciclos de filtração, no início e no fim do processo de filtração.

Granulometria	Ciclos de filtração	Faixa de diâmetro de partícula (μm)	Taxas de filtração							
			TF20		TF40		TF60		TF75	
			Início	Final	Início	Final	Início	Final	Início	Final
G1	C1	< 2	-29,14	5,21	-38,54	-8,72	-17,93	-43,00	-126,56	-37,60
		2 - 60.	-0,22	-0,03	-9,17	-1,00	-4,46	-0,58	-0,67	3,00
		60 - 200	49,45	-11,81	57,66	13,67	75,60	32,87	69,95	23,59
		200 - 600	100,00	100,00	100,00	100,00	94,26	100,00	29,31	28,95
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
	C2	< 2	-43,43	6,27	-43,84	5,64	-40,10	-17,17	-90,77	-29,92
		2 - 60.	-0,98	-1,47	-5,63	0,98	-0,46	2,00	-1,22	-3,18
		60 - 200	61,15	19,05	68,88	-13,96	80,34	41,46	67,67	38,34
		200 - 600	100,00	-	100,00	-	100,00	91,62	99,55	100,00
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
	C3	< 2	-55,10	-1,16	-49,66	-6,58	-39,87	-24,57	-72,67	-28,07
		2 - 60.	-1,77	-0,51	-5,03	0,88	-4,16	-1,55	-6,01	-1,98
		60 - 200	65,06	6,58	63,36	-11,03	74,65	34,66	91,45	51,31
		200 - 600	-	-	89,53	100,00	100,00	84,51	100,00	94,98
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
G2	C1	< 2	-43,69	-7,17	-30,16	-5,90	-82,58	-36,43	-118,64	-1,16
		2 - 60.	-1,83	0,28	-6,37	-0,80	-8,14	1,48	1,20	-6,93
		60 - 200	47,87	7,22	76,54	9,26	68,03	10,04	64,21	40,52
		200 - 600	87,97	-	100,00		91,08	52,41	96,44	82,05
		600 - 2000	100,00	-			100,00	-	100,00	100,00
	C2	< 2	-19,07	-26,06	-34,92	-37,20	-181,91	-16,03	-43,09	-12,14
		2 - 60.	-3,55	0,58	-6,59	-1,18	-3,07	2,04	-9,14	-4,57
		60 - 200	55,55	23,13	84,61	25,77	68,71	-13,72	81,44	47,23

Tabela 31. Continuação.

G2	C2	200 - 600	100,00	-	100,00	-	100,00	56,37	94,86	53,15
		600 - 2000	-	-	-	-	100,00	-	-	100,00
	C3	< 2	-41,10	5,58	-32,51	-15,55	-26,77	-18,16	-50,06	-13,00
		2 - 60.	-3,67	2,15	-6,69	0,34	-8,01	-0,64	-2,21	-2,79
		60 - 200	56,33	-42,31	88,15	16,56	71,89	10,27	81,64	50,16
		200 - 600	100,00	-	100,00	100,00	95,67	60,85	96,44	99,45
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	100,00
G3	C1	< 2	4,41	-3,13	-28,47	-13,28	-31,79	-19,47	-76,19	-15,94
		2 - 60.	-4,24	0,91	-6,27	1,67	-0,74	-2,27	-5,13	-0,64
		60 - 200	43,79	-16,09	60,64	2,29	26,42	-1,80	61,53	23,31
		200 - 600	89,03	69,85	76,56	-41,07	-117,10	68,91	86,41	83,81
		600 - 2000	100,00	-	47,68	-	-	86,13	100,00	100,00
	C2	< 2	-3,75	-0,71	-41,82	-12,85	-15,88	-24,44	-27,56	-12,40
		2 - 60.	-4,78	-2,33	-21,98	-2,54	2,44	3,10	-5,46	-2,76
		60 - 200	36,01	18,73	44,28	20,56	15,41	-21,48	53,39	25,90
		200 - 600	61,90	95,85	88,01	35,98	-63,85	65,96	89,35	73,23
		600 - 2000	-	-	100,00	-	48,94	54,52	-	-
	C3	< 2	-0,81	10,24	-21,87	-23,95	-73,94	-36,40	-42,98	-15,57
		2 - 60.	-5,21	-2,58	-5,93	1,43	-14,52	1,17	-6,30	-0,25
		60 - 200	52,08	-14,34	45,39	-30,04	71,13	14,77	55,47	10,37
		200 - 600	100,00	97,66	80,69	82,11	97,28	-77,85	92,87	72,15
		600 - 2000	-	-	-	-	100,00	-84,64	-	-

Tabela 32. Valores de desvio padrão entre filtros de areia (%) da eficiência de remoção entre filtros no processo de filtração para diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP}), considerando a combinação de diferentes granulometrias de areia e taxas de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), em diferentes ciclos de filtração, no início e no fim do processo de filtração.

Granulometria	Ciclos de filtração	Faixa de diâmetro de partícula (μm)	Taxas de filtração							
			TF20		TF40		TF60		TF75	
			Início	Final	Início	Final	Início	Final	Início	Final
G1	C1	< 2	12,64	17,44	4,58	3,11	5,53	5,17	51,58	1,53
		2 - 60.	1,38	1,29	8,75	0,51	3,70	2,52	3,93	1,15
		60 - 200	5,35	8,40	17,77	8,91	2,87	7,74	16,74	1,38
		200 - 600	0,00	0,00	0,00	0,00	5,15	0,00	112,15	1,48
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
	C2	< 2	12,55	0,97	9,23	3,60	1,70	5,67	12,72	5,92
		2 - 60.	0,69	0,60	5,45	0,71	2,89	0,93	1,00	0,39
		60 - 200	4,62	9,79	0,13	5,96	9,78	2,46	2,93	0,77
		200 - 600	0,00	-	0,00	-	0,00	8,38	0,78	0,00
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
	C3	< 2	9,48	1,25	8,00	2,69	1,55	0,26	10,80	3,57
		2 - 60.	0,34	1,08	1,03	1,18	1,35	0,31	2,47	3,02
		60 - 200	9,80	0,89	9,02	3,72	6,14	6,64	5,88	7,94
		200 - 600	-	-	18,13	0,00	0,00	10,37	0,00	8,70
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
G2	C1	< 2	15,48	1,95	13,21	0,49	7,04	26,09	34,08	1,62
		2 - 60.	0,74	0,01	13,77	1,22	5,17	2,21	0,97	2,61
		60 - 200	11,47	2,28	10,70	2,80	11,71	11,62	24,54	10,45
		200 - 600	17,01	-	0,00	-	13,19	40,67	6,16	17,95
		600 - 2000	0,00	-	-	-	0,00	-	0,00	0,00
	C2	< 2	5,20	8,41	9,10	13,24	42,66	3,81	9,03	0,80
		2 - 60.	1,56	0,75	0,80	1,04	6,59	0,23	4,14	2,84
		60 - 200	9,00	5,61	15,39	2,12	1,85	5,11	5,86	5,96

Tabela 32. Continuação.

G2	C2	200 - 600	0,00	-	0,00	-	0,00	0,87	8,91	4,27
		600 - 2000	-	-	-	-	0,00	-	-	0,00
	C3	< 2	5,66	2,69	3,18	1,05	2,99	5,73	3,18	5,07
		2 - 60.	1,07	0,66	0,88	0,82	2,06	3,26	1,74	0,12
		60 - 200	12,52	7,69	11,85	5,41	5,04	24,15	8,11	3,22
		200 - 600	0,00	-	0,00	0,00	4,33	30,54	3,56	0,94
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	0,00
G3	C1	< 2	8,99	13,95	18,83	24,58	8,12	3,06	40,09	9,18
		2 - 60.	4,59	1,90	3,04	3,95	4,16	0,95	5,88	3,38
		60 - 200	9,89	15,42	7,38	0,15	2,65	3,73	9,78	9,87
		200 - 600	10,97	42,63	7,75	9,39	17,10	23,56	17,70	10,88
		600 - 2000	0,00	-	0,00	-	-	24,02	0,00	0,00
	C2	< 2	1,89	16,56	6,94	0,96	7,22	1,20	3,40	6,79
		2 - 60.	1,62	0,80	2,53	2,01	1,09	1,21	3,30	1,13
		60 - 200	4,68	10,13	5,03	11,22	0,04	7,55	12,87	16,39
		200 - 600	16,84	5,87	7,28	7,26	36,15	22,54	9,68	18,69
		600 - 2000	-	-	0,00	-	0,00	21,73	-	-
	C3	< 2	8,85	4,34	1,17	10,41	13,94	33,12	10,96	0,26
		2 - 60.	1,34	4,58	1,36	0,82	2,71	0,35	1,50	0,14
		60 - 200	8,97	9,20	11,57	9,65	12,71	5,51	12,84	1,69
		200 - 600	0,00	3,30	6,53	8,40	4,71	12,26	2,91	0,08
		600 - 2000	-	-	-	-	0,00	15,36	-	-

Tabela 33. Valores de coeficiente de variação entre filtros de areia (%) da eficiência de remoção entre filtros no processo de filtração para diferentes faixas de diâmetro de partículas contidas na água (ER_{DP}), considerando a combinação de diferentes granulometrias de areia e taxas de filtração ($m^3 m^{-2} h^{-1}$), em diferentes ciclos de filtração, no início e no fim do processo de filtração.

Granulometria	Ciclos de filtração	Faixa de diâmetro de partícula (μm)	Taxas de filtração							
			TF20		TF40		TF60		TF75	
			Início	Final	Início	Final	Início	Final	Início	Final
G1	C1	< 2	43,36	-334,64	11,89	35,69	30,83	12,03	40,76	4,06
		2 - 60.	638,64	4000,16	95,49	51,65	82,99	437,38	583,41	-38,23
		60 - 200	-10,82	71,17	-30,81	-65,15	-3,79	-23,54	-23,93	-5,85
		200 - 600	0,00	0,00	0,00	0,00	-5,46	0,00	-382,64	-5,11
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
	C2	< 2	28,90	-15,48	21,06	-63,84	4,23	33,02	14,02	19,78
		2 - 60.	70,33	41,05	96,73	-72,58	623,81	-46,69	81,86	12,39
		60 - 200	-7,55	-51,38	-0,18	42,72	-12,17	-5,94	-4,33	-2,01
		200 - 600	0,00	-	0,00	-	0,00	-9,15	-0,78	0,00
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
	C3	< 2	17,22	107,90	16,10	40,83	3,89	1,06	14,86	12,72
		2 - 60.	18,92	210,64	20,46	-134,62	32,41	19,79	41,12	152,72
		60 - 200	-15,06	-13,59	-14,24	33,73	-8,23	-19,16	-6,43	-15,47
		200 - 600	-	-	-20,24	0,00	0,00	-12,27	0,00	-9,16
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
G2	C1	< 2	35,43	27,22	43,81	8,23	8,53	71,63	28,72	139,93
		2 - 60.	40,59	-3,08	215,99	153,19	63,52	-149,64	-80,33	37,69
		60 - 200	-23,96	-31,59	-13,98	-30,22	-17,22	-115,75	-38,23	-25,79
		200 - 600	-19,34	-	0,00	-	-14,48	-77,60	-6,39	-21,88
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
	C2	< 2	27,29	32,27	26,06	35,59	23,45	23,73	20,96	6,56
		2 - 60.	43,78	-128,66	12,09	87,69	214,64	-11,31	45,33	62,08
		60 - 200	-16,19	-24,28	-18,19	-8,21	-2,69	37,29	-7,19	-12,61

Tabela 33. Continuação.

G2	C2	200 - 600	0,00	-	0,00	-	0,00	-1,54	-9,39	-8,03
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
	C3	< 2	13,76	-48,19	9,77	6,77	11,18	31,57	6,35	39,03
		2 - 60.	29,23	-30,70	13,20	-239,51	25,66	508,69	78,44	4,17
		60 - 200	-22,22	18,16	-13,45	-32,66	-7,01	-235,03	-9,93	-6,42
		200 - 600	0,00	-	0,00	0,00	-4,52	-50,18	-3,69	-0,95
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
G3	C1	< 2	-203,63	446,08	66,15	185,06	25,55	15,70	52,61	57,57
		2 - 60.	108,13	-208,13	48,47	-236,40	560,73	41,75	114,75	530,17
		60 - 200	-22,59	95,83	-12,16	-6,55	-10,03	207,18	-15,90	-42,32
		200 - 600	-12,32	-61,03	-10,13	22,86	14,61	-34,18	-20,49	-12,98
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
	C2	< 2	50,52	2324,26	16,60	7,44	45,47	4,89	12,34	54,75
		2 - 60.	33,87	34,53	11,52	79,07	-44,51	-39,17	60,38	40,85
		60 - 200	-13,01	-54,06	-11,36	-54,56	-0,25	35,16	-24,11	-63,27
		200 - 600	-27,20	-6,12	-8,28	-20,18	56,61	-34,17	-10,84	-25,53
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-
	C3	< 2	1095,93	-42,34	5,34	43,46	18,85	91,00	25,50	1,68
		2 - 60.	25,66	177,17	23,02	-57,40	18,64	-30,02	23,73	56,44
		60 - 200	-17,22	64,14	-25,50	32,12	-17,87	-37,32	-23,15	-16,34
		200 - 600	0,00	-3,38	-8,09	-10,23	-4,84	15,75	-3,13	-0,11
		600 - 2000	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 34. Análise de regressão da perda de pressão (kPa) em função da velocidade superficial (m h^{-1}) para o processo de retrolavagem na aplicação do modelo matemático exponencial.

Modelo	Grau de liberdade	Filtro - F1		Filtro - F2		Filtro - F3	
		Quadrado médio	R ² (%)	Quadrado médio	R ² (%)	Quadrado médio	R ² (%)
Exponencial	1	24,25*	92,04	22,72*	89,49	16,33*	94,05
Erro	13	0,16	-	0,20	-	0,079	-
Total	14	-	-	-	-	-	-

Obs.: * - significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 35. Valores médios de perda de pressão (kPa) em diferentes períodos do processo de retrolavagem (min) com comparação estatística pelo teste de Tukey ($P < 0,05$)¹.

Filtro de areia	Granulometria	Tempo (min)	Grau de sujidade			
			GS1	GS2	GS3	GS4
F1	G1	3	12,59 a	12,60 a	12,89 a	13,05 a
		6	12,59 a	12,53 a	12,92 a	12,93 a
		9	12,58 a	12,60 a	12,89 a	12,99 a
		12	12,62 a	12,64 a	12,96 a	13,09 a
		15	12,62 a	12,62 a	12,95 a	13,06 a
	G2	3	17,46 a	17,65 a	16,83 a	17,09 a
		6	17,52 a	17,71 a	16,83 a	17,08 a
		9	17,55 a	17,68 a	16,85 a	17,07 a
		12	17,54 a	17,67 a	16,85 a	17,05 a
		15	17,57 a	17,69 a	16,85 a	17,08 a
	G3	3	16,96 a	15,18 a	16,72 a	16,54 a
		6	16,96 a	15,19 a	16,71 a	16,57 a
		9	16,96 a	15,22 a	16,76 a	16,58 a
		12	16,97 a	15,24 a	16,75 a	16,56 a
		15	17,00 a	15,19 a	16,80 a	16,54 a
F2	G1	3	14,63 a	15,83 a	16,31 a	16,71 a
		6	14,74 a	16,02 a	16,47 a	16,92 a
		9	14,80 a	16,07 a	16,51 a	17,02 a
		12	14,80 a	16,11 a	16,58 a	17,03 a
		15	14,81 a	16,16 a	16,58 a	17,04 a
	G2	3	21,49 a	22,48 a	21,52 a	22,60 a
		6	21,59 a	22,61 a	21,62 a	22,66 a
		9	21,67 a	22,60 a	21,60 a	22,64 a
		12	21,71 a	22,59 a	21,62 a	22,69 a
		15	21,76 a	22,68 a	21,67 a	22,68 a
	G3	3	21,05 a	19,97 a	21,40 a	21,57 a
		6	21,06 a	20,07 a	21,45 a	21,62 a

¹Médias seguidas por letras diferentes nos tempos de avaliação da retrolavagem, para determinado filtro e granulometria de areia, diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Tabela 35. Continuação.

F2	G3	9	21,04 a	20,10 a	21,41 a	21,64 a
		12	21,05 a	20,12 a	21,41 a	21,66 a
		15	21,07 a	20,11 a	21,45 a	21,64 a
F3	G1	3	13,40 a	13,73 a	13,85 a	14,50 a
		6	13,42 a	13,76 a	13,54 a	14,53 a
		9	13,44 a	13,74 a	13,49 a	14,65 a
		12	13,49 a	13,70 a	13,64 a	14,71 a
		15	13,46 a	13,67 a	13,63 a	14,66 a
	G2	3	18,07 a	18,48 a	18,33 a	18,38 a
		6	18,12 a	18,39 a	18,32 a	18,34 a
		9	18,12 a	18,43 a	18,34 a	18,35 a
		12	18,09 a	18,42 a	18,33 a	18,34 a
		15	18,05 a	18,43 a	18,41 a	18,37 a
	G3	3	18,67 a	16,61 a	18,11 a	18,22 a
		6	18,62 a	16,63 a	18,11 a	18,20 a
		9	18,67 a	16,68 a	18,07 a	18,15 a
		12	18,58 a	16,67 a	18,10 a	18,20 a
		15	18,90 a	17,33 a	18,78 a	18,79 a

Médias seguidas por letras diferentes nos tempos de avaliação da retrolavagem, para determinado filtro e granulometria de areia, diferem entre si pelo teste Tukey ($P < 0,05$).

Tabela 36. Dados médios de massa de sólidos removidos no processo de retrolavagem nas diferentes camadas do leito filtrante ($MS_{Rcamada}$) (g), em função da combinação das diferentes granulometrias de areia, graus de sujidade do leito filtrante e ciclos de filtração.

Granulometria	Grau de sujidade	Profundidade	Ciclos de filtração		
			C1	C2	C3
G1	GS1	1	4,32	5,77	4,36
		2	2,64	-0,38	1,54
		3	3,10	0,73	-2,35
		4	1,92	2,42	-0,22
	GS2	1	7,64	6,14	7,70
		2	3,87	3,28	3,90
		3	2,91	1,14	0,92
		4	4,69	2,62	1,83
	GS3	1	5,79	8,08	4,16
		2	4,16	5,31	3,41
		3	5,79	3,30	2,58
		4	5,79	3,46	1,30
	GS4	1	11,12	6,62	5,90
		2	5,08	4,47	4,05
		3	4,53	4,38	2,55
		4	3,10	2,24	1,56
G2	GS1	1	0,81	-1,52	0,99
		2	1,72	-1,92	0,75
		3	-0,07	0,18	-0,24
		4	4,18	-2,33	-3,54
	GS2	1	2,60	0,70	1,50
		2	2,64	1,70	1,15
		3	0,75	0,27	0,40
		4	2,84	2,58	0,40
	GS3	1	7,86	6,54	4,71
		2	5,15	4,31	2,46
		3	2,86	1,92	2,84
		4	3,19	-0,15	-0,40
	GS4	1	8,56	5,74	4,75
		2	5,42	5,09	3,34
		3	5,63	2,35	2,99
		4	1,85	3,32	0,73
G3	GS1	1	0,22	1,17	-0,13
		2	1,80	0,57	0,15
		3	-1,41	-0,97	1,34
		4	1,80	0,31	3,13
	GS2	1	7,84	3,30	2,60
		2	2,60	3,26	1,59
		3	4,40	0,20	1,45
		4	2,13	4,03	2,31
	GS3	1	4,49	4,78	3,37
		2	4,12	3,57	2,03
		3	3,15	2,11	1,34

Tabela 36. Continuação.

G3	GS3	4	3,37	1,74	0,29
	GS4	1	5,53	3,39	2,33
		2	2,69	2,49	1,34
		3	1,17	2,75	-0,22
		4	1,10	2,46	2,49

Tabela 37. Dados médios de massa de sólidos removidos no processo de retrolavagem para o leito filtrante por inteiro (MS_{Rtotal}) (g), em função da combinação das diferentes granulometrias de areia, graus de sujidade do leito filtrante e ciclos de filtração.

Granulometria	Graus de sujidade	Ciclos de filtração		
		C1	C2	C3
G1	GS1	11,99	8,54	3,34
	GS2	19,11	13,18	14,35
	GS3	21,53	20,16	11,45
	GS4	23,82	17,70	14,06
G2	GS1	6,63	-5,59	-2,03
	GS2	8,83	5,26	3,46
	GS3	19,06	12,63	9,60
	GS4	21,46	16,49	11,80
G3	GS1	2,40	1,08	4,49
	GS2	16,97	10,79	7,95
	GS3	15,14	12,21	7,04
	GS4	10,50	11,09	5,94

Tabela 38. Valores médios de eficiência de limpeza (E_{Li}) (%) do processo de retrolavagem para diferentes camadas do leito filtrante, na combinação de diferentes ciclos de filtração, granulometrias de areia e graus de sujidade do leito filtrante.

Granulometria	Ciclos de filtração	Profundidade	Graus de sujidade			
			GS1	GS2	GS3	GS4
G1	C1	1	26,52	62,05	52,40	77,13
		2	19,67	44,80	47,10	61,01
		3	23,21	41,30	59,51	58,81
		4	19,30	44,99	41,25	39,86
	C2	1	51,14	62,85	69,45	68,63
		2	-6,29	51,44	56,42	59,80
		3	11,94	21,16	45,11	66,20
		4	27,10	28,09	27,84	28,44
	C3	1	43,51	61,67	53,04	72,69
		2	23,46	56,50	50,00	64,24
		3	1,71	17,12	44,76	54,30
		4	-2,86	22,12	20,40	26,48
G2	C1	1	9,89	38,27	70,44	72,29
		2	23,04	35,21	53,42	62,71

Tabela 38. Continuação.

G2	C1	3	-0,96	10,30	40,21	60,91
		4	31,49	26,72	33,02	20,24
	C2	1	-38,25	14,96	69,32	67,02
		2	-38,89	30,49	62,01	62,19
		3	2,86	5,17	35,71	42,38
		4	-28,22	25,68	-2,13	42,69
	C3	1	18,56	31,66	62,23	65,57
		2	16,80	26,25	43,93	58,15
		3	-5,04	8,76	53,82	54,70
		4	-75,39	6,25	-8,12	16,26
G3	C1	1	3,37	63,13	55,06	63,98
		2	24,56	30,87	52,82	45,65
		3	-22,32	47,24	46,74	25,70
		4	17,04	18,92	34,52	17,00
	C2	1	30,19	51,14	61,70	57,45
		2	12,50	50,71	61,13	49,28
		3	-26,37	3,56	39,66	52,63
		4	3,81	43,14	23,75	37,54
	C3	1	-3,63	48,30	59,93	52,26
		2	3,38	34,66	42,86	41,01
		3	29,08	27,82	33,95	-10,26
		4	43,62	33,25	5,56	51,71

Tabela 39. Valores médios de eficiência de limpeza (E_L) (%) do processo de retrolavagem para diferentes combinações de ciclos de filtração, granulometrias de areia e graus de sujidade do leito filtrante.

Granulometria de areia	Ciclos de filtração	Grau de sujidade			
		GS1	GS2	GS3	GS4
G1	1	22,60	49,74	49,33	62,35
	2	26,30	42,72	49,39	56,03
	3	19,48	43,45	42,72	56,23
G2	1	18,16	27,42	50,73	55,21
	2	-23,70	20,53	44,05	54,88
	3	-10,58	17,15	41,03	51,44
G3	1	7,82	40,99	46,61	41,05
	2	5,33	38,70	46,51	48,79
	3	22,83	35,93	35,92	40,45