

BRUNO MORENO RAMOS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE AREIA DE BRITAGEM COMO LEITO
FILTRANTE DE FILTROS RÁPIDOS PARA TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586a
2018
Silva, Bruno Moreno Ramos da, 1990-
Avaliação do emprego de areia de britagem como leito
filtrante de filtros rápidos para tratamento de água / Bruno
Moreno Ramos da Silva. – Viçosa, MG, 2018.
xv, 153f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Rafael Kopschitz Xavier Bastos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 110-117.

1. Água - Purificação - Filtração. 2. Filtros e filtração.
3. Água potável. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 628.352

BRUNO MORENO RAMOS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO EMPREGO DE AREIA DE BRITAGEM COMO LEITO
FILTRANTE DE FILTROS RÁPIDOS PARA TRATAMENTO DE ÁGUA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

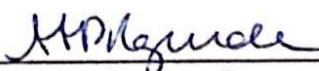
APROVADA: 20 de fevereiro de 2018.



Marcelo Libânio



Pedro Kopschitz Xavier Bastos



Ana Augusta Passos Rezende
(Presidente)

AGRADECIMENTOS

À Luzinete Maria Ramos da Silva, pelo exemplo de força e dedicação pela família.

À Maria Luzinete Ramos da Silva, por todo apoio e incentivos durante toda vida.

À Universidade Federal de Viçosa, pelas oportunidades oferecidas.

Ao meu Professor – Orientador Rafael Kopschitz Xavier Aastos pelas oportunidades concedidas e pela excelente orientação oferecida durante o desenvolvimento do presente trabalho.

À Pedra Sul Mineração Ltda., ao professor Pedro K. X. Aastos, pelo fornecimento da areia de britagem e aos técnicos Hugo Aenzoini e Luciano, pela preparação do material.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior pela bolsa de estudos concedida.

Ao Sr. Vítor Aaía pelo auxílio com o processo de compra dos materiais.

Ao Sr. Raphael Apolinário do Serviço de Usinagem - Divisão de Manutenção de Equipamentos da UFV, o qual com sua paciência e elevada capacitação técnica tornou viável a execução do projeto dos filtros piloto.

Ao Sr. Gustavo Amorim por todo apoio técnico prestado durante a elaboração e definição dos detalhes projeto e execução da instalação piloto.

À Ana Teresa Oliveira Leite, pelo companheirismo durante esta etapa e pelo auxílio com o transporte dos materiais.

À Cris Silva, grande amiga, Pagu e Pretinho companheiros diários.

Ao Sr. Junio José Pereira de Souza da linha de produtos Ônix, que voluntariamente ofereceu apoio à pesquisa doando a cola necessária à montagem dos filtros.

Ao professor Leonardo Pedroti (DEC – UFV), pela disponibilidade do Laboratório de Materiais de Construção (LMC) e auxílio para a execução e interpretação dos dados de composição química dos materiais.

Aos servidores José Carlos e Wellington Fernandes, pelo auxílio com as análises realizadas no LMC.

À DAG UFV por ceder o espaço para realização do experimento, os seixos rolados e areia natural de rio.

Aos operadores da ETA UFV, pela cooperação com as análises de qualidade da água.

Aos amigos da ETA UFV e salinha da pós-graduação, grandes companheiros, especialmente Aárbara Porto, Gabriela Capobiango, Lorrana Marques, Matheus de Arito e Thais Lorraine Moreira.

À Alexandra Elbakyan, criadora do Sci-hub, por facilitar o acesso a informações que essenciais ao desenvolvimento da pesquisa nas mais diversas áreas.

*“A tarefa não é tanto ver o que ninguém
ainda viu, mas pensar o que ninguém ainda
pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”*

(Arthur Schopenhauer)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática dos mecanismos de transporte na filtração da água em meio granular	18
Figura 2. Eficiência dos mecanismos de transporte para diferentes tamanhos de partículas em suspensão	19
Figura 3. Representação esquemática da camada dupla e variação do potencial elétrico com a distância da partícula.....	20
Figura 4. Representação esquemática dos mecanismos de aderência.....	22
Figura 5. Representação esquemática das forças envolvidas na aderência das partículas.....	23
Figura 6. Ilustração esquemática da evolução da perda de carga na filtração em profundidade: (a) ao longo do tempo - carreira de filtração (H_0 perda de carga inicial (leito filtrante limpo); H = perda de carga por colmatação); (b) ao longo do tempo (t) e da profundidade do leito filtrante (L)	26
Figura 7. Ilustração da filtração com ação de profundidade - evolução da perda de carga ao longo da espessura do leito filtrante e do tempo de filtração.....	27
Figura 8. Exemplo de variação da turbidez remanescente (T) em relação à turbidez inicial (T_0) ao longo do tempo de operação do filtro.....	30
Figura 9. Exemplo de variação da turbidez remanescente (T) em relação à turbidez inicial (T_0) ao longo da profundidade do leito filtrante	31
Figura 10. Representação esquemática da leitura da perda de carga nos piezômetros.....	33
Figura 11. Representação esquemática da turbidez e da evolução da perda de carga ao longo da carreira de filtração nos casos de (a) flocos resistentes e (b) flocos frágeis	34
Figura 12. Areia natural de rio.....	42
Figura 13. Antracito.....	42
Figura 14. Púmice	43
Figura 15. Perlita	44

Figura 16. Vidro moído.....	46
Figura 17. Terras diatomáceas	47
Figura 18. Areia de britagem.....	48
Figura 19. Fase inicial da produção da areia industrial.....	50
Figura 20. Produção da areia de britagem em britador vertical de impacto.....	51
Figura 21. Características granulométricas da areia industrial média (Pedra Sul Mineração)	52
Figura 22. Filtro de bancada com areia de britagem utilizado nos ensaios preliminares.....	59
Figura 23. Corte lateral do filtro piloto - medidas em cm.....	61
Figura 24. Vista geral das unidades piloto de filtração.....	61
Figura 25. Representação esquemática do arranjo experimental para os ensaios com a unidade piloto de filtração	62
Figura 26. Turbidez da água filtrada; filtro de bancada; experimentos com água tratada; turbidez inicial: Experimento 1 = 0,46 uT, Experimento 2 = 0,52 uT	67
Figura 27. pH da água filtrada; filtro de bancada; experimentos com água tratada; pH inicial: Experimento 1 = 6,5, Experimento 2 = 6,2.....	68
Figura 28. Condutividade da água filtrada; filtro de bancada; operação com água tratada, Condutividade inicial: Experimento 1 = 81,0 $\mu\text{S cm}^{-1}$, Experimento 2 = 84,5 $\mu\text{S cm}^{-1}$	69
Figura 29. Turbidez da água filtrada; filtro de bancada; operação com água decantada, turbidez inicial: Experimento 3 = 0,67 uT, Experimento 4 = 0,54 uT	69
Figura 30. Turbidez da água de lavagem; filtro de bancada; lavagem com água tratada, turbidez inicial da água tratada: Experimento 5 = 0,65 uT, Experimento 6 = 0,21 uT	70
Figura 31. Detalhes do acúmulo de bolhas no leito de areia natural (a) e da formação de camada esverdeada na superfície do leito filtrante de areia de britagem (b) Carreira 5	72

Figura 32. Aspecto visual dos leitos filtrantes ao final da Carreira 5: areia de britagem (a) e areia natural (b)	72
Figura 33. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 9	74
Figura 34. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 9	75
Figura 35. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 9	76
Figura 36. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 9. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural).....	77
Figura 37. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 9	78
Figura 38. Aspecto dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b) após 48 horas do encerramento da Carreira 11	78
Figura 39. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 3	80
Figura 40. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 3	81
Figura 41. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) areia natural (b), Carreira 3	82
Figura 42. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 3. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural).....	83
Figura 43. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, Carreira 3	84

Figura 44. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 6	85
Figura 45. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 6	86
Figura 46. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 6	87
Figura 47. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 6. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural).....	89
Figura 48. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 6	89
Figura 49. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 14	91
Figura 50. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 14	92
Figura 51. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 14	93
Figura 52. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 14. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural).....	94
Figura 53. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 14	94
Figura 54. Aspecto dos leitos após mais de 72 horas do encerramento da Carreira 14 (a) areia de britagem (b) areia natural	95
Figura 55. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 13	96

Figura 56. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 13	97
Figura 57. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 13	98
Figura 58. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 13. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural).....	99
Figura 59. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 13	100
Figura 60. Aspecto do leito de areia de britagem após o encerramento da carreira - taxa de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (a) Carreira 6 – período de estiagem (b) Carreira 13 – período chuvoso.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limites de qualidade da água bruta para tratamento por filtração lenta	6
Tabela 2. Limites de qualidade da água bruta para o tratamento por filtração direta .	9
Tabela 3. Limites de qualidade da água bruta para tratamento por ciclo completo..	10
Tabela 4. Características dos flocos de acordo com o valor de ITF	40
Tabela 5. Características granulométricas da areia de britagem.....	53
Tabela 6. Características granulométricas da areia natural de rio.....	53
Tabela 7. Tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade dos leitos filtrantes ...	53
Tabela 8. Características granulométricas da camada suporte	54
Tabela 9. Composição química dos materiais empregados como leito filtrante	65
Tabela 10. Características físicas das areias empregadas como leito filtrante	66
Tabela 11. Principais características das carreiras de filtração, ensaios em unidade piloto com filtros de areia natural e areia de britagem	101
Tabela 12. Produção de água nas carreiras de filtração.....	104
Tabela 13. Faixa de variação do Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) nas carreiras de filtração.....	106

RESUMO

SILVA, Bruno Moreno Ramos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Avaliação do emprego de areia de britagem como leito filtrante de filtros rápidos para tratamento de água.** Orientador: Rafael Kopschitz Xavier Bastos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o emprego de areia de britagem como leito filtrante de filtros rápidos descendentes no tratamento de água para consumo humano. Testes preliminares em unidade de filtração de bancada (proveta de 2 L) indicaram: (i) que o leito de areia de britagem não afeta negativamente a qualidade da água filtrada (turbidez, pH e condutividade elétrica); (ii) elevado potencial de remoção de turbidez de água decantada; (iii) eficiência da retrolavagem para limpeza do leito filtrante. Na sequência, foram realizados ensaios em duas unidades piloto de filtração rápida (construídas em tubulação de acrílico com 19 cm de diâmetro interno e comprimento total de 267 cm): um com areia de britagem e outro, como unidade de controle, com areia natural de rio. Ambos os leitos filtrantes foram preparados com granulometria e profundidade de acordo com as especificações da norma da ABNT para filtração rápida com areia natural. As duas areias foram ainda caracterizadas em termos de: composição química, massa específica, densidade aparente, porosidade, solubilidade em ácido, potencial zeta dos grãos e coeficiente de esfericidade. Ao longo de quatro meses foram monitoradas 14 carreiras de filtração, as quais foram caracterizadas, para taxas de filtração de 180, 270 e 360 m³ m⁻² d⁻¹, em termos de: (i) duração das carreiras; (ii) perda de carga ao longo do leito filtrante; (iii) remoção de turbidez ao longo do leito filtrante; (iv) índices de filtrabilidade – Índice de Ives e Índice de Hudson. Em geral, o desempenho do filtro de areia de britagem foi similar ou superior ao filtro de areia natural, produzindo água filtrada com turbidez inferior a 0,50 uT ao longo de toda a carreira, com duração e desenvolvimento da perda de carga próximos aos do filtro de areia natural. Conclui-se que a areia de britagem apresenta elevado potencial de emprego como leito filtrante de filtros rápidos para o tratamento de água para consumo humano, sem desvantagens técnicas-operacionais e com atrativos ambientais.

ABSTRACT

SILVA, Bruno Moreno Ramos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Evaluation of the use of crushed rock sand as filter bed for rapid filters applied for drinking water treatment.** Adviser: Rafael Kopschitz Xavier Bastos.

The objective of this work was to evaluate the use of crushed rock sand as a filter bed in rapid down flow filtration for drinking water treatment. Preliminary tests using a bench-scale filtration unit (2 L measuring cylinder) indicated: (i) that the crushed rock sand bed does not negatively affect the quality of the filtered water (turbidity, pH and electrical conductivity); (ii) a high potential for turbidity removal; (iii) backwashing is efficient in cleaning the filter bed. Then, trials were carried out using two pilot-scale rapid filtration units (acrylic tubes, internal diameter of 19 cm and total length of 267 cm): one with a crushed rock sand filter bed and the other (a control unit), with natural river sand. Both filter media were prepared in accordance with the Brazilian standards for rapid down flow sand filtration (particle size range and filter bed depth), and were further characterized in terms of: chemical composition, particles density, bulk density, porosity, acid solubility, zeta potential and sphericity coefficient. Over four months, 14 filter runs using filtration rates of 180, 270 and 360 m³.m⁻².d⁻¹ were monitored and characterized in terms of (i): filter run length; (ii) head loss increase along the filter bed depth; (iii) turbidity removal along the filter bed depth; (iv) filterability indexes – Ives Index and Hudson Index. Overall, the performance of the crushed rock sand filter was similar to or even better than that of the natural river sand filter, producing filtered water with turbidity lower than 0.50 NTU along the entire filter run, with duration and head loss increasing rates similar to those of the natural sand filter. It is concluded that crushed rock sand presents a high potential for use as a filter media for rapid filtration in drinking water treatment, with environmental advantages and no technical or operational disadvantages.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Caracterização do problema	1
1.2	Hipótese e objetivos.....	2
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	Breve panorama do tratamento e do controle de qualidade da água no Brasil.....	3
2.2	Técnicas de tratamento para clarificação da água	5
2.2.1	Filtração lenta	5
2.2.2	Filtração rápida	6
2.2.2.1	Filtração rápida em camada simples.....	7
2.2.2.2	Filtração rápida em multicamadas.....	7
2.2.2.3	Filtração direta.....	8
2.2.2.4	Ciclo completo	9
2.3	Mecanismos de coagulação e remoção de impurezas na clarificação da água	11
2.3.1	Remoção de turbidez.....	11
2.3.2	Remoção de cor	13
2.3.3	Remoção de protozoários.....	13
2.4	Mecanismos envolvidos na filtração rápida	15
2.4.1	Mecanismos de transporte	15
2.4.1.1	Interceptação.....	15
2.4.1.2	Impacto inercial	16
2.4.1.3	Sedimentação.....	16
2.4.1.4	Difusão	17
2.4.1.5	Ação hidrodinâmica.....	17
2.4.1.6	Combinação dos mecanismos de transporte	18
2.4.2	Mecanismos de aderência.....	19
2.4.2.1	Interações entre duplas camadas elétricas	19
2.4.2.2	Força de van der Waals	21

2.4.2.3	Efeito combinado da interação entre duplas camadas e forças de van der Waals	22
2.4.2.4	Interações químicas e adsorção mútua.....	23
2.4.3	Mecanismos de desprendimento.....	23
2.5	Cinética da filtração rápida.....	26
2.6	Carreira de filtração e retrolavagem dos filtros.....	33
2.7	Fatores intervenientes no desempenho da filtração	35
2.7.1	Características da água afluyente aos filtros.....	35
2.7.2	Taxa de filtração	35
2.7.3	Características do leito filtrante	36
2.7.3.1	Granulometria.....	36
2.7.3.2	Espessura do leito filtrante (L).....	37
2.7.3.3	Massa específica dos grãos, porosidade, forma dos grãos e solubilidade em ácido	38
2.8	Avaliação da eficiência da filtração – índices de filtrabilidade	39
2.8.1	Índice de Hudson.....	39
2.8.2	Índice de Ives.....	40
2.9	Materiais granulares empregados como leito filtrante para filtração rápida	41
2.9.1	Materiais convencionais	41
2.9.2	Materiais não convencionais	43
2.9.2.1	Púmice.....	43
2.9.2.2	Perlita	44
2.9.2.3	Vidro reciclado moído.....	45
2.9.2.4	Terras diatomáceas.....	46
2.9.2.5	Areia de britagem	47
3	MATERIAL E MÉTODOS	52
3.1	Caracterização dos materiais utilizados como meio filtrante.....	52
3.1.1	Granulometria	52
3.1.2	Composição química	54
3.1.3	Massa específica dos grãos (ρ_s).....	54
3.1.4	Densidade aparente (ρ_t)	55
3.1.5	Porosidade (ϵ).....	55

3.1.6	Coeficiente de esfericidade (Ce)	56
3.1.7	Solubilidade em ácido (S).....	57
3.1.8	Potencial zeta	57
3.2	Descrição dos experimentos.....	58
3.2.1	Estudo preliminar – experimento de bancada	58
3.2.2	Ensaio em unidade piloto.....	59
3.3	Avaliação da eficiência da filtração	64
3.4	Análises de qualidade da água	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1	Caracterização dos leitos filtrantes	65
4.1.1	Composição química	65
4.1.2	Características físicas.....	66
4.2	Ensaio de bancada	67
4.3	Ensaio em unidade piloto	71
4.3.1	Águas de baixa turbidez	71
4.3.1.1	Taxa de filtração de $90 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	71
4.3.1.2	Taxa de filtração de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	72
4.3.1.3	Taxa de filtração de $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	79
4.3.1.4	Taxa de filtração de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	84
4.3.2	Águas de alta turbidez	90
4.3.2.1	Taxa de filtração de $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	90
4.3.2.2	Taxa de filtração de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	95
4.4	Análise conjunta das carreiras de filtração	101
5	CONCLUSÕES	107
6	RECOMENDAÇÕES.....	109
7	REFERÊNCIAS.....	110
	APÊNDICE A. RESULTADOS DAS CARREIRAS DE FILTRAÇÃO	118

1 INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do problema

Água potável pode ser definida como aquela que não ofereça riscos à saúde e não provoque rejeição ao consumo por estímulos sensoriais negativos (BRASIL, 2011). Salvo no caso de contaminação de origem química, o tratamento da água para consumo humano consiste, fundamentalmente, no emprego de processos físicos e químicos para a clarificação e desinfecção da água. No caso de mananciais superficiais, envolve, portanto, técnicas de filtração - filtração lenta, filtração rápida em ciclo completo ou por filtração direta – cuja escolha dependerá, essencialmente, da qualidade da água e da vazão demandada. É uma etapa crucial não somente para a clarificação da água, mas também para a remoção de organismos patogênicos, principalmente de cistos e oocistos de protozoários (LIBÂNIO, 2016).

A filtração é resultado da combinação de mecanismos físicos e físico-químicos de transporte e aderência de partículas em suspensão na água ao material constituinte do leito filtrante, dependendo, portanto, da qualidade da água, das características do leito filtrante e das taxas de filtração empregadas (LIBÂNIO, 2016). Ao longo da operação de filtração, a retenção de impurezas no leito faz com que este se colmate e diminua a capacidade de filtração ou produza água com qualidade inadequada. Portanto, é necessária a limpeza periódica dos filtros, o que deve ocorrer o mais espaçadamente possível, pois usualmente a limpeza se dá por meio de retrolavagem com água tratada, consumindo parte da água produzida pela estação. Após anos de operação, os leitos dos filtros devem ser trocados, seja pelo esgotamento da vida útil do material em si ou por operação continuamente inadequada de limpeza, o que, de toda forma, representa custo elevado.

Nos filtros de estações de tratamento de água (ETA), tradicionalmente utiliza-se areia natural de rio como leito filtrante, cujas jazidas vêm sofrendo esgotamento progressivo (BARBOSA *et al.*, 2008). Além disso, conforme relatado por Alves (2002), areia de rio é, muito frequentemente, extraída de forma irregular e predatória, com agressão às calhas e margens dos rios. Portanto, desde os pontos de vista ambiental e econômico, destaca-se a importância de realização de estudos que empreguem outros materiais como leito filtrante.

Na área de construção civil, alguns estudos empregando areia de origem gnáissica como substituto da areia natural de rio na produção de argamassa e concreto têm sido realizados com sucesso (BASTOS, P. *et al.*, 2006). Esse material, denominado areia de britagem ou areia industrial, é proveniente da atividade mineradora, em geral licenciada, e se apresenta como um material mais uniforme e isento de impurezas, com custo de produção e preço comercial bem mais baixos (BASTOS, P. *et al.*, 2006).

Pretende-se no presente trabalho avaliar o desempenho do tratamento de água por filtração rápida empregando areia de britagem como leito filtrante.

1.2 Hipótese e objetivos

Hipótese

Filtros com areia de britagem como leito filtrante substituem a areia natural com vantagens ambientais, sem prejuízo da eficiência operacional do processo de filtração e da qualidade da água tratada.

Objetivos

- Objetivo geral

Avaliar, em instalação piloto, o emprego de areia de britagem em filtro rápido de escoamento descendente para tratamento de água para consumo humano.

- Objetivos específicos

Avaliar o desempenho do filtro com areia de britagem, em comparação com filtros de areia convencional, com relação à: (i) remoção de turbidez; (ii) evolução da perda de carga e (iii) duração das carreiras de filtração.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Breve panorama do tratamento e do controle de qualidade da água no Brasil

O tratamento de água para consumo humano consiste em um conjunto de processos físicos e químicos aos quais a água é submetida visando atender o padrão de potabilidade. A Portaria do Ministério da Saúde nº 2914/2011 (BRASIL, 2011) é a norma brasileira que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Essa norma é resultado de sucessivas revisões desde a primeira versão publicada em 1977, como relatado por Ceballos *et al.* (2009), incorporando avanços no conhecimento sobre tratamento, qualidade e controle de qualidade da água para consumo humano. No que tange a aspectos de qualidade da água mais diretamente ligados ao tema do presente trabalho, cumpre destacar a evolução do padrão de turbidez da água filtrada, o qual, desde a versão da norma de 2000 (Portaria MS nº 1469/2000) (BRASIL, 2000), passou a compor o padrão microbiológico de potabilidade, como indicador da remoção de protozoários, e assume valores cada vez mais restritivos (BASTOS *et al.*, 2001; BASTOS, 2003, 2005; BASTOS *et al.*, 2009; BRASIL, 2011).

O atual padrão de turbidez da água filtrada da norma brasileira de qualidade da água para consumo humano é de 0,50 uT em 95% das amostras mensais (BRASIL, 2011), mas outros países, tais como Canadá, Estados Unidos e Nova Zelândia adotam um padrão ainda mais rigoroso: 0,30 uT (USEPA, 2009; HEALTH CANADA, 2014; NHMRC/NRMMC, 2016). Não obstante relatos de dificuldades em ETAs no Brasil de produção de água filtrada com 0,50 uT e ainda mais de 0,30 uT (VIANA, 2011), o fato é que o estabelecimento de padrão de turbidez cada vez mais rigoroso é uma tendência internacional, fundamentada cientificamente. Assim, as ETAs têm que estar preparadas para a produção sistemática de água filtrada com valores bem baixos de turbidez, com o devido controle dos aspectos que determinam uma filtração efetiva: a adequação dos leitos filtrantes, o condicionamento da água nos processos anteriores à filtração e o controle adequado do próprio processo de filtração.

Pesquisas realizadas no âmbito do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) contribuíram para o aperfeiçoamento de métodos tradicionais bem como para o desenvolvimento de novas técnicas de tratamento de água (CEBALLOS *et al.*, 2009). Por exemplo, grandes avanços foram obtidos com relação às técnicas de filtração em múltiplas etapas (FIME) (DI BERNARDO, 1999) e de filtração direta (DI BERNARDO, 2003), aos processos de desinfecção (DANIEL, 2001) e à remoção de protozoários, de cianobactérias e de cianotoxinas no tratamento de água (PÁDUA, 2006; 2009). Dentre os produtos dessas pesquisas podem ser citados: a definição de limites de qualidade da água bruta adequados às diversas técnicas de tratamento de água, a definição de critérios de projeto e a determinação das eficiências de remoção de diversos contaminantes da água.

No Brasil, a norma que estabelece critérios para projeto de estações de tratamento de água para o abastecimento público é a NBR 12216, de 1992 (ABNT, 1992). Com relação aos filtros são apresentados valores para granulometria, espessura do leito filtrante e taxas de filtração, com diferenciação entre as técnicas de filtração lenta e rápida (descendente ou ascendente). Porém, essa norma já (ou há muito) requer atualização, pois sua publicação já faz mais de 25 anos e resultados de avanços obtidos em pesquisas mais recentes, como as citadas no parágrafo anterior, não foram contemplados. Enfim, atualizações se fazem necessárias em termos de critérios de projeto e de seleção de tecnologias para o tratamento de água.

Segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), em 2008 98% dos municípios brasileiros contavam com serviço de abastecimento de água e a maior parte (87,2%) distribuía água totalmente tratada (IBGE, 2010). Dos municípios que distribuía água sem qualquer tipo de tratamento, a grande maioria situava-se nas Regiões Norte e Nordeste do país, com destaque para os estados do Amazonas, Pará, Maranhão e Piauí. Essa pesquisa mostra também um expressivo aumento do número de ETAs, de 4.560 em 2000 para 6.040 em 2008, estações estas, majoritariamente (80%), de pequeno porte (população < 50.000 habitantes), com captação superficial (56%) e com tratamento convencional (ciclo completo) (70% do volume total de água distribuída).

Com relação à qualidade do serviço de abastecimento de água por rede de abastecimento, cabe destacar que, no ano da última PNSB, 1296 municípios brasileiros enfrentavam racionamento de água, sendo a maior parte destes

localizados nas Regiões Norte e Nordeste do país (IBGE, 2010). Dentre as principais causas identificadas para o racionamento estão as secas/estiagens, mas grande parte dos municípios alegou também deficiência na produção de água potável e, ou na distribuição. Embora houvesse elevado índice de distribuição de água totalmente tratada, é importante destacar que mais de 300 municípios (6,6%) ainda distribuíam água sem qualquer tipo de tratamento e em 6,2 % dos municípios apenas parte da água distribuída recebia tratamento.

2.2 Técnicas de tratamento para clarificação da água

O tratamento de águas superficiais é composto por processos de clarificação e desinfecção. A etapa de clarificação da água envolve um ou mais processos sequenciais, geralmente contendo uma etapa de filtração (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Esses processos têm como objetivo a remoção de partículas coloidais e de substâncias em solução responsáveis pela turbidez e cor da água, bem como de protozoários patogênicos. A escolha da técnica de tratamento depende essencialmente da qualidade da água, mas também da vazão de projeto e dos recursos financeiros e humanos disponíveis. A seguir, são apresentadas as principais técnicas de clarificação da água que empregam uma etapa de filtração.

2.2.1 Filtração lenta

A filtração lenta é uma das técnicas de filtração mais antigas, sendo que as primeiras unidades de que se tem conhecimento datam do início do século XIX, na Grã Bretanha (HUISMAN e WOOD, 1974). A remoção das impurezas ocorre devido aos mecanismos físico-químicos e biológicos que ocorrem principalmente na superfície do leito filtrante. A importância relativa destes mecanismos depende das características das partículas a serem removidas da água, sendo os físico-químicos mais importantes para partículas maiores que 2 μm e os biológicos mais relevantes para partículas menores que 2 μm (WEBER-SHIRK e DICK, 1997a; WEBER-SHIRK e DICK, 1997b).

Na filtração lenta, são empregadas taxas de filtração baixas - até 6 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$, segundo a NBR 12216 (ABNT, 1992) - e granulometria fina de areia - tamanho efetivo entre 0,25 e 0,35 mm e coeficiente de desuniformidade igual a 2, também segundo a NBR 12216. Devido a estas condições, esta técnica é indicada para

vazões também baixas e para águas de boa e pequena variabilidade de qualidade, como sugerido na Tabela 1. Na realidade, caso seja empregada alguma etapa de pré-tratamento, é possível tratar águas de qualidade inferior aos limites apresentados na Tabela 1 (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

Tabela 1. Limites de qualidade da água bruta para tratamento por filtração lenta

Características da água bruta	Qualidade requerida	
	90 % do tempo	100 % do tempo
Turbidez (uT)	≤ 20	≤ 50
Cor verdadeira (uC)	≤ 15	-
Concentração de algas (UPA mL ⁻¹)	≤ 250	-
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	≤ 5	-
NMP de coliformes totais 100mL ⁻¹	≤ 1000	-

uT: unidades de turbidez; uC: unidades de cor; UPA: unidades padrão de área; DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxigênio após 5 dias, a 20°C; NMP: número mais provável
Adaptado de CEPIS (2004).

A filtração lenta alcança remoção efetiva de turbidez e de microrganismos, incluindo cistos de protozoários (HELLER *et al.*, 2006), desde que os limites de taxa de filtração e de qualidade da água bruta sejam respeitados.

2.2.2 Filtração rápida

A filtração rápida é uma técnica de tratamento para clarificação de suspensões diluídas através da passagem por um meio filtrante granular, geralmente areia (ISON e IVES, 1969). Além de receber taxas de filtração bem mais elevadas do que a filtração lenta - até 180 m³ m⁻² d⁻¹ e 6 m³ m⁻² d⁻¹, respectivamente (ABNT, 1992), a filtração rápida se distingue quanto aos mecanismos de remoção de sólidos, sendo frequentemente denominada como filtração com ação em profundidade. Enquanto na filtração lenta os mecanismos de remoção estão associados principalmente a processos biológicos e à ação de coar na superfície do filtro, na filtração rápida a retenção das partículas ocorre devido a processos físico-químicos (transporte e aderência) ao longo de toda altura do leito (ISON e IVES, 1969). A seguir, são discutidas as principais variantes da filtração rápida, com relação ao número de camadas (simples ou multicamadas), ao sentido do escoamento (descendente ou ascendente) e à técnica de tratamento (filtração direta ou ciclo completo).

2.2.2.1 Filtração rápida em camada simples

A filtração rápida em camada simples pode ser classificada em relação ao sentido do escoamento, como descendente ou ascendente. A retrolavagem dos filtros (item 2.6), cujos leitos apresentam tamanho heterogêneo de grãos de areia, provoca fluidificação e estratificação dos mesmos, ou seja, grãos maiores e mais pesados permanecem nas porções inferiores do leito filtrante e grãos menores e mais leves ficam na parte superior (BAYLIS, 1937). Assim, no caso da filtração descendente, a remoção de impurezas e o desenvolvimento da perda de carga ocorrem de forma mais acentuada nas primeiras camadas da areia, onde se tem a granulometria mais fina (OEBEN *et al.*, 1968). Por outro lado, como o filtro de escoamento ascendente é alimentado pela parte inferior, a água passa primeiramente pelas camadas de areia mais grossa e termina o processo nas camadas mais finas (no topo). Dessa forma, a espessura do leito filtrante é melhor aproveitada na remoção de impurezas, obtendo-se carreiras de filtração mais longas e desenvolvimento menos acentuado da perda de carga em comparação aos filtros descendentes (OEBEN *et al.*, 1968). No entanto, devido à maior penetração dos flocos no leito filtrante (maior probabilidade de trespasse) e à possibilidade da expansão do leito ao longo da carreira de filtração, seja pela aplicação de taxas de filtração mais elevadas ou pelo aumento da velocidade ascensional com a progressiva colmatação do leito (HAMANN e MCKINNEY, 1968), são recomendadas taxa de aplicação máxima de $120 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e espessura de leito mínima de 2 m (ABNT, 1992). Para filtração rápida descendente são empregadas taxas de filtração de até $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e leitos de no mínimo 45 cm (ABNT, 1992).

2.2.2.2 Filtração rápida em multicamadas

A filtração em multicamadas foi idealizada com o objetivo de obter as vantagens da filtração ascendente (escoamento da granulometria mais grossa para mais fina), no entanto, sem a necessidade de maior espessura do leito e sem a limitação de menor taxa de filtração. Diaper e Ives (1965) empregaram um leito contendo três materiais de massa específica diferentes na filtração descendente, obtendo carreiras de filtração maiores e evolução menos acentuada da perda de carga quando comparados a filtros rápidos de camada simples com escoamento ascendente ou descendente. Foram empregados o antracito na parte superior do leito

(granulometria mais grossa e baixa massa específica), areia na camada intermediária (granulometria intermediária e massa específica intermediária) e areia granada (ou ilmenita) na parte inferior do leito (granulometria mais fina e alta massa específica), favorecendo o escoamento no sentido decrescente da granulometria quando utilizada a filtração descendente.

Segundo Rice (1974), o uso da camada inferior e de maior massa específica só é justificado quando são utilizadas taxas de filtração bem elevadas e quando há penetração profunda dos flocos no leito; caso contrário a eficiência obtida é muito similar ao leito de camada dupla (antracito e areia). Além disso, Cleasby *et al.* (1977) alertam sobre a necessidade de aplicação de taxas bem maiores na retrolavagem e maior dificuldade no controle da expansão do leito quando são usados materiais de alta densidade. Portanto, é mais comum o uso de filtros de camada dupla de antracito e areia, permitindo a aplicação de taxas de filtração bem maiores comparativamente às de filtração em camada simples, sem afetar a qualidade da água filtrada. A NBR 12216 recomenda o emprego de taxas de filtração de até $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para leitos com espessura mínima de 0,25 m de areia e 0,45 m de antracito (ABNT, 1992).

2.2.2.3 Filtração direta

Segundo Di Bernardo e Sabogal Paz (2008), a filtração direta é uma opção aplicável ao tratamento de águas de baixa turbidez e baixa cor, as quais apresentam dificuldade para o tratamento por ciclo completo (não tão baixas, entretanto, quanto às de águas aptas à filtração lenta). Nesta técnica, a água bruta é coagulada, passa ou não por floculação, e é direcionada aos filtros que podem ser descendentes (camada simples ou dupla) ou ascendentes (camada simples). Dependendo das características da água bruta, do leito filtrante e da taxa de filtração empregada, é possível obter maior eficiência de tratamento caso seja incluída uma etapa de floculação após a mistura rápida (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Alguns limites sugeridos de qualidade da água para aplicação da técnica de filtração direta são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Limites de qualidade da água bruta para o tratamento por filtração direta

Sentido do escoamento	Características de qualidade da água bruta	Qualidade requerida	
		90 % do tempo	100 % do tempo
Descendente	Turbidez (uT)	≤ 10	≤ 100
	Cor verdadeira (uC)	≤ 20	≤ 50
	Concentração de algas (UPA/mL)	≤ 200	≤ 500
	NMP de coliformes totais/ 100 mL	-	≤1000
Ascendente	Turbidez (uT)	≤ 100	≤ 200
	Cor verdadeira (uC)	≤ 60	≤ 100
	Concentração de algas (UPA/mL)	≤ 200	≤ 500
	NMP de coliformes totais/ 100 mL	-	≤1000

uT: unidades de turbidez; uC: unidades de cor; UPA: unidade padrão de área; NMP: número mais provável

Adaptado de Di Bernardo (2003), CEPIS (2004)

Para o sucesso do tratamento é necessário, entretanto, um controle rigoroso do processo de coagulação, devendo ser privilegiado o mecanismo de adsorção-neutralização de cargas (discutido no item 2.3.1), que ocorre em faixas estreitas de pH e de doses de coagulante. Com controle operacional adequado, pode-se produzir água que atenda aos padrões de turbidez da água filtrada e com duração adequada das carreiras de filtração. Além disso, estima-se que os custos de construção de estações de tratamento com filtração direta sejam até 30% menores que os de estações de ciclo completo, uma vez que são eliminadas as unidades de floculação e decantação; há também, possivelmente, redução de gastos com produtos químicos devido ao mecanismo de coagulação empregado (CULP, 1977). Segundo Di Bernardo (2003), existiam à época cerca de 400 estações de filtração direta espalhadas pelo país, sendo a maioria dos filtros de escoamento ascendente.

2.2.2.4 *Ciclo completo*

Águas com valores mais elevados de turbidez e cor e, ou com maior variabilidade de qualidade, geralmente são tratadas por ciclo completo, composto pelas etapas de coagulação e mistura rápida, floculação, decantação (ou flotação), filtração rápida e

desinfecção (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Na Tabela 3, são apresentados valores limite de turbidez e cor recomendados para emprego do ciclo completo.

Tabela 3. Limites de qualidade da água bruta para tratamento por ciclo completo

Características de qualidade da água bruta	Qualidade requerida	
	90 % do tempo	100 % do tempo
Turbidez (uT)	≤ 1000	≤ 1500
Cor verdadeira (uC)	≤ 150	-

uT: unidades de turbidez; uC: unidades de cor;

Adaptado de CEPIS (2004).

As etapas de tratamento em ciclo completo são sequenciais e dependentes, ou seja, o sucesso de uma etapa depende das etapas anteriores. Portanto, além de um projeto adequado às variações de vazão da estação, a operação deve estar preparada para variações na qualidade da água bruta, considerando, principalmente, a etapa inicial de mistura rápida e coagulação.

A mistura rápida é realizada em dispositivos capazes de gerar elevada turbulência, como o ressalto hidráulico em medidores Parshall e vertedores ou mesmo por misturadores mecanizados. Pouco antes do ponto de maior turbulência são adicionados à água o coagulante e, caso necessário, corretores de pH e polímeros auxiliares.

Na floculação, são empregados reatores com configuração que favoreça o fluxo em pistão e os choques e aglomeração das partículas desestabilizadas, isto é, a formação dos flocos.

Após a etapa de floculação, os flocos formados são removidos em decantadores ou flutadores, dependendo das características da água bruta. Águas com baixa turbidez, alta cor e elevada contagem de algas são tratadas com sucesso pelo processo de flotação, enquanto águas de turbidez mais elevada são mais eficientemente tratadas por decantação (CEPIS, 2004). Ainda, é necessário que a coagulação e floculação sejam adequadas ao tipo de floco desejado para cada técnica, ou seja, flocos densos e grandes para a decantação e flocos com boa aderência às bolhas de ar para a flotação. É importante que, independentemente do mecanismo de coagulação preponderante, as partículas coloidais sejam bem

desestabilizadas para que sejam removidas eficientemente tanto no decantador (ou flotor) quanto no filtro.

A água decantada ou flotada, com carga de sólidos bem inferior à água bruta, é então direcionada à última etapa da clarificação da água - a filtração rápida. Dependendo das condições da água bruta e vazão demandada podem ser usadas diferentes configurações para etapa de filtração: ascendente ou descendente, camada simples ou dupla, conforme detalhado nos itens 2.2.2.1 e 2.2.2.2.

2.3 Mecanismos de coagulação e remoção de impurezas na clarificação da água

2.3.1 Remoção de turbidez

A turbidez é uma característica física de qualidade da água que representa a redução da transparência da água, devida à presença de partículas em suspensão verdadeira e em dispersão coloidal. Partículas coloidais possuem tamanho da ordem de nanômetros a micrômetros e, em geral, apresentam carga superficial negativa. Portanto, as interações elétricas entre as partículas de mesmo sinal (forças de repulsão) são mais intensas que as forças intermoleculares de atração (forças de van der Waals) (ver item 2.4.2), mantendo-as estáveis e impedindo que as partículas se aglomerem formando flocos, capazes de serem removidos por forças gravitacionais (na decantação) ou de aderência (na filtração). Com exceção da filtração lenta, todas as outras técnicas de clarificação citadas neste trabalho empregam coagulação e mistura rápida como pré-tratamento para desestabilização das partículas coloidais. Pode-se entender a coagulação como o processo de redução do potencial elétrico (carga elétrica superficial das partículas), de forma a reduzir a repulsão entre partículas e favorecer a agregação. Nessa etapa, em geral, são adicionados sais de alumínio ou ferro que, dependendo das condições de pH e dose de coagulante, formam diferentes espécies químicas que condicionam a água para as próximas etapas do tratamento, como descrito a seguir.

Para águas de turbidez mais baixa, o mecanismo de coagulação predominante deve ser o de adsorção-neutralização de cargas (negativas dos coloides) sendo aplicadas doses mais baixas e em valores de pH também mais baixos. Nessas condições, prevalecerão espécies hidrolisadas do alumínio, ou ferro, com carga positiva, que

tenderão a se aderir à superfície das partículas, neutralizando-as. São necessários gradiente de velocidade elevado e tempo de mistura bem reduzido, quase instantâneo, para efetivamente desestabilizar as partículas coloidais, pois as reações das espécies hidrolisadas do alumínio (ou ferro) são muito rápidas, da ordem de milissegundos (AMIRTHARAJAH e MILLS, 1982). Nesse caso, o objetivo central é a desestabilização das partículas e a formação de flocos menores, mas com boa capacidade de aderência ao leito filtrante (que também possui carga negativa) onde, preponderantemente, serão removidas (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). Esse é o mecanismo mais adequado para estações de filtração direta, mas também pode ser adequado a estações em ciclo completo durante os períodos de estiagem.

Para águas de turbidez mais elevada, geralmente tratadas em ciclo completo, o mecanismo de coagulação a ser privilegiado é a varredura, aplicando-se doses mais altas de coagulante e pH próximo à neutralidade. Nessas condições haverá formação de hidróxido de alumínio, ou ferro, neutro, precipitado, que varre as partículas durante o processo de sedimentação ou flotação, formando flocos maiores e mais densos, mais facilmente removidos nos decantadores (ou flotadores) (CEPIS, 2004). Para o mecanismo de varredura, não é necessário o emprego de gradiente de velocidade tão elevado e tempo de mistura rápida tão baixos quanto os para adsorção-neutralização de cargas (AMIRTHARAJAH e MILLS, 1982), pois a formação do precipitado de hidróxido de alumínio (ou ferro) é uma reação mais lenta e irá ocorrer independentemente do gradiente, desde que o pH e a dose de coagulante sejam adequados. Entretanto, ainda serão necessários gradientes relativamente elevados de forma a promover uma boa mistura do coagulante na água.

A NBR 12216 (ABNT, 1992) indica que “a dispersão de coagulantes metálicos hidrolisáveis deve ser feita a gradientes de velocidade compreendidos entre 700 s^{-1} e 1.100 s^{-1} , em um tempo de mistura não superior a 5 segundos”, sem, entretanto, fazer distinções em função do mecanismo de coagulação ou da técnica de tratamento a ser empregada.

Dependendo das condições da água bruta, é possível promover a formação do precipitado (hidróxido) com carga positiva e, assim, realizar a coagulação por meio de mecanismos combinados de varredura e adsorção-neutralização de cargas. Por

fim, é importante ressaltar que o mecanismo de coagulação deve ser adequado às características da água bruta e à técnica de tratamento empregada. De toda forma, deve-se promover uma efetiva coagulação e desestabilização dos coloides para favorecer os mecanismos de aderência e a remoção das partículas nos filtros.

2.3.2 Remoção de cor

A cor verdadeira da água é causada pela presença de substâncias húmicas (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas), as quais, em geral, apresentam cadeias aromáticas e carga superficial negativa em função dos grupos carboxílicos e fenólicos presentes em suas estruturas (EDWARDS e AMIRTHARAJAH, 1985). A remoção de cor ocorre por mecanismos similares à de turbidez, mas com algumas diferenças notáveis. Na região referente à adsorção e neutralização de cargas para remoção de turbidez (pH baixo e doses baixas), as espécies hidrolisadas do coagulante reagem com substâncias húmicas dissolvidas formando complexos ou mesmo precipitando na forma de humato ou fulvato de alumínio (ou ferro). Em valores de pH e doses maiores (varredura), as substâncias húmicas são removidas por adsorção ao precipitado ou por adsorção dos complexos ao precipitado (DEMPSEY *et al.*, 1984; EDWARDS e AMIRTHARAJAH, 1985; PERNINTSKY e EDZWALD, 2006).

Em águas de cor elevada e baixa turbidez, em geral, a cor controla a coagulação, pois, em quantidades mássicas equivalentes, a matéria orgânica natural apresenta carga até 10 vezes maior do que partículas inorgânicas (PERNINTSKY e EDZWALD, 2006). Nesses casos, além dos mecanismos citados, podem ser utilizados polímeros catiônicos, os quais, em doses que proporcionem potencial elétrico próximo a zero, formam compostos polímero-húmicos com boas características de filtrabilidade, embora nem sempre com boa sedimentabilidade (DEMPSEY *et al.*, 1984).

2.3.3 Remoção de protozoários

Além da turbidez e da cor, as etapas de clarificação da água têm por objetivo a remoção de protozoários patogênicos. Estudos nesse sentido têm se concentrado em *Cryptosporidium* e *Giardia*, dada a reconhecida importância desses organismos como patógenos humanos, bem como de sua transmissão via abastecimento de água para consumo humano (WHO, 2011). Em seu ciclo de vida, esses organismos

passam por formas encistadas, as quais são excretadas, e vêm, portanto, a contaminar mananciais de abastecimento e necessitam ser removidas no tratamento da água (BASTOS *et al.*, 2009). Os cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium* são formas resistentes, inclusive à ação de desinfetantes, mas devido a algumas de suas características, como tamanho (oocistos de *Cryptosporidium*: 4 - 6 µm; cistos de *Giardia*: 8 - 12 µm) e carga superficial negativa, a remoção nos processos de clarificação da água se dá por mecanismos similares à remoção de turbidez. A etapa de filtração rápida em meio granular é reconhecida como uma barreira efetiva na remoção de cistos e oocistos de protozoários (EMELKO *et al.*, 2005).

A otimização da coagulação é considerada fundamental para remoção efetiva de protozoários, como reportado em diversos estudos (DUGAN *et al.*, 2001; EMELKO, 2003). Em experimentos em escala piloto, Dugan *et al.* (2001) reportaram remoção de *Cryptosporidium* de até 4,7 log (unidades logarítmicas de remoção) na etapa de filtração quando houve otimização da coagulação e remoção inferior a 1,5 log quando não houve otimização. Entende-se como coagulação otimizada aquela em que a remoção de turbidez e, ou cor é aprimorada por meio da determinação das doses de operação em ensaios de tratabilidade. Segundo os resultados dos trabalhos de Bustamante *et al.* (2001) (para o cloreto férrico) e Xagorarakí e Harrington (2004), a coagulação pelo mecanismo de varredura proporciona maiores remoções quando comparada ao mecanismo de adsorção-neutralização de cargas. O emaranhamento dos cistos e oocistos nos flocos é reportado como o mecanismo mais importante de remoção, tanto para a decantação quanto para a filtração (BETANCOURT e ROSE, 2004). De acordo com o estudo de Dugan (2001), em condições de coagulação otimizada é possível atingir em média 1,3 log de remoção de *Cryptosporidium* na etapa de sedimentação, enquanto na filtração podem ser obtidas eficiências superiores a 3 log de remoção, evidenciando a importância da etapa de filtração na remoção de cistos e oocistos de protozoários.

Devido à dificuldade analítica e alto custo das análises de protozoários na água, outras variáveis têm sido utilizadas como indicadores da remoção desses organismos, como a contagem de partículas, esporos de bactérias e turbidez (EMELKO *et al.*, 2005; DUGAN *et al.*, 2001). Como relatado em Bastos *et al.* (2009), não obstante a dificuldade de se estabelecer relações numéricas entre a remoção de turbidez e a de protozoários, a literatura tem registrado alguns modelos dessa

natureza (VIANA, 2011) e o valor de turbidez da água filtrada tem sido usado como parâmetro de qualidade em diversas normas de potabilidade (MINISTRY OF HEALTH, 2008; USEPA, 2009; HEALTH CANADA, 2014; NHMRC/NRMMC, 2016), inclusive o padrão de potabilidade brasileiro (BRASIL, 2011). Na regulamentação da USEPA (*United States Environmental Protection Agency*), admite-se que a produção de água filtrada com 0,30 uT por meio tratamento em ciclo completo corresponda à remoção de 3 log de oocistos de *Cryptosporidium*, sendo 0,5 log na decantação e 2,5 log na filtração (USEPA, 2006). Em versão anterior a USEPA indicava que a turbidez da água filtrada inferior a 0,50 uT corresponderia à remoção de 2,5 log de cistos de *Giardia*, sendo 0,5 log na decantação e 2,0 log na filtração (USEPA, 1991). Na norma neozelandesa, crédito adicional de 0,5 log de remoção de oocistos de *Cryptosporidium* pode ser computado no caso de produção de água com turbidez inferior a 0,15 uT (MINISTRY OF HEALTH, 2008).

2.4 Mecanismos envolvidos na filtração rápida

Na filtração rápida, as partículas a serem removidas possuem dimensões menores do que os poros do leito filtrante. Portanto, a ação de coar é pouco importante nesse caso e mecanismos físico-químicos de transporte e aderência das partículas em suspensão ao leito filtrante são os processos predominantes. A seguir, são detalhados os principais mecanismos de transporte e aderência durante a filtração rápida, conforme exposto por Ives (1970).

2.4.1 Mecanismos de transporte

2.4.1.1 Interceptação

Quando a partícula permanece nas linhas de fluxo a uma distância do grão de areia menor do que o raio da partícula, esta é retida na superfície do grão. A importância desse mecanismo na eficiência de remoção das partículas é proporcional à razão entre o diâmetro da partícula (d_p) e o diâmetro do grão de areia (d_g). Segundo Yao *et al.* (1971), a eficiência do coletor na remoção de partículas considerando somente o mecanismo de interceptação (η_I) pode ser representada pela Equação 1.

$$\eta_I = \frac{3}{2} \left(\frac{d_p}{d_g} \right)^2 \quad (1)$$

Em que:

d_p = diâmetro da partícula

d_g = diâmetro do grão de areia

2.4.1.2 Impacto inercial

As linhas de fluxo, quando se aproximam dos grãos de areia, divergem para contornar o obstáculo físico. Caso a partícula em suspensão tenha inércia suficiente para continuar a trajetória retilínea irá colidir com o grão e poderá ser retida em sua superfície. Segundo Ives e Cleasby (1972), como demonstrado teórica e experimentalmente, esse mecanismo é mais importante na filtração de ar e é pouco relevante para a filtração de água.

2.4.1.3 Sedimentação

Quando as partículas possuem tamanho e densidade relativa suficientes, nas proximidades do grão de areia, devido à menor velocidade do escoamento, as partículas podem sedimentar na superfície do material filtrante. A eficiência do mecanismo de sedimentação é proporcional à razão entre a velocidade de sedimentação de Stokes e a velocidade de aproximação da água (v_w). A eficiência desse mecanismo isoladamente (η_s) é representada na Equação 2 (YAO *et al.*, 1971).

$$\eta_s = \frac{d_g^2(\rho_p - \rho_w)g}{18\mu v_w} \quad (2)$$

Em que:

d_g = diâmetro do grão de areia

ρ_p = massa específica das partículas

ρ_w = massa específica da água

g = aceleração da gravidade

μ = viscosidade dinâmica da água

v_w = velocidade de aproximação da água

2.4.1.4 Difusão

O movimento browniano é um movimento aleatório das partículas em suspensão devido à energia térmica das moléculas de água. Para partículas menores que 1 µm esse mecanismo se torna mais importante quanto menor for a partícula, mas é praticamente insignificante para partículas maiores que 1 µm. A eficiência desse mecanismo é inversamente proporcional ao número de Peclet (Pe), o qual é definido como a razão entre a taxa de transporte de massa por advecção e a taxa de transporte por difusão. Yao *et al.* (1971) descreveram a eficiência do mecanismo de difusão (η_D), isoladamente, como representado na Equação 3.

$$\eta_D = 4,04Pe^{-2/3} = 0,9 \left(\frac{kT}{\mu d_p d_g v_w} \right)^{2/3} \quad (3)$$

Em que:

k = constante de Boltzmann

T = temperatura absoluta da água

μ = viscosidade dinâmica da água

d_p = diâmetro da partícula

d_g = diâmetro do grão de areia

v_w = velocidade de aproximação da água

2.4.1.5 Ação hidrodinâmica

Como demonstrado por Cleasby e Baumann (1962), o escoamento nos poros do leito filtrante é laminar, fazendo com que as velocidades sejam maiores no centro do poro e próximas a zero nas proximidades da superfície do grão. Devido aos gradientes de velocidade presentes nessas condições, as partículas apresentam movimento aleatório pelas linhas de fluxo, podendo eventualmente colidir com a superfície dos grãos. Como os gradientes de velocidade não são uniformes, as partículas apresentam forma não esférica e são deformáveis, a representação matemática da ação desse mecanismo torna-se bastante complexa e, de toda forma, esse mecanismo é de menor importância na filtração de água (IVES e CLEASBY, 1972).

2.4.1.6 Combinação dos mecanismos de transporte

É muito provável que mais de um dos mecanismos citados ocorram durante a filtração rápida. A importância de um ou outro mecanismo depende das características das partículas (forma, densidade, tamanho), das características do leito filtrante (distribuição granulométrica, porosidade) e das características do escoamento (taxas de filtração) (LIBÂNIO, 2016). Os mecanismos de transporte são ilustrados na Figura 1.

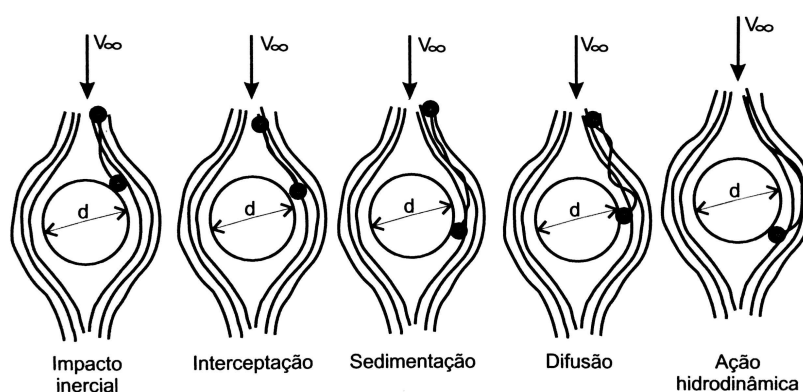


Figura 1. Representação esquemática dos mecanismos de transporte na filtração da água em meio granular

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

Como discutido em Yao *et al.* (1971), Ives e Cleasby (1972) e Amirtharajah (1988), os mecanismos de transporte de maior importância na filtração de água são a interceptação, a sedimentação e a difusão. A difusão é importante na coleta de partículas menores que $1\mu\text{m}$ e a sedimentação e a interceptação mais relevantes para partículas acima de $1\mu\text{m}$. A remoção é mínima para partículas com tamanho próximo a $1\mu\text{m}$, pois estas são muito pequenas para sedimentar ou serem interceptadas e muito grandes para o transporte por difusão. Considerando esses três mecanismos, Yao *et al.* (1971) modelaram a eficiência teórica de coleta de um único grão de areia (η), definida como a razão entre a taxa que as partículas são coletadas pelo grão e o fluxo de partículas na direção do coletor. Para a modelagem, os autores consideraram que a eficiência teórica de coleta (Equação 4) pode ser representada pela soma das eficiências isoladas dos mecanismos de interceptação, sedimentação e difusão (Equações 1, 2 e 3). Os resultados da Equação 4 são

apresentados na Figura 2 para diferentes tamanhos de partículas e assumindo $T = 25^{\circ}\text{C}$, $d_g = 0,5 \text{ mm}$, $v_w = 120 \text{ m/d}$ e $\rho_p = 1,05 \text{ g/cm}^3$.

$$\eta = \eta_I + \eta_S + \eta_D \quad (4)$$

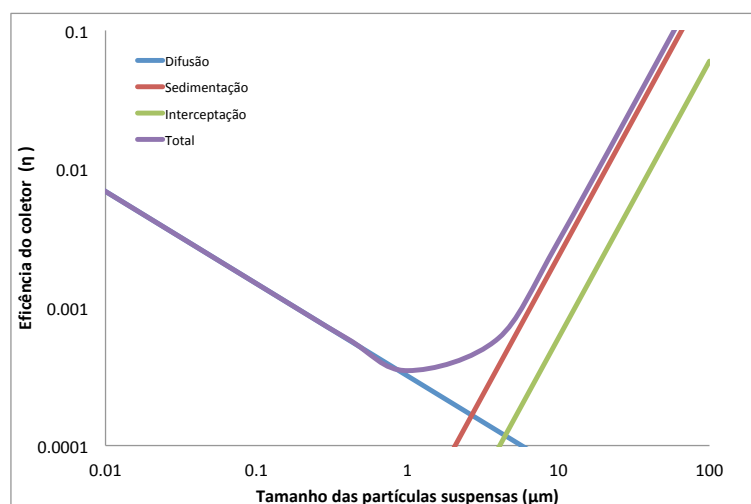


Figura 2. Eficiência dos mecanismos de transporte para diferentes tamanhos de partículas em suspensão

Fonte: adaptado de Yao *et al.* (1971)

O modelo acima é adequado para descrever a eficiência de coleta de partículas pelos grãos de areia quando as partículas estão em condições favoráveis de aderência, ou seja, para partículas desestabilizadas. Segundo Amirtharajah (1988), embora alguns trabalhos que considerem também os mecanismos de aderência tenham sido desenvolvidos, a influência do pré-tratamento químico para desestabilização das partículas ainda necessita de modelagem para a previsão satisfatória da eficiência de filtração por meio de modelos teóricos.

2.4.2 Mecanismos de aderência

2.4.2.1 Interações entre duplas camadas elétricas

Partículas em suspensão verdadeira ou em dispersão coloidal apresentam um arranjo de cargas na superfície chamado de dupla camada elétrica. Esse arranjo faz com que cargas de sinal contrário ao da partícula fiquem adsorvidas à superfície, formando uma camada compacta e, contígua a esta, uma região com íons mais dispersos, denominada camada difusa. Na interface entre as camadas compacta e

difusa, há a delimitação de um plano em que as cargas se movem juntamente com o movimento das partículas sólidas: o plano de cisalhamento. O potencial elétrico no ponto de cisalhamento, definido como a energia necessária para mover uma carga até este ponto desde o infinito, é denominado potencial zeta (ζ) e é usado para caracterizar a interface sólido-líquido (CEPIS, 2004). A representação esquemática da dupla camada e a variação (exponencial) do potencial elétrico em função da distância da superfície do sólido são apresentadas na Figura 3.

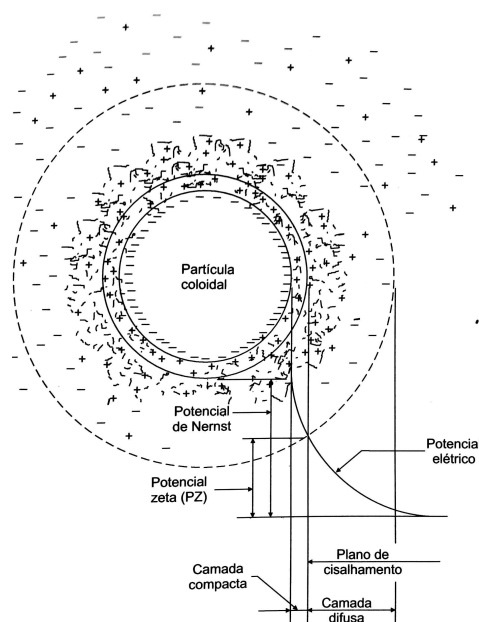


Figura 3. Representação esquemática da camada dupla e variação do potencial elétrico com a distância da partícula

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

A interação entre camadas duplas pode favorecer a atração ou a repulsão, dependendo se os potenciais elétricos são de sinais contrários ou iguais, respectivamente. A areia e a maioria das partículas em suspensão possuem carga negativa, portanto a interação tende a ser de repulsão quando não há o pré-tratamento da água bruta, ou quando este não é realizado adequadamente (IVES e CLEASBY, 1972). A influência do pré-tratamento na desestabilização das partículas em suspensão está relacionada à qualidade do processo de coagulação, que tem por objetivo a redução do potencial zeta das partículas, como discutido no item 2.3.1. A interação entre duplas camadas pode ser representada pela Equação 5 (BAI e TIEN, 1997).

$$F_D = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0(\zeta_p^2 + \zeta_g^2)\kappa e^{-\kappa\delta}}{1 - e^{-2\kappa\delta}} \left(\frac{2\zeta_p\zeta_g}{\zeta_p^2 + \zeta_g^2} - e^{-\kappa\delta} \right) \quad (5)$$

Em que:

F_d = força de repulsão entre camadas duplas

ϵ_0 = constante dielétrica no vácuo

ϵ = permissividade relativa

ζ_p = potencial zeta da partícula

ζ_g = potencial zeta dos grãos

κ = inverso do comprimento de Debye

δ = distância de separação entre a partícula e o grão

2.4.2.2 Força de van der Waals

As forças de van der Waals são forças intermoleculares fracas, compreendendo as forças de Keesom, forças de indução de Debye e forças de dispersão de London, sendo estas últimas as interações mais importantes entre partículas sólidas macroscópicas (CEPIS, 2004). As forças de dispersão de London atuam devido a dipolos instantâneos gerados pela distribuição assimétrica temporária de cargas na superfície das partículas, quando estas se aproximam do grão de areia (JEGATHEESAN e VIGNESVARAN, 2005). Em geral, essas forças são de menor intensidade quando comparadas às forças eletrostáticas entre partículas com mesmo sinal de carga, no entanto sua intensidade é aumentada quanto mais próximas estão as partículas (relevante somente para distâncias inferiores a 50 μm). Essas forças são aditivas e resultam em interação atrativa entre os grãos de areia e as partículas na água (IVES e CLEASBY, 1972), sendo as mais importantes para a aderência dos flocos ao leite. Quando as partículas estão separadas da superfície do grão de areia por uma distância muito menor que o diâmetro da partícula, a intensidade das forças de van der Waals é obtida pela Equação 6 (BAI e TIEN, 1997).

$$F_L = \frac{Hd_p}{12\delta^2} \quad (6)$$

Em que:

F_L = forças de van der Waals

H = constante de Hamaker

d_p = diâmetro da partícula

δ = distância de separação entre a partícula e o grão de areia

2.4.2.3 Efeito combinado da interação entre duplas camadas e forças de van der Waals

Os grãos de areia, assim como a grande maioria das partículas em suspensão ou dispersão coloidal na água, apresentam carga superficial negativa, que é caracterizada pelo potencial zeta. Dependendo do potencial zeta dos grãos de areia e do grau de desestabilização das partículas, a aderência será mais ou menos favorecida. O efeito combinado da interação entre duplas camadas e forças de van der Waals entre partículas carregadas e a superfície do grão de areia é representado na Figura 4 para três situações: (i) partícula com carga negativa (repulsão eletrostática); (ii) floculo com carga positiva (atração eletrostática e por forças de van der Waals) e (iii) floculo neutro (atração por forças de van der Waals).

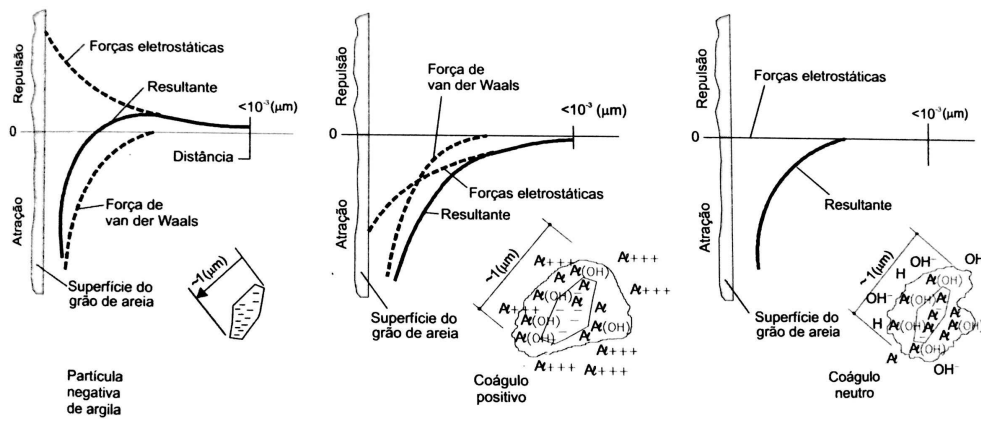


Figura 4. Representação esquemática dos mecanismos de aderência

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

2.4.2.4 Interações químicas e adsorção mútua

A aderência das partículas em suspensão aos grãos do leito filtrante também pode ocorrer por meio de ligações químicas, como pontes de hidrogênio e troca iônica. Esse mecanismo ocorre quando polímeros são adicionados à água formando pontes e ligações entre o grão de areia e as partículas (IVES e CLEASBY, 1972). Podem também ocorrer adsorção mútua e interação por meio de pontes com outros íons em solução, como cálcio e magnésio (DI BERNARDO e DANTAS, 2005).

2.4.3 **Mecanismos de desprendimento**

Durante as carreiras de filtração, como será detalhado no item 2.5, as partículas se aderem à superfície dos grãos de areia e se acumulam nos espaços intergranulares, diminuindo a seção de escoamento e causando aumento das forças de cisalhamento. Quando essas forças superam as forças que mantêm as partículas aderidas, estas são transportadas para camadas mais profundas do leito (AMIRTHARAJAH, 1988). Bai e Tien (1997) detalharam as forças envolvidas durante a retenção de partículas no leito filtrante, tal como representado de forma esquemática na Figura 5.

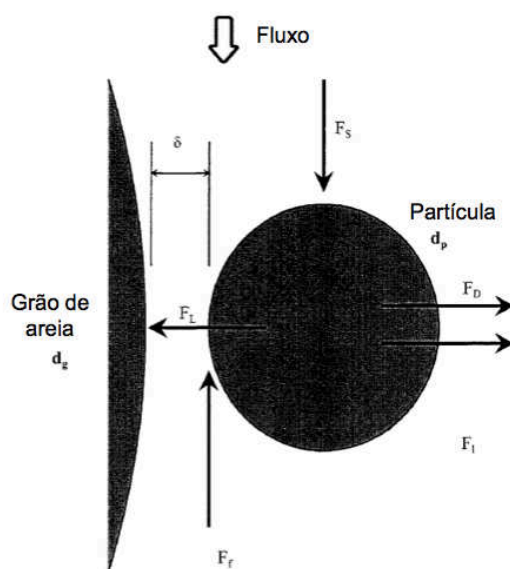


Figura 5. Representação esquemática das forças envolvidas na aderência das partículas

Fonte: adaptado de Bai e Tien (1997)

A força resultante que caracteriza a aderência ao leito filtrante é a diferença entre as forças de van der Waals (Equação 6) e de interação entre camadas duplas (Equação 5), como mostrado na Equação 7.

$$F_{Ad} = F_L - F_D \quad (7)$$

A passagem da água em velocidade pelas partículas aderidas ao leito gera forças de cisalhamento sobre as partículas, representadas por F_s na Figura 5. A intensidade das forças cisalhamento (arraste) sobre as partículas aderidas pode ser calculada, para um dado nível de colmatação do leito, pela Equação 8.

$$F_s = 2,551 \times 3\pi\mu \frac{A_s}{d_g} d_p^2 \frac{v_w}{\varepsilon_0 - \sigma} \quad (8)$$

Em que:

F_s = força de cisalhamento

A_s = função da porosidade do leito – $f(\varepsilon)$

μ = viscosidade dinâmica da água

d_g = diâmetro do grão de areia

d_p = diâmetro da partícula

v_w = velocidade de aproximação da água

ε_0 = porosidade do meio filtrante limpo

σ = depósito específico de sólidos

Como pode ser observado na Equação 8, à medida que as partículas são retidas (aumento do depósito específico de sólidos) o denominador diminui, aumentando a intensidade das forças de cisalhamento sobre as partículas. Na Equação 8 nota-se ainda que as forças de cisalhamento serão tão maiores quanto maior for a taxa de filtração. Segundo Bai e Tien (1997), em contraposição às forças de cisalhamento, surge uma força de atrito durante o escoamento da água no leito proporcional à

força de adesão. Essa força, representada por F_f na Figura 5, pode ser representada pela Equação 9.

$$F_f = k_f F_{Ad} = k_f (F_L - F_D) \quad (9)$$

Em que:

F_f = força de atrito contra o deslizamento das partículas

k_f = coeficiente de atrito

Portanto, a força resultante F_R que determina a ocorrência ou não do desprendimento de partículas é representada pela Equação 10.

$$F_R = F_S - F_f \quad (10)$$

Do que foi exposto, e como representado pela Equação 10, o desprendimento de partículas ocorre quando as forças de cisalhamento são maiores que a força de atrito ($F_R > 0$) e não ocorre quando as forças de cisalhamento são menores que a força de atrito ($F_R < 0$).

Bai e Tien (1997) estudaram o desprendimento de partículas em filtros piloto com leito de areia e chegaram às seguintes conclusões: (i) o desprendimento ocorre mais facilmente quanto mais grossa é a granulometria do leito; (ii) o desprendimento afeta mais as partículas de maior tamanho ($> 6\mu\text{m}$) do que partículas pequenas; (iii) as partículas desprendidas são novamente retidas em camadas mais profundas do leito; (iv) taxas de filtração mais elevadas favorecem a penetração mais profunda das partículas no leito, mesmo de partículas pequenas; (v) o desprendimento é mais intenso quando o filtro opera com perdas de carga maiores, ou seja, com o leito mais colmatado.

2.5 Cinética da filtração rápida

Como sintetizado em Bastos, R. *et al.* (2006), a filtração rápida pode ser entendida como um processo em que as subcamadas do leito filtrante vão, progressiva e sequencialmente, exaurindo sua capacidade de retenção de partículas. Na filtração descendente, a água com maior quantidade de impurezas encontra, primeiramente, as subcamadas de menor granulometria. À medida que as partículas são retidas nos vazios intergranulares, causam o estreitamento dos canais do meio filtrante e o conseqüente aumento da velocidade intersticial. Esse aumento da velocidade intersticial, responsável pelas forças de cisalhamento, faz com que parte das partículas retidas seja arrastada para subcamadas inferiores, ocorrendo filtração com ação de profundidade. Esse processo promove, então, incremento gradual da perda de carga ao longo do tempo e da profundidade do leito filtrante, conforme ilustrado na Figura 6 e na Figura 7.

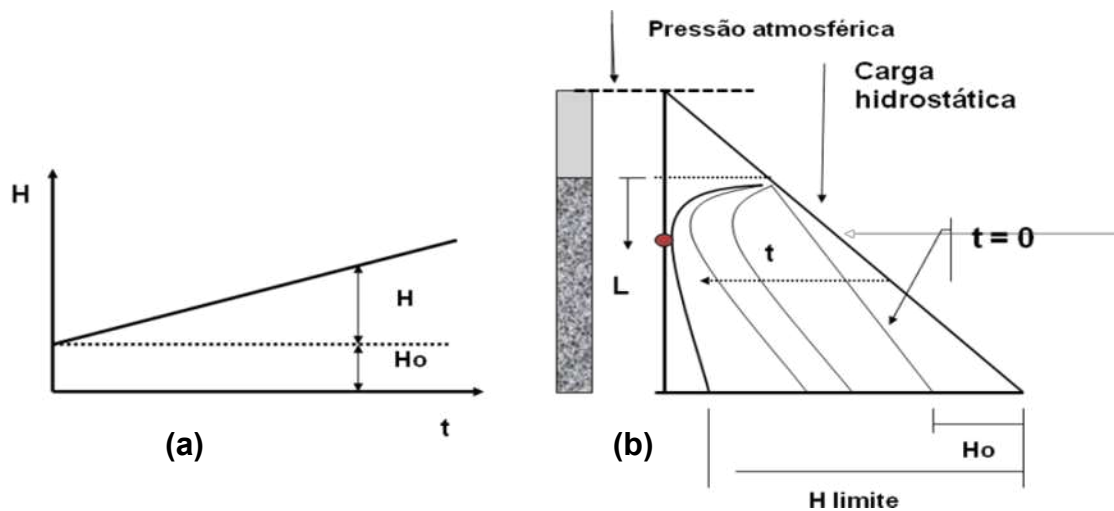


Figura 6. Ilustração esquemática da evolução da perda de carga na filtração em profundidade: (a) ao longo do tempo - carreira de filtração (H_0 perda de carga inicial (leito filtrante limpo); H = perda de carga por colmatação); (b) ao longo do tempo (t) e da profundidade do leito filtrante (L)

Fonte: adaptado de CEPIS (2004)

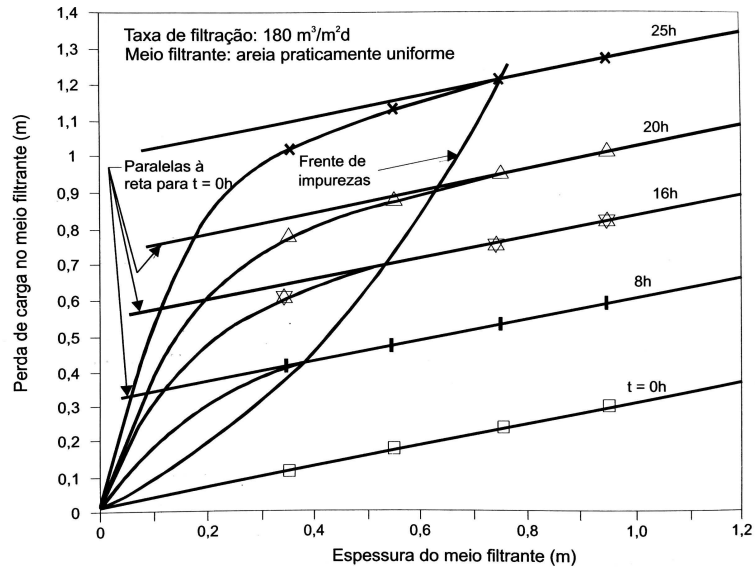


Figura 7. Ilustração da filtração com ação de profundidade - evolução da perda de carga ao longo da espessura do leito filtrante e do tempo de filtração

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

Diversos modelos têm sido propostos para representar a cinética de filtração e o desenvolvimento da perda de carga ao longo da carreira. Um dos primeiros modelos, proposto por Iwasaki (1937), assume a passagem de uma suspensão não floculenta e homogeneamente dispersa por um meio granular uniforme e limpo, em que todas as camadas do leito possuem a mesma eficiência de remoção das partículas em suspensão. O modelo de Iwasaki é apresentado na Equação 11, indicando que a taxa de variação da concentração ao longo da espessura do leito filtrante é proporcional à concentração pontual em um dado instante de tempo.

$$\frac{\partial C}{\partial L} = -\lambda C \quad (11)$$

Em que:

C= concentração de sólidos (volume/volume)

L = espessura do leito filtrante

λ = coeficiente de filtração

A integração da Equação 11 resulta em decaimento exponencial da concentração de sólidos ao longo da espessura do leito filtrante. Ao longo da carreira de filtração, os sólidos removidos da água são depositados nos poros do leito, como representado pelo balanço de massa na Equação 12.

$$\frac{\partial C}{\partial L} + \frac{1}{v_w} \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

Em que:

C= concentração de sólidos (volume/volume)

L = espessura do leito filtrante

v_w = velocidade da água

σ = depósito específico de sólidos (volume/volume)

t = tempo de filtração

Segundo Ives e Cleasby (1972), é reconhecido que o coeficiente de filtração (λ) apresentado na Equação 11 não poderia ser constante ao longo da carreira de filtração, devendo ser expresso como uma função do depósito específico (σ). Uma forma geral das diversas equações propostas para λ é apresentada na Equação 13.

$$\lambda = \lambda_o \left(1 + \frac{\sigma}{(1-\varepsilon_o)}\right)^y \times \left(1 - \frac{\sigma}{\varepsilon_o}\right)^z \times \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}}\right)^x \quad (13)$$

Em que:

λ = coeficiente de filtração

λ_o = coeficiente de filtração do meio filtrante limpo

ε_o = porosidade do meio filtrante limpo

σ = depósito específico de sólidos (volume/volume)

σ_{max} = depósito específico máximo de sólidos (volume/volume)

y, z, x = constantes empíricas

A variável λ é uma medida de eficiência da filtração e a sua variação ao longo do tempo pode ser entendida pela interpretação dos termos componentes da Equação 13. Segundo Ives e Cleasby (1972), o primeiro termo da equação representa o aumento da superfície específica (área superficial por unidade de volume) do leito devido ao acúmulo de partículas depositadas na superfície dos grãos (amadurecimento do filtro) e, conseqüentemente, aumento da eficiência da filtração ao longo do tempo. O segundo termo representa a diminuição da superfície específica do leito devido ao acúmulo de sólidos no interior dos poros e a conseqüente diminuição da eficiência da filtração ao longo do tempo. O terceiro termo representa o efeito do acúmulo de sólidos no aumento da velocidade intersticial nos poros, devido à diminuição da seção de escoamento. Na condição limite, ou seja, quando o depósito específico atinge o valor de σ_{max} , a velocidade intersticial seria tão elevada que inibiria o depósito de novas partículas no leito, caracterizando a ocorrência do trespasse.

A ação de filtração em profundidade pode ser ilustrada pela fração da turbidez remanescente (em relação à turbidez afluyente) ao longo do tempo e da profundidade do leito filtrante. Na Figura 8 e na Figura 9, pode-se observar um ganho de eficiência nos primeiros 70 minutos de operação, ou seja, o efeito do amadurecimento do filtro. A partir de então, as primeiras camadas do leito vão se saturando até praticamente tornarem-se inativas, sendo o processo de remoção de partículas realizado nas camadas mais inferiores. O processo continua de maneira gradual até que ocorra o encerramento da carga hidráulica disponível ou o trespasse das partículas, como discutido no item 2.6.

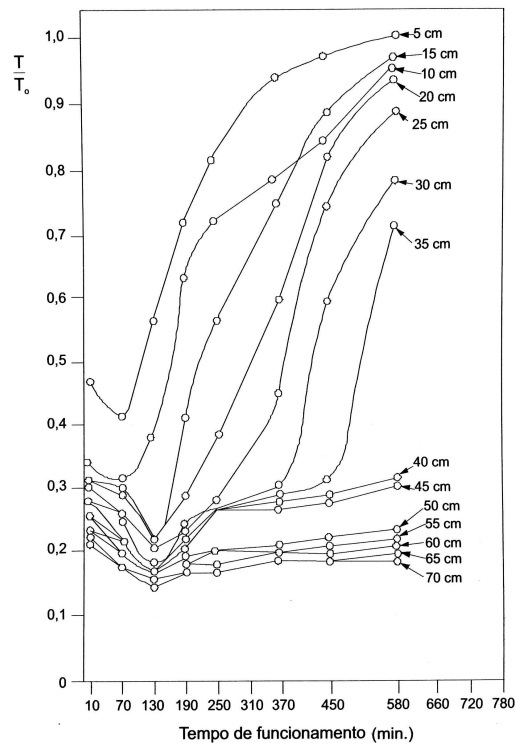


Figura 8. Exemplo de variação da turbidez remanescente (T) em relação à turbidez inicial (T_0) ao longo do tempo de operação do filtro

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

Devido ao acúmulo de sólidos e ao aumento da velocidade intersticial, a resistência ao fluxo aumenta, gerando incremento da perda de carga com o tempo. Na filtração, pode-se distinguir dois tipos de perda de carga (DI BERNARDO e DANTAS, 2005): (i) perda de carga turbulenta, a qual ocorre nas tubulações, acessórios e sistema de drenagem; (ii) perda de carga laminar, resultado da soma das perdas no meio filtrante limpo (H_0) e na camada suporte (H_s), as quais dependem das características do leito (tamanho e forma dos grãos e porosidade), da viscosidade da água e da taxa de filtração aplicada e perda de carga por colmatação (H_t), que é função do depósito de sólidos no leito ao longo do tempo (Figura 6). A perda de carga no meio filtrante pode ser estimada a partir da equação de Kozeny-Carman, como mostra a Equação 14.

$$\frac{\partial H}{\partial L} = 150 \frac{\nu v_w}{g \varepsilon^3} s^2 \quad (14)$$

Em que:

H = perda de carga do meio filtrante

ν = viscosidade cinemática da água

g = aceleração da gravidade

v_w = velocidade da água

ε = porosidade do meio filtrante

L = espessura do leito filtrante

s = superfície específica dos grãos de areia

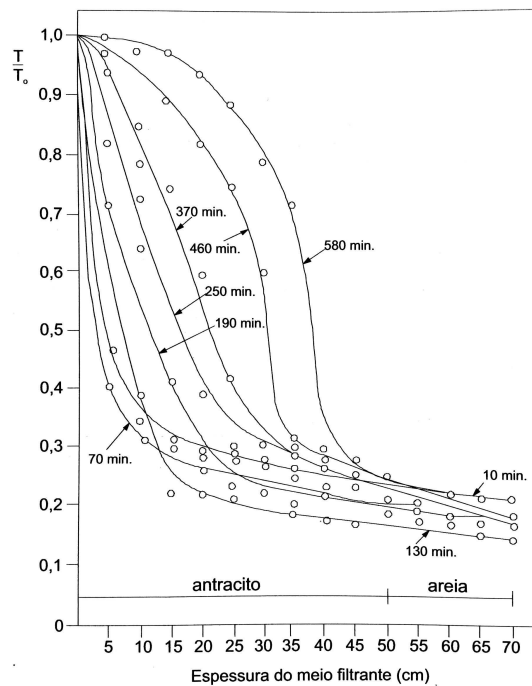


Figura 9. Exemplo de variação da turbidez remanescente (T) em relação à turbidez inicial (T_0) ao longo da profundidade do leito filtrante

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

Para o cálculo da perda de carga do meio filtrante limpo, deve-se considerar a superfície específica de grãos não esféricos e não uniformes em tamanho, além da introdução de um termo quadrático da velocidade na Equação 14; isso permite a aplicação da equação tanto para o regime laminar quanto o turbulento, obtendo-se a

Equação 15 (Equação de Ergun), tal como apresentado em Di Bernardo e Dantas (2005).

$$\frac{\Delta H}{\Delta L} = 150 \frac{\nu (1-\varepsilon_0)^2 v_w}{g \varepsilon_0^3 C_e^2} \left(\sum \frac{X_i}{d_i^2} \right) + 1,75 \frac{(1-\varepsilon_0) v_w^2}{\varepsilon_0^3 g C_e} \left(\sum \frac{X_i}{d_i} \right) \quad (15)$$

Em que:

$\Delta H/\Delta L$ = perda de carga unitária do meio filtrante limpo

ν = viscosidade cinemática da água

g = aceleração da gravidade

v_w = velocidade da água

ε_0 = porosidade inicial

C_e = coeficiente de esfericidade

X_i = fração mássica do leito com diâmetro inferior a d_i

d_i = diâmetro médio da camada i

A Equação 14 mostra que a perda de carga no filtro é dependente da superfície específica dos grãos, a qual, por sua vez, é dependente dos depósitos específicos ao longo do tempo. Ives (1970) reporta que para valores baixos de concentração de sólidos no filtrado (inferiores a 5% da concentração inicial), a integração da Equação 14 resulta em uma relação linear entre a perda de carga e o depósito específico (tempo), como mostrado na Equação 16 e na Figura 6 a.

$$H = H_0 + kt \quad (16)$$

De forma prática, a perda de carga em leitos filtrantes pode ser determinada por meio da leitura do nível de piezômetros instalados ao longo da altura do leito filtrante, como representado esquematicamente na Figura 10.

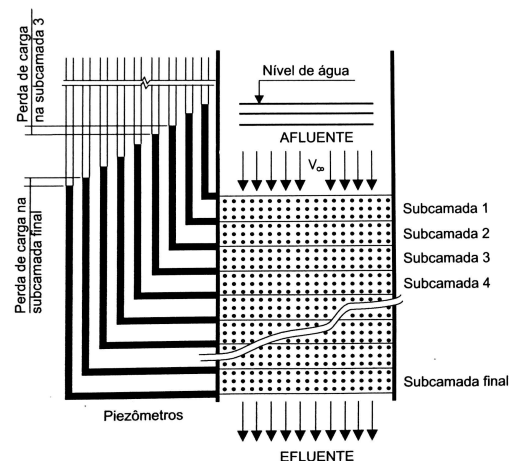


Figura 10. Representação esquemática da leitura da perda de carga nos piezômetros

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

2.6 Carreira de filtração e retrolavagem dos filtros

Após certo tempo de filtração, o filtro deixa de filtrar caso a carga disponível seja inferior à necessária para vencer as perdas de carga; pode ocorrer também trespasse, que vem a ser o arraste de partículas até seu surgimento no efluente do filtro em quantidades indesejadas e, conseqüentemente, a deterioração da qualidade da água filtrada (CLEASBY *et al.*, 1963). A ocorrência de um destes dois eventos, o que ocorrer primeiro, determina a retirada do filtro para limpeza e define a carreira de filtração – tempo de operação decorrido entre duas limpezas consecutivas do filtro.

Carreiras de filtração usuais apresentam a seguinte seqüência: (i) período de amadurecimento do filtro na etapa inicial com turbidez da água filtrada mais elevada, devido à água de lavagem remanescente no filtro (DI BERNARDO E DANTAS, 2005); (ii) rápido decréscimo da turbidez da água filtrada; (iii) estabilidade da turbidez da água filtrada em valores baixos; e (iv) eventualmente, trespasse. A duração de uma carreira de filtração está relacionada a fatores, tais como: o tipo de floco formado na coagulação-floculação e a qualidade da água decantada, a taxa de filtração empregada, o método de controle operacional da filtração e da retrolavagem (CEPIS, 2004). A Figura 11 ilustra carreiras de filtração típicas para: (a) flocos resistentes e (b) flocos frágeis.

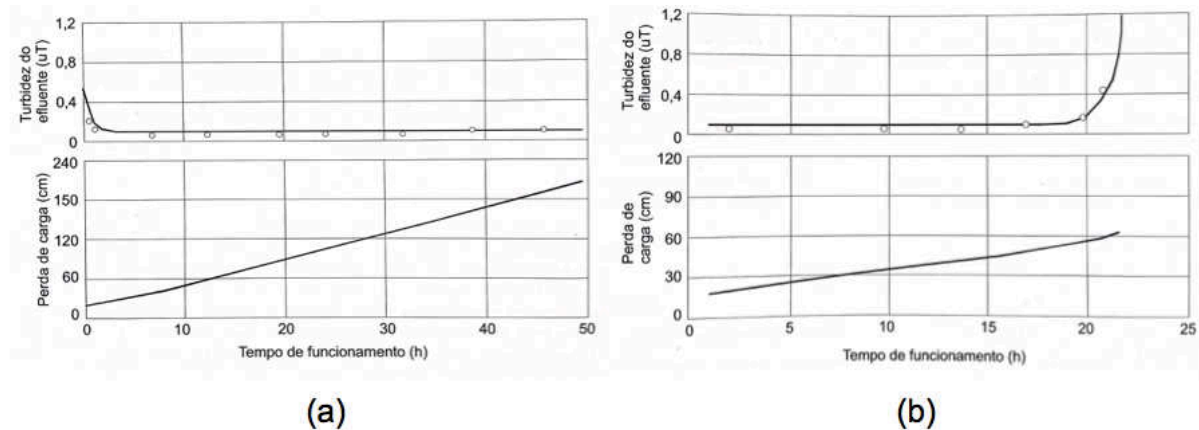


Figura 11. Representação esquemática da turbidez e da evolução da perda de carga ao longo da carreira de filtração nos casos de (a) flocos resistentes e (b) flocos frágeis

Fonte: Di Bernardo e Dantas (2005)

A situação ilustrada na Figura 11a ocorre, por exemplo, quando a turbidez é baixa e a coagulação é realizada por meio do mecanismo de adsorção-neutralização de cargas, pelo qual os flocos formados apresentam elevada capacidade de aderência ao leito filtrante. Portanto, esses flocos apresentam maior resistência ao desprendimento (trespasse) e, conseqüentemente, promovem um maior incremento da perda de carga ao longo do tempo. A Figura 11b representa a situação em que a coagulação é realizada, por exemplo, pelo mecanismo de varredura, cujos flocos apresentam menor capacidade de aderência ao leito e, conseqüentemente, são mais propensos ao trespasse. No entanto, o incremento da perda de carga ao longo do tempo se dá de forma menos intensa quando comparado à situação ilustrada na Figura 11a.

A limpeza dos filtros é feita por retrolavagem, isto é, água tratada é aplicada em sentido ascensional, promovendo a fluidificação e expansão do meio filtrante, de forma que as partículas aderidas aos grãos sejam desprendidas. A retrolavagem é um procedimento que consome elevada quantidade de água tratada (2 a 5% do volume captado) (HELLER e PÁDUA, 2006), ou seja, o controle operacional de uma ETA deve ser tal que permita a obtenção das carreiras de filtração as mais longas possíveis, promovendo, assim, economia de água e de recursos. O controle do processo de coagulação e de lavagem dos filtros favorece a obtenção de carreiras de filtração mais longas, bem como maior eficiência da filtração.

O controle da lavagem dos filtros é realizado pelo monitoramento das seguintes variáveis: velocidade ascensional da água, expansão do leito filtrante e tempo de lavagem (CEPIS, 2005). A velocidade ascensional da água aplicada durante a retrolavagem deve ser suficiente para promover expansão do leito da ordem de 20 a 30% (ABNT, 1992), situação em que as forças de cisalhamento causadas pela água sobre a superfície dos grãos promovem o desprendimento das partículas retidas durante a filtração. O tempo de retrolavagem deve ser ajustado de forma a limpar o leito de forma satisfatória e consumir o menor volume de água possível. A inadequação do procedimento de lavagem dos filtros diminui a duração das carreiras de filtração, bem como a vida útil dos filtros, e afeta negativamente a qualidade da água filtrada.

2.7 Fatores intervenientes no desempenho da filtração

Considerando os mecanismos envolvidos na filtração - transporte, aderência e desprendimento das partículas - pode-se afirmar que a eficiência da filtração está relacionada às propriedades físicas e químicas da água a ser filtrada, às características do meio filtrante e às condições hidráulicas, determinadas, fundamentalmente, pela taxa de filtração.

2.7.1 Características da água afluyente aos filtros

Dependendo das impurezas presentes na água bruta e seus respectivos níveis, diferentes mecanismos de coagulação (adsorção-neutralização de cargas, varredura), pré-tratamento (pré-cloração, pré-oxidação) ou mesmo diferentes unidades (decantador, flotador) podem ser necessários. Além disso, a eficiência e qualidade do tratamento pré-filtração serão determinadas por um controle adequado da operação da ETA. As características dos flocos influenciam o desempenho da filtração conforme ilustrado na Figura 11 e discutido nos itens 2.3 e 2.6.

2.7.2 Taxa de filtração

A taxa de filtração é dada pela razão entre a vazão afluyente ao filtro e sua área superficial. A escolha da taxa de filtração a ser empregada está relacionada ao tipo de tratamento empregado, às características do leito filtrante e ao sentido do escoamento. Para filtros rápidos descendentes de camada simples de areia, a NBR 12216 (ABNT, 1992) recomenda taxas de filtração de até $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Como mostrado nas Equações 2 e 3, a eficiência dos mecanismos de transporte (difusão e sedimentação) é diretamente afetada pela variação da taxa de filtração (v_w). Ainda, a profundidade até a qual os flocos penetram no leito filtrante, bem como o desprendimento dos flocos aderidos, são dependentes, entre outros fatores, da taxa de filtração. A aplicação de taxas adequadas de acordo com as características do leito e com a técnica de tratamento utilizada é fundamental para a obtenção de carreiras mais prolongadas e para a própria eficiência da filtração.

2.7.3 Características do leito filtrante

A escolha das características do leito filtrante é também função da qualidade da água, da técnica de tratamento e do sentido do escoamento. Por exemplo, águas de turbidez mais baixa são tratadas por filtração direta e coaguladas pelo mecanismo de adsorção e neutralização de cargas, formando flocos mais resistentes. Assim, é necessário um leito de granulometria mais grossa para evitar elevado incremento da perda de carga. No entanto, com maior porosidade, há maior probabilidade de ocorrência de trespasse, sendo necessária uma espessura de leito filtrante maior.

ETAs em ciclo completo empregam filtros rápidos de camada simples de areia ou camada dupla de areia e antracito. A NBR 12216 (ABNT, 1992) apresenta especificações para as características do leito filtrante de filtros rápidos descendentes, conforme detalhado a seguir.

2.7.3.1 Granulometria

Com base em ensaio de distribuição granulométrica, pode-se determinar a fração mássica (X) da amostra de material filtrante que passa por determinada malha, ou seja, a fração do material que possui diâmetro (d_x) menor do que o da malha considerada. Da análise, obtêm-se características de interesse para leitos filtrantes de filtros rápidos descendentes, como tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade.

- Tamanho efetivo (d_{10})

Representa o diâmetro da malha da peneira pela qual passam 10% da fração mássica do material ou, em outras palavras, que retém 90% da massa total. A NBR 12216 (ABNT, 1992) recomenda valores entre 0,45 a 0,55 mm, ou seja, que apenas

10% em massa do total da areia presente diâmetro mais fino que estes valores. Em filtros descendentes, a água encontra inicialmente as camadas do filtro com menor granulometria, portanto a remoção de partículas e elevação da perda de carga está relacionada ao diâmetro das partículas mais finas. Embora menor diâmetro dos grãos proporcione maior eficiência de remoção, o incremento da perda de carga é mais intenso e há menor penetração dos flocos no leito filtrante, podendo resultar em carreiras insatisfatoriamente curtas.

- Coeficiente de desuniformidade (C_D)

Stevenson (1997) apontava a inexistência de estudos que comprovassem que o uso de material filtrante com grãos de um único tamanho fosse mais vantajoso para o processo de filtração e que a produção de material com um único diâmetro seria excessivamente custosa. Em 1994, o mesmo autor discutia a importância de limitar os valores de desuniformidade dos materiais, uma vez que mesmo pequenas variações dessa característica afetam diretamente a taxa de retrolavagem dos filtros (STEVENSON, 1994). O coeficiente de desuniformidade representa a razão entre os diâmetros referentes à passagem de 60% e 10% da massa do material ($C_D = d_{60}/d_{10}$); quanto maior o valor do coeficiente mais desuniforme é o material. A NBR 12216 (ABNT,1992) recomenda valores entre 1,4 a 1,6 para filtros rápidos descendentes de camada simples.

2.7.3.2 Espessura do leito filtrante (L)

A espessura do leito filtrante é variável de acordo com a granulometria do material, sentido do escoamento e com a técnica de filtração utilizada. Na filtração rápida descendente em camada simples o aumento da espessura do leito filtrante é pouco efetivo, pois a remoção ocorre principalmente nas primeiras camadas do leito, ou seja, aumentar a espessura de um leito com certo diâmetro de grãos não aumentaria necessariamente a eficiência de filtração. Quando o sentido do escoamento é ascendente, o uso de maior espessura é justificável para aumentar a eficiência e evitar o trespasse, pois nessa situação há maior penetração dos flocos no leito. Para filtração rápida descendente utilizando leito simples de areia com as características citadas no item anterior (2.7.3.1), a NBR 12216 (ABNT, 1992) recomenda espessura mínima de 45 cm.

2.7.3.3 Massa específica dos grãos, porosidade, forma dos grãos e solubilidade em ácido

Além das variáveis que caracterizam o material filtrante apresentadas na NBR 12216 (ABNT, 1992), Di Bernardo e Dantas (2005) citam outras características importantes dos leitos filtrantes, conforme exposto a seguir.

- Massa específica dos grãos (ρ_s) e densidade aparente (ρ_t)

A massa específica de um material é dada pela massa por unidade de volume. Quando o meio filtrante é constituído de areia natural de rio, a massa específica dos grãos possui valores usualmente entre 2650 e 2670 kg m⁻³. A massa específica dos grãos influencia na perda de carga, na expansão do leito e também no volume de água gasto durante a retrolavagem. Essa variável é de importância ainda maior em filtros que empregam diferentes meios, pois devem ser selecionados materiais cuja diferença entre as massas específicas permita a estratificação desejada (AWWA, 1998).

A densidade aparente (massa específica aparente ou massa unitária) de um material é a razão entre a massa dos grãos pelo volume total do material, ou seja, volume dos grãos somados ao volume de vazios entre os grãos. A partir do volume necessário de material para preencher o leito filtrante, calculado a partir do produto entre a área de filtração e a espessura do leito, e da densidade aparente pode-se obter a massa necessária de material a ser adquirida na construção de novos filtros. Considerando os valores usuais de massa específica dos grãos de areia (2650 kg m⁻³) e de porosidade do leito (0,38 a 0,55) (IVES, 1970), a densidade aparente da areia apresenta valores típicos entre 1200 e 1650 kg m⁻³.

- Porosidade (ϵ)

A porosidade é definida como a razão entre o volume de vazios e o volume total do meio filtrante, sendo importante na determinação da perda de carga do meio limpo, bem como da expansão durante a retrolavagem. Para grãos mais esféricos (coeficiente de esfericidade próximo a 1), a porosidade do leito é menor quando comparada à de leitos com grãos mais angulares, pois há um empacotamento efetivo dos grãos, com conseqüente menor volume de vazios. Segundo Ives (1970),

a porosidade da areia natural de rio usada para a filtração rápida possui valores entre 0,38 a 0,55 dependendo da forma e tamanho dos grãos. O volume de poros está diretamente relacionado à capacidade de retenção de sólidos no leito filtrante e ao desenvolvimento da perda de carga ao longo da carreira de filtração, como pode ser observado nas Equações 12, 14 e 15.

- Coeficiente de esfericidade (C_e)

O coeficiente de esfericidade é dado pela razão entre a área superficial de uma esfera de mesmo volume do grão e a área superficial do grão em si, sendo usado para representar a forma dos grãos. A forma influencia na perda de carga do meio filtrante limpo, na eficiência da filtração, na expansão do leito filtrante durante a retrolavagem e no arranjo dos grãos.

- Solubilidade em ácido (S)

A solubilidade em ácido representa a quantidade de impurezas no leito ou mesmo a presença de minerais solúveis em ácido, como, por exemplo, carbonato de cálcio. Segundo a NBR 11799, que especifica características a serem atendidas pelos materiais filtrantes, a solubilidade em ácido da areia deve ser inferior a 5% (ABNT, 1990).

2.8 Avaliação da eficiência da filtração – índices de filtrabilidade

A literatura tem proposto a utilização de índices que permitam quantificar a filtrabilidade de uma suspensão em determinado leito filtrante, reunindo fatores associados às características da suspensão, do meio filtrante e às condições hidráulicas da filtração. Dois desses índices são apresentados a seguir, tal como descritos em Di Bernardo e Dantas (2005).

2.8.1 Índice de Hudson

Este índice foi proposto por Hudson em 1956 a partir de observações em estação experimental nos Estados Unidos, sendo conhecido também como Índice de Trespasse Final (ITF). O trespasse final refere-se à ocorrência de determinado valor de turbidez da água filtrada – acima de 0,20 uT na proposição original de Hudson. O ITF está associado à resistência dos flocos formados, sendo valores mais baixos

associados a flocos frágeis e valores mais altos a flocos mais resistentes. A resistência do floco está relacionada às características da água bruta e à qualidade do pré-tratamento empregado, influenciando no desenvolvimento da perda de carga ao longo da carreira, tal como ilustrado na Figura 11. A expressão que representa o índice do trespasse final (ITF) é apresentada na Equação 17.

$$ITF = \frac{(v_w d_{10}^3 H_f)}{L} \quad (17)$$

Em que:

ITF = Índice de trespasse final ($\text{cm mm}^3 \text{min}^{-1}$)

v_w = velocidade de aproximação da água (cm min^{-1})

d_{10} = tamanho efetivo do material filtrante (mm)

H_f = perda de carga no momento do trespasse (m)

L_f = espessura do leito filtrante (m)

Na Tabela 4 são apresentadas categorias de características dos flocos de acordo com os valores de ITF, propostas propostos por Hudson e apresentadas em Di Bernardo e Dantas (2005).

Tabela 4. Características dos flocos de acordo com o valor de ITF

Característica dos flocos	ITF ($\text{cm mm}^3 \text{min}^{-1}$)
Muito fracos	1
Fracos	2
Pouco resistentes	4
Medianamente resistentes	8
Fortemente resistentes	12

2.8.2 Índice de Ives

Em 1978, Ives propôs o índice expresso na Equação 18 para representar a eficiência da filtração.

$$IFI = \frac{H_f T_{ue}}{T_{ua} t v_w} \quad (18)$$

Em que:

IFI = Índice de filtrabilidade de Ives

H_f = perda de carga no instante considerado (cm)

t = tempo de filtração considerado (min)

T_{ua} = valor médio da turbidez afluyente (uT)

T_{ue} = valor médio da turbidez efluente (uT)

v_w = velocidade de aproximação (cm min^{-1})

Segundo Ives (1978), a expressão de filtrabilidade deve considerar não apenas a remoção de turbidez, mas também o aumento da perda de carga ao longo do tempo. Ainda, a filtrabilidade de uma suspensão é determinada para cada condição de leito filtrante (granulometria, espessura), sendo variável caso as características do filtro sejam alteradas. Considerando que boa filtrabilidade significa produzir filtrados de baixa turbidez, com baixos incrementos de perda de carga ao longo do tempo, mesmo com altas taxas de filtração, depreende-se que quanto menor o valor de IFI maior será a eficiência da filtração. Ives (1978) encontrou valores entre 1×10^{-4} (água coagulada com sulfato de alumínio) e 3×10^{-2} (água bruta com caulinita sem pré-tratamento). No entanto, o autor faz a ressalva que não há valores absolutos indicativos de boa ou má filtrabilidade, mas que, em experimentos realizados sob as mesmas condições, menores valores do IFI representariam maior eficiência em comparação a outros experimentos que apresentassem valores mais elevados de IFI.

2.9 Materiais granulares empregados como leito filtrante para filtração rápida

2.9.1 Materiais convencionais

O material mais utilizado como leito filtrante para o tratamento de água é a areia quartzosa, extraída do fundo de rios, muitas vezes, por atividades não licenciadas e com consequentes impactos ambientais. A areia quartzosa, também denominada areia natural de rio, é composta em grande maioria por dióxido de silício (SiO_2),

possui alta dureza e massa específica de 2650 a 2670 kg m⁻³ (DI BERNARDO e DANTAS, 2005). O aspecto do material é apresentado na Figura 12.



Figura 12. Areia natural de rio

Fonte: <https://www.indiamart.com/activeglobalincorporation/activated-carbon-powder-granules.html>

O antracito ou carvão antracitoso é um material escuro composto majoritariamente por carbono, possui massa específica de 1300 a 1500 kg m⁻³ e é proveniente da mineração. O fato do antracito ser menos denso que a areia permite que o material de maior granulometria permaneça na superfície do leito filtrante mesmo com a realização da retrolavagem. Esse material é usado como segunda camada em leitos duplos, permitindo o uso de maiores taxas de filtração e obtenção de carreiras de filtração mais longas; no entanto o antracito é mais caro que a areia (CEPIS, 2004). A Figura 13 ilustra o aspecto físico do antracito.



Figura 13. Antracito

Fonte: <https://www.indiamart.com/activeglobalincorporation/activated-carbon-powder-granules.html>

2.9.2 Materiais não convencionais

2.9.2.1 Púmice

Púmice é uma rocha vulcânica leve formada em erupções; é similar a uma esponja, com uma rede de poros devido ao aprisionamento de bolhas de gás em sua estrutura. É composto em grande parte por sílica (70%) e óxidos metálicos (alumínio, potássio, ferro). O material é extraído por atividade mineradora, sendo as principais fontes a Itália e Turquia (FARIZOGLU *et al.*, 2003). Na Figura 14 é apresentado o aspecto físico da púmice, tal como empregada na filtração.



Figura 14. Púmice

Fonte: <http://www.lava-rock.com/category/latest-news/>

Embora esse material já tenha sido objeto de estudos para filtração em trabalhos mais antigos, tal como reportado por Mörgeli e Ives (1979) e Jackson e Letterman (1980), um trabalho mais completo foi publicado por Farizoglu *et al.* (2003). Estes autores compararam o desempenho (remoção de turbidez e desenvolvimento da perda de carga) de filtros piloto contendo areia ou púmice como leito filtrante, com relação à taxa de filtração, tamanho dos grãos e profundidade do leito. Um leito de púmice de 75 cm, tamanho efetivo de 0,59 mm e coeficiente de desuniformidade de 1,35 foi utilizado. Mesmo com o emprego de taxas de filtração de até $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ o leito de púmice foi mais eficiente na remoção de turbidez, com menor incremento da perda de carga ao longo do tempo. Segundo os autores, a púmice possui, além da porosidade entre os grãos, uma porosidade interna permitindo maior acúmulo de sólidos e menor incremento da perda de carga ao longo do tempo. Após a retrolavagem com água, o material depositado foi removido eficientemente,

utilizando menor quantidade de água de lavagem, devido ao menor valor de massa específica da púmice.

2.9.2.2 Perlita

Segundo Uluatam (1991), a baixa disponibilidade de areia em algumas áreas da Turquia e o alto custo de materiais como antracito criou a necessidade de se estudar novos materiais para a substituição da areia quartzosa. A perlita é uma rocha vulcânica composta majoritariamente por sílica e óxidos de alumínio, sódio e potássio, sendo a maioria das reservas mundiais localizadas na Turquia. O aspecto físico da perlita, tal como empregado na filtração, é apresentado na Figura 15.



Figura 15. Perlita

Fonte:<http://www.conteches.com/products/stormwater-management/treatment/filter-media-options.aspx>

Em 1992, Uluatam comparou o desempenho de filtros pilotos utilizando como meio filtrante areia ou perlita moída. Em termos de características físicas, a perlita apresenta menor massa específica e maior porosidade quando comparada à areia, permitindo economia de recursos no processo de retrolavagem. Foram avaliadas as variáveis remoção de turbidez, desenvolvimento da perda de carga ao longo do tempo e solubilidade em ácido do material. A perlita apresentou menor solubilidade em ácido quando comparada à areia. Além disso, o tratamento no filtro com leito composto por perlita foi mais eficiente em termos de remoção de turbidez, com menor desenvolvimento da perda de carga e com maior aproveitamento da espessura do leito. No entanto, os materiais empregados apresentavam granulometria (tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade) diferentes,

tornando a interpretação dos resultados mais complexa. De acordo com Uluatam (1992), como os resultados das variáveis avaliadas foram similares para areia e para a perlita e o custo deste material é bem menor que o custo da areia, pode ser considerado viável o uso da perlita como material filtrante em filtros rápidos para tratamento de água.

2.9.2.3 Vidro reciclado moído

O vidro é produzido a partir da areia e é composto principalmente de sílica e alguns óxidos metálicos. Seu uso como leito de filtros rápidos vem sendo estudado em trabalhos relativamente recentes (EVANS *et al.*, 2002; SOYER *et al.*, 2010). Por meio de estudos piloto esses autores compararam filtros com leito de areia ou vidro moído com relação à remoção de turbidez e à evolução da perda de carga ao longo do tempo. Foi observado que o vidro moído apresenta valores de coeficiente de esfericidade bem menores que areia (grãos angulares) e maior porosidade em comparação a grãos de areia de granulometria similar. Foram observadas remoções de turbidez similares para os dois leitos, no entanto com menor desenvolvimento da perda de carga ao longo do tempo para o vidro moído, mesmo com a aplicação de taxas de até $276 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Devido à maior porosidade e menor massa específica de material, foi possível realizar a retrolavagem com menor vazão e foi necessária menor quantidade (massa) de material para preenchimento do leito. Segundo Soyer *et al.* (2010), em regiões em que esse material apresente custo competitivo com o da areia, o uso de vidro moído pode ser uma boa alternativa, pois além dos custos de instalação e das vantagens acima apresentadas, o uso de materiais recicláveis é ambientalmente menos impactante quando comparado a atividades de extração de areia. O aspecto físico do vidro moído empregado na filtração é apresentado na Figura 16.



Figura 16. Vidro moído

Fonte: <http://hichipper.en.made-in-china.com/product/ZKonbqhJkFVD/China-Recycled-Crushed-Glass-Cullet.html>

2.9.2.4 *Terras diatomáceas*

A filtração em terras diatomáceas é uma técnica de tratamento com algumas diferenças em relação às outras previamente discutidas, incluindo o fato de já ser mais bem estudada. Nessa técnica, uma mistura de água e terras diatomáceas é recirculada por um meio poroso até a formação de uma fina camada de revestimento, quando então é iniciado o processo de filtração. As partículas em suspensão são removidas na superfície de pré-revestimento produzida na etapa anterior, tornando-se parte do meio filtrante. Com o progresso da filtração, há a formação de uma torta na superfície de pré-revestimento e o processo continua até que ocorra o encerramento da carga hidráulica disponível. Com o encerramento da carreira de filtração, a torta juntamente com a camada de pré-revestimento é removida por lavagem com água sob pressão e o processo se reinicia a partir da recirculação da mistura de água e terras diatomáceas e formação de uma nova camada de pré-revestimento (FULTON, 2000).

As terras diatomáceas são compostas de esqueletos fossilizados de algas microscópicas que possuem a capacidade de extrair sílica da água para produzir sua estrutura, a qual é composta por cerca de 85% de sílica (FULTON, 2000). Em regiões como Lompoc, Califórnia, as condições existentes há milhões de anos (principalmente a presença do oceano em locais onde hoje é continente) favoreceram depósitos de diatomáceas, as quais, após o soerguimento das terras continentais, tornaram-se disponíveis para a extração (FULTON, 2000). Na Figura 17 é apresentado o aspecto físico das terras diatomáceas usadas na filtração.



Figura 17. Terras diatomáceas

Fonte: <http://diatomaceous.sell.ecer.com/iz6e44956-diatomite-diatomaceous-earth-filter-aid-for-beer-industry-beer-filtration-de-filter-media-images.html>

A filtração em terras diatomáceas é empregada principalmente para limpeza de águas de piscina e na indústria de bebidas, além da produção de água potável (FULTON, 2000). São utilizados grãos com tamanho da ordem de dezenas de micrômetros, com camada de pré-revestimento de 3 a 5 mm e empregadas taxas de filtração de 30 a 180 m³ m⁻² d⁻¹. Os mecanismos atuantes são, principalmente, a ação de coar e a aderência ao leito, podendo ser empregado pré-tratamento para remoção de cor e outras substâncias dissolvidas. Como reportado em diversos estudos (BROWN *et al.*, 1974; LANGÉ *et al.*, 1986; SCHULER e GOSH, 1990), a filtração em terras diatomáceas é efetiva na remoção de materiais particulados (turbidez e cistos e oocistos de protozoários), bactérias e vírus. Ainda, com um bom projeto e operação adequada, o tratamento por esta técnica pode ser mais barato quando comparado a sistemas em ciclo completo (FULTON, 2000). No entanto, essa técnica é recomendada apenas para o tratamento de águas de baixa turbidez.

2.9.2.5 Areia de britagem

Apesar de não terem sido encontrados relatos na literatura de uso de areia de britagem em tratamento de água, como este é o tema do presente trabalho optou-se por incluí-lo neste item sobre materiais não convencionais empregados como leito filtrante granular para filtração rápida.

A areia de britagem é um agregado miúdo resultante da britagem de rochas, produzida em equipamento específico (britador de eixo vertical - VSI, na sigla em inglês) nas mesmas plantas de mineração para produção de agregados maiores para construção civil, como a brita. O termo *areia de britagem* consta na NBR 9935

Agregados - Terminologia (ABNT, 2011). No mercado são usados também os termos "areia industrial" e "areia artificial", de cunhos comercial ou popular. O material é produzido para uso em construção civil, cumprindo o mesmo papel da areia natural de rio em concretos e argamassas, principalmente. A granulometria é controlada por processos automatizados de trituração e peneiramento da rocha, permitindo a vantagem de maior uniformidade, dificilmente obtida em areias extraídas de leitos de rio; além disso, a areia de rio pode se apresentar poluída, por exemplo, com torrões de argila e matéria orgânica, e mesmo contaminada.

Outro aspecto relevante é que a areia de britagem, diferentemente da areia de rio é produzida, geralmente, em grandes instalações de mineradoras, sendo um produto comercializado na formalidade, com geração de impostos e empregos; apresenta grande potencial para gerar economia nas obras, com desempenho igual ou superior ao da areia natural (BASTOS, P. *et al.*, 2006). Na Figura 18 é apresentado o aspecto físico da areia de britagem, tal como empregada na construção civil. Estudos sobre o emprego desse material na construção civil têm sido realizados, aplicando o material como substituto total da areia natural (BARBOSA *et al.*, 2008; BASTOS, P. *et al.*, 2006) ou parcial (DRAGO *et al.*, 2009; MENOSSI *et al.*, 2010). Alguns estudos envolvendo o uso de areia de britagem empregam material obtido de rocha de gnaiss e outros, material obtido de rocha basáltica. Porém, nenhum dos estudos consultados reporta a composição mineralógica da areia de britagem e seus efeitos sobre os resultados obtidos.



Figura 18. Areia de britagem

Fonte: <http://britastomazelli.com.br/areia-industrial>

A areia de britagem costuma apresentar elevado teor de material fino ($< 0,075\text{mm}$), por conta do processo de produção que aplica alta energia de impacto nas partículas para quebrá-las ("cominuição" da rocha), o que pode ocasionar certa complexidade na aplicação em argamassas e concretos. Para a aplicação mais eficaz, portanto, deve-se seguir os resultados de estudo de dosagem, assim como é feito, também, para a areia natural.

Importante ressaltar a diferença entre areia de britagem e o chamado "pó-de-pedra", fração miúda que sobra em todos os processos de produção de brita, em todas as pedreiras. O pó-de-pedra é de difícil aplicação direta na tecnologia de concretos e argamassas e de difícil comercialização, justamente por sua falta de padronização e teor de finos ainda mais elevado que a areia de britagem. Vale destacar, no entanto, o grande potencial de uso também do pó-de-pedra para leitos filtrantes, desde que com a granulometria corrigida por peneiramento em grande escala. O pó-de-pedra não será objeto de estudo na presente dissertação.

O princípio de produção e uso de areia de britagem é o de aproveitamento total dos finos (BASTOS, P. *et al.*, 2006), sem descarte de nenhuma parcela, com ganhos econômicos e ambientais. A produção de areia de britagem é similar à produção de agregados maiores para construção civil, envolvendo as etapas de extração das rochas nas pedreiras, transporte por caminhões até as plantas de produção, britagem primária da rocha e transporte para o peneiramento (Figura 19). Após a separação da rocha britada com diâmetro entre 25 e 38 mm, essas frações são utilizadas para a produção da areia industrial em britador de impacto vertical (Figura 20).

Na construção civil, a areia de britagem, se usada em proporções adequadas obtidas em estudos de dosagem, proporciona algumas vantagens em relação à areia natural, tais como: maior resistência mecânica e menor retração para argamassa (BASTOS, P. *et al.*, 2006); maior resistência à compressão e à tração para o concreto (BARBOSA *et al.*, 2008). Uma possível desvantagem observada é a diminuição da trabalhabilidade do material preparado (argamassa ou concreto) quando comparado à areia natural. No entanto, outras características já citadas, fazem com que a areia de britagem encontre boa aceitação no mercado da construção civil (BASTOS, P. *et al.*, 2006).



Figura 19. Fase inicial da produção da areia industrial



Figura 20. Produção da areia de britagem em britador vertical de impacto

* Rocha britada com diâmetro entre 25 e 38 mm

Devido às características granulares do material e à similaridade com a areia natural de rio, é possível que a areia de britagem possa também ser empregada em filtros rápidos descendentes de ETA. Embora a maioria dos trabalhos da área de construção civil citados tenha buscado a utilização dos finos como vantagem econômica, ambiental e operacional, no tratamento da água o emprego do material bruto pode não ser possível devido à possibilidade de incremento de turbidez da água filtrada decorrente do material mais fino aderido aos grãos componentes do leito. No entanto, com a adequação da granulometria da areia de britagem por meio de peneiramentos e a lavagem do material para remoção dos finos aderidos aos grãos, o material pode, em tese, ser adequado como leito filtrante, segundo as características determinadas pelas NBR 11799 e NBR 12216.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos materiais utilizados como meio filtrante

A areia natural de rio foi obtida na Estação de Tratamento de Água da UFV (ETA UFV), que recentemente fez a troca dos leitos filtrantes.

A areia de britagem foi produzida pela empresa Pedra Sul Mineração Ltda. e preparada para o presente trabalho sob a coordenação do Professor Pedro Kopschitz Xavier Bastos. A partir do produto “Areia Industrial Média”, funcionários da Pedra Sul Mineração separaram as frações granulométricas adequadas à filtração rápida descendente (0,42 a 1,7 mm), correspondentes a 25% em peso do material bruto (Figura 21).

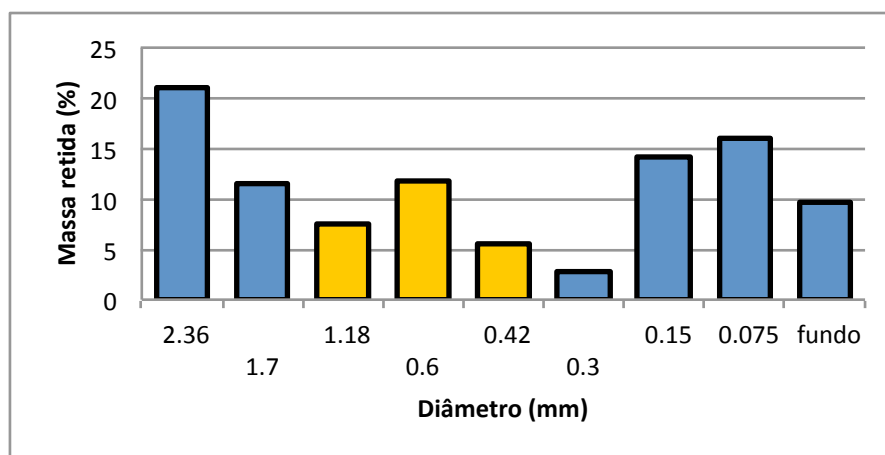


Figura 21. Características granulométricas da areia industrial média (Pedra Sul Mineração)

*As frações destacadas em amarelo representam os grãos com granulometria adequada à filtração rápida descendente em camada simples

Na UFV, as areias de britagem e natural de rio foram sucessivamente peneiradas de forma a obter as características granulométricas de acordo com a NBR 12216.

3.1.1 Granulometria

Duas amostras de cerca de 600 g de cada areia foram utilizadas para a caracterização granulométrica, sendo utilizado um peneirador eletromecânico PAVITEST (peneiras de 20,3 cm de diâmetro) por 20 minutos. A massa retida nas peneiras com abertura de 0,425; 0,600; 0,850; 1,00; e 1,70 mm foi mensurada em balança analítica, obtendo-se a distribuição granulométrica de cada areia com base

na média de valores dos dois ensaios para cada material. Na Tabela 5 são apresentadas as características granulométricas da areia de britagem e na Tabela 6 as da areia natural de rio.

Tabela 5. Características granulométricas da areia de britagem

Abertura da malha (mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)	Massa retida acumulada (%)	Massa que passou (%)
1,70	1,00	1,00	0,20	99,8
0,850	17,93	18,93	3,30	96,7
0,600	277,71	296,64	51,1	48,9
0,425	271,67	568,31	97,8	2,20
0,300	12,69	581,00	100,0	0,00

Tabela 6. Características granulométricas da areia natural de rio

Abertura da malha (mm)	Massa retida (g)	Massa retida acumulada (g)	Massa retida acumulada (%)	Massa que passou (%)
1,70	2,60	2,60	0,40	99,6
0,850	22,63	25,23	3,50	96,5
0,600	342,55	367,78	50,3	49,7
0,425	343,63	711,41	97,3	2,70
0,300	19,61	731,02	100,0	0,00

Dessa análise, foram obtidos os valores de tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade indicados na Tabela 7.

Tabela 7. Tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade dos leitos filtrantes

Característica	Areia de britagem	Areia natural
Tamanho efetivo (mm)	0,45	0,45
Coeficiente de desuniformidade	1,45	1,44

De forma similar e utilizando um agitador de peneiras PAVITEST (peneiras de 50 x 50 x 10 cm), foram separadas diferentes frações de seixo rolado para a composição da camada suporte dos filtros, com as características granulométricas apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Características granulométricas da camada suporte

Camada	Granulometria (mm)	Espessura da camada (cm)
Seixo rolado (topo)	1,70 a 4,76	6
Seixo rolado	4,76 a 6,35	6
Seixo rolado	6,35 a 9,50	6
Seixo rolado	9,50 a 12,7	6
Seixo rolado (fundo)	12,7 a 19,0	6

3.1.2 Composição química

Para a caracterização química das areias, 100 g de cada material (já condicionados como leito filtrante) foram triturados e peneirados em malha de 0,075 mm. As amostras obtidas foram submetidas à análise de espectrometria de fluorescência de raio X (XRF) utilizando equipamento Shimadzu modelo EDX-700, no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF). Os resultados são apresentados como percentual de cada componente (óxidos) nas amostras analisadas.

3.1.3 Massa específica dos grãos (ρ_s)

A massa específica dos grãos foi determinada com o método do picnômetro, conforme as especificações da NBR 6508 (ABNT, 1994). A análise foi realizada em duplicata e teve duração de três dias, sendo que, no primeiro, cada amostra de areia foi deixada imersa em água (período de 24 horas); no segundo dia foram determinadas a massa do picnômetro (500 mL) com água e a massa do picnômetro com água e 500 g de amostra (superfície seca); no terceiro dia foi determinada a absorção de água pela amostra de 500 g de areia (superfície seca). Os resultados são apresentados como a média dos valores obtidos nos dois ensaios.

3.1.4 Densidade aparente (ρ_t)

A densidade aparente, também denominada massa específica aparente ou massa unitária, foi determinada por meio da mensuração (triplicata) da massa do material que preenchia um cilindro metálico padronizado de 9,98 L, conforme as especificações da NBR NM 45 (ABNT, 2006), sendo os resultados apresentados como a média de três ensaios.

3.1.5 Porosidade (ε)

A porosidade dos leitos filtrantes, dada pela razão entre o volume de vazios (V_v) e volume total da amostra (V_t), foi obtida a partir das determinações da massa específica dos sólidos e da densidade aparente (Equação 21). Considerando a relação expressa na Equação 19:

$$V_t = V_s + V_v \quad (19)$$

Em que:

V_t = volume total da amostra

V_s = volume de sólidos na amostra

V_v = volume de vazios da amostra

Dividindo a Equação 19 por V_t , assumindo que a massa total da amostra (m_t) é aproximadamente igual à massa de sólidos (m_s) e sabendo que $V = m/\rho$, tem-se as Equações 20 e 21:

$$1 = \frac{V_s}{V_t} + \varepsilon_0 = \frac{m_s \rho_t}{m_t \rho_s} + \varepsilon_0 = \frac{\rho_t}{\rho_s} + \varepsilon_0 \quad (20)$$

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_t}{\rho_s} \quad (21)$$

Em que:

ε_0 = porosidade inicial

ρ_s = massa específica dos sólidos

ρ_t = densidade aparente

3.1.6 Coeficiente de esfericidade (C_e)

O coeficiente de esfericidade foi obtido com base na determinação da perda de carga do meio filtrante limpo para diferentes taxas de filtração, tal como proposto por Cleasby e Fan (1981) e discutido em Soyer *et al.* (2010). A partir da Equação 15, colocando o coeficiente de esfericidade (C_e) em evidência, têm-se as Equações 22 e 23.

$$\frac{\Delta H}{\Delta L} C_e^2 - 1,75 \frac{(1-\varepsilon_0) v_w^2}{\varepsilon_0^3 g} \left(\sum \frac{X_i}{d_i} \right) C_e - 150 \frac{\nu (1-\varepsilon_0)^2}{g \varepsilon_0^3} v_w \left(\sum \frac{X_i}{d_i^2} \right) = 0 \quad (22)$$

$$aC_e^2 + bC_e + c = 0 \quad (23)$$

Em que:

$$a = \frac{\Delta H}{\Delta L}$$

$$b = -1,75 \frac{(1-\varepsilon_0) v_w^2}{\varepsilon_0^3 g} L \left(\sum \frac{X_i}{d_i} \right)$$

$$c = -150 \frac{\nu (1-\varepsilon_0)^2}{g \varepsilon_0^3} v_w \left(\sum \frac{X_i}{d_i^2} \right)$$

$\Delta H/\Delta L$ = perda de carga unitária do meio filtrante limpo

ν = viscosidade cinemática da água

g = aceleração da gravidade

v_w = velocidade da água

ε_0 = porosidade inicial

C_e = coeficiente de esfericidade

X_i = fração mássica do leito com diâmetro inferior a d_i

d_i = diâmetro médio da camada i

Com os valores de a , b e c (Equação 23) obtidos do monitoramento das carreiras de filtração e das características do leito anteriormente determinadas, pode-se utilizar a fórmula de resolução da equação de segundo grau para determinar o coeficiente de esfericidade de cada material.

3.1.7 Solubilidade em ácido (S)

Para determinação da solubilidade em ácido, uma amostra de 100 g (m_i) de cada material (areia natural e de britagem) foi mantida imersa em 1L de solução de HCl 1:1 (v/v) por 30 minutos, com eventuais agitações da amostra, como recomendado pela NBR 11799. A seguir, as amostras foram lavadas com água destilada e secas em estufa a 105°C por 3 horas, sendo determinada em balança analítica a massa final (m_f) de cada areia após o ensaio. A solubilidade em ácido de cada material, reportada como porcentagem, é calculada por meio da Equação 23.

$$S = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (23)$$

Em que:

S = solubilidade em ácido (%)

m_i = massa inicial (100 g)

m_f = massa final (g)

3.1.8 Potencial zeta

O potencial zeta de cada areia foi determinado utilizando uma fração do material com granulometria bem inferior à utilizada nos filtros. Isso foi feito devido à técnica empregada para a análise (eletroforese) e a faixa de tamanho de grãos compatível com o equipamento utilizado. Para a preparação das amostras, cada areia foi peneirada na malha de 45 μm e a fração que passou foi utilizada para obtenção de

uma suspensão contendo 50 mg L^{-1} , preparada com água destilada. O potencial zeta de cada material foi determinado para duas condições distintas: (i) condição natural, sem qualquer ajuste de pH e de condutividade; (ii) condições de operação, pH de 6,8 e condutividade de $80 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$, simulando as características da água decantada afluyente aos filtros. O ajuste de pH foi realizado utilizando soluções de HCl e NaOH (0,1 e 1 N) e a condutividade foi ajustada com solução de KCl (0,3 N). Os ensaios foram realizados no Laboratório de Controle da Qualidade da Água da Divisão de Água e Esgotos (DAG) da UFV utilizando o equipamento Zetasizer Z90, marca Malvern.

3.2 Descrição dos experimentos

3.2.1 Estudo preliminar – experimento de bancada

Um filtro de bancada (Figura 22) foi construído utilizando uma proveta de 2 L (8 cm de diâmetro interno) furada na parte inferior para introdução de um espigão, ao qual foi conectada uma mangueira de silicone para a saída de água filtrada e introdução da água de lavagem. No interior da proveta foi introduzido um tubo de PVC de 5 cm de altura e 7,8 cm de diâmetro, sobre o qual foi apoiada uma placa circular (de acrílico) de 1 cm de espessura com 45 furos de 4,76 mm de diâmetro (fundo falso). Foi utilizada uma camada suporte de 10 cm com a granulometria apresentada na Tabela 8, no entanto, com espessura de cada camada de apenas 2 cm. Sobre a camada suporte, foram colocados 20 cm de areia de britagem para a composição do leito filtrante, com granulometria idêntica à exposta na Tabela 5.



Figura 22. Filtro de bancada com areia de britagem utilizado nos ensaios preliminares

Foram realizados seis ensaios com a unidade experimental de bancada: (i) dois ensaios para avaliar o efeito da areia de britagem sobre a qualidade da água filtrada; (ii) dois ensaios para avaliar a remoção de turbidez da água decantada e (iii) dois ensaios para avaliar a eficiência da retrolavagem para limpeza do leito. Nos Experimentos 1 e 2, o filtro foi alimentado com água tratada (filtrada e clorada na ETA UFV) e operado por 10 minutos com taxa de filtração constante de $150 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, sendo a qualidade da água filtrada avaliada a cada minuto com base nas variáveis turbidez, pH e condutividade. Nos Experimentos 3 e 4, o filtro foi alimentado com água decantada da ETA UFV e operado com taxa declinante de 150 a $90 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ao longo de 15 minutos, sendo coletadas amostras para determinação da turbidez da água filtrada a cada minuto. Nos Experimentos 5 e 6, foi realizada a retrolavagem do filtro com água tratada na ETA UFV e acompanhada a turbidez da água de lavagem a cada 30 s, ao longo de 9 minutos. Antes do início de todos os ensaios, era realizado o procedimento de retrolavagem do filtro de bancada com água tratada durante 10 minutos, de forma a padronizar as condições do leito ao início de cada experimento.

3.2.2 Ensaios em unidade piloto

O sistema piloto foi composto por dois filtros rápidos de escoamento descendente, sendo um com leito filtrante de areia de britagem e, como unidade de controle, um

com areia natural de rio. Cada unidade foi construída em tubulação de acrílico com 19 cm de diâmetro interno, parede de 0,5 cm e comprimento total de 267 cm, sendo que a parte inferior (100 cm) e a parte superior (165 cm) foram conectadas por meio de flanges, também em acrílico. A parte inferior possuía as seguintes estruturas: (i) flange inferior para fixação da unidade a uma mesa de apoio em madeira com 30 cm de altura; (ii) flange não removível (fundo falso) a 10 cm de altura do fundo, com 56 furos de 4,76 mm de diâmetro, também em acrílico; (iii) saída de água em PVC de 32 mm de diâmetro, na qual foi conectada, por meio de um tê, uma tubulação de 24 mm de diâmetro para injeção de água tratada em sentido ascendente para realização da retrolavagem; (iv) oito válvulas pneumáticas de 5 mm de diâmetro, sendo as duas primeiras em relação ao topo da camada suporte separadas por 10 cm e as restantes distanciadas 5 cm uma das outras. Às válvulas pneumáticas foram conectadas tubulações de PVC com 2 cm de comprimento e 5 mm de diâmetro para possibilitar a conexão de mangueiras de silicone, as quais foram fixadas a um quadro graduado. Essas mangueiras foram utilizadas para a leitura do nível da água e determinação das perdas de carga no leito filtrante e também para a coleta de amostras em diferentes profundidades do leito. Após a montagem da parte inferior, o filtro foi preenchido com 30 cm de camada suporte com as características apresentadas na Tabela 8, leito filtrante com espessura de 45 cm e as características granulométricas apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6. A parte superior continha apenas uma entrada de 32 mm, conectada a uma canaleta no interior do filtro, 20 cm acima do flange de conexão com a parte inferior. Na Figura 23 é apresentado um corte lateral de um dos filtros piloto e na Figura 24 é apresentada a instalação piloto por completo.

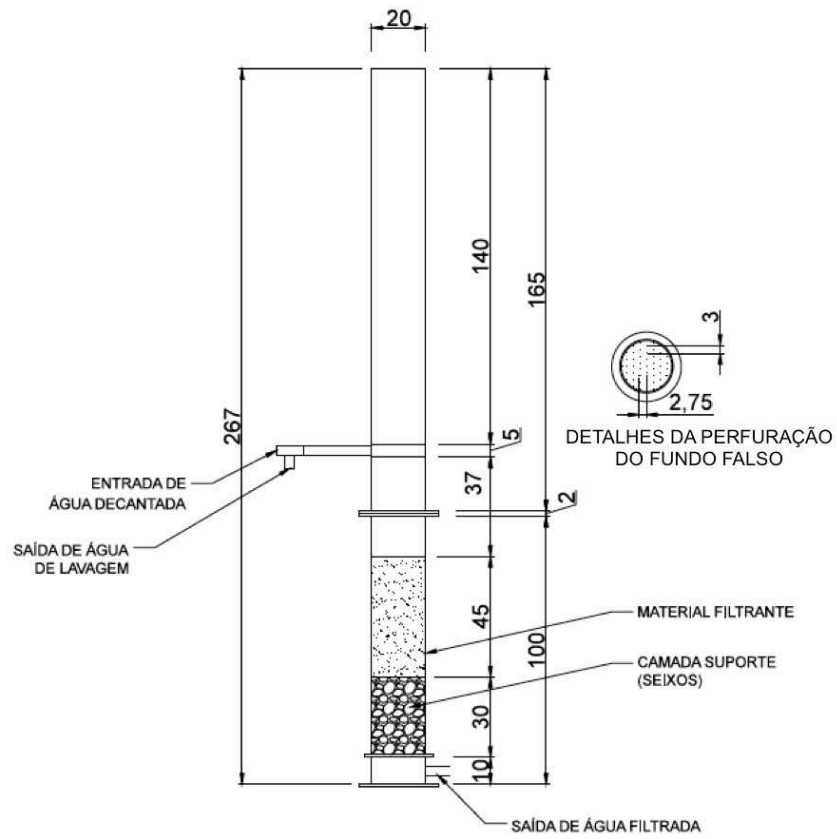


Figura 23. Corte lateral do filtro piloto - medidas em cm



Figura 24. Vista geral das unidades piloto de filtração

Os filtros piloto foram instalados nas dependências da DAG UFV e alimentados com água decantada da ETA UFV, que opera em ciclo completo com as seguintes características pré-filtração: mistura rápida em medidor Parshall e coagulação com sulfato de alumínio, floculação hidráulica e decantação convencional. Os dois filtros piloto foram operados simultaneamente ao longo de quatro meses, com taxas de filtração de 90, 180, 270 e 360 m³ m⁻² d⁻¹. O arranjo experimental para os ensaios em escala piloto está representado de forma esquemática na Figura 25.

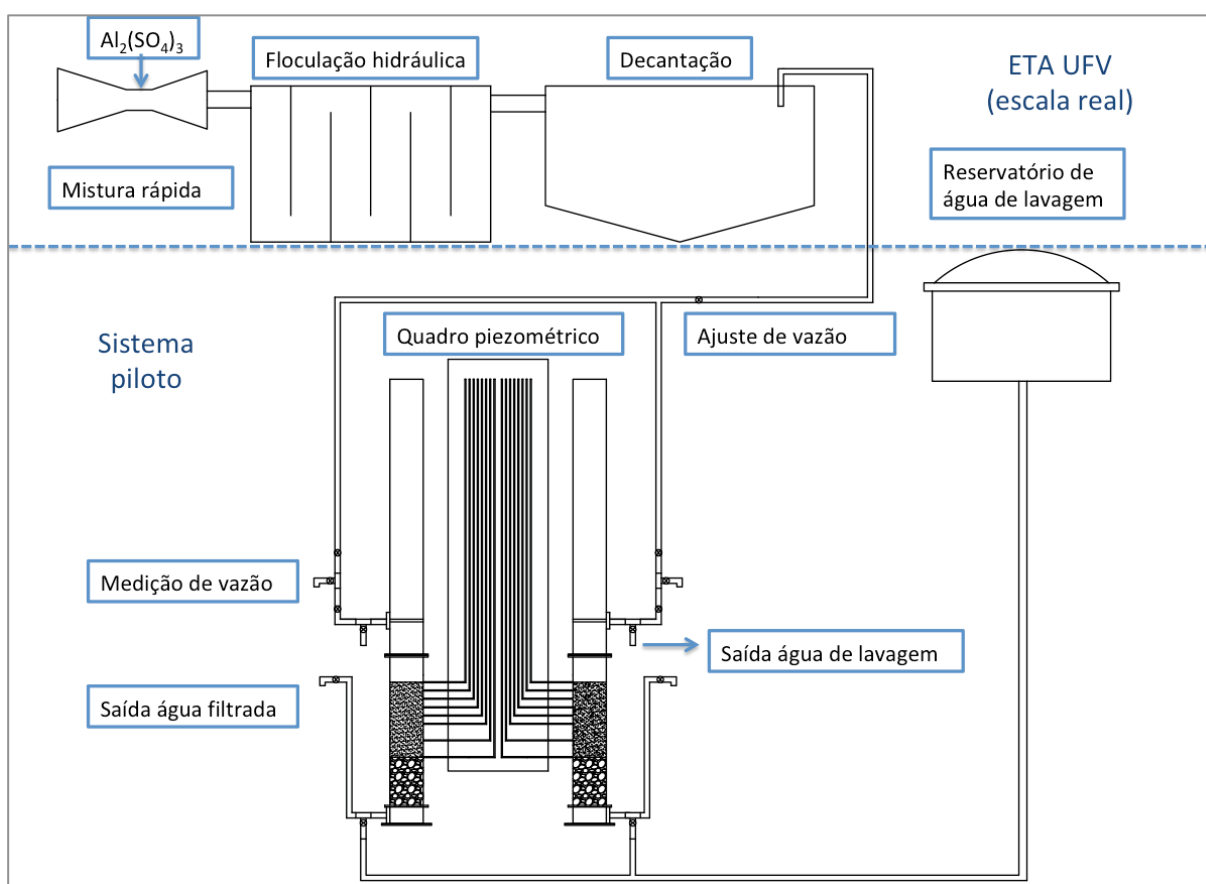


Figura 25. Representação esquemática do arranjo experimental para os ensaios com a unidade piloto de filtração

As carreiras de filtração foram consideradas finalizadas quando da ocorrência de trespasse que provocasse turbidez da água filtrada superior a 0,50 uT (padrão de potabilidade brasileiro), ou quando ocorresse o esgotamento da carga hidráulica disponível (180 cm), sendo então realizada a retrolavagem dos filtros. A retrolavagem foi realizada de forma padronizada ao fim de todas as carreiras de

filtração: duração de 10 minutos, expansão do leito de 33%, velocidade ascensional de 94 cm min^{-1} para a areia natural de rio e 106 cm min^{-1} para areia de britagem.

Durante as carreiras de filtração foram monitoradas a perda de carga e a turbidez ao longo da profundidade dos leitos filtrantes, por meio, respectivamente, do registro da altura da coluna d'água nos piezômetros e da coleta e análise de amostras de água nas mesmas mangueiras utilizadas como piezômetros. As coletas para as análises foram realizadas com intervalos de duas horas. As carreiras de filtração, em termos da evolução da turbidez e da perda de carga, foram caracterizadas graficamente, tal como na Figura 7 e na Figura 11.

As operações dos filtros piloto tinham início às 9:00 h e eram finalizadas às 18:00 h, dada a impossibilidade de monitoramento dos filtros no período noturno; eram reiniciadas no dia seguinte às 9:00 h e assim sucessivamente até o encerramento das carreiras de filtração. Para o cômputo da duração das carreiras de filtração, foram consideradas apenas as horas em que os filtros estiveram efetivamente operando, ou seja, não contabilizando o período entre 18:00 e 9:00 h em que os filtros estavam fora de operação.

Inicialmente, foram planejadas doze carreiras de filtração durante o período de estiagem (turbidez da água bruta mais baixa), sendo quatro carreiras para cada uma das seguintes taxas de filtração: 90, 180 e $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Essas taxas de filtração foram adotadas a partir da recomendação da NBR 12216 para filtros rápidos, sendo $90 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ metade do valor máximo recomendado, a taxa de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ o valor máximo recomendado e $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 1,5 vezes o valor máximo recomendado. No entanto, devido a problemas operacionais ocorridos durante um único ensaio com taxa de filtração de $90 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (item 4.3.1.1), não foram realizadas mais operações com essa taxa de filtração. Foram realizadas então três carreiras com a taxa de filtração de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, dobro do valor máximo recomendado pela NBR 12216. Durante o período chuvoso (água bruta e decantada com turbidez mais elevada), foram avaliadas apenas duas carreiras de filtração, uma com taxa de $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e outra com $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Devido ao curto período em que o manancial apresentou elevada turbidez da água bruta, não foi possível repetir os testes com as taxas de filtração de 270 e $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, nem realizar testes com taxa de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Assim, entre os meses de agosto e dezembro de 2017, foram avaliadas 14 carreiras de filtração.

3.3 Avaliação da eficiência da filtração

A eficiência da filtração nos filtros de areia natural e de areia de britagem foi avaliada, comparativamente, com base: (i) na duração das carreiras de filtração; (ii) na caracterização das carreiras de filtração, conforme descrito no item anterior; (iii) nos índices de filtrabilidade descritos no item 2.8; no caso do ITF, o valor de referência de turbidez da água filtrada considerado foi 0,50 uT. Muito embora o ITF seja um índice originalmente concebido para avaliar as características dos flocos, a abordagem no presente trabalho foi outra. Considerando que os filtros eram operados em paralelo recebendo a mesma água afluyente, uma mesma característica de floco poderia resultar em diferentes graus de aderência ao leito filtrante devido à diferença de composição dos materiais utilizados. Portanto, o ITF foi empregado com o objetivo de avaliar comparativamente, nas carreiras em que ocorreu o trespasse, a aderência dos flocos aos leitos de areia de britagem e de areia natural de rio.

3.4 Análises de qualidade da água

As análises de qualidade da água, a seguir descritas, foram realizadas no Laboratório de Controle de Qualidade da Água, vinculado à DAG UFV, segundo as disposições do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

As análises de turbidez das águas decantada (ETA UFV) e filtrada (instalação piloto), bem como no teste preliminar com areia de britagem, foram realizadas utilizando turbidímetro de bancada marca HACH modelo 2100 AN, calibrado semanalmente.

Para as análises de pH e condutividade no teste preliminar com areia de britagem e na determinação do potencial zeta foi utilizado pHmetro Digimed modelo DM-2P e condutivímetro Digimed DM-32, ambos calibrados semanalmente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos leitos filtrantes

4.1.1 Composição química

Na Tabela 9 são apresentados os resultados da composição química da areia natural de rio e da areia de britagem.

Tabela 9. Composição química dos materiais empregados como leito filtrante

Componente (%)	Areia de Britagem	Areia Natural
SiO ₂	62,48	91,06
Al ₂ O ₃	18,46	5,02
CaO	6,97	0,10
K ₂ O	4,96	1,32
Fe ₂ O ₃	4,77	0,53
SO ₃	1,46	1,60
TiO ₂	0,72	0,00
Ca ₂ O	0,00	0,21
Sn ₂ O ₃	0,00	0,16
Outros	0,18	0,02

A sílica é um dos componentes mais abundantes da crosta terrestre, estando presente na composição de diversas rochas. Nos materiais analisados, a sílica representa cerca de 62 % em massa na areia de britagem e 91 % na areia natural de rio. A areia natural ainda contém trióxido de alumínio, trióxido de enxofre, óxido de potássio e óxido de ferro III. A areia de britagem contém menos sílica que a areia natural, porém, maiores percentuais de óxido de alumínio, cal, óxido de potássio, óxido de ferro III e teor de trióxido de enxofre similar à areia natural. O maior teor de óxido de ferro III na areia de britagem (nove vezes maior, em comparação com a areia natural) pode ser responsável pela coloração mais escura apresentada por esse material.

4.1.2 Características físicas

Na Tabela 10 são apresentadas as características físicas das areias de britagem e natural de rio: massa específica dos grãos, densidade aparente, porosidade, coeficiente de esfericidade, solubilidade em ácido e potencial zeta. As condições naturais durante o ensaio de potencial zeta para a areia de britagem foram pH 5,6 e condutividade de $3,8 \mu\text{S cm}^{-1}$; para a areia natural, pH 5,6 e condutividade de $5,6 \mu\text{S cm}^{-1}$.

Tabela 10. Características físicas das areias empregadas como leito filtrante

Característica	Areia de britagem	Areia natural
Massa específica dos grãos (g cm^{-3})	2,72	2,64
Densidade aparente (g cm^{-3})	1,28	1,33
Porosidade	0,53	0,50
Coeficiente de esfericidade	0,77	0,82
Solubilidade em ácido (%)	1,16	0,22
Potencial zeta natural (mV)	-19,5	-22,1
Potencial zeta ajustado (mV)	-11,4	-11,3

A massa específica da areia de britagem aqui encontrada ($2,72 \text{ g cm}^{-3}$) é maior do que a reportada em Bastos P. *et al.* (2006), de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$. Como a areia de britagem é um material mais heterogêneo em termos de composição química, é possível que durante o condicionamento (peneiramento) da granulometria do material bruto para a filtração tenham sido alteradas as proporções entre componentes mais ou menos densos, consequentemente alterando o valor da massa específica dos grãos. Além disso, o estudo de Bastos P. *et al.* (2006) foi realizado em época diferente, sendo possível que a composição da rocha extraída atualmente pela Pedra Sul Mineração Ltda. fosse também diferente.

O percentual da solubilidade em ácido da areia de britagem foi cerca de cinco vezes maior do que o valor apresentado pela areia natural de rio. A diferença pode ser atribuída aos maiores percentuais de materiais básicos (K_2O e CaO) e de óxido de

ferro da areia de britagem. No entanto, ambos os valores encontram-se abaixo do máximo de 5% estabelecido pela NBR 11799.

O potencial zeta das areias apresentou valores bem similares, cerca de -20 mV para as condições naturais e cerca de -11 mV para as condições de operação. Como observado, as alterações de pH e condutividade exerceram grande influência na carga superficial apresentada pelos grãos de areia. Portanto, para a caracterização de materiais filtrantes é mais importante saber o potencial zeta de operação ao invés do potencial zeta natural, uma vez que o primeiro representa melhor as condições de aderência (interações entre duplas camadas) durante a operação dos filtros.

O coeficiente de esfericidade foi um pouco maior para a areia natural de rio do que para a areia de britagem, o que ajuda a explicar a porosidade um pouco menor da primeira e a maior velocidade de lavagem requerida para a segunda.

4.2 Ensaios de bancada

Na Figura 26, Figura 27 e Figura 28 são apresentados os resultados dos Experimentos 1 e 2 para turbidez, pH e condutividade, respectivamente. O objetivo desses dois experimentos foi operar o filtro de bancada com água tratada (filtrada e clorada na ETA UFV) para verificar se o leito de areia de britagem, em si, afeta a qualidade da água do efluente filtrado.

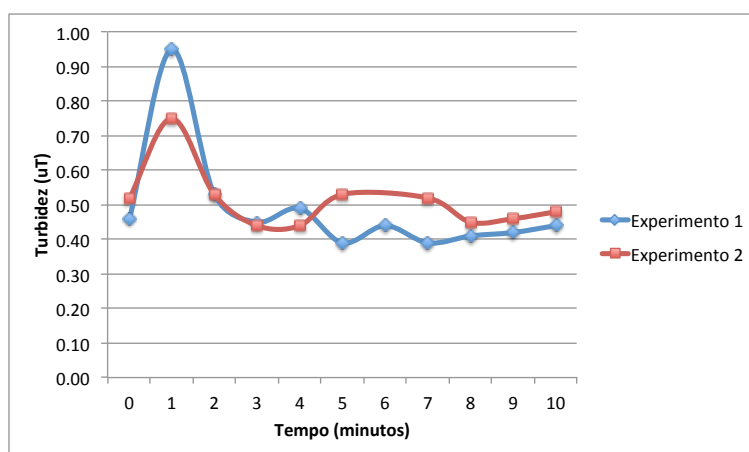


Figura 26. Turbidez da água filtrada; filtro de bancada; experimentos com água tratada; turbidez inicial: Experimento 1 = 0,46 uT, Experimento 2 = 0,52 uT

Como pode ser observado na Figura 26, durante a operação do filtro de bancada (10 minutos) a turbidez da água filtrada se manteve próxima ou abaixo do valor de turbidez da água utilizada para operação do filtro; exceção foram os dois primeiros minutos de operação, durante os quais os maiores valores de turbidez estão, provavelmente, relacionados ao remanescente de água de lavagem no filtro.

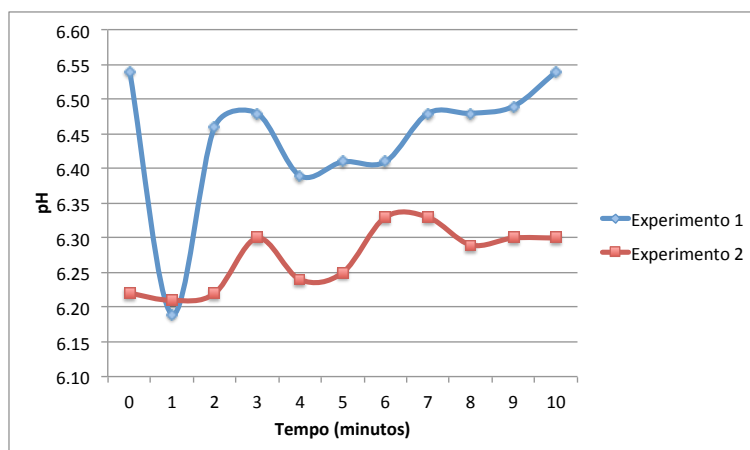


Figura 27. pH da água filtrada; filtro de bancada; experimentos com água tratada; pH inicial: Experimento 1 = 6,5, Experimento 2 = 6,2

Como mostrado na Figura 27, o pH da água filtrada apresentou pequena variação ao longo da operação. No Experimento 1, com pH inicial de 6,5, o pH da água filtrada manteve-se entre 6,4 e 6,5 na maior parte do tempo, com exceção de um único valor (6,2). No Experimento 2, com pH inicial de 6,2, os valores de pH ficaram entre 6,2 e 6,3 durante todo o experimento. Infere-se, portanto, que essas variações da qualidade da água filtrada possam ser atribuídas às variações de qualidade da própria água de alimentação do filtro.

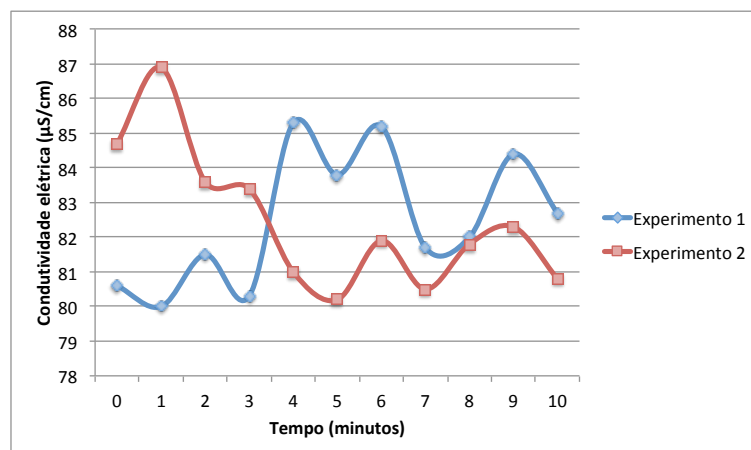


Figura 28. Condutividade da água filtrada; filtro de bancada; operação com água tratada, Condutividade inicial: Experimento 1 = $81,0 \mu\text{S cm}^{-1}$, Experimento 2 = $84,5 \mu\text{S cm}^{-1}$

Com relação à condutividade elétrica da água filtrada, novamente, a variação foi pequena (cerca de $\pm 5 \mu\text{S cm}^{-1}$ em relação ao valor inicial - Figura 28) e poderia ser atribuída às variações de qualidade da própria água de alimentação do filtro.

Em resumo, os resultados dos Experimentos 1 e 2 sugerem que o uso do leito filtrante de areia de britagem não afetou negativamente a qualidade da água filtrada.

Uma segunda série de experimentos (Experimentos 3 e 4) foi realizada com o objetivo de avaliar preliminarmente a remoção de turbidez da água decantada (ETA UFV) pelo filtro de bancada com leito de areia de britagem. Os resultados desses experimentos são apresentados na Figura 29.

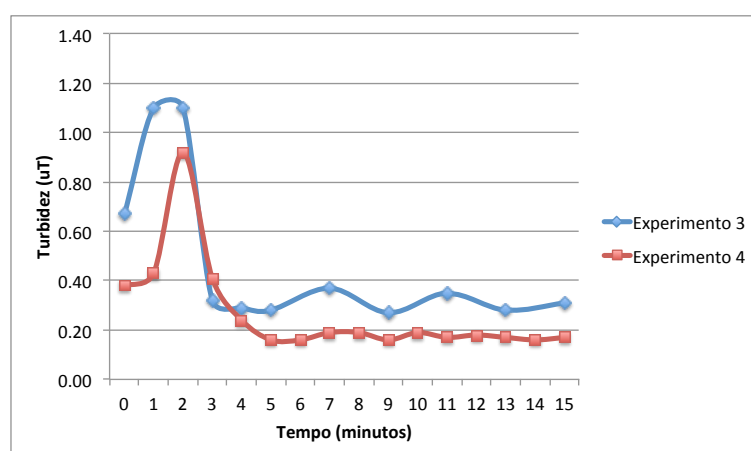


Figura 29. Turbidez da água filtrada; filtro de bancada; operação com água decantada, turbidez inicial: Experimento 3 = $0,67 \text{ uT}$, Experimento 4 = $0,54 \text{ uT}$

Os resultados dos Experimentos 3 e 4 apresentaram características bem similares: valores mais elevados do que a turbidez da água de entrada durante os dois primeiros minutos, provavelmente devido ao remanescente de água de lavagem sobre o leito, seguidos de estabilização da turbidez da água filtrada em valores baixos (cerca de 0,30 uT para o Experimento 3 e 0,20 uT para o Experimento 4) após o terceiro minuto de operação. Embora os valores de turbidez da água decantada utilizada durante os ensaios fossem bem baixos (0,54 - 0,67 uT), os resultados dos Experimentos 3 e 4 indicam elevado potencial de remoção de turbidez da água decantada por filtros que empreguem leito de areia de britagem.

Foram realizados mais dois ensaios (Experimentos 5 e 6) para avaliar a eficiência do processo de retrolavagem na limpeza do leito, ou seja, se as partículas retidas nos Experimentos 3 e 4 seriam efetivamente desprendidas do leito com a operação de lavagem. Os resultados dos Experimentos 5 e 6 são apresentados na Figura 30.

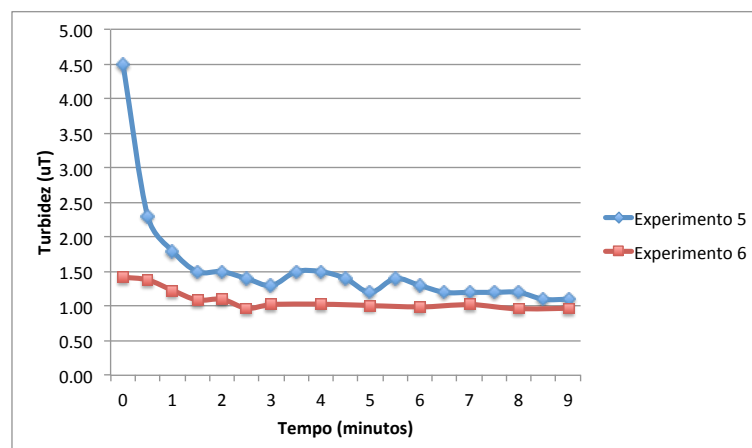


Figura 30. Turbidez da água de lavagem; filtro de bancada; lavagem com água tratada, turbidez inicial da água tratada: Experimento 5 = 0,65 uT, Experimento 6 = 0,21 uT

Devido ao curto tempo de operação dos filtros e à baixa turbidez da água decantada nos experimentos 3 e 4, não foi possível avaliar adequadamente a eficiência do processo de retrolavagem, uma vez que havia uma pequena quantidade de partículas retidas no leito. No entanto, pode-se observar que a turbidez da água de lavagem apresentou decaimento mais acentuado nos primeiros 1,5 minutos de operação, atingindo pico de 4,5 uT e 1,5 uT nos Experimentos 5 e 6, respectivamente, e mantendo-se aproximadamente constante entre 1,0 e 1,5 uT

durante o restante do procedimento. Não obstante as particularidades desses experimentos, infere-se que, aparentemente, a retrolavagem com água tratada foi suficiente para remover as partículas aderidas ao leito de areia de britagem.

Devido aos resultados considerados satisfatórios obtidos com a operação da unidade de filtração em escala de bancada, foram construídas unidades piloto para a simulação e caracterização mais completa das carreiras de filtração.

4.3 Ensaios em unidade piloto

Conforme descrito no item 3.2.2, ao todo foram avaliadas 14 carreiras de filtração: (i) doze carreiras com água de baixa turbidez, sendo uma com taxa de filtração de $90 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, quatro com $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, quatro com $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e três com $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; (ii) duas carreiras com água de turbidez da água bruta elevada, sendo uma com taxa de filtração de $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e outra com $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Porém, para efeito de discussão dos resultados, foram selecionadas para apresentação uma carreira por taxa de filtração e por período (estiagem e chuvoso), sendo o restante dos resultados apresentados no APÊNDICE A (caso contrário, como foram gerados oito gráficos por carreira, ao todo seriam apresentados 112 gráficos neste item).

4.3.1 Águas de baixa turbidez

4.3.1.1 Taxa de filtração de $90 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

A Carreira 5, operada com taxa de filtração de $90 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e água afluyente aos filtros com turbidez em faixa de 0,74 - 1,0 uT, teve duração de 86 horas. No entanto, ocorreram alguns problemas operacionais, possivelmente, ocasionados pela proliferação de algas no leito filtrante. Devido à baixa velocidade de filtração empregada, a retenção de partículas ocorreu predominantemente nos primeiros centímetros da camada filtrante. As algas retidas produziam gases que prejudicavam a operação dos filtros, por exemplo, alterando o valor de turbidez da água coletada em alguns piezômetros e a leitura da perda de carga. Ainda assim, foi obtido valor de turbidez da água filtrada inferior a 0,20 uT para ambos os filtros durante toda a carreira de filtração. Na Figura 31 são mostrados detalhes do acúmulo de bolhas no leito filtrante e da formação de uma camada esverdeada na superfície. A Figura 32 mostra a condição dos leitos após o fim da carreira de filtração.



(a)



(b)

Figura 31. Detalhes do acúmulo de bolhas no leito de areia natural (a) e da formação de camada esverdeada na superfície do leito filtrante de areia de britagem (b) Carreira 5



(a)



(b)

Figura 32. Aspecto visual dos leitos filtrantes ao final da Carreira 5: areia de britagem (a) e areia natural (b)

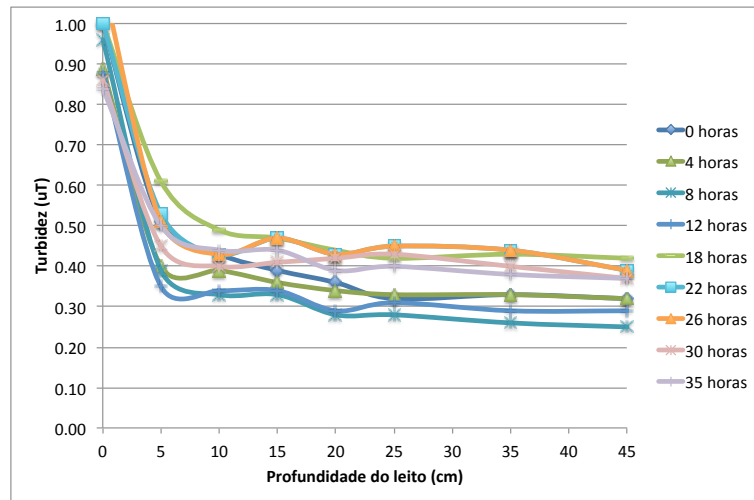
Devido aos resultados obtidos (produção estável de água filtrada com baixa turbidez em carreira de 86 horas) e às dificuldades operacionais ocorridas (acúmulo de bolhas de ar no leito), não foram testadas outras carreiras com taxa de filtração de $90 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

4.3.1.2 Taxa de filtração de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

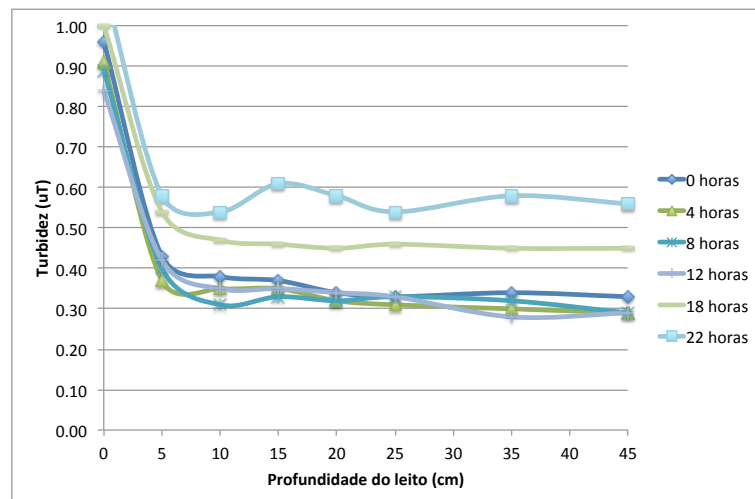
As carreiras de filtração 9, 10, 11 e 12 foram operadas com taxa de filtração de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Nas Carreiras 9 e 10 (turbidez afluyente entre 0,78 e 1,1 uT), a turbidez da água filtrada se manteve um pouco mais elevada em relação aos outros

experimentos, sendo obtidos valores entre 0,25 e 0,42 uT para a areia de britagem e entre 0,27 e 0,56 uT para areia natural de rio. Nas Carreiras 11 e 12 (turbidez afluente entre 0,51 e 1,1 uT), a turbidez da água filtrada permaneceu entre 0,13 e 0,28 uT para a areia de britagem e entre 0,14 e 0,31 uT para areia natural de rio. Todas as carreiras de filtração com areia de britagem foram encerradas pelo esgotamento da carga hidráulica disponível e com duração média de 33,5 horas; o mesmo se deu nas Carreiras 10, 11 e 12 do filtro de areia natural, com duração média de 32,8 horas. Durante a Carreira 9 ocorreu trespasse no filtro com areia natural, após 22 horas de operação. Na Figura 33 até a Figura 37 são apresentados os resultados da Carreira 9.

Como observado na Figura 33, em ambos os filtros a turbidez da água filtrada permaneceu estável, entre 0,25 e 0,45 uT, nas primeiras 12 horas. Valores abaixo de 0,50 uT já eram observados após a passagem pelos primeiros 5 cm de leitos filtrante. Após 18 horas de operação, foi observada uma leve piora na qualidade da água filtrada, possivelmente devido a alguma deficiência na coagulação. A água bruta apresentou baixa turbidez ($\approx 4,0$ uT) durante toda a carreira e, mesmo assim, a decantação se mostrou eficiente, alcançando água decantada com cerca de 1,0 uT. No entanto, apesar do baixo valor de turbidez, as partículas provavelmente não estavam bem desestabilizadas, dificultando a aderência dos flocos ao leito filtrante. Tal fato ocorreu devido à grande variabilidade da qualidade da água e da vazão captada pela ETA UFV durante o período, resultando em maior dificuldade no controle do processo de coagulação pelos operadores. No filtro de areia de britagem, tal fato resultou no aumento da turbidez para valores pouco acima de 0,45 uT até o final da carreira (35 horas). No leito de areia natural, após 22 horas de operação a turbidez atingiu valores superiores a 0,50 uT em todas as camadas do leito filtrante.



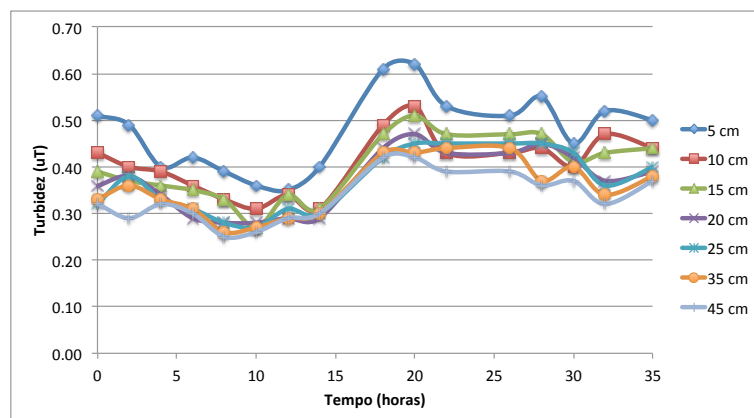
(a)



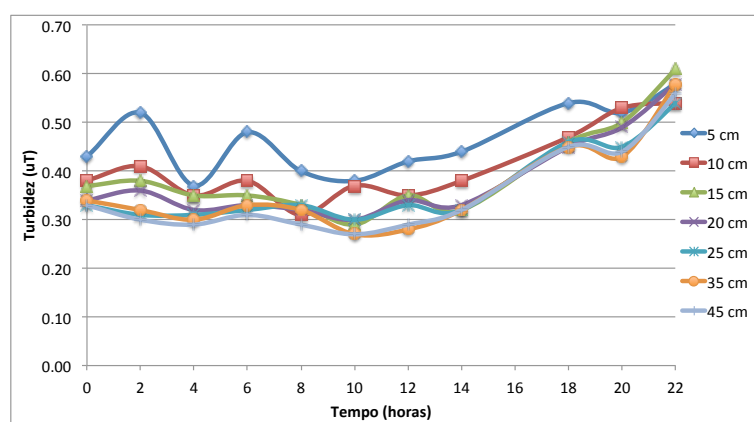
(b)

Figura 33. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 9

Na Figura 34, pode ser observado mais claramente o comportamento crescente da turbidez da água filtrada após 15 horas no filtro de areia de britagem e após 12 horas no filtro de areia natural. Também pode ser observado na Figura 34, pela proximidade das curvas, que a filtração teve ação superficial predominante em ambos os filtros operados com $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. A qualidade do efluente final (45 cm) foi praticamente idêntica à dos efluentes dos 10 cm de leito filtrante para ambos os filtros durante a maior parte da operação.



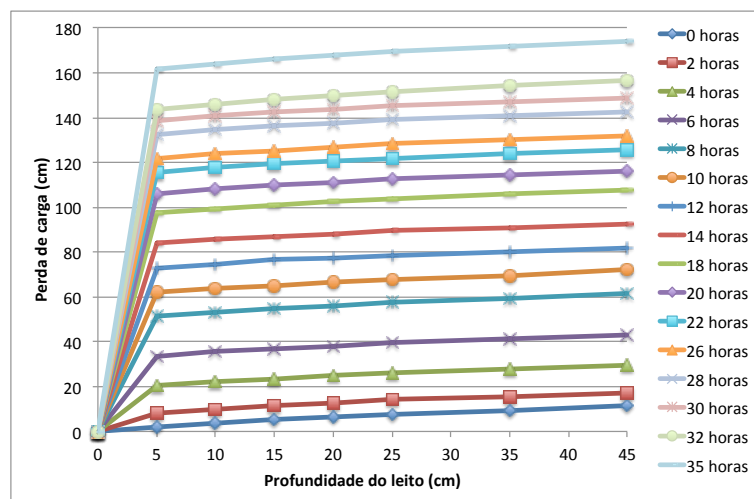
(a)



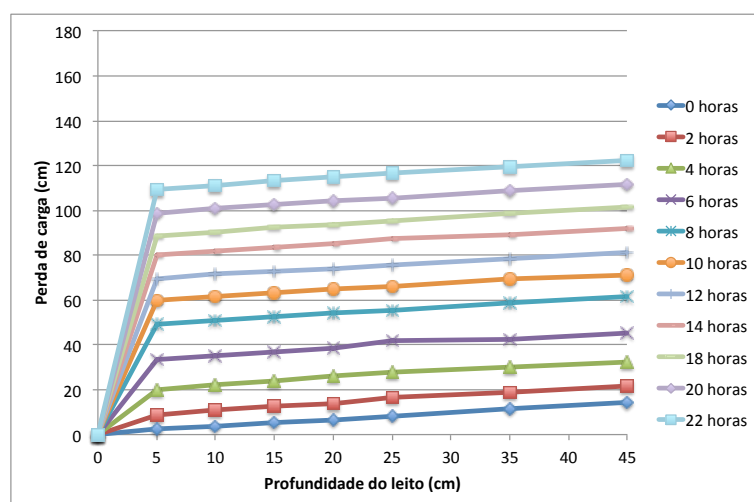
(b)

Figura 34. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 9

A Figura 35 mostra a evolução da perda de carga na Carreira 9 ao longo da profundidade do leito filtrante e do tempo. Os dois filtros apresentaram comportamentos similares de evolução da perda de carga, sendo que com 22 horas de operação (fim da carreira para o filtro com areia natural por trespasse) ambos apresentavam perda de carga total de aproximadamente 125 cm. Como discutido anteriormente, observa-se que a frente de impurezas não se movimentou de forma acentuada para profundidades superiores a 5 cm de leito, sendo a retenção predominantemente superficial.



(a)



(b)

Figura 35. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 9

Na Figura 36 são apresentados os valores de perda de carga e de turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da Carreira 9. Nota-se que houve pouca variação da qualidade da água decantada ao longo da carreira (valores entre 0,76 e 1,1 uT) e, considerando a evolução da perda de carga e da turbidez da água filtrada, fica bem evidente a similaridade do comportamento dos dois filtros.

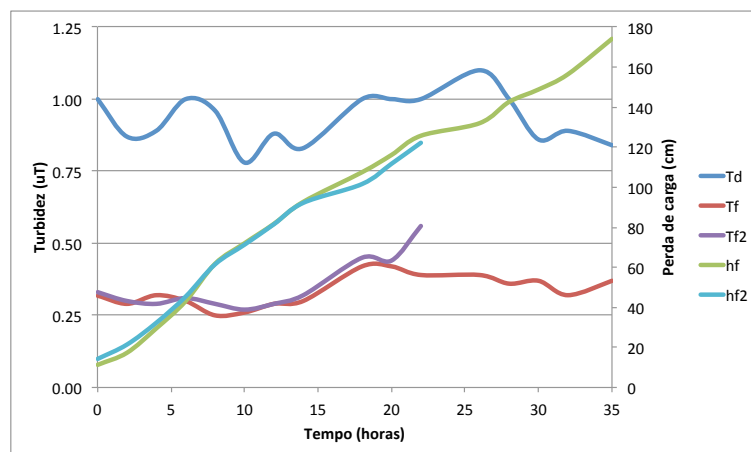


Figura 36. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 9. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

Como mostrado na Figura 37, de acordo com o Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI), houve aumento da eficiência dos filtros nas primeiras seis horas de carreira, devido aos menores valores de turbidez da água filtrada durante o período. Ambos os filtros apresentaram valores de IFI entre $2,5 \times 10^{-3}$ e $3,5 \times 10^{-3}$ até 20 horas de operação; observa-se, entretanto, piora no filtro de areia natural até a ocorrência do trespasse com 22 horas e melhora na eficiência do filtro de areia de britagem até 26 horas de filtração, pois, apesar do aumento da turbidez da água filtrada durante esse período, houve também aumento da turbidez da água decantada.

O valor de Índice de Trespasse Final (ITF) calculado para o filtro de areia natural foi de $3,15 \text{ cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$. Embora não tenha ocorrido trespasse no filtro de areia de britagem, considerando a turbidez da água filtrada de $0,39 \text{ uT}$ (após 45 cm e 22 horas de operação) o valor de ITF seria $3,25 \text{ cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$. Conforme o critério apresentado na Tabela 4, os flocos afluentes aos filtros seriam classificados entre fracos ($2 \text{ cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$) e pouco resistentes ($4 \text{ cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$). Assim, é provável que, mesmo que os flocos tenham apresentado baixo grau de desestabilização, as forças de cisalhamento no interior do leito impostas pela taxa de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ não tenham sido suficientes para desprender as partículas do leito de areia de britagem; por sua vez, no leito de areia natural de rio tais condições resultaram na ocorrência de valor turbidez acima de $0,50 \text{ uT}$ ao longo de toda profundidade do leito filtrante.

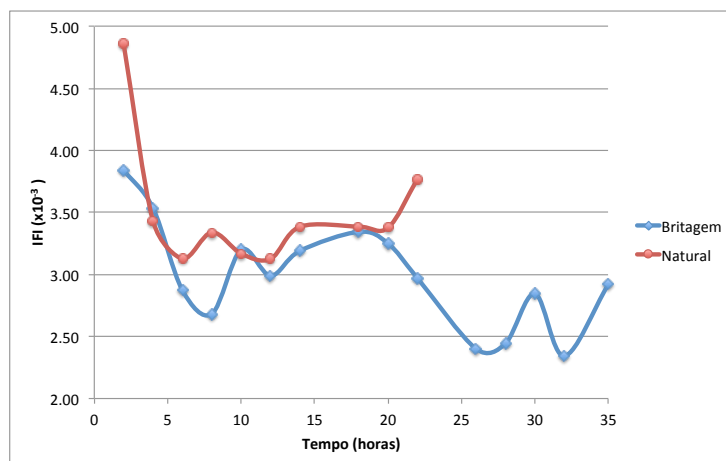


Figura 37. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 9

Após a realização da Carreira 11, também operada com $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, o filtro permaneceu fora de operação por 48 horas, permitindo crescimento microbológico no leito filtrante. Embora tal fato seja indesejável, o crescimento se limitou à profundidade do leito até onde ocorreu a remoção de sólidos, permitindo a visualização da frente de impurezas, como mostra a Figura 38. Como discutido para Carreira 9, se pode observar que a filtração teve ação predominantemente superficial nas carreiras operadas com $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.



(a)



(b)

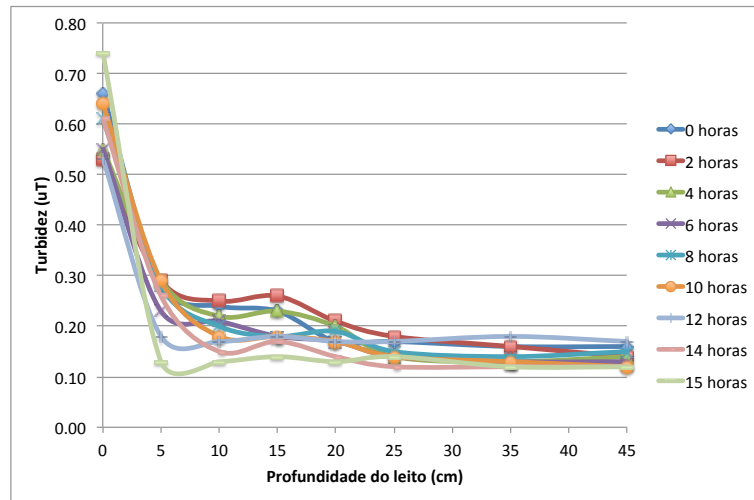
Figura 38. Aspecto dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b) após 48 horas do encerramento da Carreira 11

4.3.1.3 Taxa de filtração de 270 m³ m⁻² d⁻¹

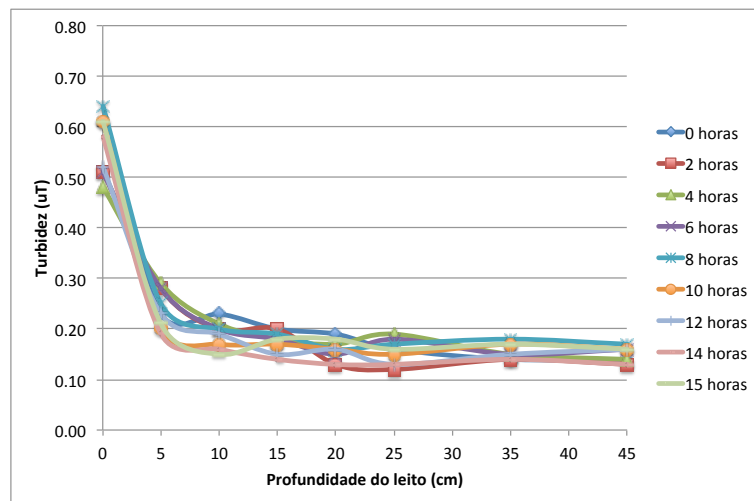
As Carreiras 1, 2, 3 e 4 foram operadas com taxa de filtração de 270 m³ m⁻² d⁻¹. As duas primeiras carreiras foram encerradas pouco antes do esgotamento da carga hidráulica total disponível devido à ocorrência de bolhas de ar no interior do leito filtrante. Diferentemente da Carreira 5 (90 m³ m⁻² d⁻¹), o aparecimento de ar no leito filtrante não prejudicou a interpretação dos resultados, pois ocorreu nas últimas horas da carreira, sendo necessário apenas o encerramento da operação com carga hidráulica um pouco inferior à máxima disponível.

Em resumo, com taxa de filtração de 270 m³ m⁻² d⁻¹ a turbidez da água filtrada foi inferior a 0,30 uT em ambos os filtros durante todo o tempo nas Carreiras 1 e 2 (turbidez afluente de 0,60 a 1,2 uT) e foi inferior a 0,20 uT durante as Carreiras 3 e 4 (turbidez afluente entre 0,48 e 0,88 uT). A duração média das carreiras de filtração foi de cerca de 15 horas, tanto para o filtro de areia de britagem quanto para o de areia natural, e todas as carreiras foram encerradas pelo esgotamento da carga hidráulica disponível. Na Figura 39 até Figura 43 são apresentados os resultados da Carreira 3 (turbidez da água afluente aos filtros 0,48 a 0,74 uT), que teve 15 horas de duração.

Como pode ser observado na Figura 39, a turbidez da água filtrada permaneceu estável (baixa variabilidade) ao longo da profundidade e da carreira de filtração para ambos os filtros, apresentando baixa variabilidade e valores abaixo de 0,20 uT. No início da carreira, houve retenção de partículas ao longo da profundidade do leito filtrante (mais notável para o leito de areia de britagem - Figura 39a); no entanto, ao final da carreira os valores de turbidez da água filtrada obtidos em diferentes profundidades foram bem próximos aos do efluente da profundidade de 10 cm. A Figura 40 facilita a visualização do exposto.



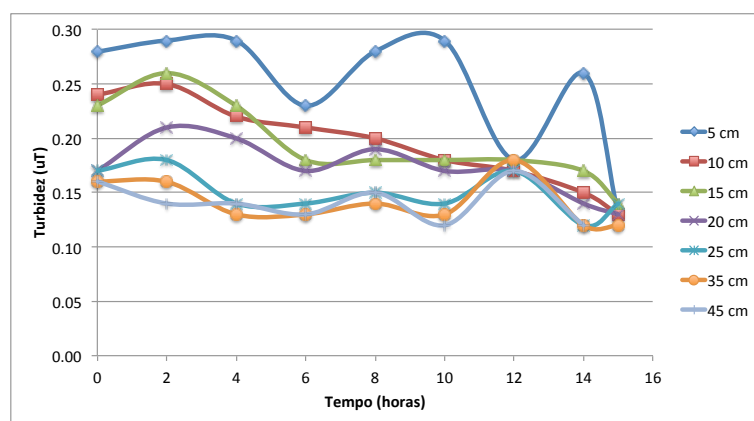
(a)



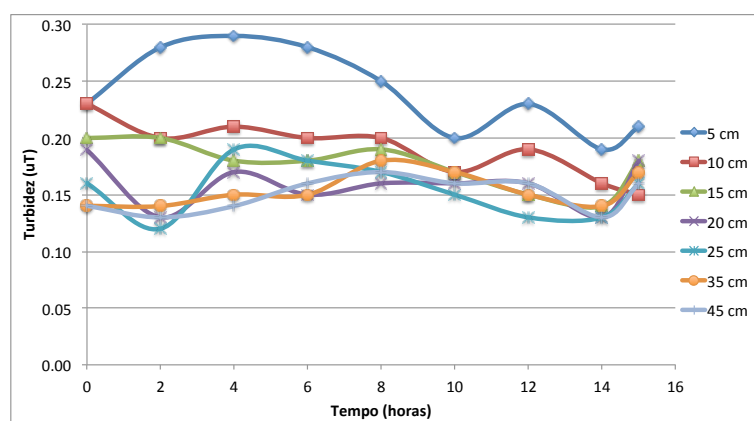
(b)

Figura 39. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 3

Apesar da maior taxa de filtração em comparação às das carreiras apresentadas anteriormente - Carreira 5 ($90 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e Carreira 9 ($180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) - durante a Carreira 3 a filtração também apresentou ação predominantemente superficial. Conforme apresentado na Figura 41, a evolução da perda de carga ocorreu de maneira similar para ambos os filtros, sendo que a frente de impurezas não avançou de forma acentuada para profundidades além de 5 cm. Embora taxas de filtração mais elevadas favoreçam a penetração dos flocos em maiores profundidades do leito (CLEASBY e BAUMANN, 1962), tal fato não foi observado, possivelmente, devido à baixa turbidez da água decantada afluenta.



(a)

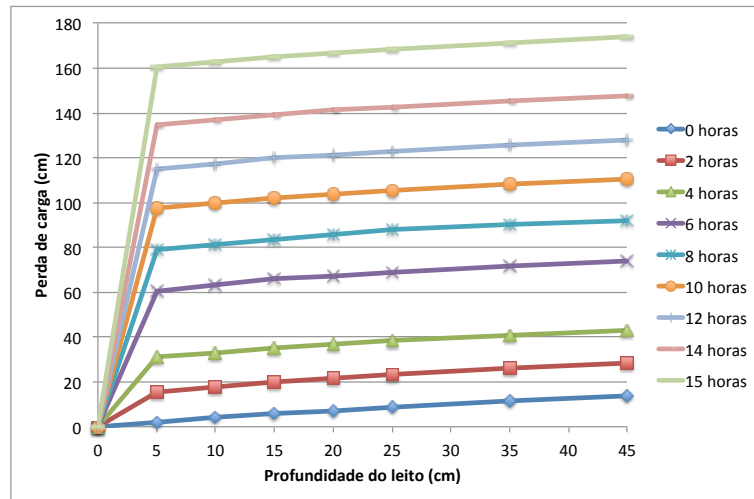


(b)

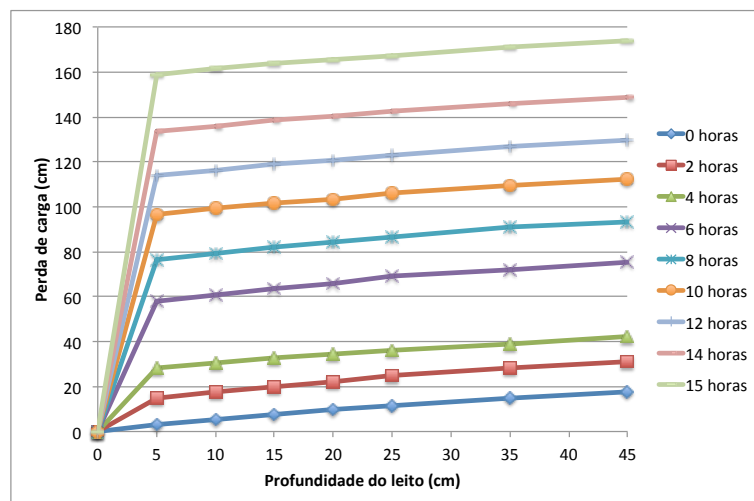
Figura 40. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 3

Devido à necessidade de monitoramento contínuo do filtro ao longo da carreira, às 18:00 h a operação dos filtros era encerrada e reiniciada no dia seguinte às 9:00h, dada a impossibilidade de monitoramento no período noturno. Assim, no reinício da operação das carreiras, foram observadas mudanças no comportamento da evolução da perda de carga. Na Figura 41, pode ser observado que o incremento da perda de carga entre 4 e 6 horas e entre 14 e 15 horas de operação dos filtros foram maiores em relação ao restante da carreira, provavelmente, devido ao reinício das carreiras nos tempos correspondentes a 6 e 14 horas de operação. É possível que durante o período em que o filtro esteve fora de operação tenha havido proliferação de algas (ou outros organismos, como bactérias) na superfície do leito filtrante causando incremento inicial na perda de carga. No entanto, como observado na

Figura 41, após o reinício da operação a perda de carga ao longo de tempo devido à retenção de sólidos voltou a ter comportamento similar (distância entre as linhas) ao do dia anterior.



(a)



(b)

Figura 41. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) areia natural (b), Carreira 3

Na Figura 42 fica clara a similaridade no comportamento dos dois filtros ao longo da carreira, considerando a turbidez da água filtrada e perda de carga total. Como pode ser observado, a turbidez da água decantada apresentou valores entre 0,52 e 0,73 uT ao longo da Carreira 3. Isso pode ajudar a explicar a ocorrência de filtração com ação principalmente superficial, apesar da maior taxa de filtração em relação às

carreiras anteriormente apresentadas. A grande diferença se deu na duração das carreiras, encerradas pelo esgotamento da carga hidráulica disponível: 35 horas com taxa de filtração de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e menos da metade com taxa de filtração de $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, para ambos os filtros.

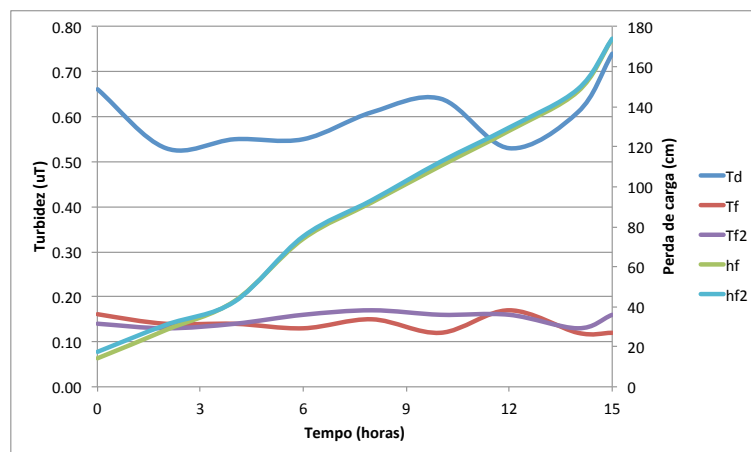


Figura 42. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 3. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

Na Figura 43, pode ser observado que não houve diferença marcante entre os IFI ao longo da carreira dos dois filtros, permanecendo entre $1,6$ e $3,5 \times 10^{-3}$ para a areia de britagem e entre $2,1$ e $3,5 \times 10^{-3}$ para a areia natural. A areia de britagem apresentou desempenho um pouco melhor que a areia natural e os valores obtidos estão próximos àqueles para a taxa de filtração de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, ou seja, aparentemente, não houve diferença no desempenho dos filtros operados com taxa de 180 ou $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

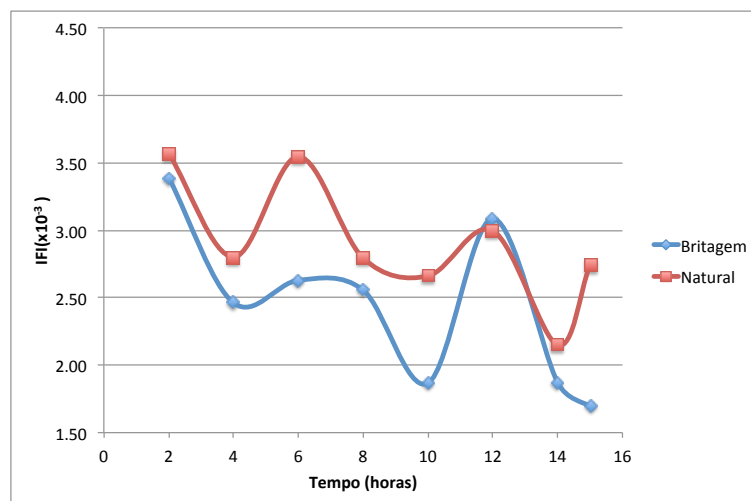
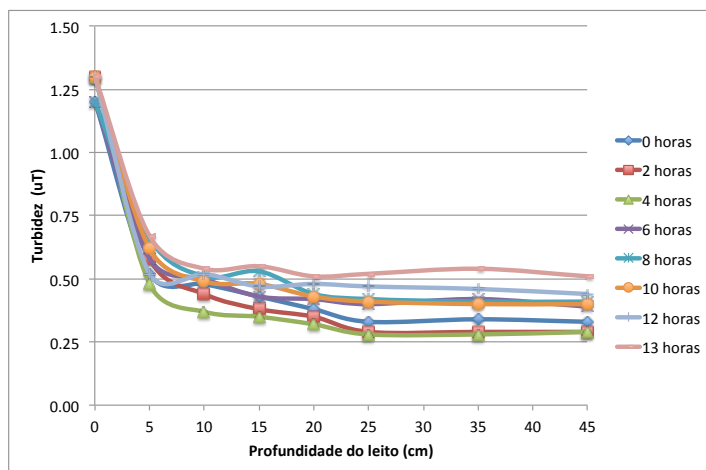


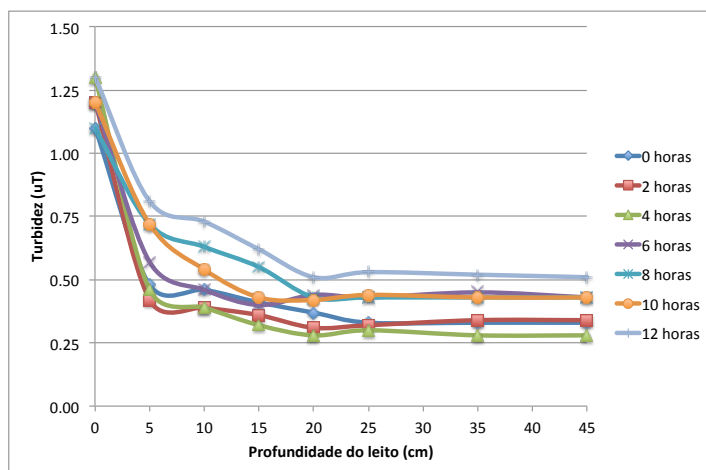
Figura 43. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, Carreira 3

4.3.1.4 Taxa de filtração de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

As Carreiras 6, 7, e 8 foram operadas com taxa de filtração de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Nas Carreiras 7 e 8 (turbidez afluente entre 1,0 e 1,5 uT) foi obtida turbidez da água filtrada entre 0,24 e 0,39 uT com o filtro de areia de britagem e de 0,26 a 0,42 uT com o filtro de areia natural de rio. Essas carreiras foram encerradas pelo esgotamento da carga hidráulica disponível e tiveram duração média de 13,7 horas. A Carreira 6 (turbidez afluente entre 1,1 e 1,3 uT) foi encerrada devido à ocorrência do trespasse em ambos os filtros, após 13 horas no caso do filtro de areia de britagem e após 12 no filtro de areia natural de rio. A turbidez da água filtrada nessa carreira manteve-se entre 0,29 e 0,51 uT com o filtro de areia de britagem e entre 0,28 e 0,51 uT com o filtro de areia natural. Os resultados obtidos na Carreira 6 são apresentados da Figura 44 até a Figura 48.



(a)

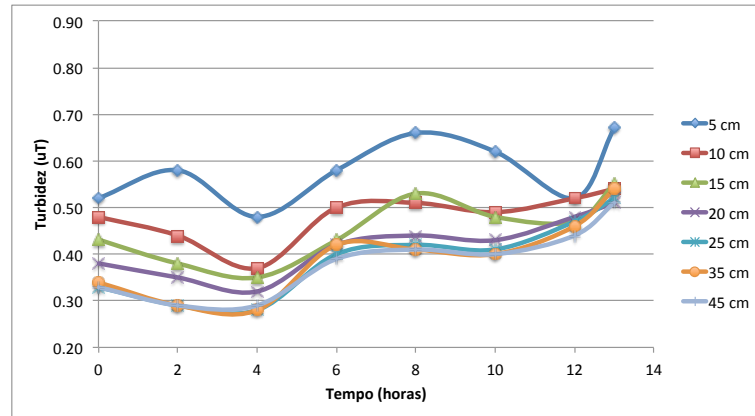


(b)

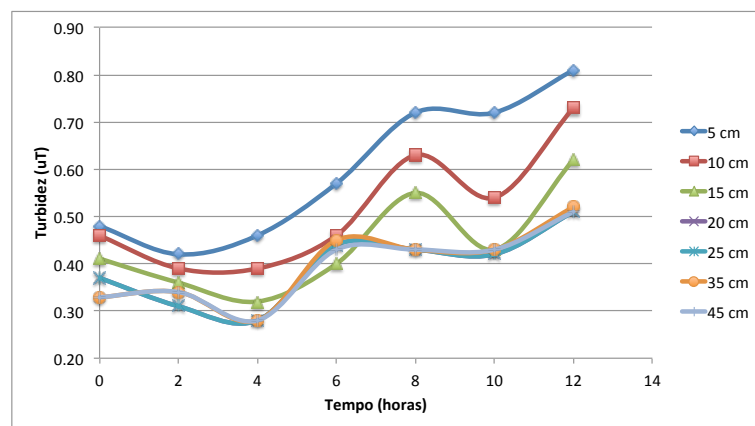
Figura 44. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 6

Como pode ser observado na Figura 44 e na Figura 45, a filtração em profundidade ocorreu bem mais nitidamente na Carreira 6 do que nas anteriormente analisadas. Desde o início da operação já havia alguma remoção além dos 5 cm superficiais do leito em ambos os filtros, porém o efeito da ação em profundidade no filtro de areia natural de rio somente se tornou mais nítido após oito horas de operação. Nos dois filtros a remoção se deu nos 25 cm iniciais de leito filtrante, no entanto a maior parte da remoção ocorreu ainda na camada mais superficial (5 cm), sendo que a turbidez da água filtrada após essa camada já apresentava valores bem próximos a 0,50 uT. O incremento que se nota entre a quarta e a sexta hora da carreira pode ser devido ao reinício da operação, conforme apontado no item anterior (item 4.3.1.3); a turbidez do efluente final manteve-se em torno de 0,40 uT entre a sexta e a décima

hora e aumentou gradualmente até a ocorrência do trespasse em ambos os filtros por volta de 12-13 horas de operação



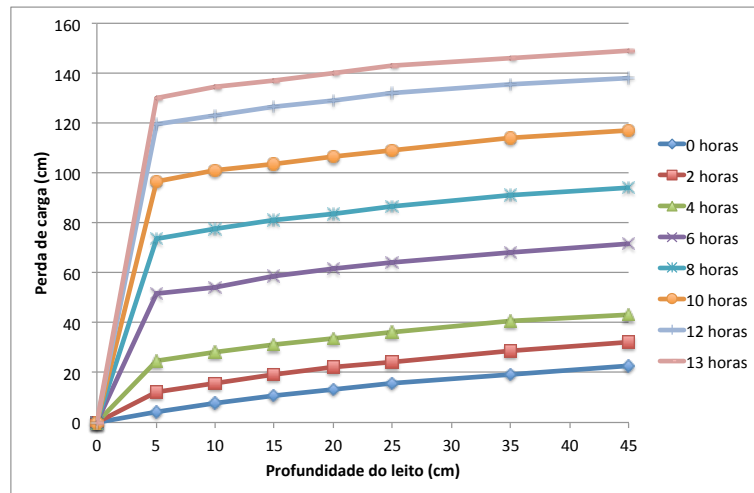
(a)



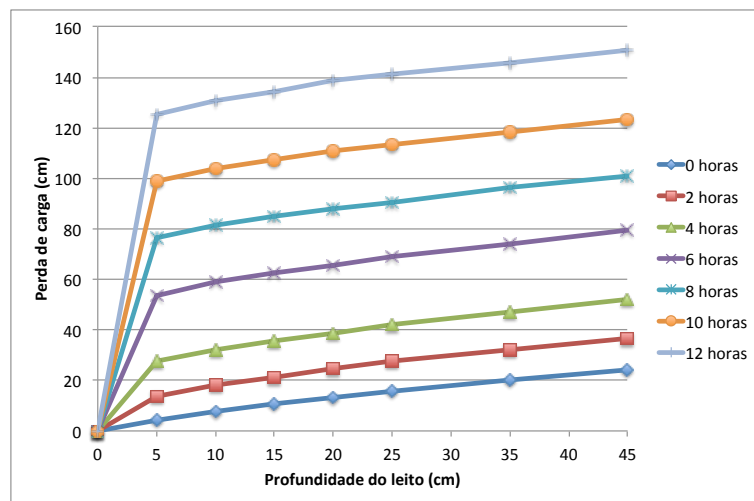
(b)

Figura 45. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 6

Em resumo, embora a remoção de turbidez tenha ocorrido em camadas mais profundas dos leitos filtrantes em comparação com as carreiras operadas com 180 e 270 m³ m⁻² d⁻¹, a maior parte da retenção ocorreu mesmo nos 5 cm iniciais. Assim, como observado na Figura 46, o grande incremento de perda de carga ao longo do tempo em ambos os filtros foi devido à retenção de sólidos na primeira camada de leito filtrante. A evolução da perda de carga com o tempo foi, novamente, similar em ambos os filtros, no entanto, considerando os valores absolutos, a perda de carga foi um pouco maior no leito de areia natural do que no leito de areia de britagem.



(a)



(b)

Figura 46. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 6

Na Figura 47 pode-se observar que a turbidez da água decantada sofreu pouca alteração durante a carreira e que a água filtrada apresentou turbidez bem similar em ambos os filtros. Nessa figura ficam mais nítidos os valores de perda carga um pouco maiores registrados no leito de areia natural. É interessante observar também que, embora o trespasse tenha ocorrido em tempos diferentes nos leitos de areia de britagem (13 horas) e de areia natural (12 horas), a perda de carga era praticamente a mesma nos dois leitos no momento da ocorrência (≈ 150 cm), assim como o ITF ($\approx 7,6 \text{ cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$).

Com a progressiva colmatação do leito (perda de carga) a velocidade intersticial aumenta, assim como as forças de cisalhamento sobre as partículas aderidas ao leito filtrante (IVES, 1970). Considerando que o desprendimento das partículas é resultado do balanço entre as forças de aderência (partícula – leito) e forças de cisalhamento (água – partícula) (BAI e TIEN, 1997), ao atingir valores de perda de carga de cerca de 150 cm os leitos apresentavam grau de colmatação tal que o balanço entre as referidas forças resultou no desprendimento de sólidos. Como já comentado, após 10 horas de carreira de filtração o desprendimento aumentou progressivamente até atingir níveis inaceitáveis (turbidez da água filtrada superior a 0,50 uT) com 12 (areia natural) e 13 (areia de britagem) horas de operação (Figura 47).

O valor do ITF calculado para os leitos de areia de britagem e de areia natural foram $7,56 \text{ cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$ e $7,64 \text{ cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$, respectivamente. Considerando o critério apresentado na Tabela 4, os flocos seriam classificados como pouco resistentes ($4 \text{ cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$) a medianamente resistentes ($8 \text{ cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$). É interessante observar que, embora as características do floco nessa carreira tenham sido aparentemente melhores que na Carreira 9, o trespasse ocorreu para ambos os filtros, enquanto na Carreira 9 o fenômeno foi observado apenas no leito de areia natural de rio. Mesmo que os flocos na Carreira 6 tenham se apresentado mais resistentes do que na Carreira 9, a maior taxa de filtração da Carreira 6 ($360 \text{ vs. } 180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), e conseqüentemente forças de cisalhamento também maiores, favoreceu o desprendimento dos flocos. Nota-se ainda que o trespasse na Carreira 6 (12-13 horas) se deu mais precocemente do que na Carreira 9 (22 horas). Por fim, cabe registrar que o emprego da taxa de filtração de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ resultou em carreiras ainda mais curtas – cerca de 13 horas.

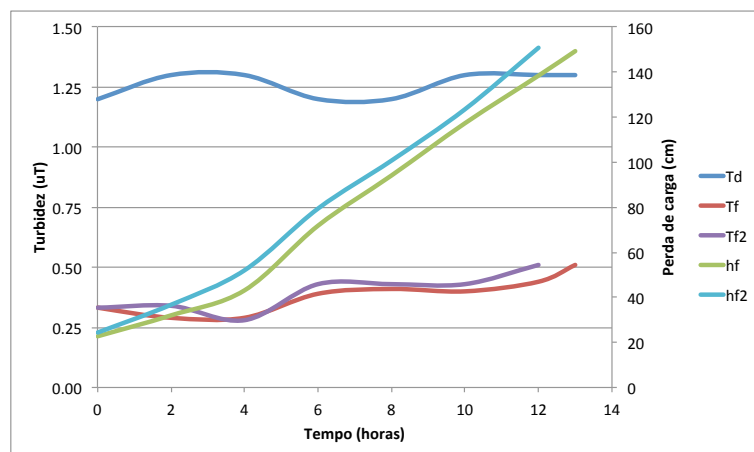


Figura 47. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 6. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural).

O IFI se apresentou em valores na faixa de $1,5$ a $3,5 \times 10^{-3}$ (Figura 48), bem similares aos obtidos para as taxas de filtração de 180 e $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para o período de turbidez baixa. Com base neste índice o desempenho do filtro de areia de britagem durante a carreira seria considerado melhor, principalmente após seis horas de operação. Os menores valores de IFI para o leito de areia de britagem se devem aos menores valores de perda de carga apresentados por esse filtro ao longo da Carreira 6. Ao final da carreira é observada perda de eficiência em ambos os filtros devida ao aumento da turbidez da água filtrada.

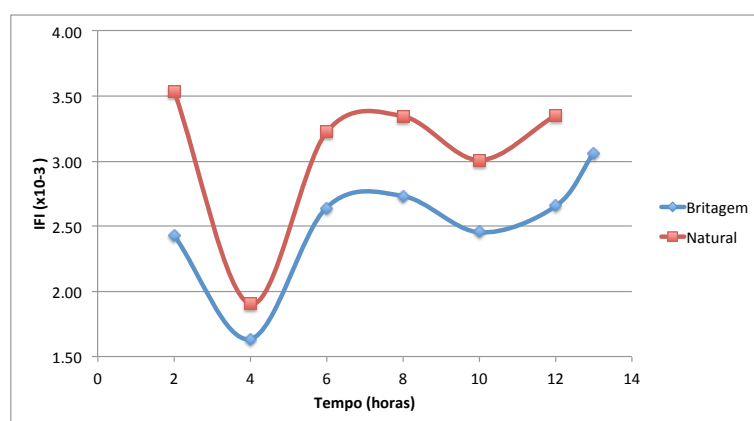


Figura 48. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 6

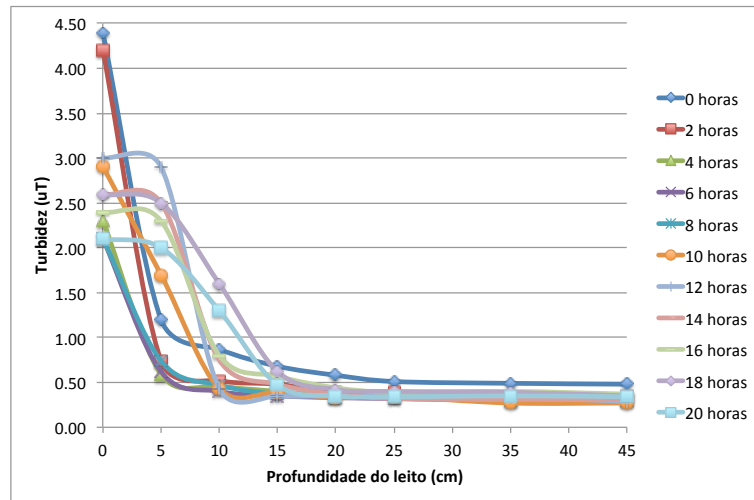
4.3.2 Águas de alta turbidez

Devido às fortes chuvas ocorridas nas primeiras semanas de dezembro de 2017, a turbidez da água bruta no manancial atingiu valores de até 200 uT, sendo obtidos valores de turbidez da água decantada de 2,0 a 5,0 uT na ETA UFV. Nestas condições os filtros apresentaram comportamento distinto comparativamente ao período de estiagem, conforme detalhado nos itens a seguir.

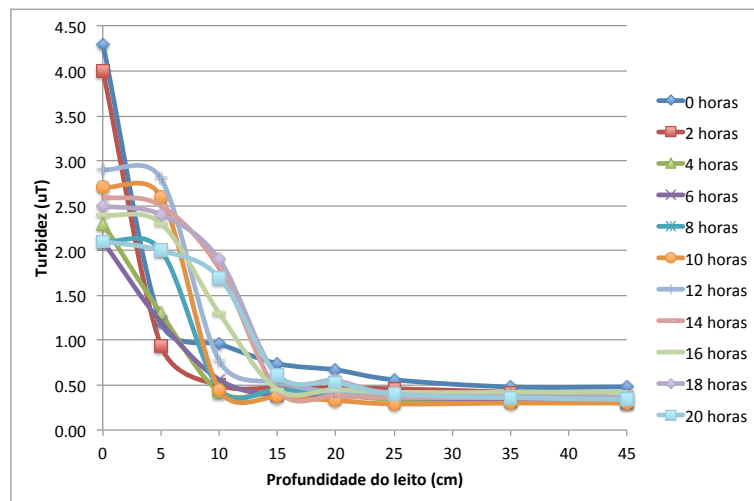
4.3.2.1 Taxa de filtração de $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

Durante a Carreira 14 os filtros foram operados com taxa de $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e turbidez da água decantada de 2,1 a 4,4 uT. O filtro de areia de britagem produziu água filtrada com turbidez entre 0,27 e 0,48 uT, similar ao filtro de areia natural, que produziu água filtrada com turbidez entre 0,30 e 0,48 uT. A carreira foi encerrada pelo esgotamento da carga hidráulica disponível e teve duração de 20,5 horas. Os resultados da Carreira 14 estão detalhados na Figura 49 até Figura 54.

Na Figura 49 pode ser observado que a filtração ocorreu com ação de profundidade em ambos os filtros durante a operação com turbidez da água decantada mais elevada. A remoção de turbidez ocorreu mesmo em profundidades de até 25 cm desde o início da carreira de filtração em ambos os leitos. A partir de 10 horas de operação do filtro de areia de britagem e de 8 horas do filtro de areia natural, nota-se uma progressiva saturação das camadas iniciais do filtro (Figura 50). A comparação com os valores da turbidez da água decantada na Figura 52 permite concluir que, após 12 horas de carreira do leito de areia de britagem e após 10 horas para o filtro de areia natural, a turbidez da água filtrada após a passagem pelos 5 cm iniciais de leito (Figura 50) era praticamente a mesma turbidez da água decantada; nota-se ainda que, após a saturação dos primeiros 5 cm, o mesmo comportamento passa a ser observado na camada de 10 cm até a finalização da carreira.

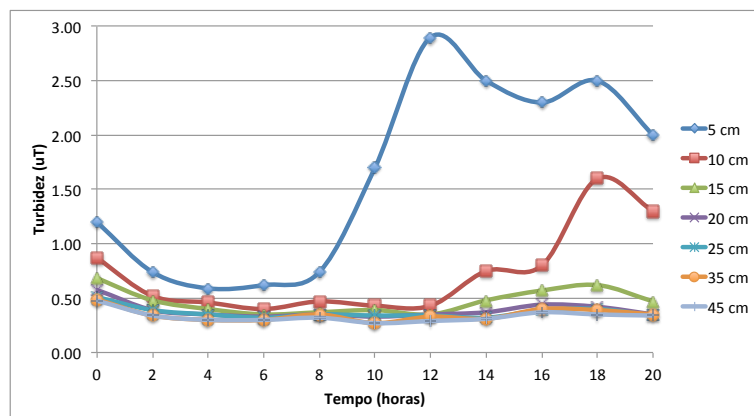


(a)

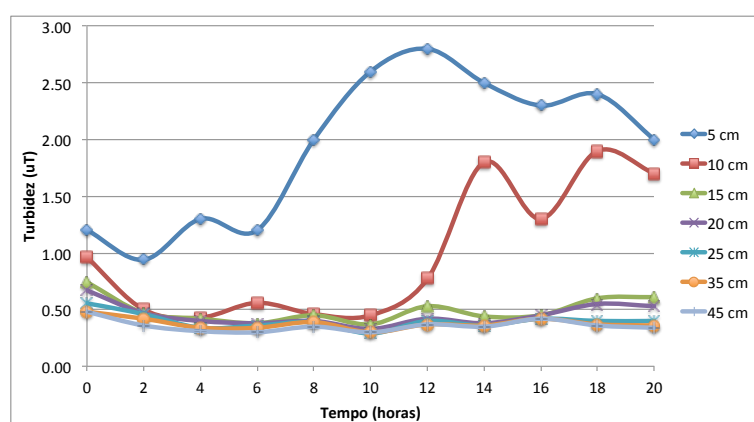


(b)

Figura 49. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 14



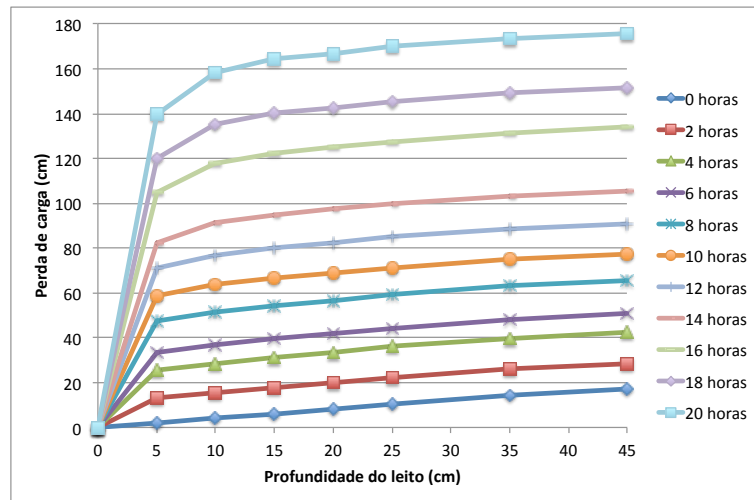
(a)



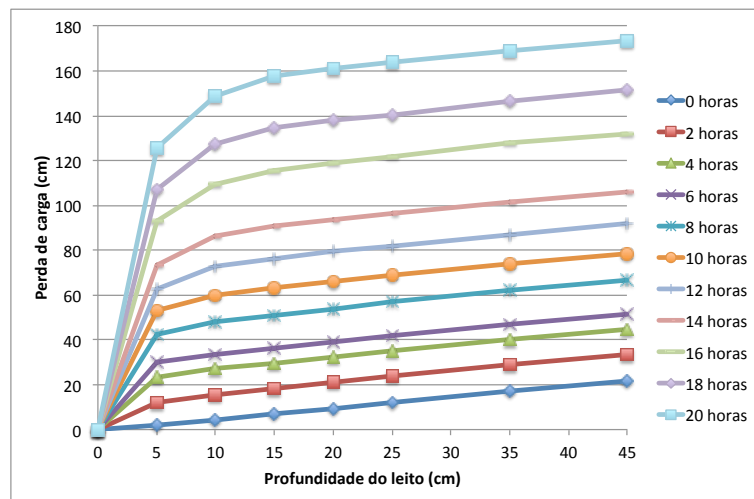
(b)

Figura 50. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 14

Diferentemente das outras carreiras anteriormente analisadas, o avanço da frente de impurezas para maiores profundidades do leito resultou em perda de carga mais bem distribuída ao longo do leito (Figura 51). Após os tempos de operação discutidos no parágrafo anterior, observa-se uma inflexão mais acentuada na declividade das linhas que representam a perda de carga nas camadas iniciais. Dessa forma, o volume do leito filtrante foi utilizado mais eficientemente, proporcionando incrementos da perda de carga ao longo do tempo menos intensos comparados ao período de estiagem e, conseqüentemente, maior duração da carreira de filtração.



(a)



(b)

Figura 51. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 14

Na Figura 52 pode ser observada a similaridade do comportamento dos dois filtros com relação à turbidez da água filtrada e à evolução da perda de carga com o tempo. É importante ressaltar que mesmo recebendo água decantada com turbidez entre 2,1 e 4,4 uT ambos os filtros foram capazes de produzir água filtrada com turbidez média de 0,33 uT ao longo de toda carreira, com duração de 20 horas, e que não houve trespasse apesar da taxa de filtração elevada ($270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

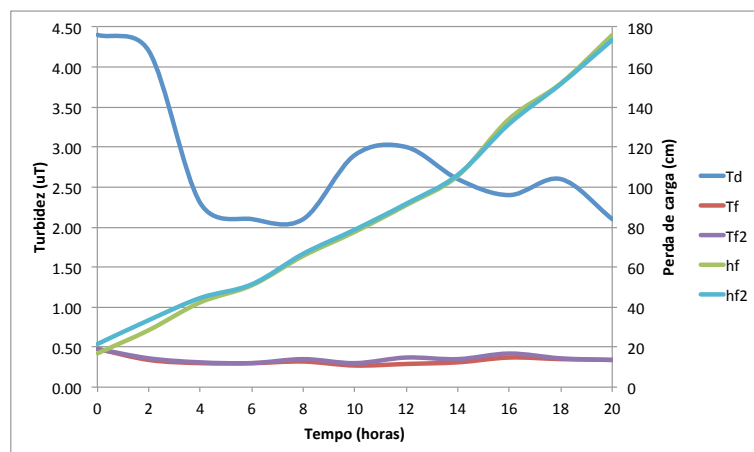


Figura 52. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 14. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural).

A eficiência dos filtros de areia de britagem e de areia natural de rio, representada pelo IFI, foi bem similar durante a Carreira 14. No entanto, é interessante observar que os valores obtidos - na faixa de $0,6$ a $1,3 \times 10^{-3}$ (Figura 53) - são bem inferiores aos obtidos nas carreiras do período de estiagem (entre $1,5$ e $3,5 \times 10^{-3}$), evidenciando maior eficiência dos filtros no tratamento de águas com alta turbidez. A aparente maior eficiência no período de 8 a 14 horas de operação ocorreu devido ao aumento da turbidez da água decantada nesse intervalo, sem no entanto haver alteração da turbidez da água filtrada.

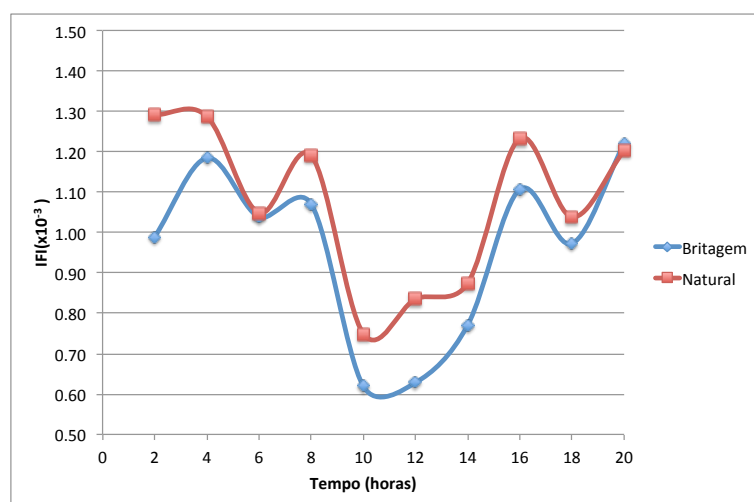


Figura 53. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 14

Assim como ocorrido na Carreira 11 e apresentado na Figura 38, após a realização da Carreira 14 o leito foi retirado de operação por um período superior a 72 horas, fazendo com que ocorresse crescimento microbiológico até a profundidade em que ocorreu a remoção de sólidos durante a carreira (Figura 54). O avanço da frente de impurezas é mais perceptível no leito de areia natural de rio devido ao maior contraste apresentado após o crescimento microbiológico (Figura 54b).

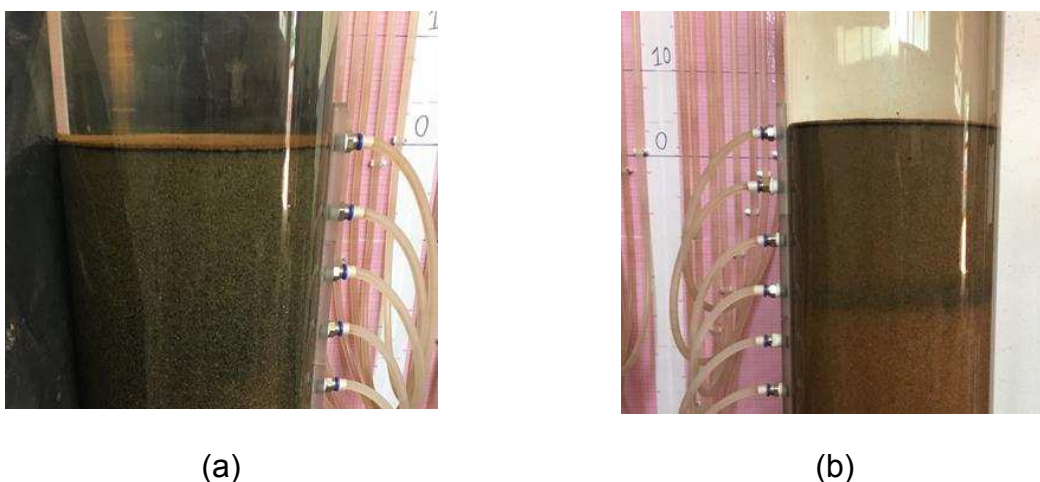
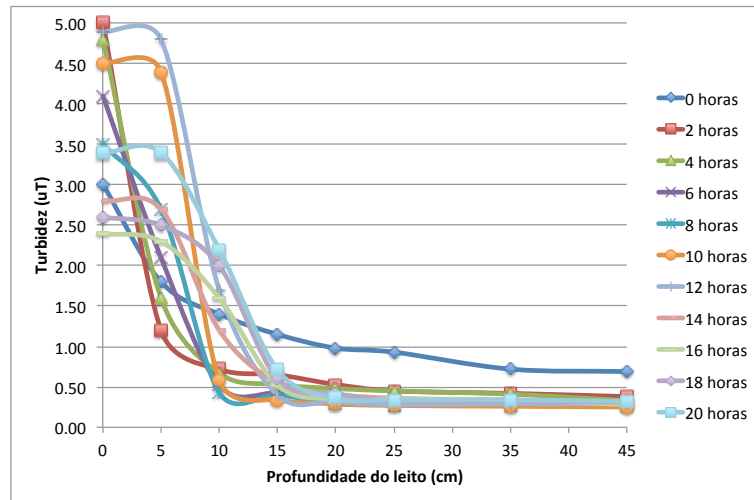


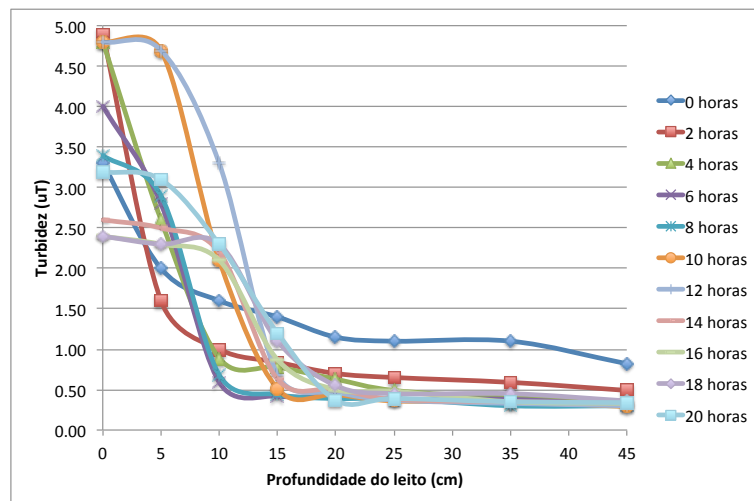
Figura 54. Aspecto dos leitos após mais de 72 horas do encerramento da Carreira 14 (a) areia de britagem (b) areia natural

4.3.2.2 Taxa de filtração de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$

A Carreira 13 foi operada com taxa de filtração de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e turbidez da água decantada entre 2,4 e 5,0 uT. Após o decaimento inicial da turbidez da água filtrada, o filtro de areia de britagem produziu água com turbidez de 0,25 a 0,38 uT e o filtro de areia natural entre 0,29 e 0,49 uT. A carreira foi encerrada devido ao esgotamento da carga hidráulica disponível, após 20 horas de operação. Na Figura 55 até a Figura 60 são apresentados os resultados da Carreira 13.



(a)

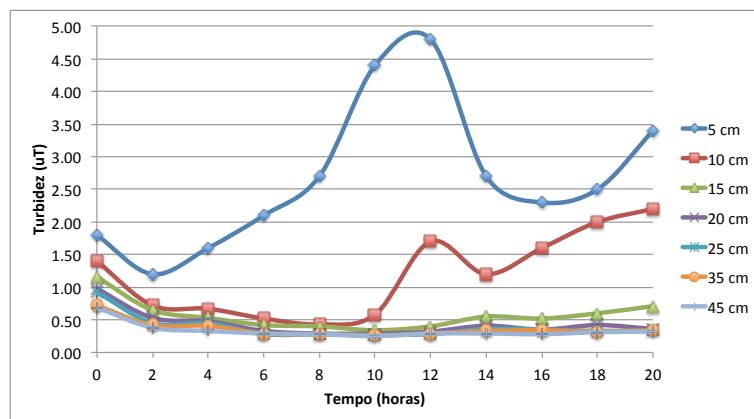


(b)

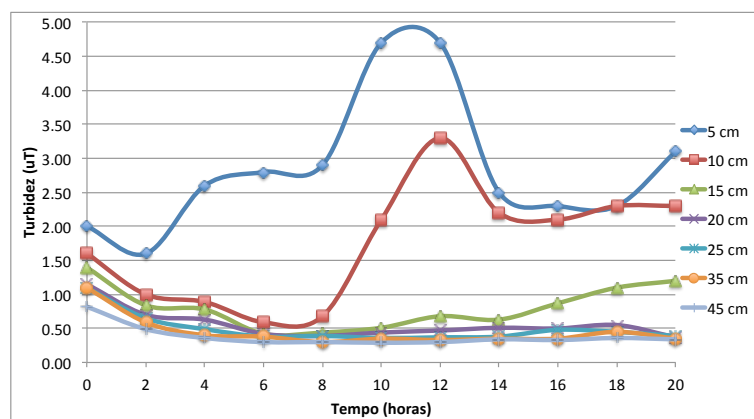
Figura 55. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 13

Como observado na Figura 55, ambos os filtros foram incapazes de produzir água com turbidez inferior a 0,50 uT logo após o início da operação: neste momento, a turbidez da água filtrada do leito de areia de britagem foi 0,69 uT e a do leito de areia natural 0,82 uT. Devido ao intervalo de duas horas entre coletas, não foi possível determinar quanto tempo foi necessário para os filtros produzirem água filtrada com turbidez inferior a 0,50 uT (tempo de amadurecimento dos filtros). Aparentemente, no filtro de areia de britagem esse tempo foi menor, pois após duas horas de operação o efluente já apresentava turbidez de 0,38 uT, enquanto o do filtro de areia natural apresentava turbidez de 0,49 uT. A filtração ocorreu com ação em

profundidade nos dois filtros, sendo observada remoção de turbidez em toda profundidade do leito filtrante nas duas horas iniciais da carreira e nos primeiros 20 cm ao longo do restante da operação (Figura 55). Após 10 horas de carreira, pode-se observar a saturação dos 5 cm iniciais do leito em ambos os filtros, com progressivo caminhamento da frente de impurezas para maiores profundidades (Figura 56).



(a)



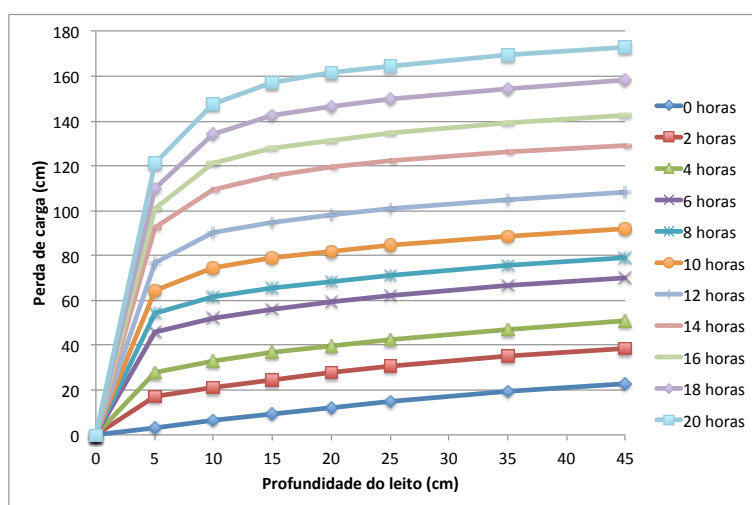
(b)

Figura 56. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 13

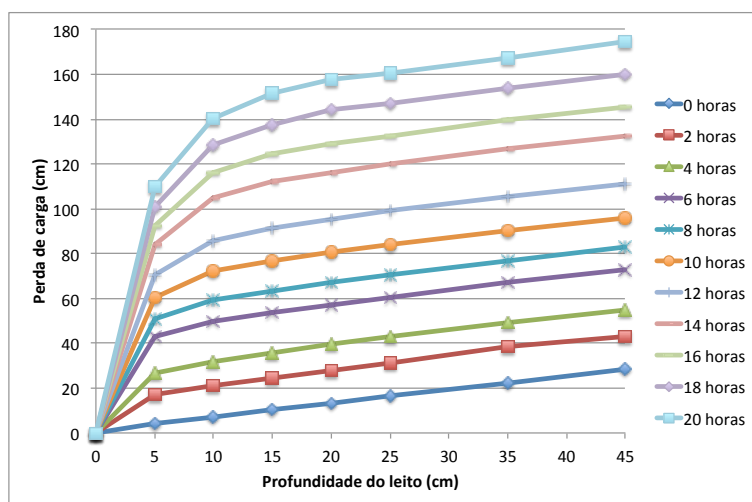
Na Figura 56, pode-se observar que o comportamento da turbidez da água filtrada nos 5 cm de leito filtrante é praticamente o mesmo do da água decantada (Figura 58) após 10 horas de operação de ambos os filtros, assim como o

comportamento da turbidez da água filtrada por 10 cm de leito de areia natural após 14 horas de operação.

A Figura 57 mostra a evolução da perda de carga ao longo do leito filtrante. Diferentemente das carreiras realizadas no período de estiagem, a remoção ocorrida ao longo da profundidade refletiu no incremento de perda de carga ao longo da profundidade. O comportamento dos dois filtros foi bem similar, com a frente de impurezas se movendo para profundidades cada vez maiores ao longo da carreira, tal como na Carreira 14, porém de forma mais acentuada.



(a)



(b)

Figura 57. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 13

A Figura 58 resume os resultados da Carreira 13. A turbidez da água decantada apresentou maior variabilidade em relação às outras carreiras, no entanto, sem afetar a qualidade da água filtrada. Diferentemente das outras carreiras, houve um período inicial de não atendimento ao padrão de 0,50 uT, mas após 4 horas de operação o filtro de areia de britagem já produzia água com turbidez um pouco inferior a 0,30 uT e o filtro de areia natural pouco superior a 0,30 uT. O comportamento da evolução da perda de carga foi bem similar nos dois filtros, sendo que o filtro de areia natural apresentou valores ligeiramente superiores. Em resumo, comparativamente à Carreira 14, a operação com taxa de filtração mais elevada ($360 \text{ vs. } 270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), demandou maior período de maturação dos filtros, promoveu filtração em profundidade de forma mais acentuada em ambos os filtros, mas isso não chegou a provocar trespasse e garantiu carreiras de filtração de mesma duração (20 horas).

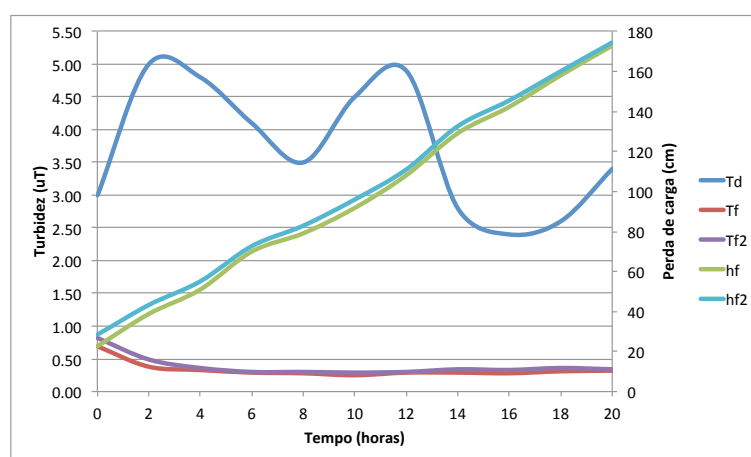


Figura 58. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 13. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural).

Devido à elevada remoção de turbidez apresentada pelos filtros e longa duração da carreira de filtração, os valores de IFI (Figura 59) foram baixos, assim como na Carreira 14. Com exceção do início da carreira, os valores de IFI situaram-se na faixa de $0,3 \text{ a } 0,9 \times 10^{-3}$ - bem inferiores aos obtidos nas carreiras operadas com $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ durante o período de estiagem. Esses resultados, assim como aqueles discutidos para a Carreira 14, demonstram uma maior eficiência dos filtros durante o período chuvoso.

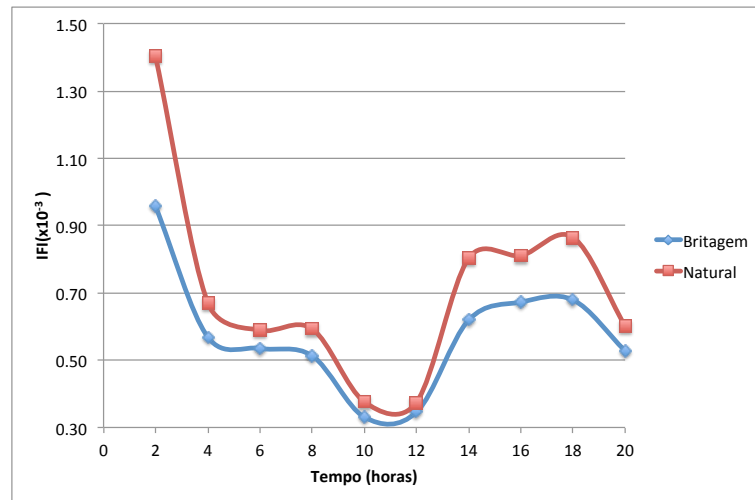


Figura 59. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 13

Na Figura 60 é apresentado o aspecto do leito filtrante de areia de britagem após o encerramento de duas carreiras operadas com taxa de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$: (a) Carreira 6 – período de estiagem; (b) Carreira 13 – período chuvoso. Pode-se perceber que após a Carreira 13 o leito filtrante apresentava aspecto mais amarronzado até a profundidade de 25 cm, devido à retenção de partículas no leito, enquanto essa coloração foi observada apenas na camada superficial do leito durante a Carreira 6. Tais resultados não foram apresentados para a areia natural de rio devido ao baixo contraste entre as partículas retidas e a coloração do próprio leito filtrante, dificultando a comparação visual.



Figura 60. Aspecto do leito de areia de britagem após o encerramento da carreira - taxa de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (a) Carreira 6 – período de estiagem (b) Carreira 13 – período chuvoso

4.4 Análise conjunta das carreiras de filtração

De forma a melhor visualizar o desempenho global dos filtros, as principais características das carreiras de filtração são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Principais características das carreiras de filtração, ensaios em unidade piloto com filtros de areia natural e areia de britagem

Carreira	Tf (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	Duração (horas)		Perda de carga final (cm)		Turbidez da água decantada (uT)		Turbidez da água filtrada (uT)			
								AB		AN	
		AB	AN	AB	AN	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
1	266	16	16	155,2	157,0	0,60	1,20	0,16	0,30	0,19	0,25
2	266	12	12	153,4	155,6	0,59	0,76	0,17	0,25	0,18	0,25
3	268	15	15	173,9	174,0	0,51	0,74	0,12	0,16	0,13	0,17
4	270	16,5	16,7	173,8	174,0	0,57	0,88	0,14	0,17	0,14	0,17
5	89	86	86	156,9	156,7	0,74	1,00	0,14	0,20	0,14	0,20
6	359	13*	12*	149,3	150,8	1,10	1,30	0,29	0,51	0,28	0,51
7	366	14,3	14,3	172,7	174,7	1,00	1,50	0,31	0,39	0,31	0,42
8	366	13	13	171,9	174,6	0,96	1,10	0,24	0,29	0,25	0,30
9	181	35	22*	174,1	122,2	0,78	1,10	0,25	0,42	0,29	0,56
10	182	31	31	173,8	174,4	0,80	1,10	0,26	0,38	0,27	0,43
11	181	30	31	173,3	174,5	0,62	1,10	0,17	0,28	0,21	0,31
12	183	38	36,5	174,1	174,5	0,51	0,88	0,13	0,27	0,14	0,27
13 ⁽¹⁾	368	20	20	172,9	174,5	2,40	5,00	0,25	0,38	0,29	0,49
14 ⁽¹⁾	274	20,5	20,5	176,0	173,5	2,10	4,40	0,27	0,48	0,30	0,48

Tf = taxa de filtração; AB = areia de britagem; AN = areia natural; Min. = valor mínimo do conjunto de dados; Max. = valor máximo do conjunto de dados; * carreiras encerradas por trespasse, as demais foram encerradas por esgotamento da carga hidráulica disponível; ⁽¹⁾ carreiras realizadas durante o período chuvoso, as demais foram realizadas durante o período de estiagem.

Dos dados da Tabela 11, considerando a duração das carreiras, a evolução da perda de carga ao longo do tempo e a qualidade da água filtrada, depreende-se que o filtro de areia de britagem apresentou desempenho equiparável ao filtro de areia natural de rio, quando os dois foram operados com mesma qualidade de água afluyente e sob as mesmas taxas de filtração.

No filtro de areia de britagem, das 14 carreiras de filtração, 13 foram encerradas pelo esgotamento da carga hidráulica disponível, sendo que em oito 100% dos valores de turbidez da água filtrada foram inferiores a 0,30 uT – padrão de turbidez de água filtrada de normas tais como as dos EUA (USEPA, 2006) e Canadá (HEALTH CANADA, 2014) como indicador da remoção de oocistos de *Cryptosporidium*.

Com exceção da Carreira 6 ($T_f = 360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, turbidez afluyente = 1,1 a 1,3 uT) em que ocorreu trespasse e da primeira hora da Carreira 13 ($T_f = 360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, turbidez afluyente = 3,0 uT), o filtro de areia de britagem foi capaz de produzir água filtrada com valores inferiores a 0,50 uT, ou seja, de acordo com o padrão imposto pela Portaria 2914/ 2011 (BRASIL, 2011), tido como indicador da remoção de cistos de *Giardia* (BASTOS *et al.*, 2009); o padrão da norma brasileira de turbidez máxima pontual de 1,0 uT não foi excedido em nenhuma carreira, mesmo no início da operação ou quando água decantada afluyente apresentava turbidez elevada.

Em duas carreiras houve a ocorrência de trespasse (turbidez > 0,50 uT), sendo que em apenas uma delas o fenômeno ocorreu nos dois filtros. De certa forma inesperadamente, o trespasse em ambos os filtros ocorreu em período de melhor qualidade da coagulação (ITF entre 4 e 8 $\text{cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$), enquanto na condição de coagulação de moderada a intermediária (ITF entre 2 e 4 $\text{cm mm}^3 \text{ min}^{-1}$) o trespasse ocorreu apenas no filtro de areia natural de rio. É provável que tenham prevalecido determinadas condições (por exemplo, potencial zeta das partículas) que favoreceram a aderência em um material filtrante, mas no outro não. Para a investigação dessa hipótese são, entretanto, necessários estudos com controle da coagulação de forma a permitir o ajuste a diferentes mecanismos de coagulação, trabalhar com diferentes graus de desestabilização das partículas afluyentes ao filtro e determinar a influência dessas variáveis na aderência das partículas em cada material filtrante.

Com relação às taxas de filtração empregadas, pode-se observar que houve diminuição da duração das carreiras com o aumento da taxa, sem, no entanto, afetar a qualidade da água filtrada. Cabe destacar que, como as carreiras foram realizadas durante intervalos de tempo relativamente longos utilizando água decantada real, houve variação da qualidade da água durante o período e, portanto, outros fatores não mensurados podem ter influenciado a duração das carreiras, como, por exemplo, concentração de algas e cor (verdadeira) da água. As carreiras realizadas durante o período chuvoso tiveram maior duração quando comparadas às carreiras testadas com as mesmas taxas durante o período de estiagem, provavelmente, devido ao maior aproveitamento do volume do leito filtrante, ou seja, remoção de partículas em profundidades maiores do leito. Com a penetração dos flocos em maiores profundidades do leito, tem-se menor incremento da perda de carga ao longo do tempo e, conseqüentemente, maior duração das carreiras de filtração.

Devido aos diferentes mecanismos de coagulação empregados nos períodos de estiagem e chuvoso, é provável que a resistência dos flocos obtidos também tenha sido diferente. Durante o período de estiagem, a ETA UFV realiza a coagulação com mecanismo combinado de adsorção-neutralização de cargas, produzindo flocos mais resistentes e, portanto, com menor penetração no leito filtrante. Em contrapartida, durante o período chuvoso são empregadas maiores doses de coagulante, caracterizando o mecanismo de varredura que produz flocos menos resistentes e, portanto, com maior penetração ao longo da altura do leito filtrante.

Ainda em relação à duração das carreiras, pode-se afirmar que, em geral, foram curtas, particularmente aquelas operadas com 270 e 360 m³ m⁻² d⁻¹. Porém, é necessário considerar que essas taxas empregadas são bem superiores ao máximo de 180 m³ m⁻² d⁻¹ recomendados pela NBR 12216 (ABNT, 1992).

Além disso, a comparação de carreiras realizadas com taxas de filtração diferentes é melhor realizada com base na produção de água por carreira de filtração, como mostrado na Tabela 12. Nota-se que durante o período de estiagem a produção de água foi maior com a taxa de 360 m³ m⁻² d⁻¹ do que com 270 m³ m⁻² d⁻¹, e que a taxa 180 m³ m⁻² d⁻¹ foi a que resultou em maior volume de água produzido. Durante o período chuvoso, novamente a carreira operada com taxa de 360 m³ m⁻² d⁻¹ produziu maior volume de água quando comparada à carreira operada com 270 m³ m⁻² d⁻¹ e produziu volume ainda maior do que aquele obtido com taxa de 180 m³ m⁻² d⁻¹

durante o período de estiagem. Esses resultados podem ser explicados pelo que foi discutido nos parágrafos anteriores com relação à maior penetração dos flocos no leito para maiores taxas de filtração e quando a coagulação é realizada pelo mecanismo de varredura (período chuvoso).

Tabela 12. Produção de água nas carreiras de filtração

Carreira	Tf média (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	Produção de água (m ³ m ⁻²)	
		Areia de britagem	Areia natural
1		171	171
2	270	133	133
3		168	168
4		186	188
5	90	319	319
6		194	180
7	360	218	218
8		198	198
9		264	166
10	180	235	235
11		226	234
12		290	278
13 ⁽¹⁾	360	307	307
14 ⁽¹⁾	270	234	234

Tf = taxa de filtração; ⁽¹⁾ carreiras realizadas no período chuvoso

Devido ao maior valor de massa específica dos sólidos apresentado pela areia de britagem, foi necessária velocidade ascensional (vazão de água de lavagem) maior quando comparada ao leito de areia natural de rio para promover as mesmas expansões (33%). Para lavagem da areia natural de rio foi empregada velocidade ascensional de 94 cm min⁻¹, enquanto para a areia de britagem foi necessária velocidade de 106 cm min⁻¹, o que representaria aumento de 13% no consumo de

água de lavagem (considerando a mesma duração da operação). Porém, podem ser realizados estudos de otimização da retrolavagem, de forma a identificar se é possível promover a adequada limpeza do leito filtrante com taxas de retrolavagem menores. É possível também que diferentes combinações granulométricas da areia de britagem resultem em diferentes valores de massa específica dos grãos devido à maior heterogeneidade da composição desse material. Portanto, caso se comprove que ao usar uma combinação granulométrica da areia de britagem com menor massa específica a eficiência da filtração não será prejudicada, a desvantagem do maior consumo de água de lavagem pode ser solucionada.

Na Tabela 13 são apresentadas as faixas de variação do IFI em todas carreiras de filtração. Os resultados demonstram eficiências similares para os dois materiais testados, sendo que os valores obtidos para areia de britagem são um pouco menores que os da areia natural. A amplitude de valores um pouco maior para areia natural pode ser atribuída aos maiores valores registrados no início das carreiras, devidos à maior perda de carga do meio filtrante limpo (comparativamente ao leito de areia de britagem) e, conseqüentemente, valores de perda de carga um pouco maiores nas primeiras horas de operação. Segundo Ives (1978), não há valores absolutos do IFI que classifiquem a filtrabilidade de uma água como alta ou baixa, mas é possível comparar valores de diferentes carreiras de filtração entre si, sendo que valores menores de IFI de uma carreira indicam melhor filtrabilidade em comparação à outra que apresente valor de IFI maior. Como discutido anteriormente com relação à remoção de turbidez e perda de carga, o desempenho dos filtros não foi comprometido na operação com maiores taxas de filtração, apresentando valores de IFI similares ou pouco maiores que aqueles obtidos nas carreiras operadas com $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Nas carreiras realizadas durante o período chuvoso (Carreiras 13 e 14), devido à maior remoção de turbidez e maior duração das carreiras, foram obtidos valores de IFI bem inferiores quando comparados aos resultados do período de estiagem, evidenciando o potencial de tratamento do filtro de areia de britagem mesmo recebendo água decantada de mais alta turbidez.

Tabela 13. Faixa de variação do Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) nas carreiras de filtração

Carreira	IFI x 10 ⁻³			
	Areia de britagem		Areia Natural	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1	1,37	4,61	1,99	3,37
2	2,83	4,84	3,17	5,82
3	1,70	3,38	2,14	3,56
4	1,54	2,90	1,71	2,94
5	0,70	1,95	0,89	2,92
6	1,63	3,06	1,90	3,53
7	1,74	4,01	1,95	5,11
8	2,04	4,37	2,24	4,86
9	2,34	3,84	3,13	4,86
10	1,91	4,15	2,00	5,29
11	1,35	3,08	1,58	3,06
12	1,13	3,25	1,34	4,35
13	0,33	0,96	0,38	1,40
14	0,62	1,19	0,84	1,29

A similaridade do desempenho apresentado pelos filtros de areia de britagem e de areia natural de rio pode encontrar explicação tanto nas condições experimentais como nas características próprias dos materiais dos leitos filtrantes, também similares, se não as mesmas (Tabela 10). Os filtros foram operados em paralelo, recebendo a mesma água afluyente e com taxas de filtração iguais; a areia de britagem e a areia natural de rio apresentaram as mesmas características granulométricas e valores próximos de porosidade e de potencial zeta (natural e ajustado). A pequena diferença observada entre os valores de porosidade e do coeficiente de esfericidade pode ter favorecido perdas de carga no início das carreiras um pouco maiores para o leito de areia natural de rio, sendo o restante dos valores de perda de carga bem próximos no decorrer da carreira.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi comparado o desempenho de filtros rápidos descendentes, contendo como leito areia de britagem ou areia natural de rio, operados em paralelo com mesma qualidade da água decantada afluyente e com a mesma taxa de filtração. Foram determinadas características físicas e químicas da areia de britagem de importância para a filtração: massa específica, densidade aparente, porosidade, solubilidade em ácido, potencial zeta dos grãos, coeficiente de esfericidade e composição química do material. Do resultado de 14 carreiras de filtração realizadas pode-se concluir que a areia de britagem apresentou desempenho satisfatório, sendo obtidas carreiras de filtração, remoção de turbidez e desenvolvimento da perda de carga similares aos obtidos com areia natural de rio. Especificamente, foi constatado durante o estudo:

- A areia de britagem apresentou composição química diferente da areia natural de rio, contendo maiores teores de trióxido de alumínio e trióxido de ferro.
- A massa específica dos grãos da areia de britagem ($2,72 \text{ g cm}^{-3}$) usada no presente trabalho foi um pouco maior que a usualmente encontrada para a areia natural de rio ($2,64 - 2,67 \text{ g cm}^{-3}$).
- A porosidade e o potencial zeta dos grãos de areia de britagem foram similares aos encontrados para a areia natural, sendo que os dois materiais apresentavam a mesma granulometria. Essas características ajudam a explicar o desempenho similar obtido para os dois filtros, por influenciarem nas condições hidráulicas do escoamento e também na aderência das partículas ao leito filtrante.
- As perdas de carga registradas no leito de areia de britagem no início da carreira de filtração (leito limpo) foram pouco menores que os obtidos para areia natural, para todas as taxas de filtração testadas.
- A aplicação de taxas de filtração acima de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ não ocasionou deterioração da qualidade da água filtrada. No entanto, resultou em carreiras com menor duração durante o período de operação com valores mais baixos de turbidez afluyente.

- Durante o período de operação dos filtros com turbidez mais elevada de água decantada, o aumento da taxa de filtração de 270 para 360 m³ m⁻² d⁻¹ não ocasionou deterioração da qualidade da água filtrada e nem redução da duração da carreira de filtração.
- Nas operações com taxas de filtração de 90, 180, 270 e 360 m³ m⁻² d⁻¹ e turbidez mais baixa da água decantada, a filtração ocorreu com ação predominantemente superficial; no período de operação com turbidez da água decantada mais elevada e com taxas de filtração de 270 e 360 m³ m⁻² d⁻¹ a filtração ocorreu mais nitidamente com ação em profundidade para as duas taxas testadas. Dessa forma, a perda de carga ocorreu concentradamente nos 5 cm iniciais de leito filtrante no período de estiagem, enquanto no período chuvoso se deu de maneira mais bem distribuída ao longo da profundidade do leito.
- Das 14 carreiras analisadas, em 12 o filtro com areia de britagem produziu água filtrada com turbidez inferior a 0,50 uT em 100% do tempo, em oito produziu turbidez inferior a 0,30 uT durante toda carreira e em nenhuma das carreiras o limite máximo de 1,0 uT foi excedido. Esse fato evidencia o potencial de atendimento ao padrão de turbidez da água filtrada imposto pela Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Conclui-se, portanto, que os resultados apresentados evidenciam o potencial de emprego de leito de areia de britagem como material filtrante em filtros rápidos descendentes para o tratamento de água para consumo humano, pois esse material pode apresentar vantagens econômicas, ambientais e apresenta desempenho similar ao da areia natural de rio em termos de duração das carreiras de filtração, desenvolvimento da perda de carga e remoção de turbidez.

6 RECOMENDAÇÕES

Considerando os resultados do presente trabalho e as lacunas de conhecimento ainda existentes sobre o uso de areia de britagem no tratamento de água, recomenda-se:

- Caracterizar os processos necessários e custos para o condicionamento da areia de britagem *in natura* às condições requeridas para leitos filtrantes para tratamento de água.
- Avaliar o uso de areia de britagem de outras origens (por exemplo, basáltica) e a influência da composição química no desempenho da filtração.
- Realizar mais estudos de caracterização das carreiras de filtração sob diferentes condições operacionais, como, por exemplo, taxas de filtração diferentes das utilizadas nesse trabalho e, ou operação com taxa declinante.
- Avaliar a influência de outras características da água afluenta no desempenho das carreiras de filtração, tais como cor verdadeira e potencial zeta da água coagulada.
- Com base no controle do processo de coagulação, avaliar quais características de qualidade da água decantada determinam o trespasse em cada material filtrante.
- Avaliar a remoção de cor verdadeira e de indicadores de remoção de protozoários (por exemplo, esporos de bactérias aeróbias).
- Avaliar o emprego de diferentes granulometrias e espessuras de leito filtrante;
- Avaliar o emprego do material em diferentes técnicas de filtração, como filtração rápida ascendente, filtração direta ou filtração lenta.

7 REFERÊNCIAS

ALVES, A.G. Ações poluidoras na Bacia do Rio Guandu e suas conseqüências para ETA Guandu. In: SEMINÁRIO BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GUANDU: PROBLEMAS E SOLUÇÕES, 2002, Seropédica. *Anais*. UFRRJ: SERLA, 2002, CD-ROM.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd ed. Washington: APHA; AWWA; WEF, 2012.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA. *AWWA B100-96: Standard for Filtering Material*. Denver: AWWA 1998. 36p.

AMIRTHARAJAH, A.; CLEASBY, J.L. Predicting expansion of filters during backwash. *Journal of the American Water Works Association*, v. 64, n. 1, p.52-59, 1972.

AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K.M. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. *Journal of the American Water Works Association*, v.74, n.4, p.210-216, 1982.

AMIRTHARAJAH, A. Some theoretical and conceptual views of filtration. *Journal of American Water Works Association*, v. 80, n. 12, p.36-46, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro: ABNT 1984. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11799: Material filtrante: areia, antracito e pedregulho: especificação*. Rio de Janeiro: ABNT 1990. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público: procedimento*. Rio de Janeiro: ABNT 1992. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro: ABNT 2006. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9935: Agregados – Terminologia*. Rio de Janeiro: ABNT 2011. 12p.

BAI, R.; TIEN, C. Particle detachment in deep bed filtration. *Journal of colloid and interface science*, v.186, n.2, p.307-317, 1997.

BARBOSA, M.T.G.; COURA, C.G.; MENDES, L.O. Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto. *Ambiente Construído*. Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 51-60, 2008.

BASTOS, P.K.X.; ALTOMAR NETO, F.; BERNARDO, D. S.; OLIVEIRA, L. N.; COUTO, M. L. Areia de britagem para argamassas e concretos – a experiência de Juiz de Fora, MG. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 11, 2006, Florianópolis. *Anais*. Porto Alegre: ANTAC, 2006. p. 3985-3993.

BASTOS, R.K.X., HELLER, L.; FORMAGGIA, D.M.E.; AMORIM, L. C; SANCHEZ, P.S.; BEVILACQUA, P.D.; COSTA, S. S; CÂNCIO, J. A. Revisão da Portaria 36 GM/90. Premissas e princípios norteadores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. (CD-ROM).

BASTOS, R. K. X. Controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano – evolução da legislação brasileira. In: CONGRESSO REGIONAL DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL DA 4ª REGIÃO DA AIDIS, CONE SUL, 4, 2003, São Paulo. *Anais*. Rio de Janeiro: AIDIS, 2003, CD ROM.

BASTOS, R.K.X. *Comentários sobre a Portaria MS. N.º 518/2004: subsídios para implementação*. Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Coordenação Geral de Vigilância em Saúde Ambiental, 92 p, 2005.

BASTOS, R.K.X. (coordenador). *Manual de boas práticas no abastecimento de água: procedimentos para a minimização de riscos à saúde*. Brasília : Ministério da Saúde, 2006. 260 p. (Série A. Normas e Manuais Técnicos)

BASTOS, R.K.X ; BRANDAO, C.C.S. CERQUEIRA. D. A. Tratamento de água e remoção de protozoários in: PÁDUA, V. L. (Coord.) *Remoção de microrganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano*. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2009, p 109-149 (Projeto Prosab)

BAYLIS, J.R. Experiences in filtration. *Journal of American Water Works Association*, v.29, n.7, p.1010-1048, 1937

BETANCOURT, W.Q.; ROSE, J.B. Drinking water treatment processes for removal of *Cryptosporidium* and *Giardia*. *Veterinary parasitology*, v.126, n.1, p.219-234, 2004.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n° 36. Aprova normas e o padrão de potabilidade da água para consumo humano em todo o território nacional. *Diário oficial da União*, 23 de janeiro 1990.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n°. 1469. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, 29 de dezembro 2000.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n°. 518 Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, 26 de março 2004.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n°. 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União*, 14 de dezembro de 2011.

BROWN, T.S.; MALINA JR., J.F.; MOORE, B.D. Virus removal by diatomaceous-earth filtration—Part 2. *Journal of American Water Works Association*, v.66, n.12, p.735-738, 1974.

BUSTAMANTE, H.A.; SHANKER, S.R.; PASHLEY, R.M; KARAMAN, M.E. Interaction between *Cryptosporidium* oocysts and water treatment coagulants. *Water Research*, v.35, n.13, p.3179-3189, 2001.

CEBALLOS, B. S. O; DANIEL, L. A.; BASTOS, R.K.X. Tratamento de água para consumo humano: panorama mundial e ações do PROSAB. In: PÁDUA, V.L. (Coord.) *Remoção de microorganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano*. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2009, p. 19 – 43.

CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE – CEPIS/OPS. *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*. Lima, Peru: CEPIS/OPS, 2004.

CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE – CEPIS/OPS. *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de*

filtración rápida. Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada. Lima, Peru: CEPIS/OPS, 2005.

CLEASBY, J.L.; WILLIAMSON, M.M.; BAUMANN, E.R.; HUDSON, H.E. Effect of Filtration Rate Changes on Quality [with Discussion]. *Journal of American Water Works Association*. v. 55, n.7, p.869-880, 1963.

CLEASBY, J.L.; ARBOLEDA, J.; BURNS, D.E.; PRENDIVILLE, P.W.; SAVAGE, E.S. Backwashing of granular filters. *Journal of American Water Works Association*, v.69, n. 2, p.115-126, 1977.

CLEASBY, J.L.; FAN, K.S. Predicting fluidization and expansion of filter media. *Journal of Environmental Engineering Division*, v.107, n. 3, p.455-471, 1981.

CULP, R.L. Direct filtration. *Journal of American Water Works Association*, v. 69, n.7, p.375-378, 1977.

DANIEL, L. A. *Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável.* Rio de Janeiro: PROSAB, ABES, RiMa, 2001, 139 p.

DEMPSEY, B.A.; GANHO, R.M.; O'MELIA, C.R. The coagulation of humic substances by means of aluminum salts. *Journal of American Water Works Association*, v.76, n.4, p.141-150, 1984.

DIAPER, E.W.; IVES, K.J. Filtration through size-graded media. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, v.9, n.3, p.89-116, 1965.

DI BERNARDO, L. *Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas.* Rio de Janeiro: PROSAB, ABES, RiMa, 1999, 121 p.

DI BERNARDO, L. *Tratamento de água para abastecimento por filtração direta.* Rio de Janeiro: PROSAB, ABES, RiMa, 2003, 480 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. *Métodos e técnicas de tratamento de água.* 2ª ed. São Carlos: RiMa, 2005, 792 p, v.1.

DI BERNARDO, L; SABOGAL PAZ, L.P. *Seleção de tecnologias de tratamento de água.* São Carlos–SP: Ed. LDiBe, 2008, 878 p, v.1.

DRAGO, C; VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland. *REM: Revista Escola de Minas*, v.62, n.3, p. 399-408, 2009.

DUGAN, N.R.; FOX, K.R.; OWENS, J.H.; MILTNER, R.J. Controlling *Cryptosporidium* oocysts using conventional treatment. *Journal of American Water Works Association*, v.93, n.12, p.64-76, 2001.

EDWARDS, G.A.; AMIRTHARAJAH, A. Removing color caused by humic acids. *Journal of American Water Works Association*, v.77, n.3, p.50-57, 1985.

EMELKO, M.B. Removal of viable and inactivated *Cryptosporidium* by dual-and tri-media filtration. *Water research*, v.37, n.12, p.2998-3008, 2003.

EMELKO, M.B.; HUCK, P.M; COFFEY, B.M. A review of *Cryptosporidium* removal by granular media filtration. *Journal of American Water Works Association*, v.97, n.12, p.101-115, 2005.

EVANS, G.; DENNIS, P.; COUSINS, M.; CAMPBELL, R. Use of recycled crushed glass as a filtration medium in municipal potable water treatment plants. *Water Science and Technology: Water Supply*, v.2, n.5-6, p.9-16, 2002.

FARIZOGLU, B.; NUHOGLU, A.; YILDIZ, E.; KESKINLER, B. The performance of pumice as a filter bed material under rapid filtration conditions. *Filtration & separation*, v.40, n.3, p.41-47, 2003.

FULTON, G.P. *Diatomaceous earth filtration for safe drinking water*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2000, 214 p.

HAMANN, C.L.; MCKINNEY, R.E. Upflow filtration process. *Journal of American Water Works Association*, n.60, v.9, p.1023-1039, 1968.

HEALTH CANADA. *Guidelines for Canadian Drinking Water Quality – Summary Table*. Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, Ottawa, Ontario, 2014.

HELLER, L.; VIEIRA, M.B.C.M.; BRITO, L.L.A.; SALVADOR, D.P. Desempenho da filtração lenta em areia submetida a cargas de pico de oocistos de *Cryptosporidium* sp, bactérias e sólidos: uma avaliação em instalação piloto. *Engenharia sanitária e ambiental*, v.11, n.1, p.27-38, 2006

HELLER, L.; PÁDUA, V.L. *Abastecimento de água para consumo humano*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006, 859 p.

HUISMAN, L.; WOOD, W.E. *Slow sand filtration*. Vol. 16. Geneva: World Health Organization, 1974, 122 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 219 p.

ISON, C.R.; IVES, K.J. Removal mechanisms in deep bed filtration. *Chemical Engineering Science*. v.24, n.4, p.717-729, 1969.

IVES, K.J. Rapid filtration. *Water Research*, v. 4, n.3, p. 201-223, 1970.

IVES, K.J.; CLEASBY, J.L. Filtration of water and wastewater. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v.2, n.1-4, p.293-335, 1972.

IVES, K.J. A new concept of filterability. *Progress in Water Technology*, v.10, n.5-6, p.123-137, 1978.

JACKSON, G.E.; LETTERMAN, R.D. Granular media filtration in water and wastewater treatment, part 1. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v.10, n.4, p.339-373, 1980.

JEGATHEESAN, V.; VIGNESWARAN, S. Deep bed filtration: mathematical models and observations. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v.35, n.6, p. 515-569, 2005.

LANGÉ, K.P.; BELLAMY, W.D.; HENDRICKS, D.; LOGSDON, G.S. Diatomaceous earth filtration of Giardia cysts and other substances. *Journal of American Water Works Association*. v.78, n.1, p.76-84, 1986.

LIBÂNIO, M. *Fundamentos de qualidade e tratamento de água*. 4ª ed. Campinas: Editora Átomo, 2016. 638 p.

MENOSSI, R.T.; MELGES, J.L.P.; AKASAKI, J.L.; CAMACHO, J.S.; FAZZAN, J.V.; TASHIMA, M.M.; SALLES, F.M. Pó de pedra: uma alternativa ou um complemento ao uso da areia na elaboração de misturas de concreto?. *Holos Environment*, v.10, n.2, p.209-222, 2010.

MINISTRY OF HEALTH. *Drinking-water Standards for New Zealand*, 2005 (Revised 2008). Wellington: Ministry of Health. New Zealand, 2008.

NHMRC/NRMMC – National Health and Medical Research Council, NRMMC - Natural Resource Management Ministerial Council. *Australian Drinking Water Guidelines 6*, 2016.

OEBEN, R.W.; HAINES, H.P.; IVES, K.J. Comparison of normal and reverse-graded filtration. *Journal of American Water Works Association*, v.60, n.4, p.429-439, 1968.

PÁDUA, V.L. (Coord.). *Manual para estudo de cianobactérias planctônicas em mananciais de abastecimento público: caso da represa Lomba do Sabão e lago Guaíba, Porto Alegre, Rio Grande do Sul*. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2006, 64 p. (Projeto PROSAB).

PÁDUA, V.L. (Coord.). *Remoção de microorganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano*. Rio de Janeiro: ABES 2009, 392 p. (Projeto PROSAB).

PERNITSKY, D.J.; EDZWALD, J.K. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, v.55, n.2, p.121-141, 2006.

RICE, A.H. High-Rate Filtration. *Journal of American Water Works Association*, v.66, n.9, p.258-261, 1974.

SCHULER, P.F.; GHOSH, M.M. Diatomaceous earth filtration of cysts and other particulates using chemical additives. *Journal of American Water Works Association*, v.82, n.12, p.67-75, 1990.

STEVENSON, D.G. The specification of filtering materials for rapid-gravity filtration. *Water and Environment Journal*, v.8, n.5, p.527-533, 1994.

STEVENSON, D.G. Flow and filtration through granular media—the effect of grain and particle size dispersion. *Water Research*, v.31, n.2, p.310-322, 1997.

ULUATAM, S.S. Assessing perlite as a sand substitute in filtration. *Journal of American Water Works Association*, v.83, n.6, p.70-71, 1991.

ULUATAM, S.S. Laboratory evaluation of perlite bed filtration in water treatment. *International journal of environmental studies*, v.42, n.1, p.1-10, 1992.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. National Primary Drinking Water Regulations Federal Register, Part 12, 40 CFR Part 141, 1991

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. National Primary Drinking Water Regulations: Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule; Final Rule. Federal Register, Part II, 40CFR, Parts 9, 141 and 142. 2006.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *National Primary Drinking Water Regulations*, 2009 (EPA 816-F-09-004).

VIANA, D. B. *Contribuições para a construção de modelos de estimativa de riscos à saúde associados à transmissão de Giardia e Cryptosporidium via abastecimento de água para consumo humano*. 2011. 258f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2011.

WEBER-SHIRK, M.L.; DICK, R.I. Physical-chemical mechanisms in slow sand filters. *Journal of American Water Works Association*, v.89, n.1, p.87, 1997.

WEBER-SHIRK, M.L.; DICK, R.I. Biological mechanisms in slow sand filters. *Journal of American Water Works Association*, v.89, n.2, p.72. 1997.

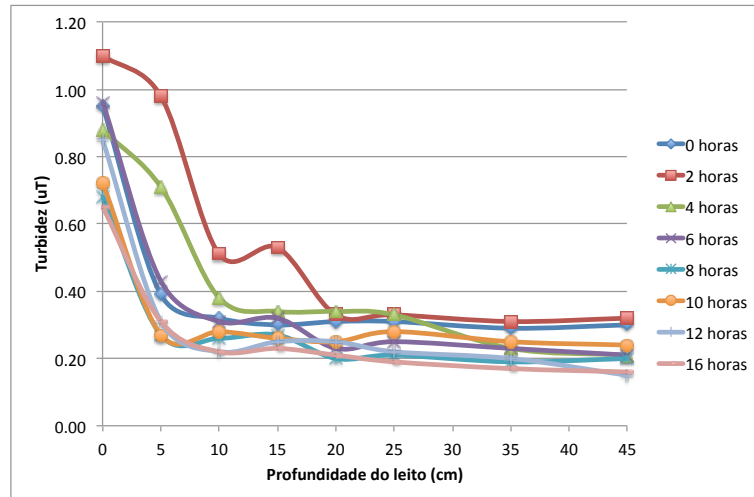
WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Guidelines for drinking-water quality*. 4^a ed. Geneva: WHO. 2011. 564p.

XAGORARAKI, I.; HARRINGTON, G.W. Zeta potential, dissolved organic carbon, and removal of Cryptosporidium oocysts by coagulation and sedimentation. *Journal of environmental engineering*, v.130, n.12, p.1424-1432, 2004.

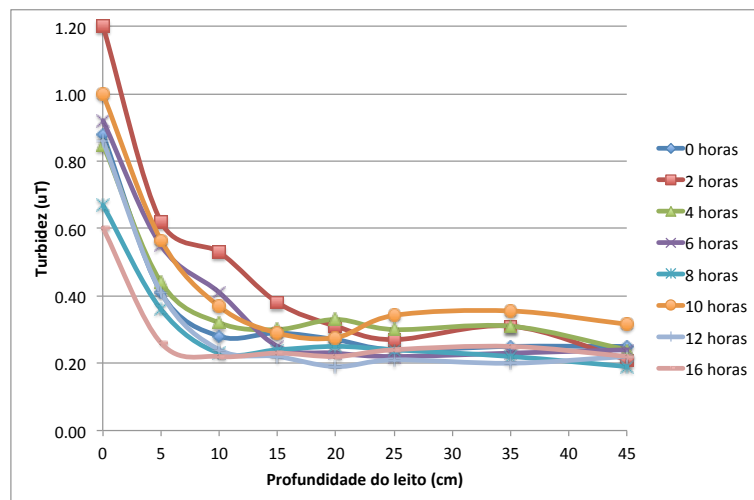
YAO, K.M.; HABIBIAN, M.T.; O'MELIA, C.R. Water and wastewater filtration. Concepts and applications. *Environmental science & technology*, v.5, n.11, p.1105-1112, 1971.

APÊNDICE A. RESULTADOS DAS CARREIRAS DE FILTRAÇÃO

- Carreira 1

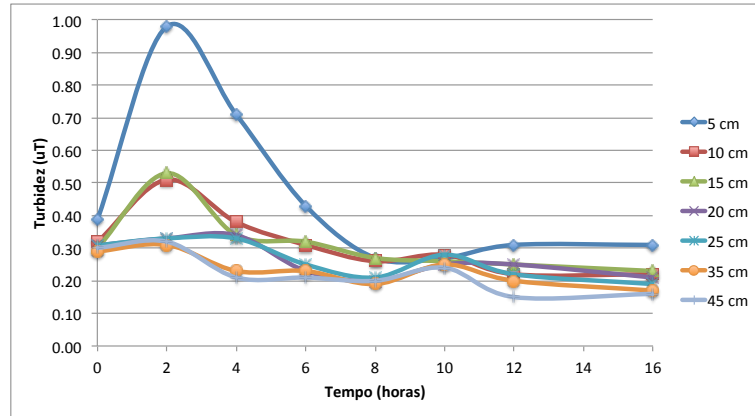


(a)

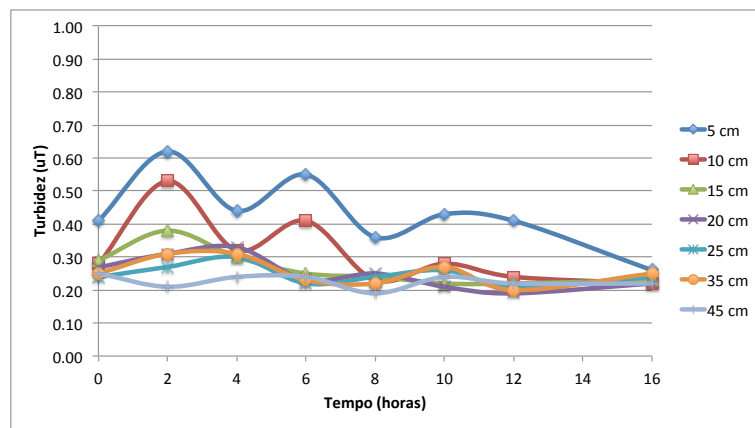


(b)

Figura A 1. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 1

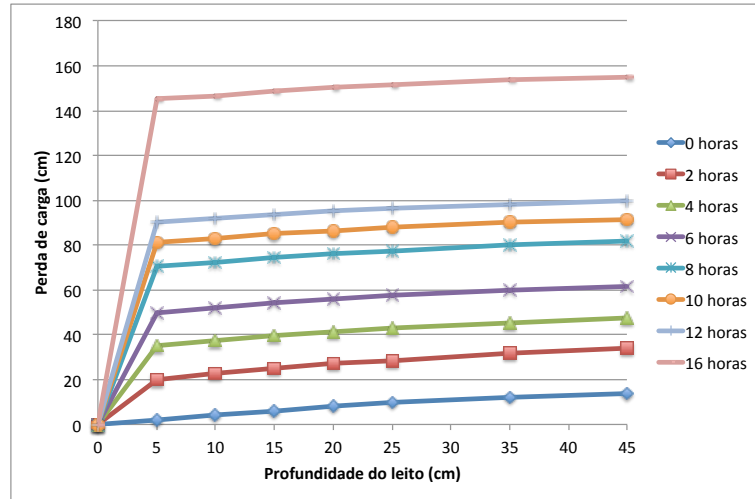


(a)

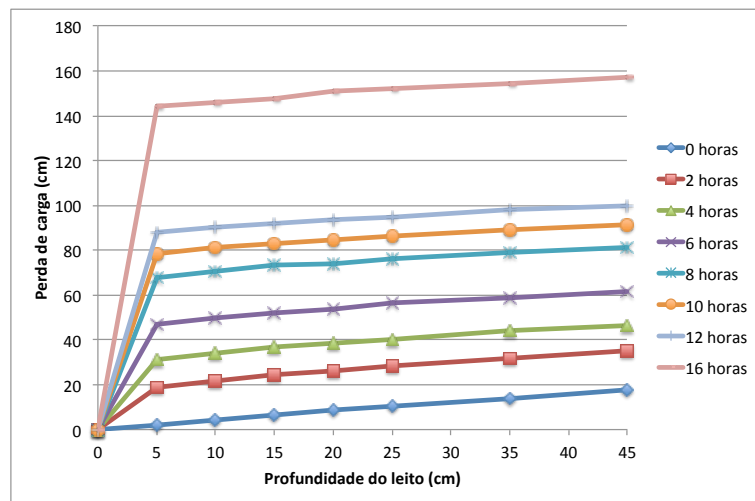


(b)

Figura A 2. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 1



(a)



(b)

Figura A 3. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 1

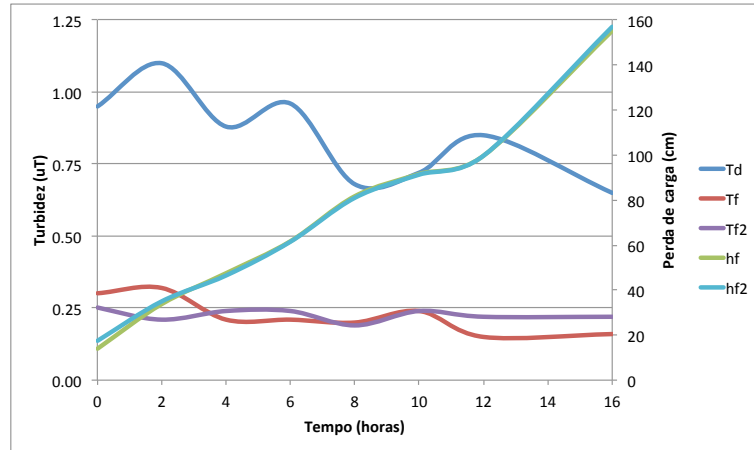


Figura A 4. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 1. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

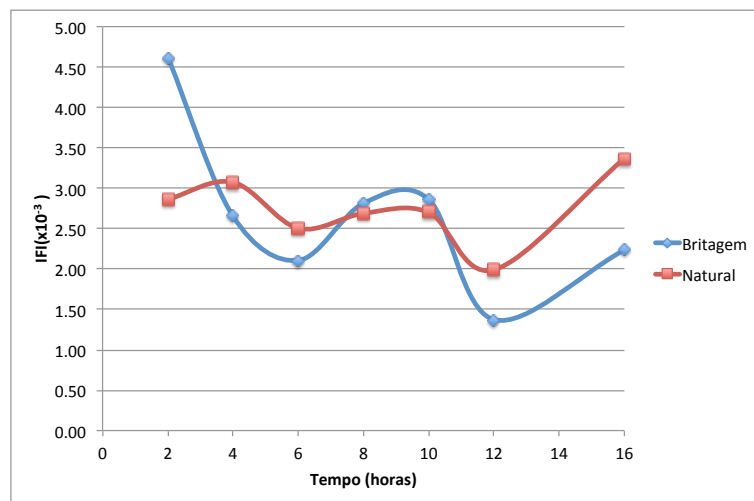
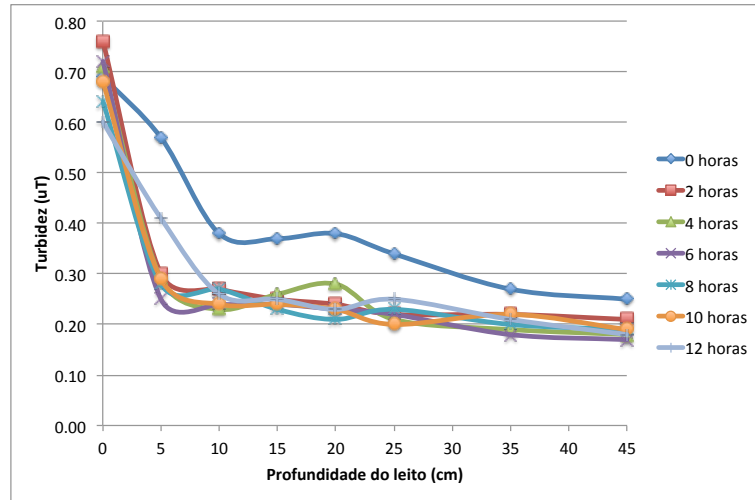
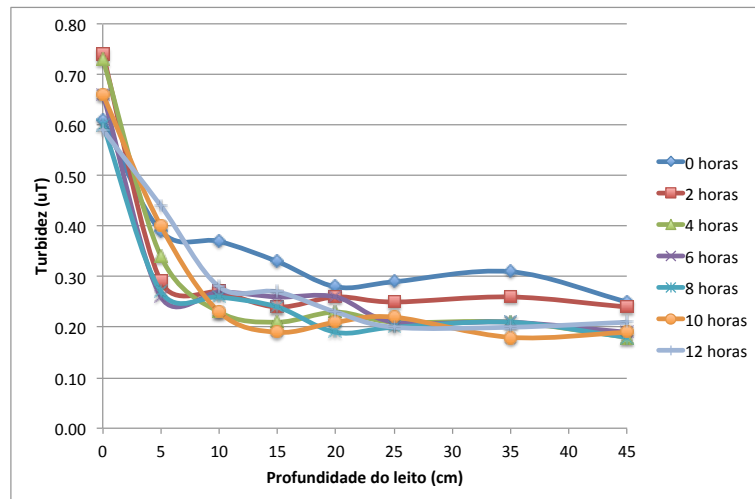


Figura A 5. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 1

- Carreira 2

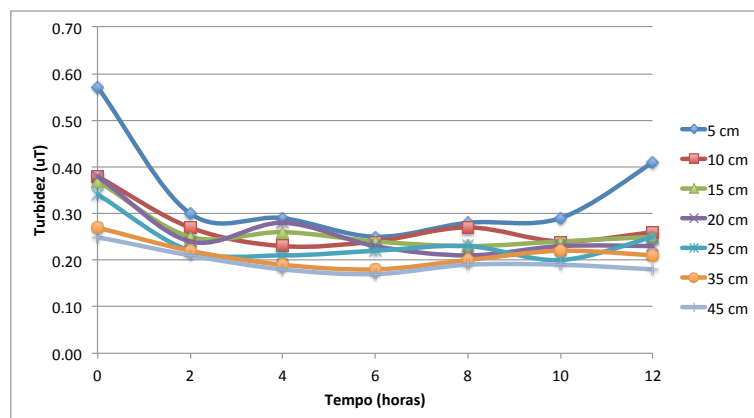


(a)

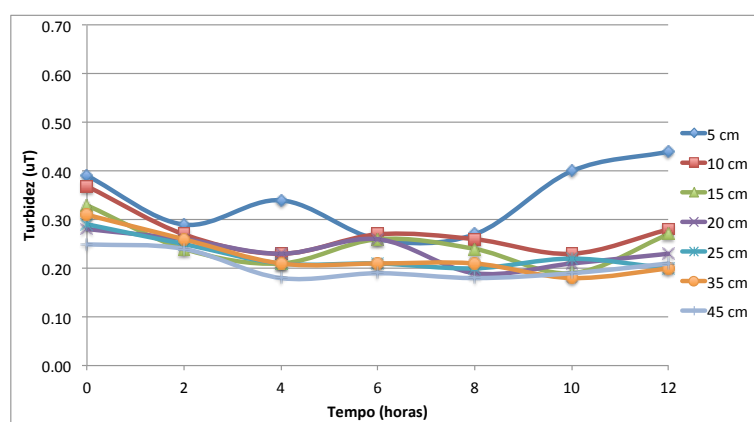


(b)

Figura A 6. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 2

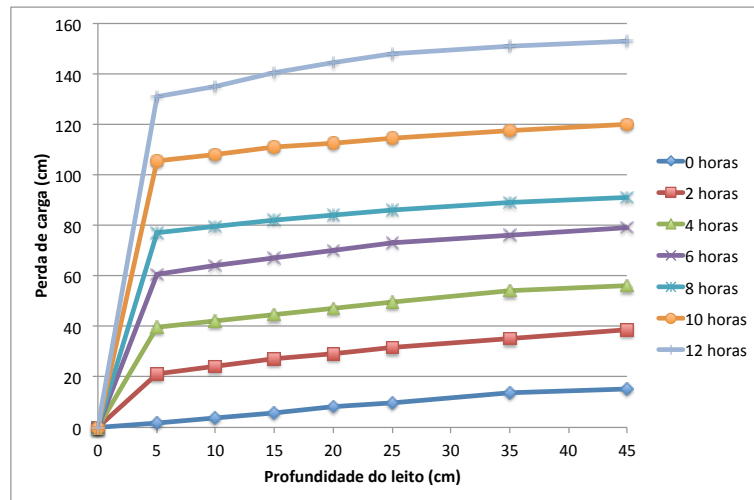


(a)

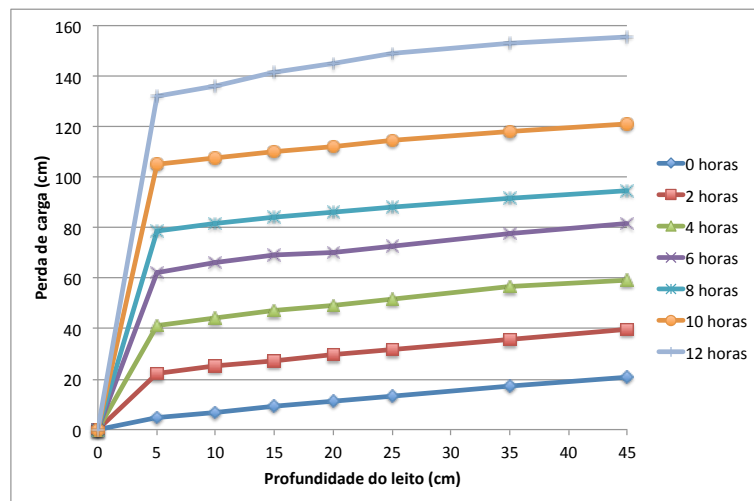


(b)

Figura A 7. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 2



(a)



(b)

Figura A 8. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 2

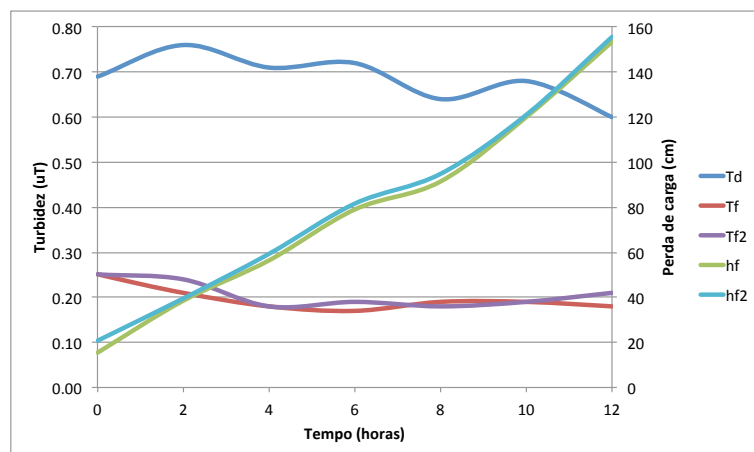


Figura A 9. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 2. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

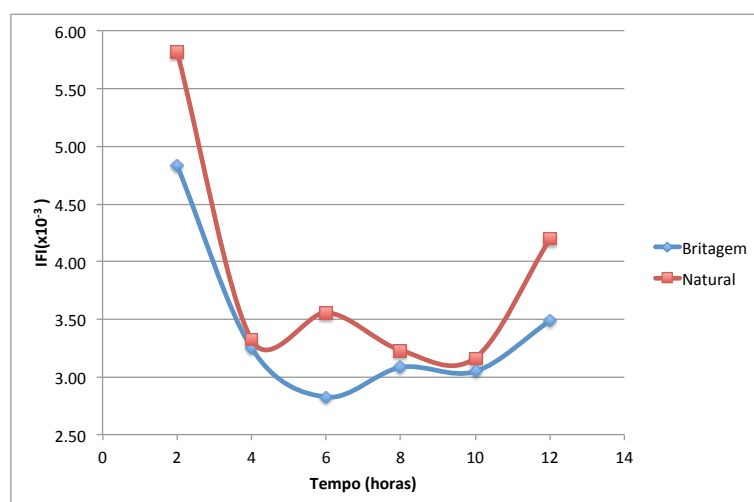
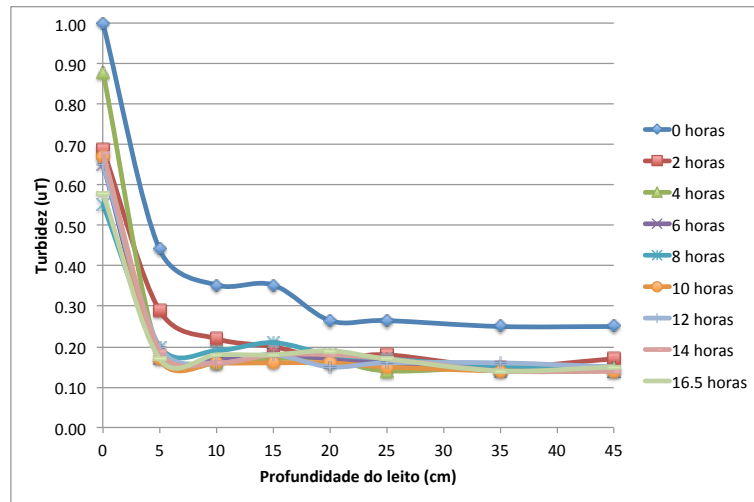
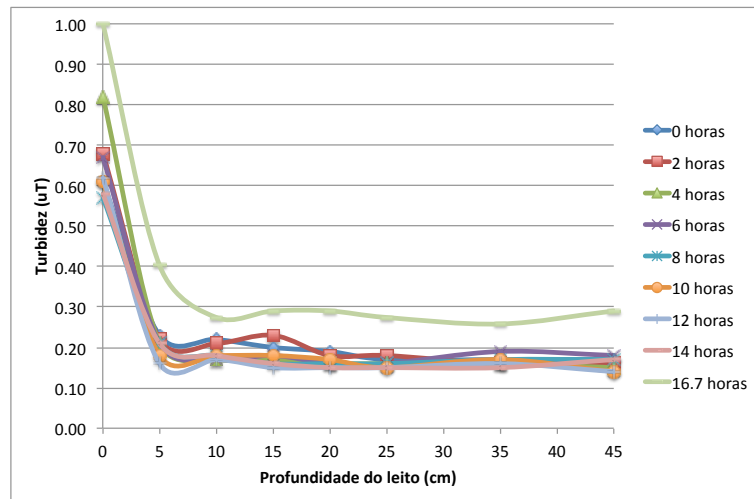


Figura A 10. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 2

- Carreira 4

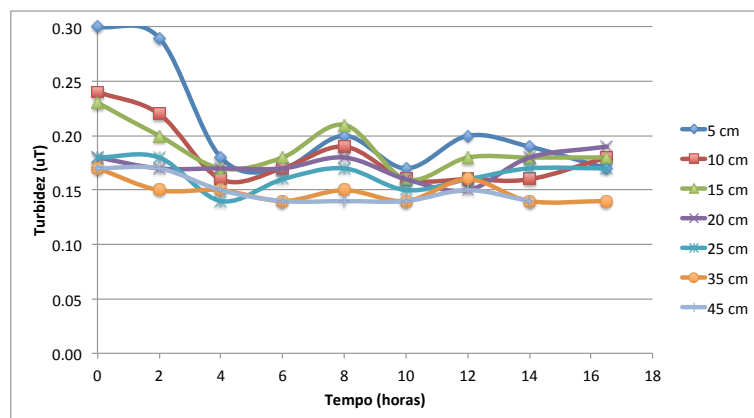


(a)

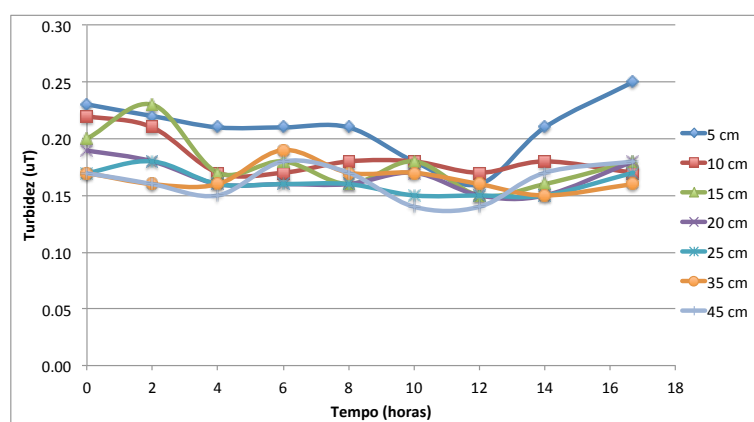


(b)

Figura A 11. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 4

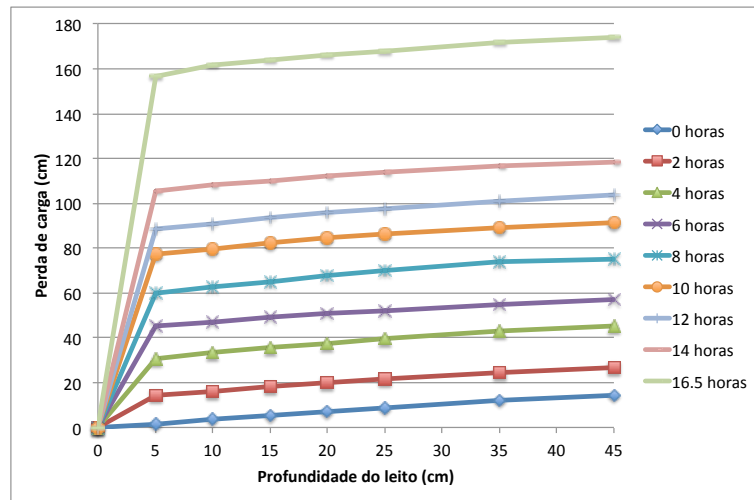


(a)

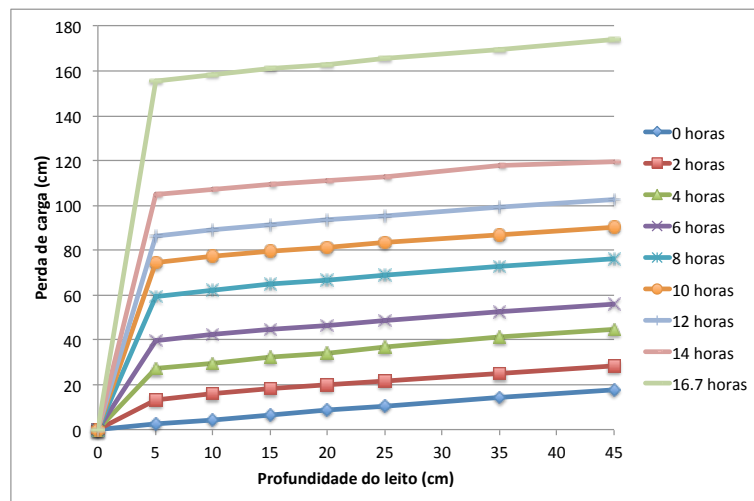


(b)

Figura A 12. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 4



(a)



(b)

Figura A 13. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 4

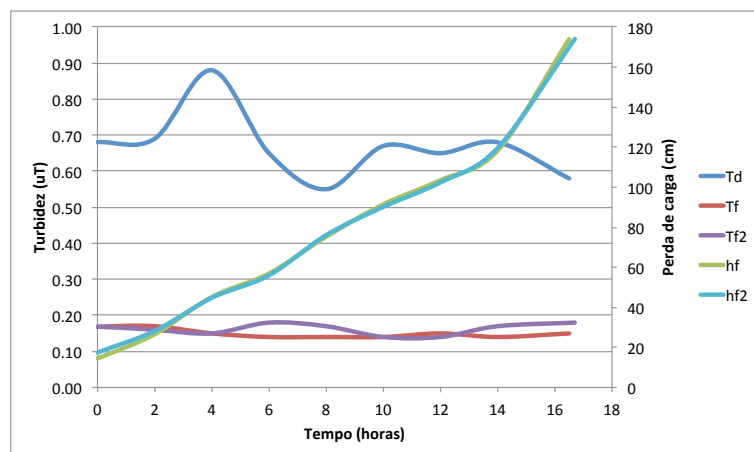


Figura A 14. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 4. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

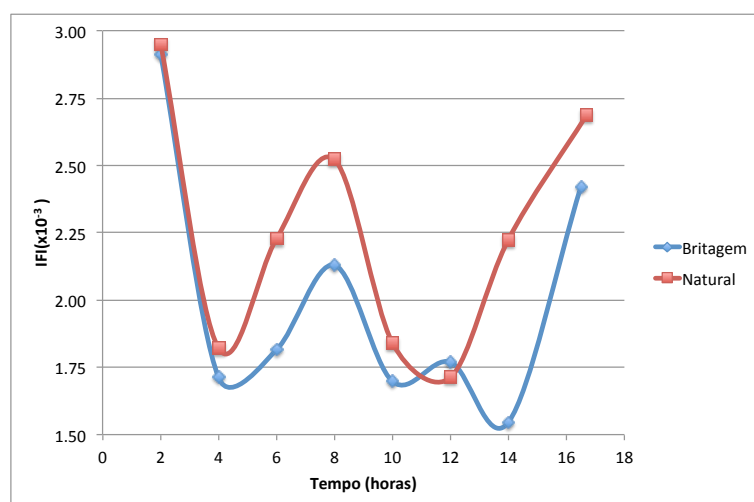
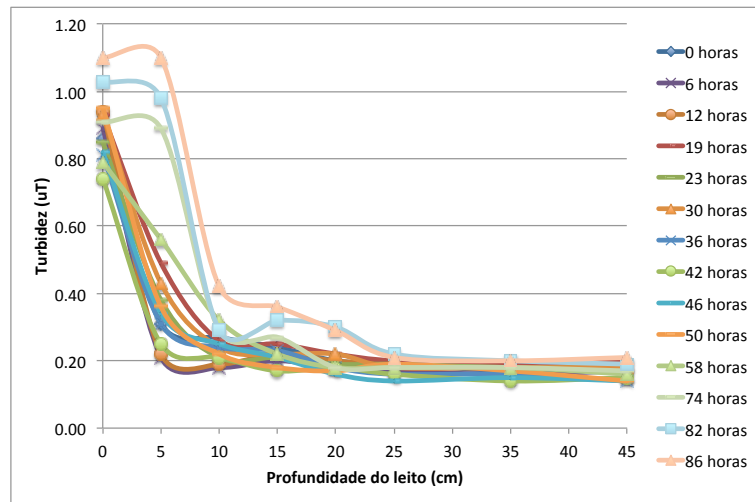
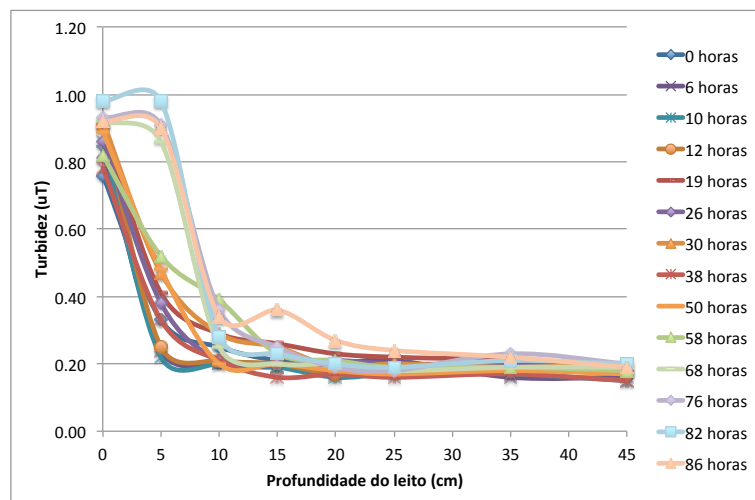


Figura A 15. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 4

- Carreira 5

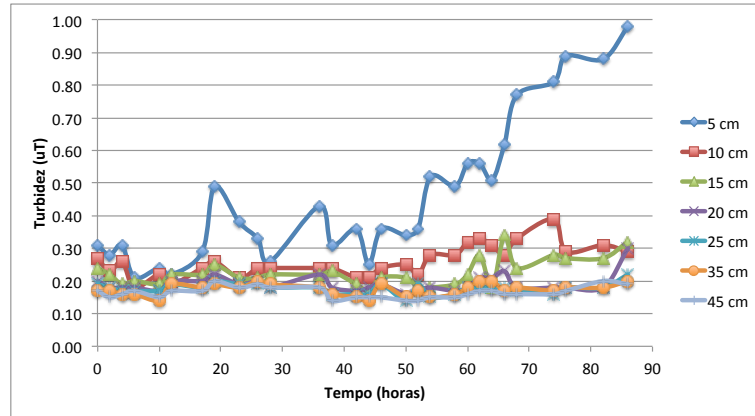


(a)

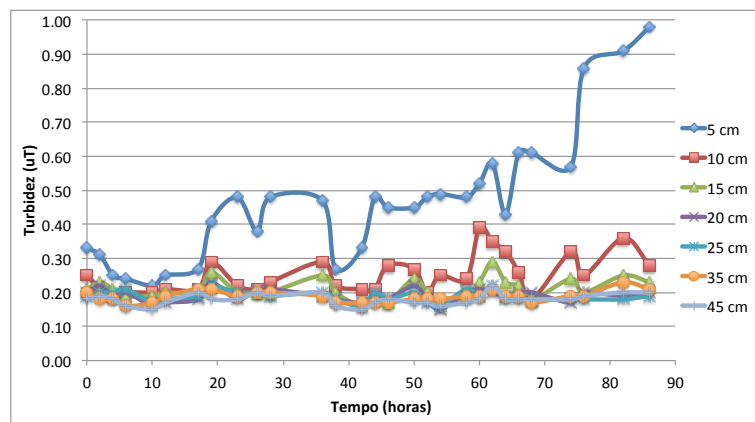


(b)

Figura A 16. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 5

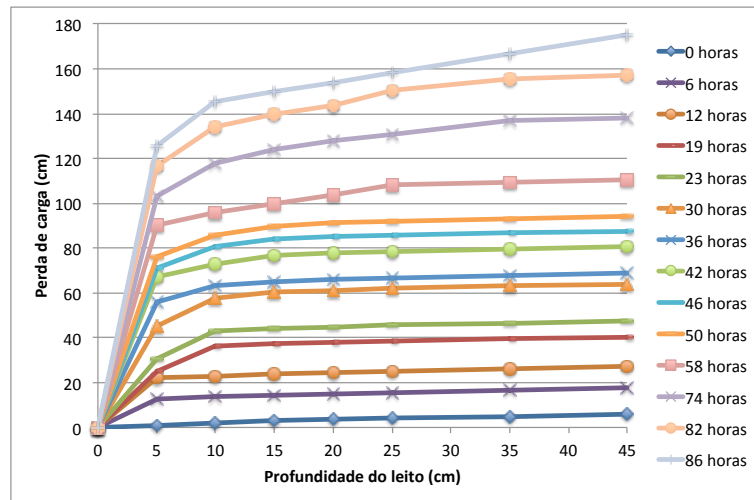


(a)

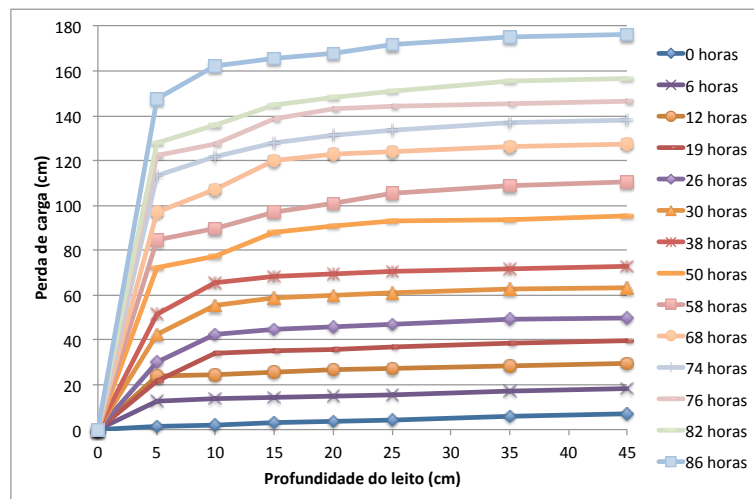


(b)

Figura A 17. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 5



(a)



(b)

Figura A 18. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 5

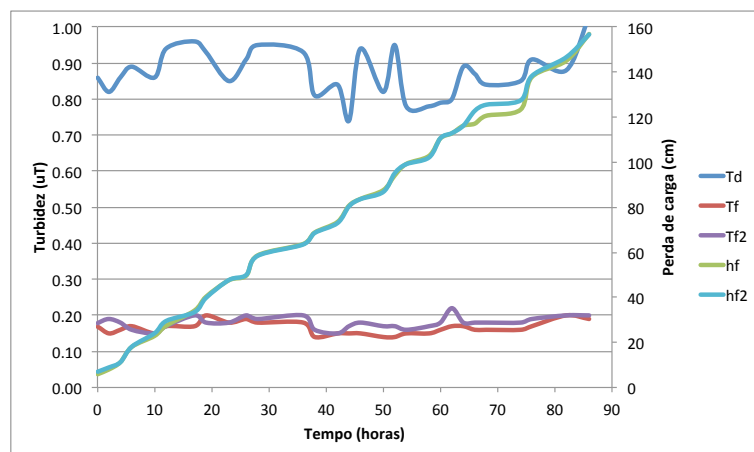


Figura A 19. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 5. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

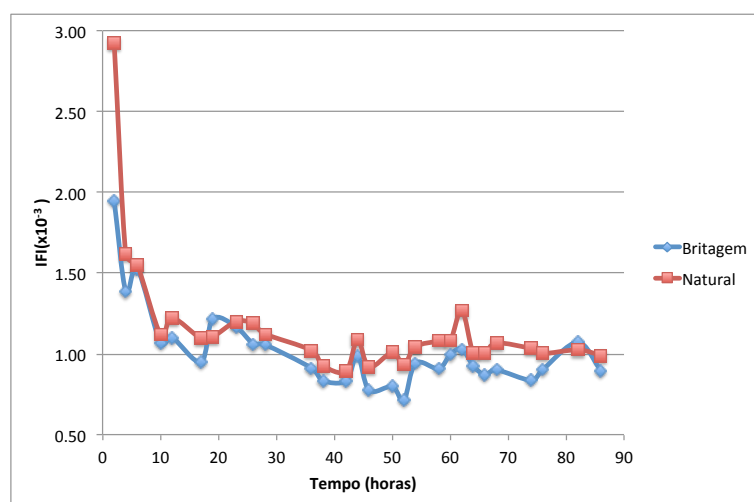
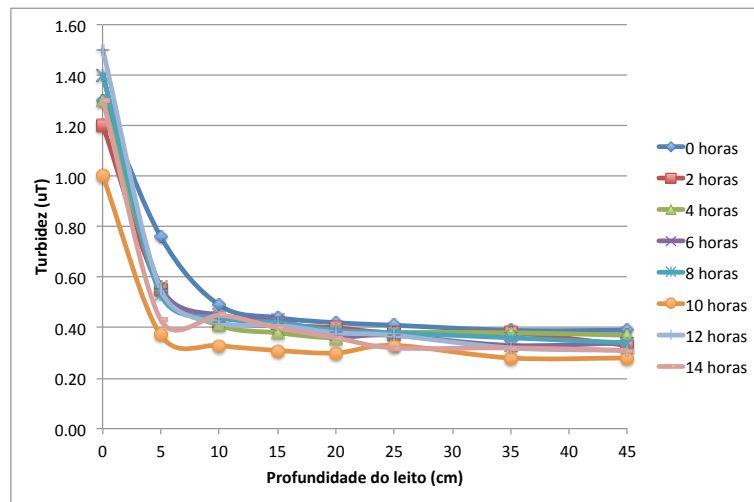
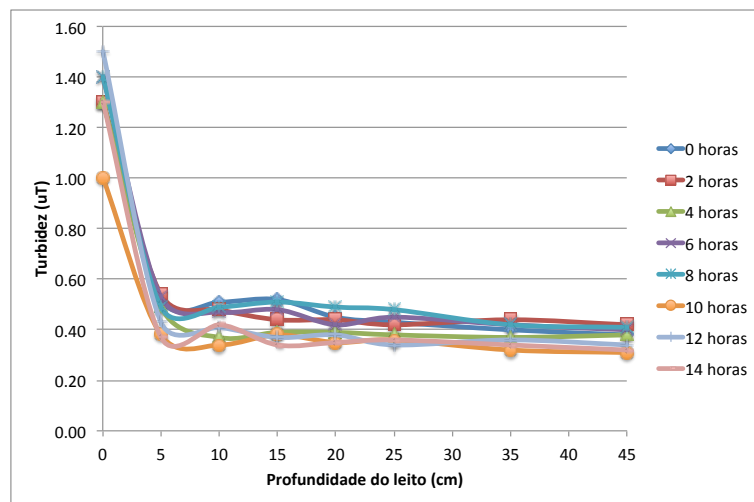


Figura A 20. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 5

- Carreira 7

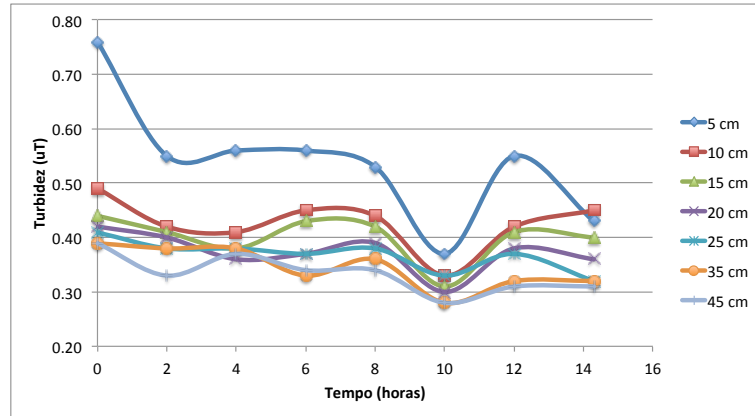


(a)

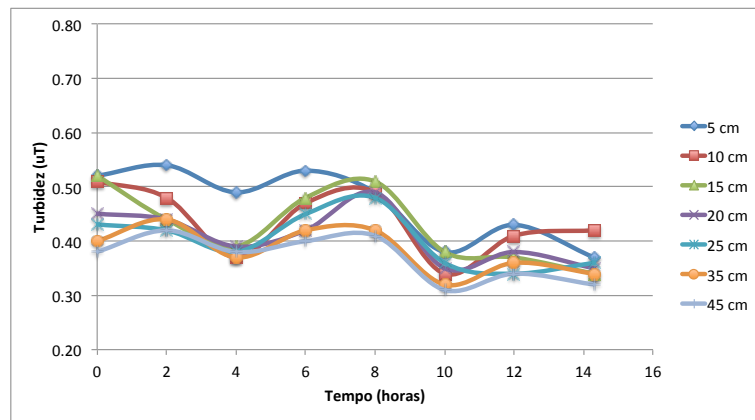


(b)

Figura A 21. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 7

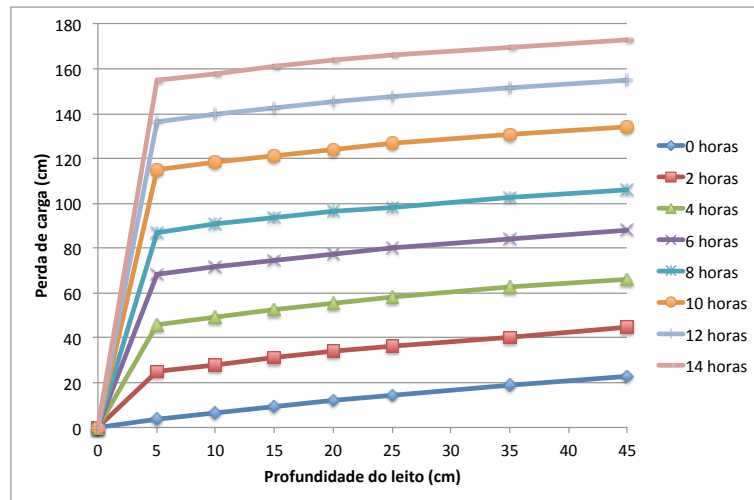


(a)

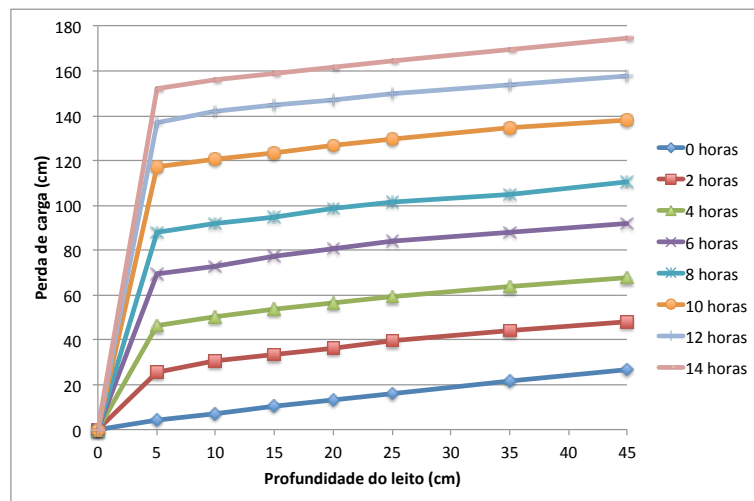


(b)

Figura A 22. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 7



(a)



(b)

Figura A 23. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 7

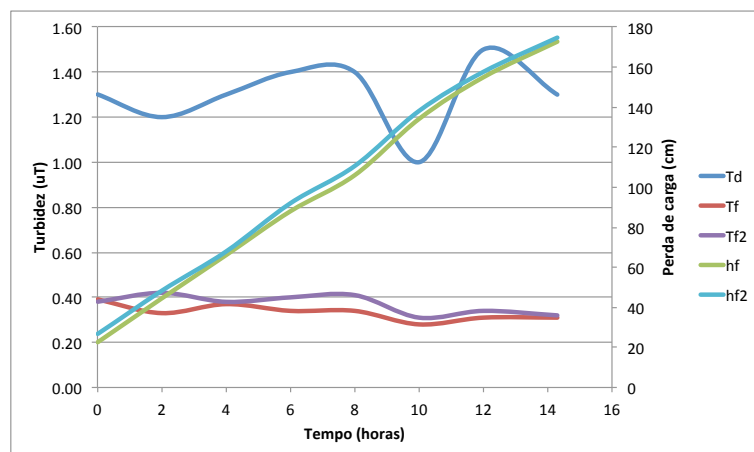


Figura A 24. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 7. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

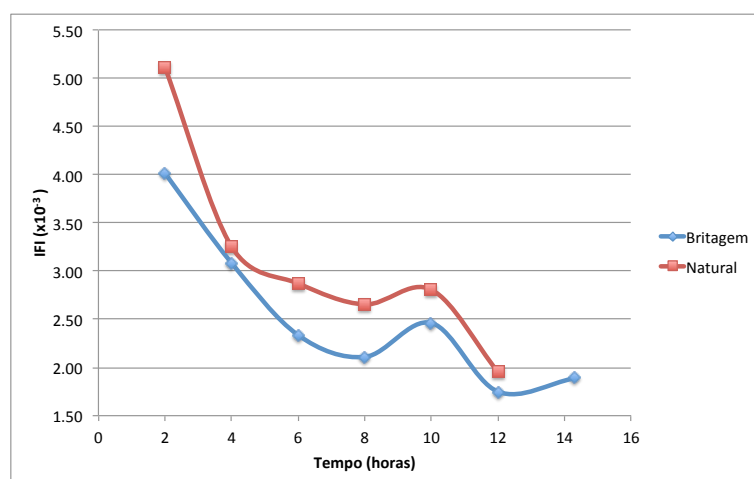
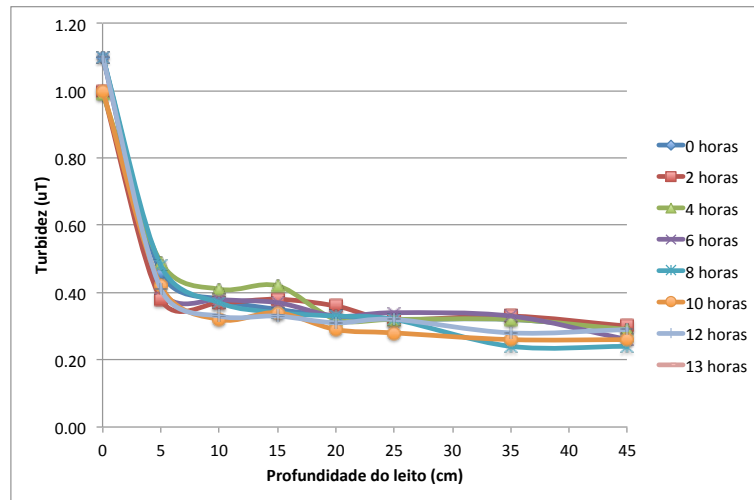
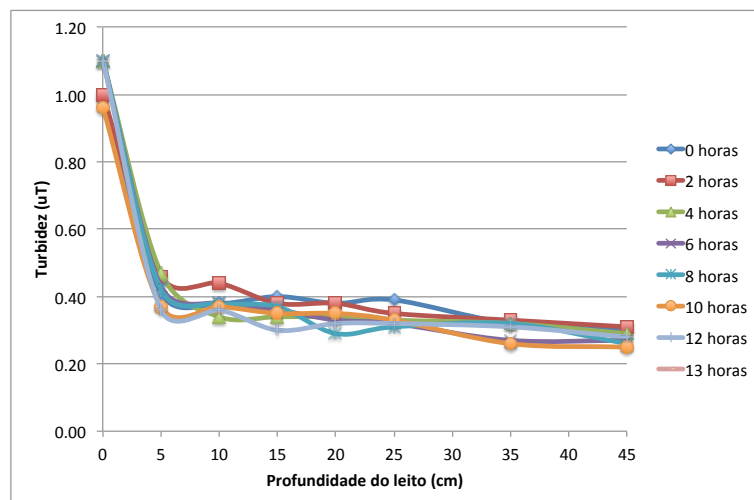


Figura A 25. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 7

- Carreira 8

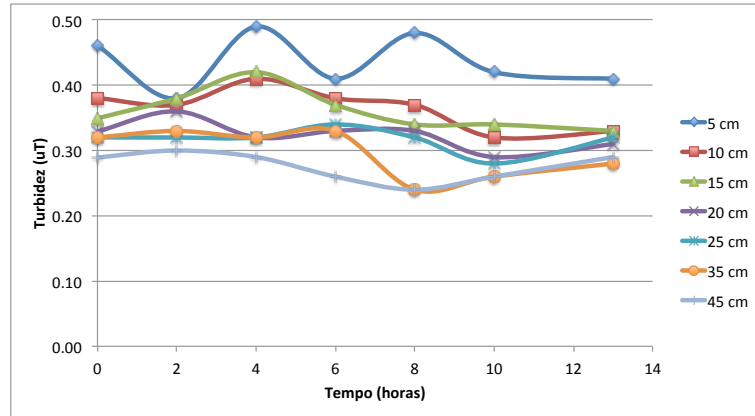


(a)

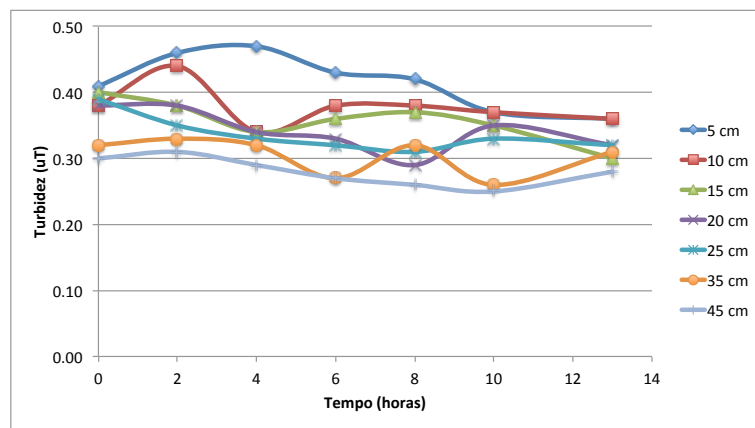


(b)

Figura A 26. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 8

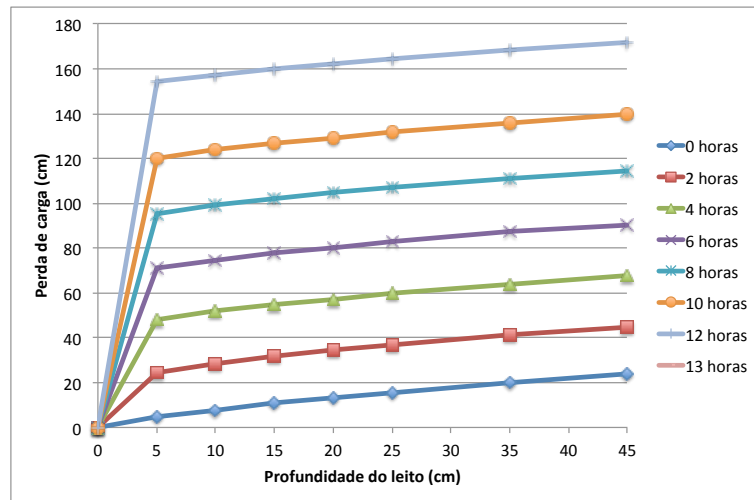


(a)

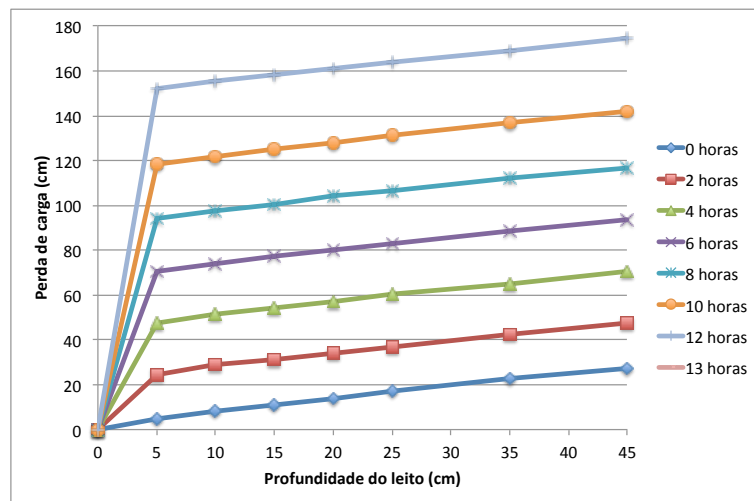


(b)

Figura A 27. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 8



(a)



(b)

Figura A 28. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 8

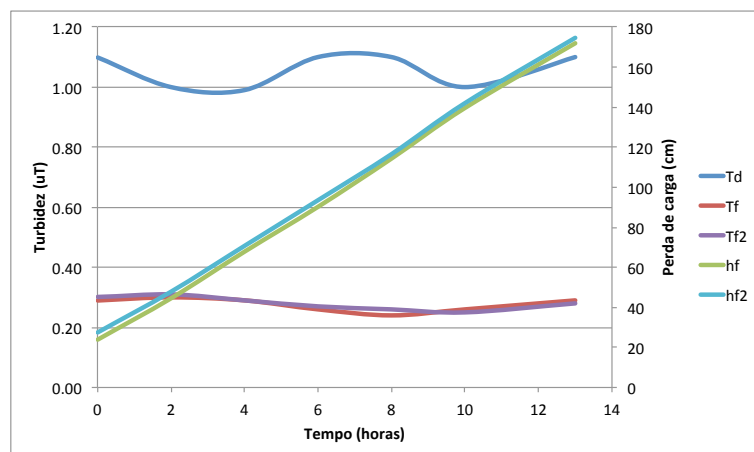


Figura A 29. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 8. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

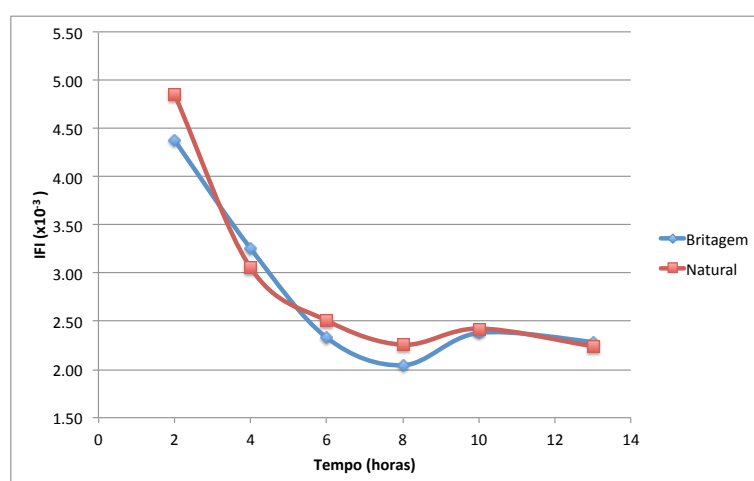
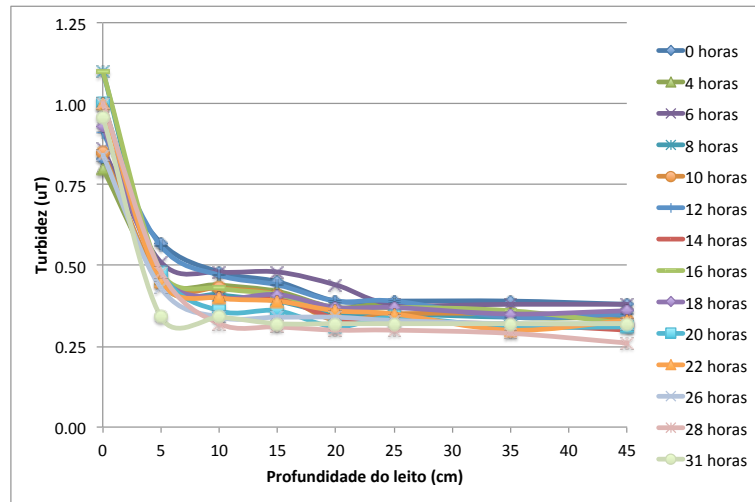
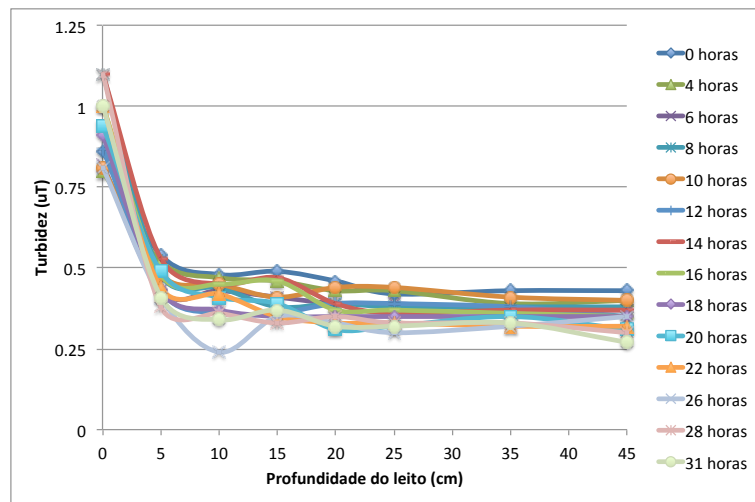


Figura A 30. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 8

- Carreira 10

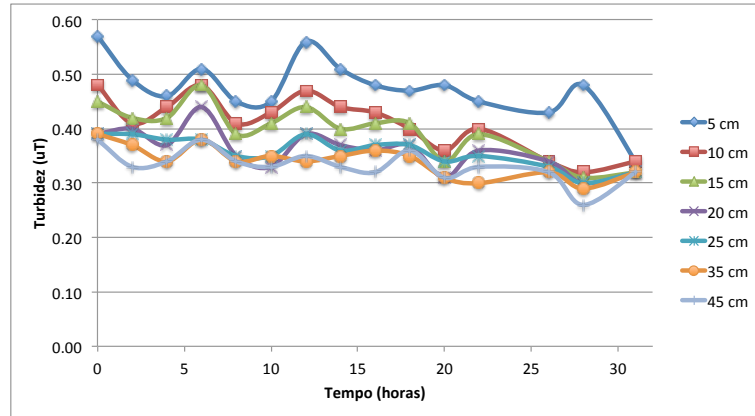


(a)

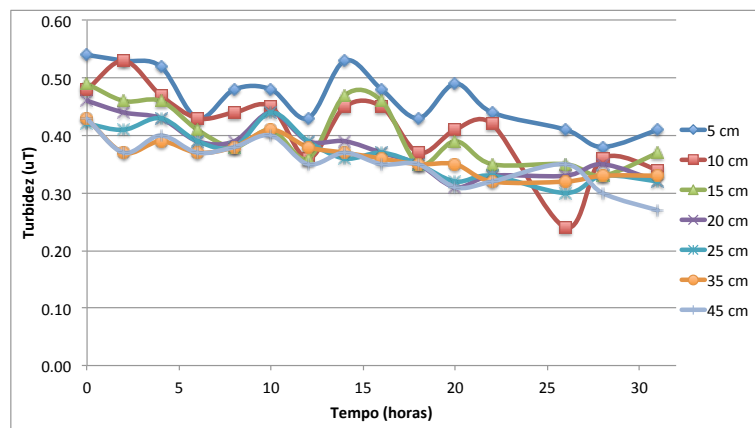


(b)

Figura A 31. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 10

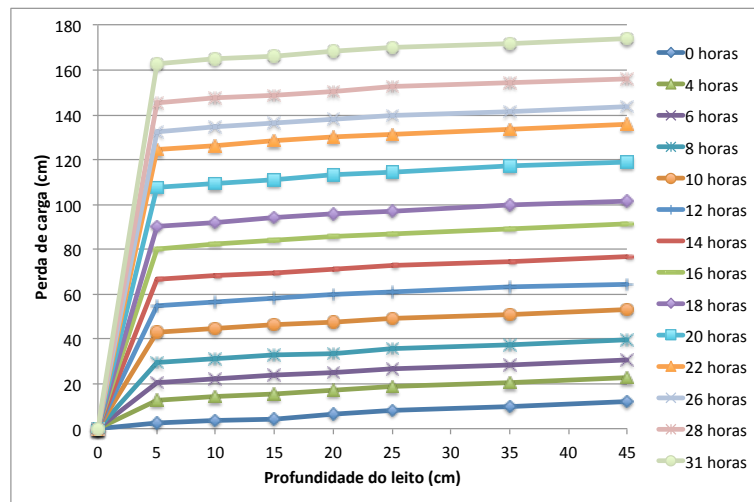


(a)

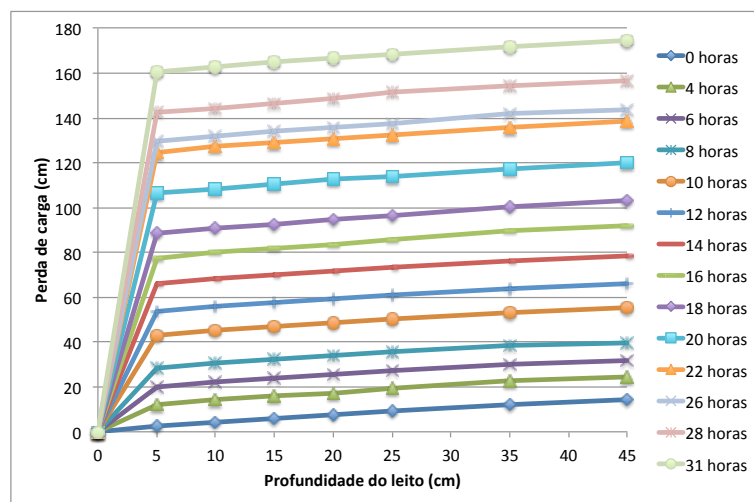


(b)

Figura A 32. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 10



(a)



(b)

Figura A 33. P Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 10

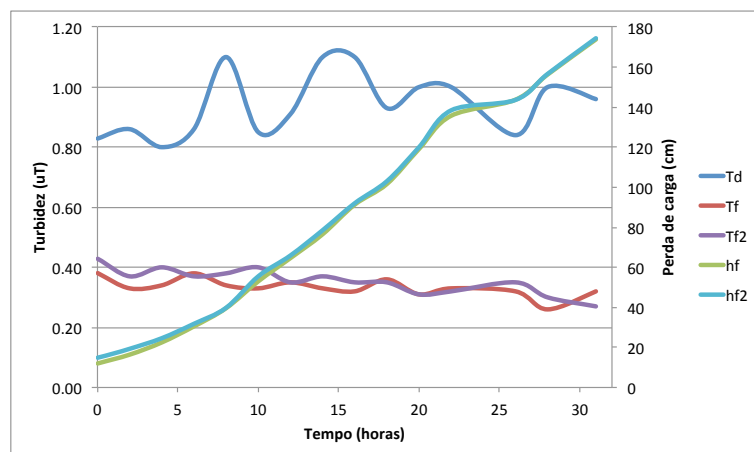


Figura A 34. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 10. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

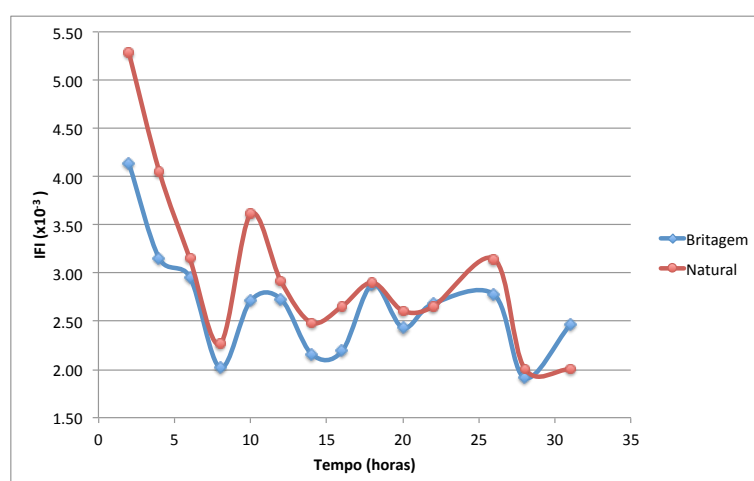
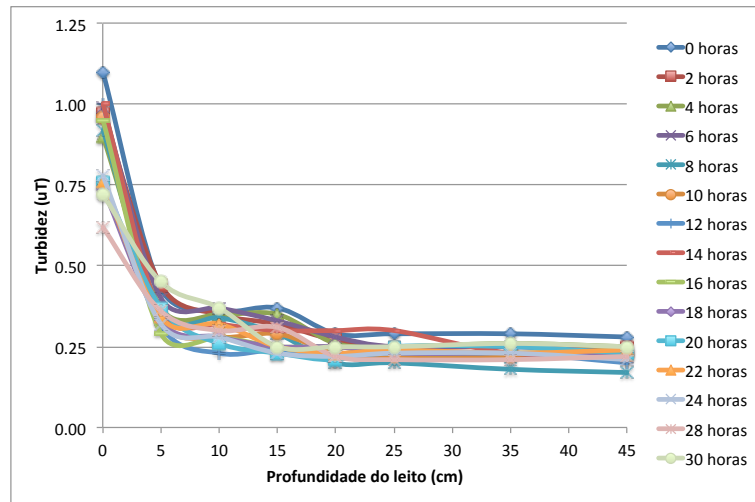
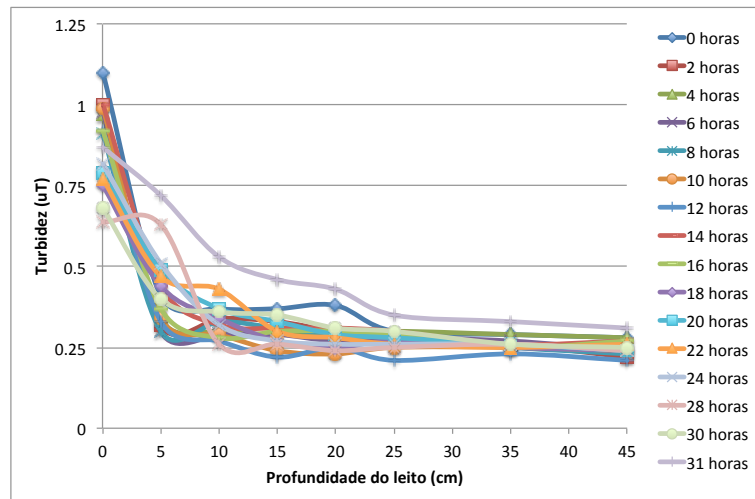


Figura A 35. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 10

- Carreira 11

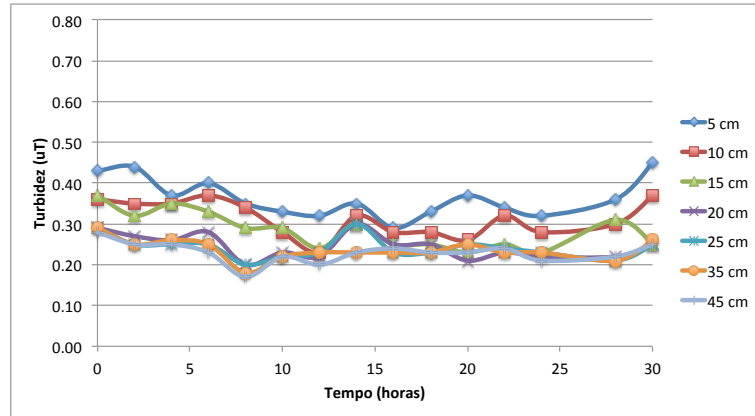


(a)

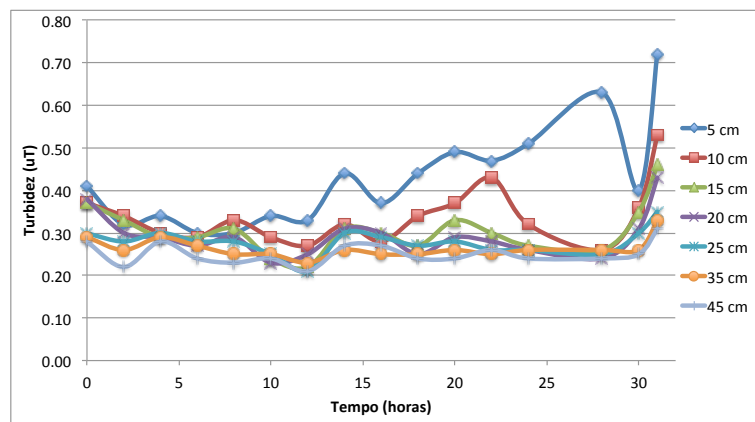


(b)

Figura A 36. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 11

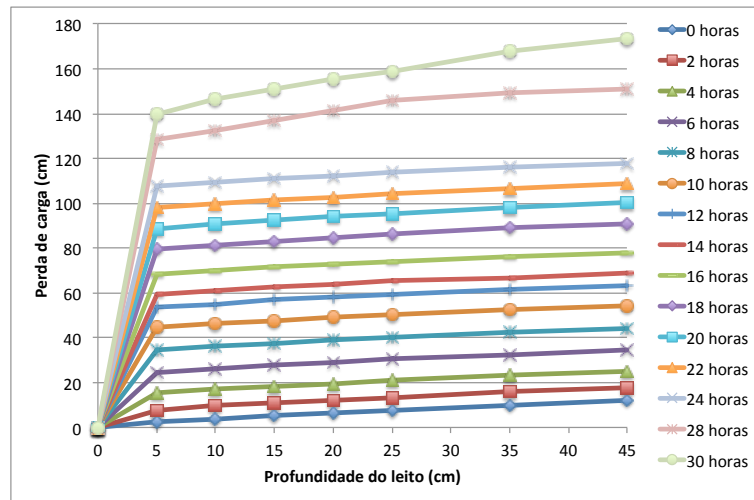


(a)

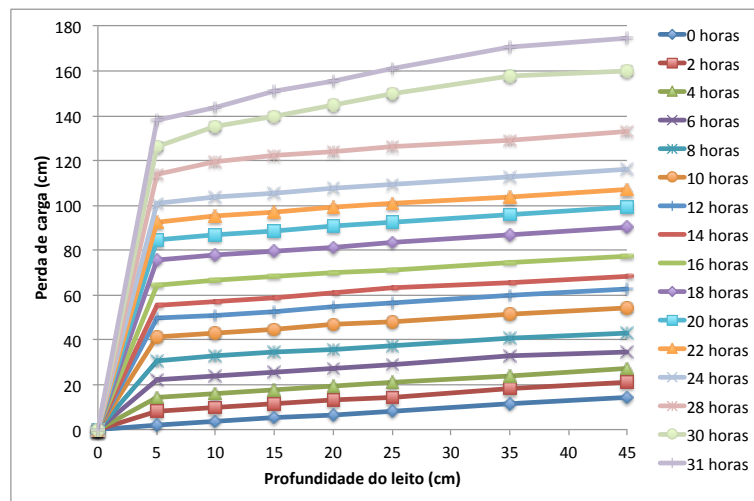


(b)

Figura A 37. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 11



(a)



(b)

Figura A 38. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 11

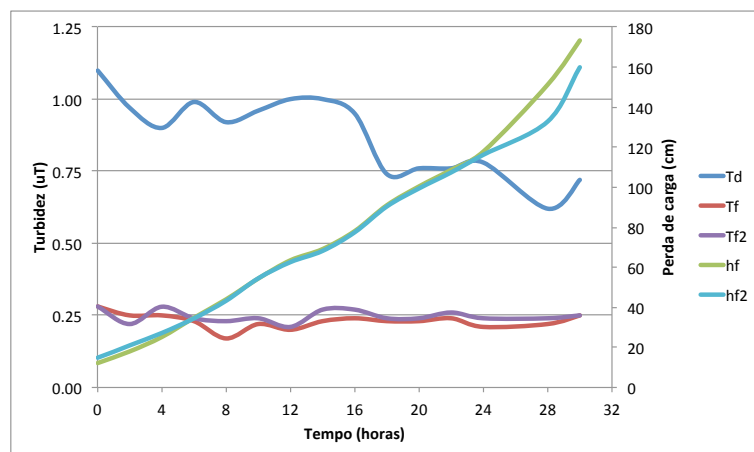


Figura A 39. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 11. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

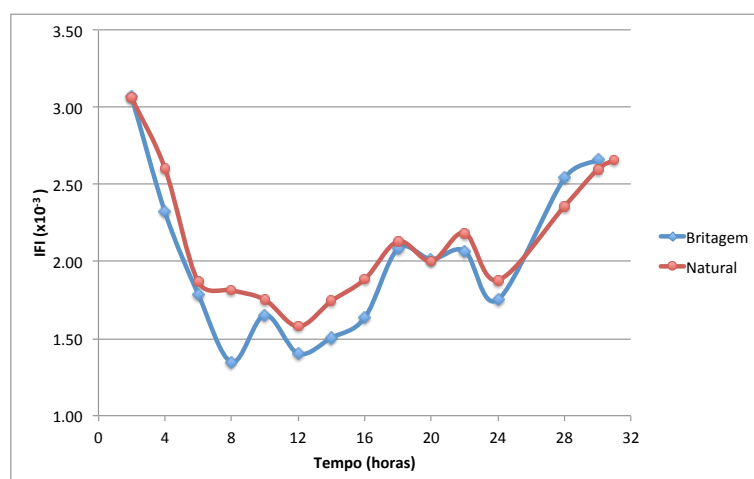
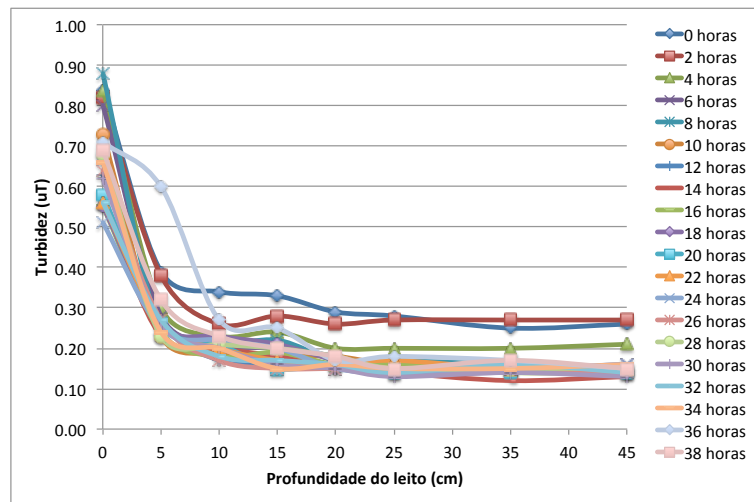
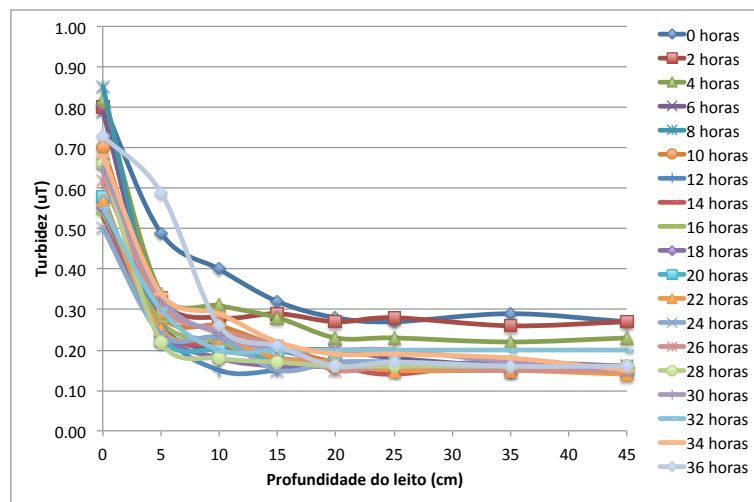


Figura A 40. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 11

- Carreira 12

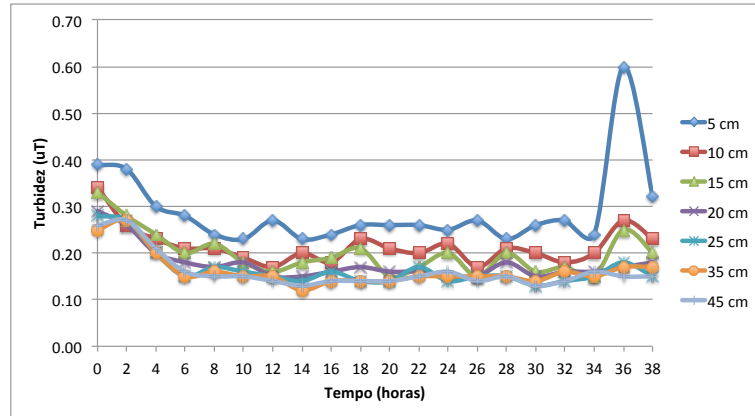


(a)

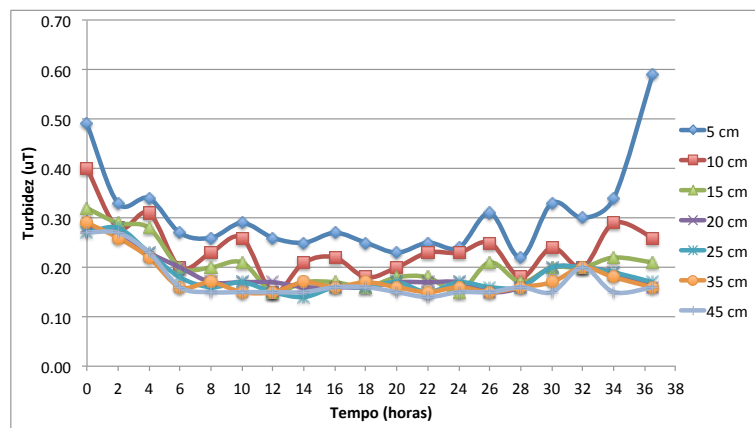


(b)

Figura A 41. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 12

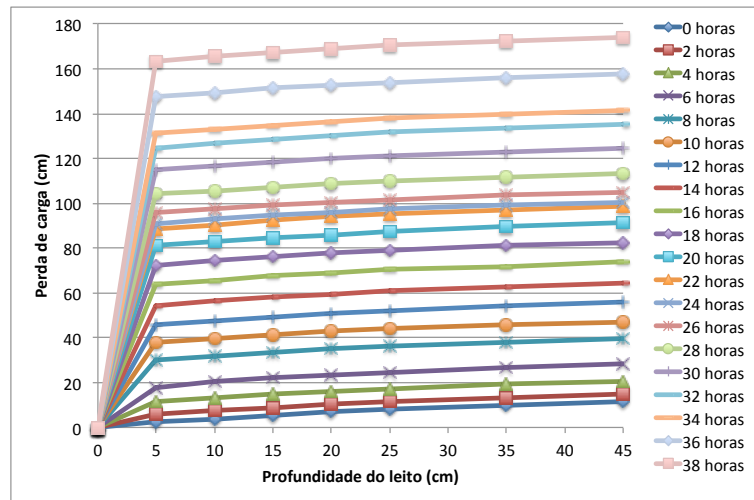


(a)

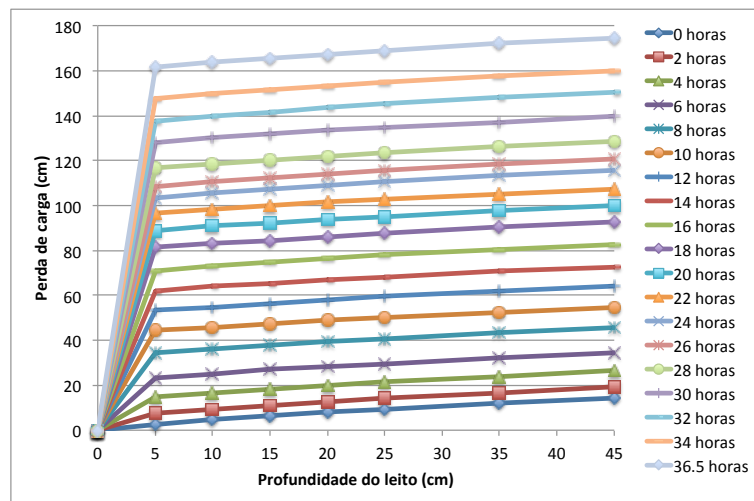


(b)

Figura A 42. Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração, areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 12



(a)



(b)

Figura A 43. Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos de areia de britagem (a) e de areia natural (b), Carreira 12

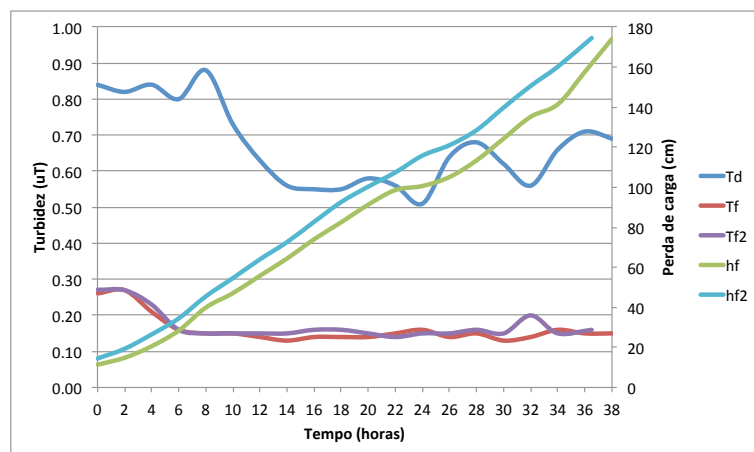


Figura A 44. Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração, Carreira 12. Td = turbidez da água decantada; Tf = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf2 = turbidez da água filtrada (areia natural); hf = perda de carga (areia de britagem); hf2 = perda de carga (areia natural)

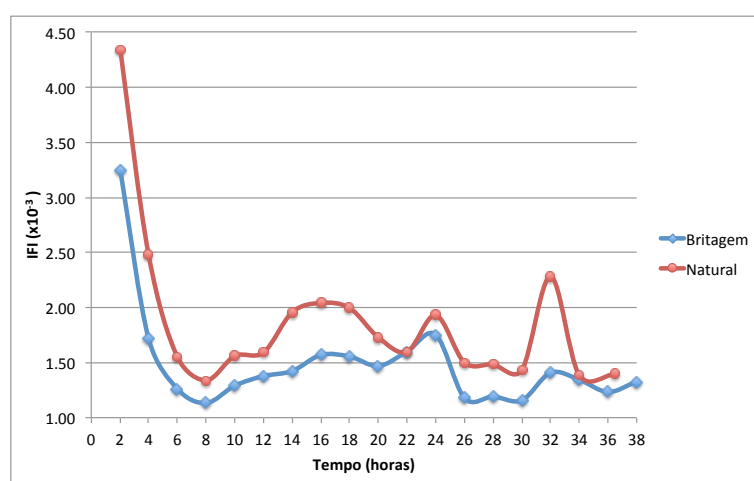


Figura A 45. Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, filtros com areia natural e de britagem, Carreira 12