

LUANA ALVES DOS SANTOS CORNÉLIO

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA POR FILTRAÇÃO RÁPIDA DESCENDENTE
COM USO DE AREIA DE BRITAGEM – REMOÇÃO DE TURBIDEZ E INDICADORES
BACTERIANOS**

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*.

Orientador: Rafael Kopschitz Xavier Bastos

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C814a
2021
Cornélio, Luana Alves dos Santos, 1992-
Avaliação do tratamento de água por filtração rápida
descendente com uso de areia de britagem - remoção de turbidez
e de indicadores bacterianos / Luana Alves dos Santos Cornélio.
– Viçosa, MG, 2021.

1 dissertação eletrônica (252 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Rafael Kopschitz Xavier Bastos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2021.

Referências bibliográficas: f. 136-142.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.124>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Água - Purificação. 2. Água - Purificação - Filtração.
3. Areia. 4. Água - Microbiologia - Indicadores. I. Bastos, Rafael
Kopschitz Xavier, 1958-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 628.162

LUANA ALVES DOS SANTOS CORNÉLIO

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA POR FILTRAÇÃO RÁPIDA
DESCENDENTE COM USO DE AREIA DE BRITAGEM – REMOÇÃO DE
TURBIDEZ E INDICADORES BACTERIANOS**

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: 12 de novembro de 2021.

Assentimento:



Luana Alves dos Santos Cornélio

Autora



Rafael Kopschitz Xavier Bastos

Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus, princípio e autor de todas as coisas, pelo amparo em todos os momentos.

À Virgem Maria, pela intercessão constante e por ser refúgio nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Paulo dos Santos e Marlene Alves de Freitas Santos, pela doação e apoio incondicionais.

Ao meu esposo, Mateus Gomes Cornélio, pelo amor, companheirismo, apoio e paciência.

Ao meu filho, Giovanni Alves dos Santos Cornélio, por me fazer redescobrir o sentido da vida e vencer o egoísmo.

Aos meus irmãos, Raiana Alves dos Santos e Samuel Alves dos Santos, e minha cunhada, Beatriz Gomes Cornélio, parceiros de todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa, por todas as oportunidades oferecidas desde a graduação.

Ao meu Professor – Orientador, Rafael Kopschitz Xavier Bastos, pelas oportunidades oferecidas, pelo apoio e cuidado em todos os momentos e pela orientação oferecida durante o desenvolvimento desse trabalho.

À Pedra Sul Mineração Ltda., ao professor Pedro K. X. Bastos, pelo fornecimento da areia de britagem.

A Bruno Moreno Ramos da Silva, pelo desenvolvimento da unidade de filtração piloto e pelo auxílio durante o desenvolvimento desse trabalho.

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

À DAG – UFV por ceder o espaço para a realização do experimento.

Aos técnicos do LCQA, Janderson Badim Bepler e Guilherme Mateus Bousada, pelo apoio nas análises e pela amizade.

Aos operadores da ETA UFV, pelo auxílio nas análises de qualidade de água e por todo apoio.

Aos amigos da ETA UFV e salinha da pós-graduação, especialmente Bárbara Porto, Bruno Silva, Paula Laranja, Vivian Cabral, João Pimenta, Thais Moreira e Tarcísio Santos, pelo companheirismo e troca de experiências.

Às amigas Maria Clara Bandeira Pinheiro e Ana Paula Assad de Carvalho, bolsistas de IC que auxiliaram no desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos da RCC Viçosa, especialmente os do MUR Viçosa, pela intercessão e cuidado para comigo nesse tempo de mestrado.

“Comece fazendo o que é necessário, então faça o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível.”
(São Francisco de Assis)

RESUMO

CORNÉLIO, Luana Alves dos Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2021. **Avaliação do tratamento de água por filtração rápida descendente com uso de areia de britagem – remoção de turbidez e de indicadores bacterianos.** Orientador: Rafael Kopschitz Xavier Bastos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o tratamento de água para consumo humano por meio da filtração rápida descendente com uso de areia de britagem em diferentes condições de coagulação e qualidade da água afluyente aos filtros. Ensaio em escala piloto foram realizados em duas unidades de filtração: uma com areia de britagem e a outra, como unidade de controle, com areia natural de rio (convencional). Ambos os leitos filtrantes foram preparados com granulometria e profundidade de acordo com o especificado em norma da ABNT para filtração rápida com areia natural. Os filtros foram operados simultaneamente com taxas de filtração de 180, 270 e 360 m³ m⁻² d⁻¹. Ao longo do período de fevereiro de 2019 a março de 2020 foram monitoradas 22 carreiras de filtração, as quais foram caracterizadas em termos de: (i) duração das carreiras; (ii) evolução das perdas de carga; (iii) remoção de turbidez; (iv) índices de filtrabilidade; e (v) remoção de protozoários e bactérias por meio do uso de indicadores microbiológicos. Além disso, foi avaliada a influência do potencial zeta da água decantada no desempenho das carreiras de filtração. Em geral, o filtro de areia de britagem teve desempenho análogo ao filtro de areia convencional em termos de duração da carreira de filtração, perda de carga e turbidez da água filtrada, mesmo em condições operacionais desfavoráveis: turbidez afluyente elevada, eventos de floração e taxa de filtração elevada. No período chuvoso, as carreiras de filtração foram mais longas que as do período de estiagem. Em relação a qualidade da água filtrada, os filtros produziram água filtrada com turbidez inferior a 0,50 uT durante a maior parte do tempo de operação. Além disso, os filtros comportaram-se de modo similar na remoção de microrganismos indicadores. Conclui-se que o uso de areia de britagem em filtros rápidos para o tratamento de água para consumo humano é viável como alternativa aos filtros de areia natural de rio, sem desvantagens em termos operacionais e de remoção de turbidez e de microrganismos.

Palavras-chave: Tratamento da água. Filtração rápida. Meio filtrante. Areia de britagem. Indicadores microbiológicos.

ABSTRACT

CORNÉLIO, Luana Alves dos Santos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, November, 2021. **Evaluation of drinking water treatment by rapid filtration using crushed rock sand – removal of turbidity and bacterial indicators.** Adviser: Rafael Kopschitz Xavier Bastos.

This work aimed at evaluating the treatment of drinking water under different conditions of coagulation and water quality by means of rapid downflow filtration with crushed rock sand. Pilot tests were performed using two filtration units: one with crushed rock sand and the other, as a control unit, with natural river sand (also named as conventional sand). The filter beds of both units were prepared with particle sizes and depth according to the requirements of Brazilian standards for rapid down flow sand filtration. Both filters were operated simultaneously with filtration rates of 180, 240 and 360 m³ m⁻² d⁻¹. From February 2019 to March 2020, 22 filter runs were monitored and characterized for: (i) filter run length; (ii) head losses development; (iii) turbidity removal; (iv) filterability indexes; and (v) removal of protozoa and bacteria using microbial indicators. Also, the influence of the zeta potential of the filters' influent (settled) water on the performance of the filtration runs was evaluated. In general, the crushed rock sand filter presented as a similar performance as the conventional sand filter in terms of filter run duration, head loss, and turbidity removal, even under unfavorable conditions: high influent water turbidity, algal bloom, and high filtration flow rate. Filter runs in the rainy season, were longer than those in the dry season. Both filters produced filtered water with turbidity below 0.50 NTU during most of the time. Further, the filters presented similar performance with regards to removal of microbial indicators. It is concluded that the use of crushed rock sand in rapid filters for drinking water treatment as an alternative to filters with natural river sand is feasible, without disadvantages, operational wise and in terms of turbidity and microorganisms removal efficiencies.

Keywords: Drinking water treatment. Rapid filtration. Filter bed media. Crushed rock sand. Microbiological indicators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxogramas dos sistemas de filtração direta.....	22
Figura 2 – Distribuição de dimensões das partículas presentes na água	25
Figura 3 – Ilustração esquemática da coagulação pelos mecanismos neutralização/adsorção de cargas e de varredura	30
Figura 4 – Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio	32
Figura 5 – Mecanismos de transporte na filtração da água em meio granular	33
Figura 6 - Interação entre as forças eletrostáticas e forças de Van der Waals	37
Figura 7. Perdas de carga ao longo do tempo de filtração e da profundidade do leito filtrante	38
Figura 8 – Escala de comparação visual: forma dos grãos relacionada aos valores de coeficiente de esfericidade	46
Figura 9 – Corte lateral do filtro piloto com medidas em cm.....	56
Figura 10 – Vista geral da unidade piloto.....	57
Figura 11 – Representação esquemática do arranjo experimental para os ensaios com a unidade piloto de filtros rápidos descendentes.....	58
Figura 12 – Presença de flocos na superfície do leito filtrante de areia convencional (carreira 2)	64
Figura 13 – Presença de flocos na superfície do leito filtrante de areia de britagem (carreira 2)	64
Figura 14 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 1	66
Figura 15 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 1	67
Figura 16 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 2	68
Figura 17 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 2	69
Figura 18 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 3	70
Figura 19 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 3	71

Figura 20 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 13	72
Figura 21 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 13	74
Figura 22 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 13	75
Figura 23– Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, carreira 1376	
Figura 24 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 6	79
Figura 25 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 11	80
Figura 26 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 6	81
Figura 27 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 11	82
Figura 28 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 6	83
Figura 29 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 11	84
Figura 30 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 6	86
Figura 31 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 11	87
Figura 32 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 8	90
Figura 33– Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 8	91
Figura 34 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 8	92
Figura 35 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 8	94

Figura 36 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 20, período chuvoso.....	96
Figura 37 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 20, período chuvoso.....	97
Figura 38 – Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração: (a) filtro de areia de britagem (b) filtro de areia convencional – Carreira 20, período chuvoso.....	98
Figura 39 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 20, período chuvoso.....	99
Figura 40 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 20, período chuvoso.....	100
Figura 41 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 14.....	101
Figura 42 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 14, período chuvoso.....	102
Figura 43 – Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração: (a) filtro de areia de britagem (b) filtro de areia convencional – Carreira 14, período chuvoso.....	103
Figura 44 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 14.....	104
Figura 45 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 14, período chuvoso.....	105
Figura 46 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 16.....	107
Figura 47 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 16.....	108
Figura 48 – Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração: (a) filtro de areia de britagem (b) filtro de areia convencional – Carreira 16.....	109
Figura 49 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 16.....	110
Figura 50 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 16.....	111
Figura 51 – Dose de coagulante em função da turbidez da água bruta e da concentração de algas na água decantada.....	112

Figura 52 – Efeitos da floração de algas na duração das carreiras de filtração, naturbidez da água filtrada e no IFI nos filtros de areia de britagem (a) e areia convencional (b).....	113
Figura 53 – Representação gráfica da estatística descritiva da remoção de EBA no período de estiagem de acordo com taxa de filtração.....	114
Figura 54 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 1, operada com $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	115
Figura 55 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 10, operada com $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	115
Figura 56 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 8, operada com $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	116
Figura 57 – Representação gráfica da estatística descritiva (<i>Boxplot</i>) da remoção de EBA no período chuvoso de acordo com taxa de filtração	116
Figura 58 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 18, operada com $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	117
Figura 59 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 20, operada com $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	118
Figura 60 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 16, operada com $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	118
Figura 61 – Remoção média e desvio-padrão de esporos de bactérias aeróbias nos filtros de areia e de areia de britagem para cada taxa de filtração ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$) nos períodos chuvoso e de estiagem.....	119
Figura 62 – Valores médios e desvio-padrão de remoção de coliformes totais nos filtros 1 e 2 para cada taxa de filtração aplicada (180 , 270 e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$) no período chuvoso e de estiagem.....	120
Figura 63 – Remoção de coliformes totais ao longo das carreiras de filtração: (a) carreira 13 ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); (b) carreira 6 ($270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); (c) carreira 9 ($360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$), período de estiagem	122
Figura 64 – Remoção de coliformes totais ao longo das carreiras de filtração (a) carreira 20 ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); (b) carreira 21 ($270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); (c) carreira 19 ($360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	123
Figura 65 – Turbidez média da água filtrada e potencial zeta (módulo) médio para as carreiras de filtração monitoradas	125

Figura 66 – Turbidez média da água filtrada e da água decantada nas carreiras de filtração dos filtros de areia convencional e de areia de britagem 128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites dos parâmetros de qualidade da água bruta para o tratamento por filtração lenta	21
Tabela 2 – Parâmetros de qualidade da água bruta para o tratamento por filtração direta.....	23
Tabela 3 – Parâmetros de qualidade da água bruta para o tratamento por dupla filtração	23
Tabela 4 – Parâmetros de qualidade da água para aplicação do tratamento por ciclo completo	24
Tabela 5 – Valores usuais do índice de trespassse	52
Tabela 6. Características granulométricas da camada suporte do filtro da unidade piloto	54
Tabela 7. Características granulométricas da areia de britagem e areia natural de rio (convencional)	55
Tabela 8. Composição química dos materiais empregados como leito filtrante	55
Tabela 9. Tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade dos leitos filtrantes.....	56
Tabela 10 – Turbidez da água filtrada nas carreiras operadas com taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, período de estiagem.	65
Tabela 11 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) para as carreiras operadas a taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, período de estiagem	77
Tabela 12 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) para carreiras operadas a taxa de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, período de estiagem.....	85
Tabela 13 – Tempo de duração das carreiras de filtração para carreiras operadas a taxa de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, período de estiagem.....	88
Tabela 14 – Turbidez da água filtrada para carreiras operadas a taxa de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, período de estiagem	89
Tabela 15 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) para carreiras operadas a taxa de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, período de estiagem.....	93
Tabela 16 – Resultados dos testes de correlação de Pearson entre valores de potencial zeta, turbidez da água filtrada e turbidez remanescente dos filtros de areia de britagem e areia convencional.....	123
Tabela 17 – Principais parâmetros avaliados nas carreiras de filtração para os filtros em escala piloto de areia de britagem e areia convencional	126
Tabela 18 – Produção de água em cada carreira de filtração	129

Tabela 19 – Variação do Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) nas carreiras de filtração	130
Tabela 20 – Remoção de esporos de bactérias nos filtros de areia de britagem e areia natural ao longo das carreiras de filtração	132
Tabela 21 – Remoção de coliformes totais nos filtros de areia de britagem e areia natural ao longo das carreiras de filtração	133

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1. Caracterização do Problema	17
1.2. Hipótese e objetivos.....	19
2. REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1. Técnicas de tratamento para clarificação da água.....	20
2.1.1. Filtração lenta	20
2.1.2. Filtração direta.....	21
2.1.3. Ciclo completo.....	23
2.2. Remoção de impurezas no processo de clarificação da água	24
2.2.1. Remoção de turbidez	25
2.2.2. Remoção de cor	26
2.2.3. Remoção de protozoários	27
2.3. Coagulação.....	28
2.3.1. Compressão da camada difusa.....	29
2.3.2. Adsorção e neutralização de cargas.....	29
2.3.3. Varredura	30
2.3.4. Adsorção e formação de pontes.....	30
2.3.5. Coagulação com sulfato de alumínio.....	31
2.4. Filtração	32
2.4.1. Mecanismos da filtração.....	33
2.4.2. Cinética da filtração rápida.....	38
2.4.3. Carreira de filtração	41
2.4.4. Limpeza dos filtros por retrolavagem.....	43
2.4.5. Características do meio filtrante	44
2.4.6. Índices de filtrabilidade	51

3. MATERIAL E MÉTODOS.....	53
3.1. Descrição da unidade experimental	53
3.1.1. Estação de tratamento de água da Universidade Federal de Viçosa (ETA UFV) 53	
3.1.2. Unidade piloto de filtros rápidos descendentes	53
3.1.3. Resumo do arranjo experimental.....	59
3.2. Avaliação da eficiência de filtração.....	60
3.3. Análises de qualidade da água	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1. Caracterização das carreiras de filtração no período de estiagem	62
4.1.1. Taxa de filtração de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	63
4.1.2. Taxa de filtração de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	77
4.1.3. Taxa de filtração de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	87
4.2. Caracterização das carreiras de filtração no período chuvoso.....	94
4.2.1. Taxa de filtração de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	95
4.2.2. Taxa de filtração de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	100
4.2.3. Taxa de filtração de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$	105
4.3. Análises microbiológicas	111
4.3.1. Influência da floração de algas no desempenho das carreiras de filtração	111
4.3.2. Remoção de esporos de bactérias aeróbias.....	113
4.3.3. Remoção de coliformes totais	120
4.4. Relação entre potencial zeta e remoção de turbidez	123
4.5. Análise conjunta da eficiência dos filtros	125
5. CONCLUSÕES.....	134
6. RECOMENDAÇÕES.....	135
7. REFERÊNCIAS	136

1. INTRODUÇÃO

1.1. Caracterização do Problema

Água tratada pode ser definida como aquela submetida a processos físicos, químicos ou à combinação destes, visando atender a um padrão de potabilidade (BRASIL, 2021). Dessa forma, a água submetida ao tratamento não deve oferecer riscos à saúde nem provocar rejeição ao consumo. A fim de atender a esses requisitos, fundamentalmente, o tratamento da água consiste no emprego de processos de clarificação e desinfecção, exceto em caso de contaminação por produtos químicos. Neste sentido, é importante destacar que a filtração é uma etapa fundamental do processo de clarificação das águas, além de cumprir importante papel na remoção de microrganismos patogênicos, com destaque para os cistos de protozoários.

A escolha da técnica de filtração a ser aplicada depende, essencialmente, da qualidade da água do manancial de captação e da vazão demandada para consumo. No caso de águas de mananciais superficiais, há duas técnicas principais de filtração: filtração lenta e filtração rápida, a segunda em ciclo completo ou por filtração direta. A filtração resulta da combinação entre mecanismos físicos e físico-químicos de transporte das partículas em suspensão na água e de aderência ao material do leito filtrante e depende tanto da qualidade da água, como das características do leito filtrante.

Nos filtros de estações de tratamento de água (ETA), é comum o uso de areia natural de rio como material constituinte do leito filtrante. Ao longo da operação dos filtros ocorre a retenção de partículas no leito, o que resulta na colmatação deste e consequente redução da capacidade de filtração, ou ainda na produção de água com turbidez acima do padrão de potabilidade. Dessa forma, para que a filtração se desenvolva adequadamente, é necessária a limpeza periódica dos leitos filtrantes para remoção das partículas aderidas.

Normalmente, a limpeza dos filtros é realizada por meio da retrolavagem, com uso de água tratada. A água para lavagem é usualmente armazenada em reservatório elevado e inserida nos filtros no sentido ascensional, promovendo expansão do leito filtrante e desprendimento das impurezas aderidas ao material do leito. Vale ressaltar que a realização desse processo de forma adequada pode garantir maior tempo de vida útil ao material filtrante. Entretanto, após anos de operação é necessária a troca dos leitos filtrantes devido ao desgaste do material, o que representa custo elevado.

Areia natural de rio é amplamente utilizada em obras de engenharia, o que tem elevado o custo deste material em decorrência do progressivo esgotamento das jazidas, em especial, devido à extração próxima aos locais de consumo (BARBOSA *et al.*, 2008). Além disso, a extração da areia provoca diversos impactos ambientais, entre os quais a geração de efluentes com excesso de particulados e alteração no nível de lençóis freáticos devido à construção de cavas inundadas (QUARESMA, 2009). Outros aspectos relevantes são as agressões às calhas dos rios e desequilíbrios causados na dinâmica fluvial devido à redefinição dos limites das margens dos rios, com mudanças no padrão de fluxo e transporte dos sedimentos e, por conseguinte, impactos nos ecossistemas aquáticos (OLIVEIRA e MELLO, 2007).

De fato, a areia natural possui grande importância na área de construção civil e, face à crescente escassez desse recurso, a busca, por materiais alternativos é mais que pertinente. Alguns estudos avaliando o emprego de resíduos de mineração na área de construção civil têm sido realizados, com bons resultados, como a experiência de substituição de areia natural por areia de britagem em argamassas e concretos (BASTOS *et al.*, 2006). A areia de britagem, ou areia industrial, é um agregado miúdo resultante da britagem de rochas. Proveniente de atividade mineradora, geralmente licenciada, este material é mais uniforme, não possui impurezas, além de ter custo de produção e aquisição bem menores em comparação à areia natural de rio.

Resultados recentes obtidos por Silva (2018) demonstraram o potencial do emprego da areia de britagem como material filtrante em filtros rápidos descendentes para o tratamento de água para consumo humano. Em comparação com o leito filtrante de areia de rio, destaca-se o desempenho similar no cumprimento dos padrões de turbidez da água filtrada, desenvolvimento da perda de carga e duração das carreiras de filtração. Além disso, o uso de areia de britagem possui vantagens econômicas e ambientais. No entanto, algumas questões ainda necessitam ser exploradas em maior profundidade, tais como: (i) comportamento das carreiras de filtração no tratamento de águas com diferentes características de qualidade; e (iii) desempenho dos filtros na remoção de bactérias e protozoários.

1.2. Hipótese e objetivos

Hipótese

Filtros rápidos de fluxo descendente com leito filtrante de areia de britagem podem ser empregados em estações de tratamento da água para consumo humano em substituição aos filtros convencionais com leito de areia natural, sem perdas na eficiência operacional, qualidade microbiológica, física e química da água tratada em diferentes condições de coagulação e qualidade da água afluente aos filtros.

Objetivos

Objetivo geral

Avaliar, em escala piloto, o uso da areia de britagem em leito filtrante de filtro rápido de escoamento descendente para tratamento da água para consumo humano em diferentes condições de coagulação e qualidade da água afluente aos filtros.

Objetivos específicos

Avaliar comparativamente o desempenho de filtros com leito filtrante de areia de britagem e de areia convencional em relação a:

- (i) evolução das perdas de carga;
- (ii) duração das carreiras de filtração;
- (iii) remoção da turbidez;
- (iv) remoção de protozoários e bactérias por meio do uso de indicadores microbiológicos (coliformes totais e esporos de bactérias aeróbias);
- (v) influência do potencial zeta da água decantada no desempenho das carreiras de filtração;
- (vi) índices de filtrabilidade – Índice de Ives e Índice de Hudson.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Técnicas de tratamento para clarificação da água

O tratamento da água para consumo humano consiste em um conjunto de processos e operações com a finalidade de adequar as características físicas, químicas e biológicas da água ao padrão que não ofereça riscos à saúde humana (DI BERNARDO, 2009). A água bruta proveniente de manancial superficial deve atender aos requisitos de uso definidos pela Resolução CONAMA nº357/2005 (BRASIL, 2005), enquanto a água tratada deve atender ao padrão de potabilidade definido na Portaria MS nº 888 / 2021 (BRASIL, 2021).

Para o atendimento do padrão de potabilidade, a água bruta é submetida a processos de clarificação seguidos de desinfecção. De acordo com as etapas de clarificação aplicadas, as técnicas de tratamento da água podem ser divididas em dois grupos: sem coagulação e com coagulação. Filtração lenta e separação por membranas são exemplos de tecnologias sem coagulação; por sua vez, filtração direta, dupla filtração e tratamento em ciclo completo são as principais tecnologias com emprego de coagulação química (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN; 2017).

Em ambos os grupos de técnicas de tratamento da água, a filtração é uma etapa crítica e fundamental do processo de clarificação, pois constitui a última barreira de retenção de impurezas. Entre as impurezas presentes na água destacam-se as partículas coloidais e substâncias em solução responsáveis, respectivamente, pela turbidez e cor da água, além dos protozoários patogênicos.

2.1.1. Filtração lenta

O termo filtração lento é devido às baixas taxas de filtração aplicadas. De acordo com a NBR 12216 (ABNT, 1992), na ausência de ensaios em filtro piloto, a taxa máxima aplicada, para filtros lentos, deve ser de 6 m³/m².d. Nessa técnica, não há emprego de coagulação química e as impurezas da água bruta são removidas por mecanismos físico-químicos e biológicos, com ação, principalmente, superficial (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Não há consenso em relação aos limites de aplicabilidade da filtração lenta e suas variantes (MURTHA, 1999), porém, os limites apresentados na literatura demonstram que a tecnologia é aplicada ao tratamento de águas com valores baixos de turbidez e de cor. Na Tabela 1 são apresentados os

limites dos parâmetros de qualidade da água reportados por Di Bernardo; Dantas e Voltan (2017) e CEPIS (2004) para o tratamento por filtração lenta.

Tabela 1 – Qualidade da água bruta adequada ao tratamento por filtração lenta

Parâmetro	CEPIS, 2004		Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017		
	100%*	90%*	100%*	95%*	90%*
Turbidez (uT)	≤ 50	≤ 20	< 10	-	< 3
Cor verdadeira (uC)	-	≤ 15	< 10	< 5	-
Algas (UPA/mL)	-	≤ 250	< 500	-	< 100
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	-	≤ 1000	< 1000	-	< 100
<i>E. coli</i> (NMP/100mL)	-	-	< 500	-	< 100

*do tempo; uT: unidades de turbidez; uC: unidades de cor; UPA: unidades padrão de área; NMP: número mais provável.

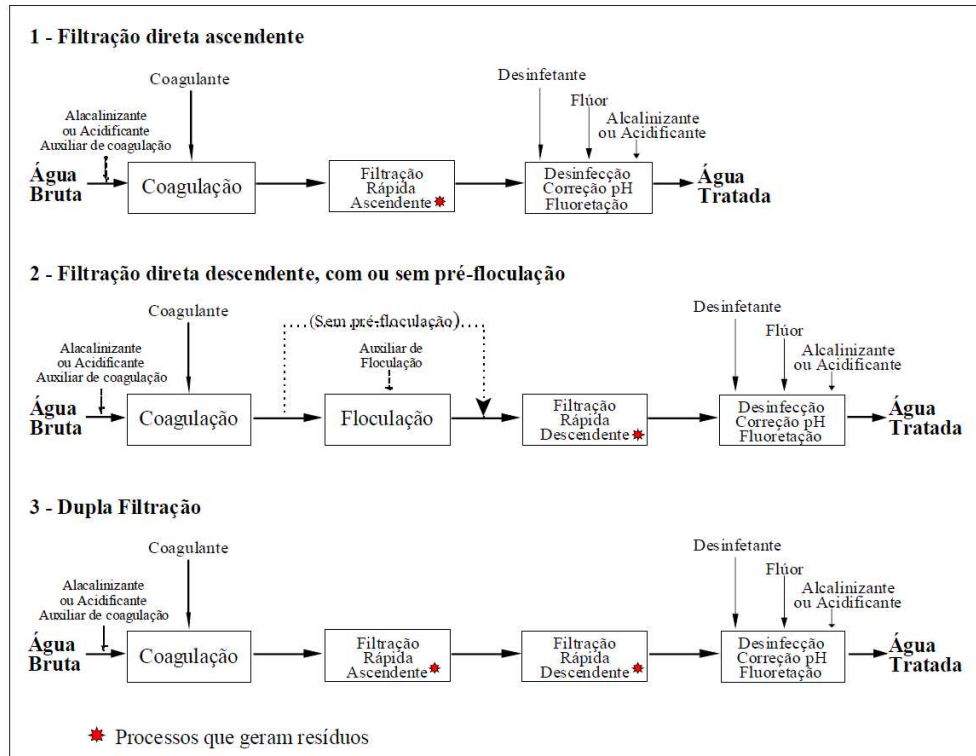
Fonte: Adaptado CEPIS (2004); Di Bernardo e Dantas (2005).

Até o final do século passado houve grande evolução da tecnologia de filtração lenta, incluindo a utilização de mantas sintéticas e o uso de carvão ativado granular. Esses avanços possibilitaram a aplicação de maiores taxas de filtração do que as habitualmente utilizadas. Outra variante é a chamada filtração em múltiplas etapas (FiME), em que unidades de pré-tratamento com leito de pedregulho e areia grossa, antecedentes aos filtros lentos, são utilizadas para remoção de material grosseiro (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

2.1.2. Filtração direta

A filtração direta é uma técnica de tratamento na qual a água bruta coagulada, ou coagulada e floculada, é direcionada a filtros descendentes (camada simples ou dupla) ou ascendentes (camada simples), e a filtração ocorre em profundidade. Essa técnica de tratamento é também aplicável ao tratamento de águas de baixa turbidez e cor (DI BERNARDO e SABOGAL PAZ, 2008) e apresenta três configurações básicas, como pode ser observado na .

Figura 1 – Fluxogramas dos sistemas de filtração direta



Fonte: Di Bernardo *et al.* (2003).

A dupla filtração caracteriza-se pela filtração direta ascendente como pré-tratamento para a filtração direta descendente. Visa à produção de água com menor turbidez (inferior a 10 uT) na filtração ascendente, de modo propiciar o emprego da filtração direta para águas de pior qualidade. Recomendações de qualidade da água para o tratamento por filtração direta descendente e ascendente são apresentados na Tabela 2, e por dupla filtração na Tabela 3.

Tabela 2 – Qualidade da água bruta adequada ao tratamento por filtração direta

Parâmetro	Filtração direta descendente		Filtração direta ascendente	
	100%*	95%*	100%*	95%*
Turbidez (uT)	< 100	< 25	≤ 50	≤ 25
Cor verdadeira (uC)	< 50	< 25	≤ 50	≤ 25
Algas (UPA/mL)	< 1000	< 500	≤ 500	
C.T. (NMP/100 mL)	< 2500	< 500	≤ 1000	
<i>E. coli</i> (NMP/100mL)	< 500	< 100	≤ 1000	

*do tempo; uT: unidades de turbidez; uC: unidades de cor; UPA: unidades padrão de área; NMP: número mais provável; CT: coliformes totais.

Fonte: Adaptado Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017).

Tabela 3 – Qualidade da água bruta adequada ao tratamento por dupla filtração

Parâmetro	Dupla filtração com filtração ascendente em areia grossa			Dupla filtração com filtração ascendente em pedregulho		
	100%*	95%*	90%*	100%*	95%*	90%*
Turbidez (uT)	≤ 100	75	≤ 50	≤ 150	≤ 75	≤ 50
Cor verdadeira (uC)	≤ 100	75	≤ 50	≤ 100	≤ 75	≤ 50
Algas (UPA/mL)	≤ 7500	≤ 5000	≤ 2000	≤ 7500	≤ 5000	≤ 2500
C.T. (NMP/100 mL)	≤ 10000			≤ 5000		
<i>E. coli</i> (NMP/100mL)	≤ 2500			≤ 1500		

*do tempo; uT: unidades de turbidez; uC: unidades de cor; UPA: unidades padrão de área; NMP: número mais provável; CT: coliformes totais.

Fonte: Adaptado Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017).

2.1.3. Ciclo completo

O tratamento em ciclo completo é indicado para águas superficiais com elevados valores de turbidez e cor. Essa tecnologia é composta pelas etapas de coagulação, floculação, sedimentação ou flotação e filtração rápida. Na unidade de mistura rápida, a água bruta é coagulada por meio da adição de sais de alumínio ou ferro, por vezes complementada pela adição de polímeros; segue para a unidade de floculação na qual é submetida à agitação lenta, de modo que as partículas desestabilizadas possam se aglomerar até atingir tamanho e massa específica suficientes para serem removidas por sedimentação nos decantadores, ou por flotação nos flotadores. Por fim, a água é filtrada em unidades de escoamento ascendente ou descendente contendo material de granulometria específica (DI BERNARDO; DANTAS;

VOLTAN, 2017). A Tabela 4 apresenta limites recomendados de qualidade da água para aplicação de tratamento por ciclo completo.

Tabela 4 – Parâmetros de qualidade da água para aplicação do tratamento por ciclo completo

Parâmetro de qualidade	Limite de qualidade	
	90% do tempo	100% do tempo
Turbidez (uT)	≤ 1000	≤ 1500
Cor verdadeira (uC)	≤ 150	-

uT: unidades de turbidez; uC: unidades de cor

Fonte: Adaptado CEPIS (2004).

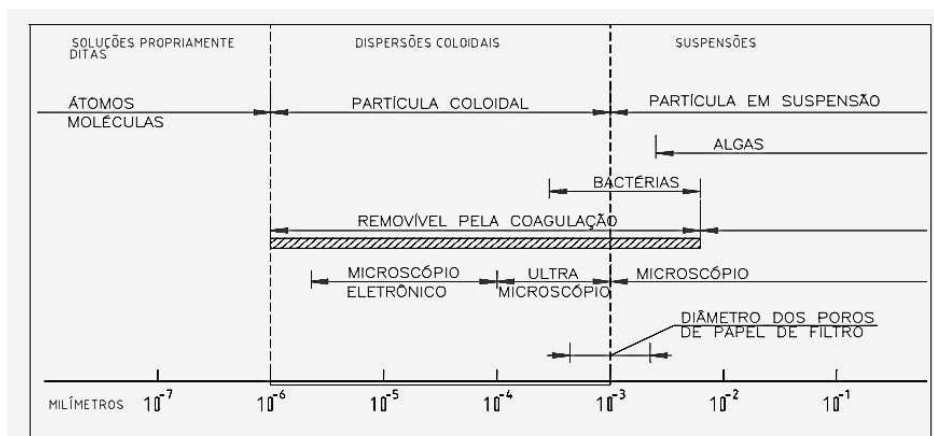
Segundo Libânio (2016), a escolha da tecnologia de tratamento da água segundo o critério das normas brasileiras de qualidade do manancial superficial (Resolução CONAMA nº 357 de 2005) e de projeto de estações de tratamento de água (NBR 12216 de 1992) converge, em grande parte, para o ciclo completo.

2.2. Remoção de impurezas no processo de clarificação da água

Em mananciais superficiais estão presentes diversas impurezas, como substâncias húmicas, coloides, microrganismos. Essas partículas/substâncias possuem carga superficial negativa, o que dificulta a sedimentação natural das mesmas devido à força eletrostática de repulsão. As partículas e substâncias tendem a ficar suspensas, em dispersão coloidal ou em solução no meio líquido ocasionando turbidez e cor nas águas. Para a remoção dessas impurezas são necessárias alterações em suas características, por meio da coagulação, floculação, sedimentação ou flotação e filtração (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

O comportamento das partículas dispersas e, conseqüentemente, o método de remoção dessas, estão diretamente ligados às suas dimensões. A apresenta as dimensões de partículas presentes em soluções, dispersões coloidais e suspensões.

Figura 2 – Distribuição de dimensões das partículas presentes na água



Fonte: CEPIS (1973)

Partículas em suspensão apresentam tamanhos entre 10^{-3} a 10^{-1} mm, e podem ser removidas por meio de sedimentação ou flotação com separação das fases líquidas e sólida em tempo praticável. Dispersões coloidais incluem partículas de tamanhos entre 10^{-6} a 10^{-3} que, devido ao seu tamanho reduzido, levariam tempo demasiadamente longo para sedimentação. Para promover a união das partículas coloidais, promove-se a desestabilização das mesmas no processo de coagulação (ver item 2.3), seguida pela formação de flocos no processo de floculação.

A seguir são apresentados os mecanismos de remoção de turbidez, cor e protozoários no processo de clarificação do tratamento de água.

2.2.1. Remoção de turbidez

A turbidez é um parâmetro físico de qualidade da água, que expressa uma propriedade ótica relacionada à interação entre a luz e as partículas em suspensão / dispersão coloidal no meio líquido. É um parâmetro de mensuração analítica extremamente simples, de baixo custo e altamente informativo em termos de presença e remoção de material particulado na água. Por isso, é a variável mais comumente utilizada no controle operacional de processos de clarificação da água (decantação e filtração).

As partículas coloidais possuem tamanho diminuto, da ordem de nanômetros a micrômetros, e como dito, não sedimentam em tempos de detenção praticáveis. Além disso, na maioria das vezes, os coloides apresentam carga superficial negativa, de modo que as forças eletrostáticas de repulsão apresentam-se mais intensas que as forças de atração de van der

Waals. Naturalmente, essas partículas não se aglomeram e, assim, é difícil a remoção das mesmas nos processos de decantação ou filtração. Para que as partículas suspensas se aglomerem é preciso que sejam desestabilizadas., o que é obtido por meio da coagulação.

Em geral, a coagulação ocorre com a adição de sais de ferro ou alumínio à água bruta que, de acordo com as condições de pH e dose do coagulante, formam diferentes espécies químicas. O processo de coagulação pode ocorrer por diferentes mecanismos, dos quais a adsorção-neutralização de cargas e a varredura são tidos como os principais. O mecanismo de coagulação predominante é, também, determinado pela turbidez da água.

Para águas com elevada turbidez, o mecanismo predominante de coagulação é a varredura. A ocorrência deste mecanismo se dá com aplicação de altas doses de coagulante em pH próximo a neutralidade favorecendo a formação de flocos com boas características de sedimentabilidade. No entanto, para águas com baixa turbidez predomina o mecanismo de adsorção-neutralização de cargas. Neste caso, são aplicadas doses mais baixas de coagulante em pH também mais baixo com objetivo de desestabilizar as partículas e formar flocos menores com boas características de aderência no leito filtrante (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). O mecanismo de coagulação principal deve ser adequado à qualidade da água bruta e à técnica de tratamento aplicada. De toda maneira, a coagulação deve ocorrer de forma a favorecer mecanismos de aderência ao leito filtrante e, por conseguinte, a remoção de partículas nos filtros.

2.2.2. Remoção de cor

A cor da água é causada, frequentemente, pela presença de compostos orgânicos de origem vegetal em decomposição, definidos como substâncias húmicas. A classificação das substâncias húmicas pode ser realizada como proposto por Oden (1919, apud MENDES, 1989):

- (i) ácido húmico: fração solúvel em hidróxido de sódio e insolúvel em ácidos minerais e álcool;
- (ii) ácido fúlvico: fração solúvel em ácidos minerais e hidróxido de sódio;
- (iii) ácido himatomelânico: fração solúvel em hidróxido de sódio e álcool e insolúvel em ácidos minerais; e
- (iv) humina: resíduo da separação dos compostos anteriores – insolúvel em água e hidróxido de sódio.

Estudo conduzido por Black e Christman (1963) demonstrou que as concentrações dos compostos causadores de cor em águas naturais podem variar entre 15 e 50 mg/L, sendo que o ácido fúlvico é o principal constituinte (87%) das substâncias húmicas presentes na água, seguido pelo ácido himalomelâmico (11%) e o ácido húmico (2%).

As substâncias húmicas também podem apresentar carga superficial negativa, devida à presença dos grupos carboxílicos e fenólicos em suas estruturas (EDWARDS; ARMITHARAJAH, 1985). Assim, a remoção da cor ocorre de maneira semelhante à remoção de turbidez. Na região de adsorção- neutralização de cargas., há formação de complexos ou precipitados (humato ou fulvato de alumínio – ou ferro) resultantes da reação das substâncias húmicas com as espécies hidrolisadas do coagulante. Na região em que predomina o mecanismo de varredura, as substâncias húmicas ou os complexos formados por elas podem ser adsorvidas ao hidróxido precipitado. Essas substâncias também podem ser removidas com o uso de polímeros catiônicos, a partir da formação de compostos polímero-húmicos (DEMPSEY *et al.*, 1984; EDWARDS; ARMITHARAJAH, 1985).

2.2.3. Remoção de protozoários

A etapa de clarificação tem também por objetivo a remoção de protozoários patogênicos, como a *Giardia* e o *Cryptosporidium*. Esses organismos apresentam ciclos biológicos complexos, que incluem estágios de reprodução no organismo do hospedeiro e a formação de cápsulas protetoras - os cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium*, que os tornam persistentes no meio ambiente (são excretados nas fezes de humanos ou animais) e resistentes à ação de desinfetantes (BASTOS *et al.*, 2009). A ingestão de poucos cistos ou oocistos, via ingestão de água ou alimentos contaminados, pode causar infecção (FRANCO, 2007).

Os cistos de protozoários apresentam características, como tamanho e carga elétrica superficial, que os tornam passíveis de remoção pelos mecanismos envolvidos na clarificação da água: coagulação, floculação, decantação e filtração. Os cistos de *Giardia* tem dimensões aproximadas de 8 a 12 μm e os oocistos de *Cryptosporidium*, 4 a 6 μm e ambos possuem carga superficial negativa (HEADD *et al.*, 2016). Dessa forma, a remoção das formas encistadas dos protozoários se dá de modo semelhante à remoção de turbidez.

A coagulação é um processo fundamental para a remoção de protozoários. Estudo conduzido por Dugan (2001) demonstrou que em condições de coagulação otimizada é possível

atingir remoção de *Cryptosporidium* na sedimentação e na filtração, respectivamente, de até 1,3 e 3 unidades logarítmicas (log).

As análises de protozoários na água são complexas e de alto custo e, por isso, tem sido proposto o uso de indicadores de remoção desses organismos, como, por exemplo, a turbidez e esporos de bactérias aeróbias (DUGAN *et al.*, 2001; HEADD *et al.*, 2016).

Em diversas normas de qualidade da água para consumo humano são estabelecidos limites de turbidez da água filtrada como indicadores da qualidade parasitológica da água. A norma estadunidense estabelece padrão de 0,3 uT para filtração em meio granular com vistas ao controle de *Cryptosporidium* (USEPA, 2006). O padrão brasileiro é de 0,5 uT (BRASIL, 2021), que é um limite voltado ao controle de *Giardia* (BASTOS *et al.*, 2009).

Os esporos de bactérias aeróbias compartilham com os cistos de protozoários muitas semelhanças em termos de biologia, persistência no ambiente e mecanismos de remoção/resistência nos/aos processos de tratamento da água, são de análise simples e barata e altamente prevalentes no ambiente; por tudo isso são considerados potenciais indicadores da remoção de protozoários no tratamento da água (HEADD *et al.*, 2016). Esporos de *Bacillus subtilis* têm sido sugeridos como indicadores de remoção de protozoários; possuem tamanho médio de aproximadamente 1,2 μm , enquanto oocistos de *Cryptosporidium* possuem 4 - 6 μm , e apresentam potencial zeta bastante similar ao dos oocistos em faixa de pH de 6,5 - 8 (MUHAMMAD *et al.*, 2009). O uso de esporos com este propósito é reconhecido na própria regulamentação dos EUA de qualidade da água para consumo humano, no entendimento que podem fornecer estimativas conservadoras e boa correlação com a remoção de oocistos de *Cryptosporidium* em estações de tratamento de água de ciclo completo (USEPA, 2006).

2.3. Coagulação

A desestabilização (neutralização) das cargas das partículas pode ser realizada por meio da adição de sais de alumínio ou de ferro a água bruta, em um processo com duração de segundos, em que são formadas espécies hidrolisadas de ferro ou alumínio com carga positiva. No tratamento da água esse processo se dá na unidade de mistura rápida e é denominado coagulação.

A coagulação resulta de um fenômeno químico e um físico. O fenômeno químico consiste nas reações do coagulante com formação de espécies hidrolisadas com carga positiva e, subsequentemente, de hidróxido neutro, precipitado; depende das características da água

(pH, alcalinidade, turbidez, cor, entre outras) e da dose do coagulante. O fenômeno físico é caracterizado pelo transporte das espécies hidrolisadas propiciando o contato com as impurezas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Mas a coagulação depende ainda de outra variável muito importante: o potencial zeta (PZ), que expressa, grosso modo, a carga superficial das partículas em suspensão / dispersão coloidal; ou seja, é uma medida da magnitude da repulsão ou da atração entre partículas, isto é, da dispersão, agregação ou floculação de suspensões e dispersões coloidais.

A coagulação é o resultado individual ou combinado de quatro mecanismos: (i) compressão da dupla camada elétrica; (ii) adsorção-neutralização de cargas; (iii) varredura; e (iv) adsorção e formação de pontes (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

2.3.1. Compressão da camada difusa

Em torno de uma partícula com carga elétrica negativa, forma-se uma camada elétrica dupla: (i) a “camada compacta” na região da interface sólido-líquido, onde há acúmulo de íons positivos; (ii) a “camada difusa”, que engloba a camada compacta, onde se encontram dispersos íons positivos e negativos. A presença do colóide na água forma assim um potencial elétrico que diminui exponencial com a distância da partícula, sendo que medida do potencial na fronteira das camadas compacta e difusa, é chamada Potencial zeta.

Um sistema coloidal pode então ser desestabilizado pela adição de íons com carga contrária às das partículas coloidais, ou seja, pela introdução de eletrólitos positivos. A introdução desses eletrólitos causa aumento na densidade de carga da camada difusa e reduz a zona de influência das partículas; ou seja, a coagulação se dá pela compressão da dupla camada difusa. Quando há concentração elevada de íons positivos e negativos na água, há incremento de íons na camada difusa, que para se manter neutra passa a ter um volume reduzido e as forças de Van der Waals tornam-se dominantes, eliminando a estabilização eletrostática (DI BERNARDO et. al, 2003).

2.3.2. Adsorção e neutralização de cargas

Uma dispersão coloidal é desestabilizada por meio de interações entre coagulante-colóide, coagulante-solvente e colóide-solvente (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Os cátions provenientes do coagulante servem para neutralizar a carga negativa do

coloide, sendo que isso ocorre antes da formação de um floco visível. Após esse processo, são formados microflocos de carga positiva na faixa ácida (devido a adsorção de H^+), que podem cobrir as partículas coloidais e neutralizá-las (ECKENFELDER, 1989).

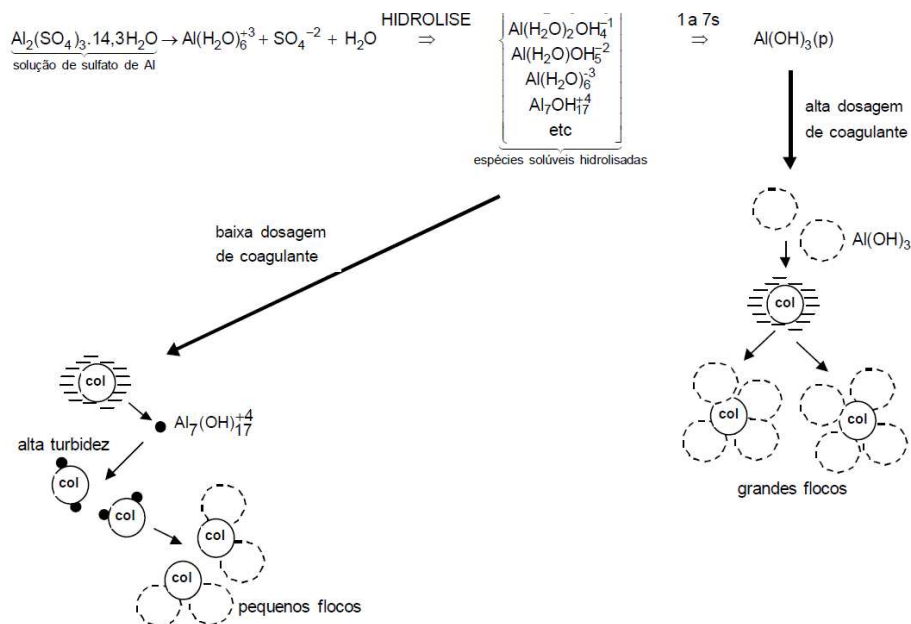
2.3.3. Varredura

De acordo com a quantidade de coagulante (dose elevada) aplicada e o pH da mistura (elevado), pode ocorrer a formação de precipitados de hidróxido de alumínio ou ferro, que serão os responsáveis pelo mecanismo chamado de varredura (DI BERNARDO et. al, 2003).

Neste caso, os flocos obtidos são maiores e sedimentam ou flutam com maior facilidade que os obtidos por adsorção e neutralização de cargas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Na floculação os coloides são aglomerados com o floco hidratado do óxido.

Segundo Amirtharajah e Mills (1982) os mecanismos de coagulação por adsorção e neutralização de cargas ou por varredura podem ocorrer pelos caminhos ilustrados na Figura 3.

Figura 3 – Ilustração esquemática da coagulação pelos mecanismos neutralização/adsorção de cargas e de varredura



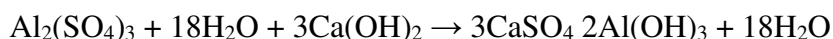
Fonte: adaptado Amirtharajah e Mills (1982)

2.3.4. Adsorção e formação de pontes

A coagulação pode ser realizada por adição de polieletrólitos catiônicos e aniônicos. A teoria para explicar o comportamento dos polímeros coagulantes é baseada na adsorção dos mesmos à superfície dos coloides, seguida pela redução da carga ou pelo deslocamento das partículas pelos polímeros (LYCLEMA, 1978).

2.3.5. Coagulação com sulfato de alumínio

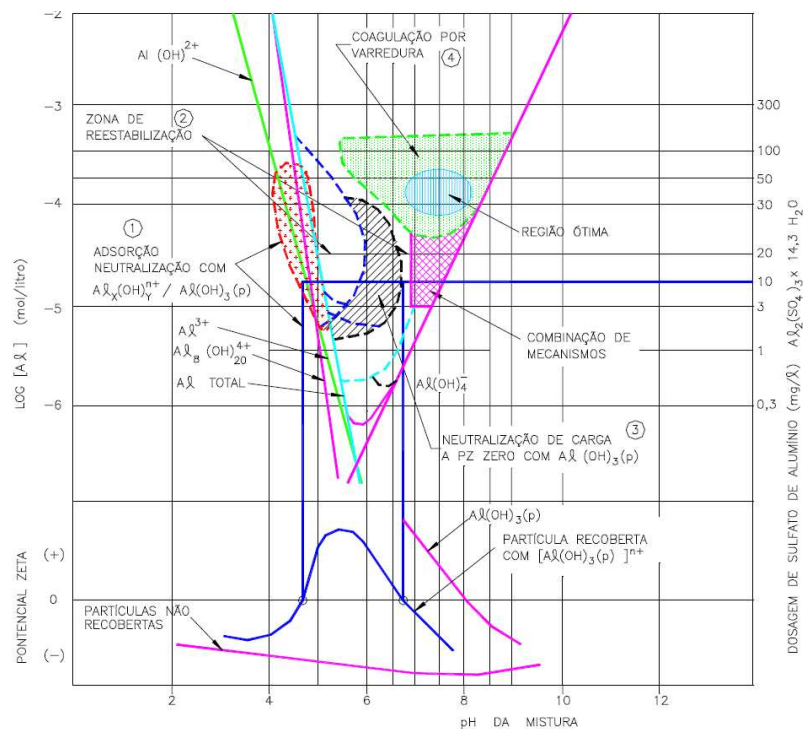
O coagulante mais utilizado para o tratamento da água é o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$). Quando este coagulante é adicionado na água, de forma simplificada, ocorre a seguinte reação (ECKENFELDER, 1989):



A formação de precipitado ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ocorre em condições de dose elevada de coagulante e pH entre 6 e 8. Reações intermediárias liberam íons H^+ , promovendo consumo da alcalinidade natural da água.

O diagrama de coagulação desenvolvido por Amirtharajah e Mills (1982) (Figura 4) possibilita identificar as condições de pH e dose de coagulante para desestabilização das partículas coloidais por meio dos diferentes mecanismos de coagulação. O diagrama é constituído por quatro regiões, que se caracterizam por pares de dose de coagulante e pH da mistura. Na primeira região (dose e pH baixos) ocorre a neutralização de cargas das partículas coloidais pelas espécies hidrolisadas positivas de alumínio, que se adsorvem à superfície dos coloides. Na segunda região, com doses crescentes, ocorre a reestabilização das cargas dos coloides, por excesso de cargas positivas. A terceira região é conhecida como ‘corona’ e o principal mecanismo de coagulação é a neutralização de carga pelo hidróxido de alumínio positivo. Por fim, na quarta região (ampla região de pH e dose elevados) há formação predominante do hidróxido neutro, precipitado, ao qual partículas coloidais são “aprimionadas”, caracterizando o mecanismo de varredura.

Figura 4 – Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio



Fonte: adaptado Amirtharajah e Mills (1982).

2.4. Filtração

A filtração tem como função a remoção de sólidos suspensos, coloides e microrganismos presentes na água. Na maioria das técnicas de tratamento da água é a etapa que precede a desinfecção; assim, é a última barreira do processo de clarificação e, eventualmente da remoção de patógenos resistentes à cloração, como o *Cryptosporidium*.

A filtração pode ser classificada em relação as taxas de filtração (filtração lenta e rápida), ao sentido do fluxo (ascendente e descendente) e às características do leito filtrante (camada simples ou multicamadas). De acordo com a NBR 12219 / 1992, a taxa máxima de filtração para filtros lentos é $6 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$; para filtração rápida: (i) $180 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ no caso de filtros descendentes de camada simples (areia) e $360 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ para camada dupla (areia e antracito); (ii) $120 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ para filtração ascendente.

A ação da filtração rápida pode se dar em superfície ou em profundidade. Quando há ação em profundidade as partículas são retidas ao longo do leito filtrante, em contraposição à ação superficial, na qual a retenção de impurezas ocorre, essencialmente, no topo do leito


filtrante (cerca de 15 cm). A primeira pode ser entendida como uma filtração em estágios, na qual inicialmente trabalham as subcamadas superficiais e, à medida que uma subcamada é colmatada, as forças de cisalhamento devidas ao escoamento da água superam as de aderência, ocorrendo, assim desprendimento e arraste das partículas para a próxima subcamada. Dessa forma, o incremento de perda de carga ocorre de maneira gradual ao longo do tempo e da profundidade do leito filtrante. Preferencialmente, a filtração rápida deve ser realizada com ação em profundidade, o que pode resultar em carreiras de filtração maiores com elevada produção de água (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

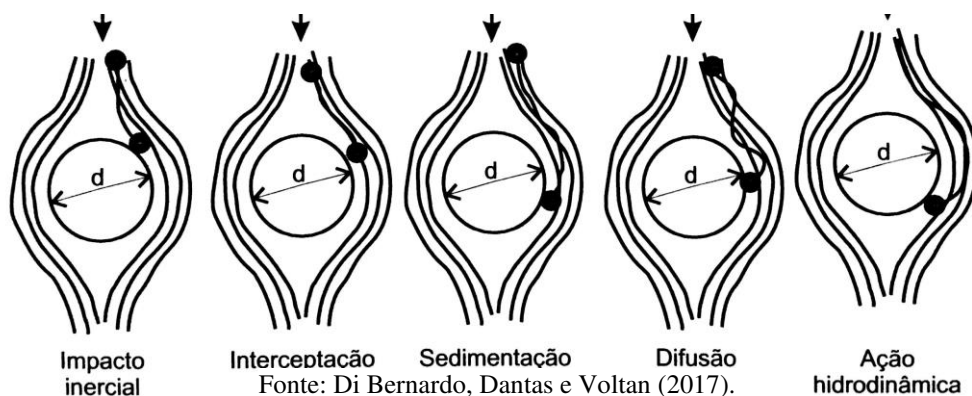
2.4.1. Mecanismos da filtração

Em filtros rápidos a ação de coar é pouco importante devido ao fato de que dimensões das partículas a serem removidas são menores que os poros do leito filtrante. Há então predominância de mecanismos físicos e físico-químicos de transporte e aderência, que dependem das características das partículas, da água e do meio filtrante, da taxa de filtração e do método de operação dos filtros (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

2.4.1.1. *Mecanismos de Transporte*

Segundo Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017) os mecanismos de transporte são responsáveis pela condução de partículas suspensas na água para a proximidade da superfície dos materiais granulares do leito filtrante. Os principais mecanismos de transporte descritos por Ives (1975) são: (i) impacto inercial; (ii) ação hidrodinâmica; (iii) interceptação; (iv) sedimentação; e (v) difusão como apresentado na .

Figura 5 – Mecanismos de transporte na filtração da água em meio granular 



É importante ressaltar que um ou mais dos mecanismos citados podem ocorrer simultaneamente durante a filtração rápida. A importância desses mecanismos vai depender das características das partículas, do leito filtrante e do escoamento (LIBÂNIO, 2016). Os mecanismos de transporte são apresentados com mais detalhes a seguir.

(i) Impacto inercial

Ao longo do escoamento, as linhas de fluxo de corrente divergem na proximidade dos grãos para desviar dos obstáculos físicos. Porém, se as partículas tiverem quantidade suficiente de energia continuam sua trajetória até atingirem a superfície dos grãos. Quanto maiores a velocidade de aproximação, o tamanho e a massa específica das partículas e menor a viscosidade da água e o tamanho dos grãos, mais eficiente é o processo. Esse mecanismo é mais importante na filtração de ar e pouco relevante na filtração de água (IVES, 1975).

(ii) Interceptação

As partículas movem-se ao longo das linhas de corrente. Para partículas com massa específica próxima à da água ocorre retenção das mesmas quando a distância da superfície do grão em relação a linha de fluxo é inferior a metade do tamanho das partículas. A partir da década de 1970 constatou-se que a interceptação não é um mecanismo de transporte independente, resulta da difusão e sedimentação (IVES, 1975).

(iii) Sedimentação

Partículas com tamanho e densidade relativa suficiente para sedimentar nos vazios intersticiais pode se depositar sobre os grãos; particularmente em regiões nas quais a velocidade de escoamento é pequena (regiões próximas aos grãos) Ives (1975). Esse mecanismo é mais importante para partículas maiores que 1 μm .

(iv) Difusão

O mecanismo de difusão é importante para partículas menores que 1 μm (YAO *et al.*, 1971; IVES, 1975). Dá-se pelo movimento browniano, movimento aleatório de partículas relativamente pequenas suspensas / em dispersão coloidal, como consequência de choques com moléculas ou átomos presentes no líquido. O fenômeno é mais intenso conforme o aumento da

energia termodinâmica e diminuição da viscosidade da água (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

(v) Ação hidrodinâmica

A remoção de partículas de maiores dimensões, aproximadamente 10 μm , tem sido atribuída à ação hidrodinâmica. Esse mecanismo pode ser explicado quando se considera o escoamento nos poros do leito filtrante como laminar. Neste caso, uma partícula suspensa na água está submetida a velocidades tangenciais diferentes na direção perpendicular ao escoamento. As velocidades são maiores no centro do poro e aproximadamente iguais a zero na superfície do grão. Assim, as diferenças entre as velocidades podem fazer a partícula girar dando origem a uma força que a conduz à superfície do grão (região de menor velocidade). A ação hidrodinâmica está relacionada ao tamanho da partícula, forma e massa específica da mesma e condições de escoamento (IVES, 1975).

2.4.1.2. Mecanismos de aderência

Os mecanismos de aderência ocorrem quando as partículas estão próximas aos grãos do meio filtrante. A adesão das partículas pode ocorrer diretamente no grão ou em outras partículas já aderidas. Ao se ligar à uma superfície, a partícula, está sujeita a duas forças (TOREGAS, 1983): fixação cisalhamento.

A aderência é influenciada pelas dimensões das partículas, dos grãos, dos vazios intergranulares e das distâncias nas quais o mecanismo é atuante. Os leitos filtrantes, geralmente, são constituídos por areia de diâmetro médio de 500 μm e os vazios intergranulares tem dimensões que variam entre 35 a 50 μm , com distâncias entre os grãos e as partículas próximas a 1 μm . As partículas coloidais, por sua vez, possuem dimensões que variam 0,01 a 10 μm . Fica evidente que, na filtração rápida em profundidade, a ação de coar não exerce influência significativa, pois os vazios podem chegar a dimensões 100 a 1000 vezes maiores que as partículas a serem retidas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). A aderência pode ser atribuída à: (i) interação entre as forças eletrostáticas e de Van der Waals; e (ii) interação superficial de origem química.

(i) Interação entre as forças eletrostáticas e de Van der Waals

A desestabilização adequada das partículas é fundamental para a aderência ao material filtrante, devido ao fato que os grãos do meio filtrante, quando submersos em água, apresentam carga superficial negativa. A interação entre as forças eletrostáticas de repulsão e a de atração de Van der Waals na filtração é ilustrada pela 6 para três situações diferentes: (i) partícula de argila estabilizada; (ii) partícula de argila com carga positiva (reestabilização); e (iii) partícula com carga neutralizada (ponto isoelétrico).

No primeiro caso, não há aderência da partícula devido a barreira de energia existente entre os grãos do meio filtrante e as partículas. As cargas superficiais das partículas e do material filtrante são de mesmo sinal, assim, a força resultante é de repulsão. O segundo caso é caracterizado pelo excesso de carga positiva; no início da filtração há elevada aderência das partículas, entretanto, quando a superfície dos grãos se torna positiva há redução da eficiência, pois as partículas suspensas também têm carga positiva. O terceiro caso apresenta a configuração ideal da filtração, pois as partículas encontram-se neutralizadas favorecendo a retenção das mesmas no material filtrante.

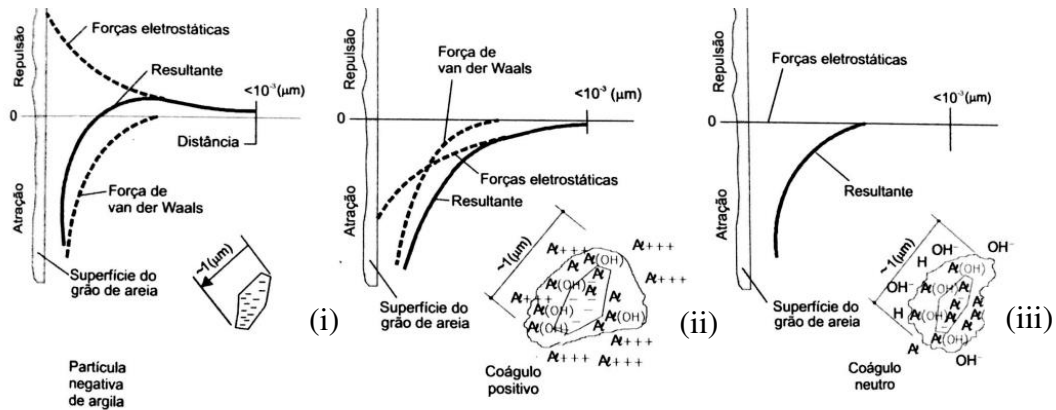
(ii) Interação entre as forças eletrostáticas e de Van der Waals

A desestabilização adequada das partículas é fundamental para a aderência das mesmas no material filtrante, devido ao fato que os grãos do meio filtrante, quando submersos em água, apresentam carga superficial negativa. A interação entre as forças eletrostáticas de repulsão e a de atração de Van der Waals na filtração é ilustrada pela para três situações diferentes: (i) partícula de argila estabilizada; (ii) partícula de argila com carga positiva (reestabilização); e (iii) partícula com carga neutralizada (ponto isoelétrico).

No primeiro caso, não há aderência da partícula devido a barreira de energia existente entre os grãos do meio filtrante e as partículas. As cargas superficiais das partículas e do material filtrante são iguais, assim, a força resultante é de repulsão. O segundo caso é caracterizado pelo excesso de carga positiva. No início da filtração há elevada aderência das partículas, entretanto, quando a superfície dos grãos se torna positiva há redução da eficiência, pois as partículas suspensas também têm carga positiva. O terceiro caso apresenta a

configuração ideal da filtração, pois as partículas encontram-se neutralizadas favorecendo a retenção das mesmas no material filtrante.

Figura 6 - Interação entre as forças eletrostáticas e forças de Van der Waals



Fonte: Di Bernardo; Dantas e Voltan (2017).

(iii) Interação superficial de origem química

Em algumas situações, as forças químicas podem ser superiores às eletrostáticas. Assim, a aderência das partículas coloidais em suspensão pode ocorrer por ligações de hidrogênio, troca iônica e adsorção mútua. A ocorrência desse mecanismo associa-se ao uso de polímeros como coagulantes. Quando esses coagulantes são adicionados à água formam ligações entre as partículas e os grãos do material filtrante (IVES e CLEASBY, 1972).

No processo de filtração, a adsorção mútua pode ser considerada a interação química mais importante. As partículas previamente retidas nos grãos podem estar ligadas a espécies hidrolisadas de alumínio ou ferro, ou, até mesmo, a moléculas de polímeros, promovendo a adsorção de outras partículas de impurezas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

2.4.1.3. Mecanismos de desprendimento

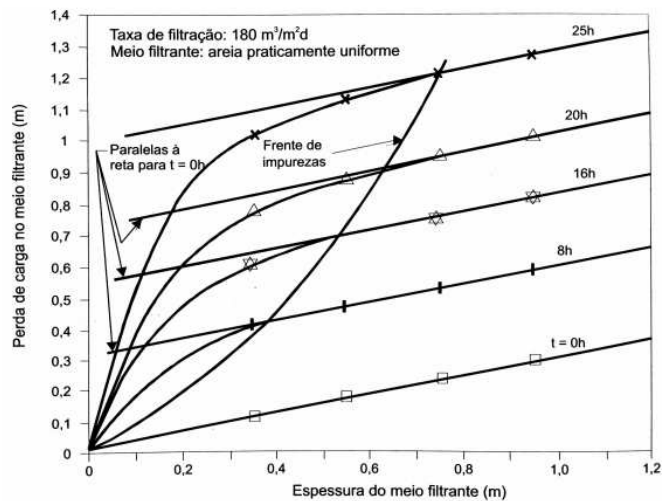
Ao decorrer da filtração as partículas são retidas na superfície dos grãos do material filtrante e acumulam-se nos espaços intersticiais. Isso provoca estreitamento da seção de escoamento e consequente aumento da força cisalhante. Quando as forças de cisalhamento superam as forças de aderência ocorre o transporte das partículas para camadas mais profundas

do leito (AMIRTHARAJAH, 1988). O arraste das partículas através do leito filtrante pode ocorrer até o aparecimento das mesmas na água filtrada, o que caracteriza o trespasse (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

2.4.2. Cinética da filtração rápida

A remoção de impurezas durante a filtração ocorre, como já mencionado, por mecanismos de transporte e aderência. As partículas vão sendo retidas nas subcamadas do leito filtrante, de modo que, estas vão ao longo do tempo exaurindo, sequencialmente, sua capacidade de retenção (BASTOS, R. *et al.*, 2006). O acúmulo de partículas nos vazios intergranulares provoca o estreitamento dos mesmos e, conseqüentemente, aumento da velocidade intersticial e da força de cisalhamento o que resulta no desprendimento das partículas aderidas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). As partículas desprendidas são arrastadas para as subcamadas inferiores, dessa forma, a filtração ocorre em profundidade e há o incremento da perda de carga ao longo do tempo e da profundidade do leito filtrante conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Perdas de carga ao longo do tempo de filtração e da profundidade do leito filtrante



Fonte: Di Bernardo; Dantas e Voltan (2017)

Atualmente, os efeitos dos mecanismos de transporte, aderência e desprendimento são explicados pela teoria das trajetórias e pela teoria fenomenológica. A teoria fenomenológica ou macroscópica descreve a taxa de deposição das partículas em função do tempo de filtração e

profundidade do leito filtrante a partir de um balanço de massa. Já a teoria das trajetórias descreve a dinâmica de retenção de partículas no meio filtrante considerando cada grão de material filtrante como um coletor individual (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

Iwasaki (1973) foi um dos primeiros autores a propor um modelo para representar a cinética da filtração. Segundo o autor, a taxa de variação da concentração das partículas ao longo da espessura do leito filtrante é proporcional à concentração pontual em um dado instante de tempo de acordo com a Equação 1.

$$\frac{\partial C}{\partial L} = -\lambda C \quad (1)$$

Em que,

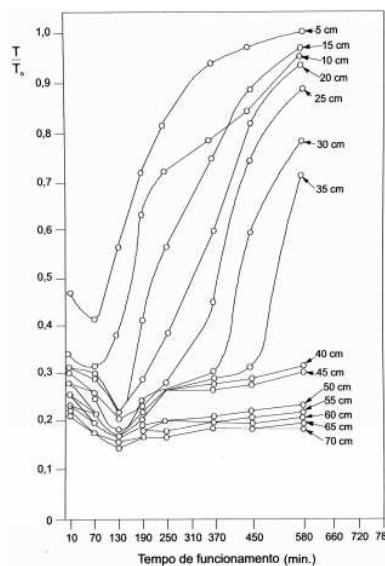
C = concentração de sólidos (volume/volume)

L = espessura do leito filtrante

λ = coeficiente de filtração

Ao integrar a Equação 1, observa-se que o decaimento da concentração de sólidos ao longo do leito filtrante é exponencial. Pode-se expressar a ação de filtração em profundidade por meio da fração de turbidez remanescente ao longo do tempo e da profundidade dos filtros. Na Figura 8 pode se observar o efeito do amadurecimento dos filtros ao longo do qual há ganho de eficiência dos filtros e produção de água filtrada com menor turbidez. Ao longo do tempo as camadas superficiais do leito vão sendo saturadas sucessivamente, de modo que a remoção de partículas começa a ocorrer nas camadas inferiores.

Figura 8 - Variação da turbidez remanescente (T) em relação a turbidez inicial (T₀) ao longo da carreira de filtração



Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017)

O acúmulo de sólidos nos vazios intergranulares provoca o aumento da velocidade intersticial, o que gera o incremento de perda de carga ao longo da carreira de filtração. Distingue-se na filtração dois tipos de perda de carga: (i) laminar e (ii) turbulenta (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). A perda de carga turbulenta ocorre pela passagem da água por tubulações, peças especiais e sistema de drenagem. A perda de carga laminar, por sua vez, consiste nas perdas de carga resultantes da passagem da água no meio filtrante limpo e na camada suporte. Essa depende das características do leito filtrante, da viscosidade da água, da taxa de filtração aplicada e da perda de carga por colmatação. Pode ser estimada a partir da fórmula de Kozeny-Carman (Equação 2).

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

Em que,

H = perda de carga do meio filtrante;

ν = viscosidade cinemática da água;

g = aceleração da gravidade;

v_w = velocidade da água;

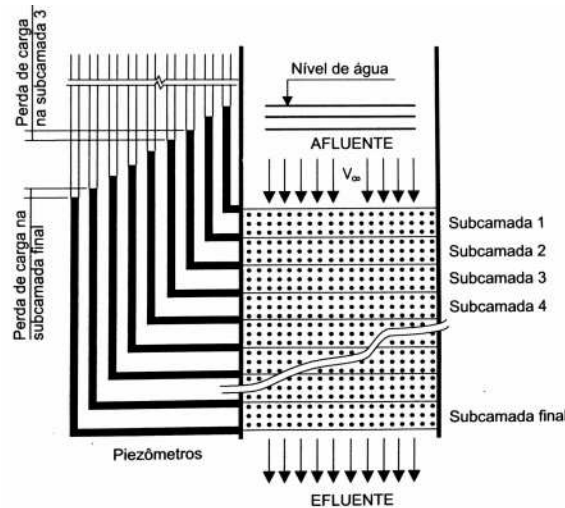
ε_0 = porosidade do meio filtrante;

L = espessura do leito filtrante;

s = superfície específica dos grãos de areia.

Na prática, a determinação da perda de cargas em leitos filtrantes pode ser realizada por meio da leitura do nível de piezômetros instalados ao longo da profundidade do leito. O esquema desse tipo de prática é representado na Figura 9.

Figura 9 - Representação da leitura do nível de piezômetros

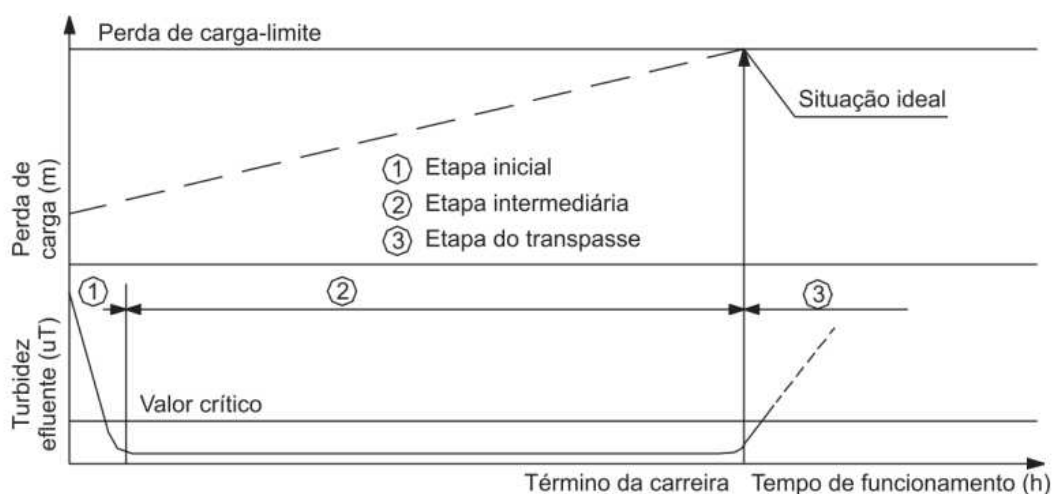


Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017).

2.4.3. Carreira de filtração

A carreira de filtração é definida como o tempo transcorrido entre duas limpezas consecutivas de um filtro, sendo determinado pelo esgotamento da carga hidráulica disponível ou pela ocorrência do trespasse. O primeiro caso, caracteriza o encerramento da carreira de filtração devido a carga hidráulica disponível ser inferior à necessária para vencer as perdas de carga (CLEASBY *et al.*, 1963). O trespasse deve-se ao aumento da velocidade intersticial nos poros do leito filtrante que pode promover o arraste das partículas retidas até a água filtrada, provocando a elevação da turbidez do efluente (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). A ocorrência simultânea do início do trespasse e o esgotamento da carga hidráulica representariam a situação ideal para o fim de uma carreira de filtração, como pode ser observado na Figura 10. Porém, esses processos dependem das características da água afluyente e condições de operação dos filtros e, geralmente, não ocorrerão ao mesmo tempo.

Figura 10 – Etapas da filtração com caracterização da perda de carga e trespasse

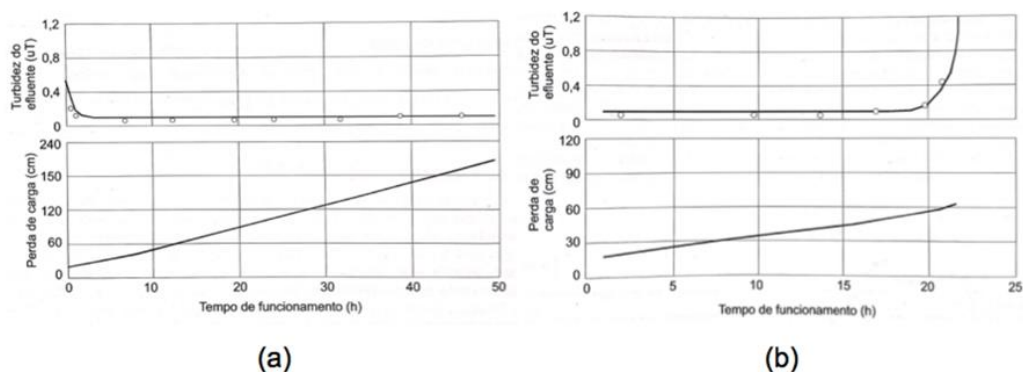


Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017).

Conforme observado na Figura 10, a carreira de filtração caracteriza-se por três etapas sequenciais: (i) etapa inicial ou de amadurecimento do leito filtrante, na qual a água produzida possui valores de turbidez mais elevados, que decrescem rapidamente; (ii) etapa intermediária na qual os valores de turbidez são baixos e estáveis; e (iii) trespasse e/ou perda de carga-limite, caracterizando o fim da carreira de filtração. A duração da carreira de filtração está ligada ao tipo de floco formado na coagulação e floculação, à taxa de filtração aplicada, ao método de operação do filtro e à retrolavagem (CEPIS, 2004).

Quando a turbidez da água bruta é baixa e a coagulação é realizada com predomínio do mecanismo de adsorção e neutralização de carga há formação de flocos resistentes com boa capacidade de aderência ao leito filtrante. Dessa forma, os flocos são mais resistentes às forças de cisalhamento e conseqüentemente favorecem um maior incremento de perda de carga, a carreira seria encerrada pelo esgotamento da carga hidráulica disponível (Figura 11 a). Por outro lado, em águas de maior turbidez com coagulação realizada, predominantemente, pelo mecanismo de varredura há formação de flocos mais frágeis, com menor capacidade de aderência e, portanto, mais propensos ao trespasse. Nesse caso há menor incremento de perda de carga ao longo da carreira de filtração e a ocorrência de trespasse é mais provável (Figura 11 b).

Figura 11 – Comportamento da turbidez e perda de carga ao longo da duração das carreiras de filtração



Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017).

2.4.4. Limpeza dos filtros por retrolavagem

Ao término da carreira de filtração, geralmente, os filtros rápidos são limpos por meio de retrolavagem, que consiste na aplicação de água tratada nas unidades filtrantes no sentido ascensional, com vazão capaz de promover a expansão adequada do leito filtrante para remoção das partículas retidas no mesmo (RICHTER e AZEVEDO NETTO, 1991). A limpeza inadequada dos filtros pode acarretar problemas diversos, tais como: desenvolvimento de bolas de lodo no interior do leito, menores volumes de água produzidos por carreira de filtração, produção de água filtrada de menor qualidade e aumento da perda de carga ao longo do leito filtrante (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

No processo de retrolavagem, a expansão do leito filtrante deve ser suficiente para que haja desprendimento do material retido no filtro. De acordo com a NBR 12216 (ABNT, 1992), a velocidade ascensional da água deve promover a expansão do leito na ordem de 20 a 30%. O tempo para lavagem dos filtros deve ser suficiente para remoção satisfatória das impurezas retidas no leito e consumir o menor volume de água, o tempo mínimo de retrolavagem deve ser de 10 min e a velocidade ascensional não deve ser inferior a 0,60 m/s (ABNT, 1992).

A retrolavagem é um processo que consome elevado volume de água tratada, segundo Heller e Pádua (2006) cerca de 2 a 5% do volume captado. Dessa forma, o controle operacional adequado das ETAs é fundamental, pois promove maiores carreiras de filtração e, conseqüentemente, a limpeza dos filtros será realizada entre intervalos de tempo maiores. A redução do consumo de água pode se dar também pelo emprego de lavagem com água e ar.

2.4.5. Características do meio filtrante

A eficiência da filtração está relacionada, de forma interdependente, às características da água afluyente aos filtros, às características do meio filtrante e às condições hidráulicas e modo de operação dos filtros (taxa de filtração, sentido de fluxo). No caso de ETAs nas quais é empregada a técnica de ciclo completo utilizam-se, em geral, filtros rápidos de camada simples (areia) ou camada dupla (areia e antracito). As características mais relevantes dos leitos filtrantes são apresentadas a seguir.

2.4.5.1. *Espessura do leito filtrante*

A espessura do leito filtrante está relacionada: (i) à granulometria do material filtrante; (ii) ao sentido do escoamento da água nos filtros; e (iii) à técnica de filtração aplicada.

Em filtros rápidos descendentes de camada simples de areia, dada a distribuição das camadas do leito filtrante, a remoção de impurezas ocorre, principalmente, nas camadas superficiais, mais finas, do leito filtrante. Assim, pouco adiantaria espessuras maiores que a recomendação mínima de norma: 0,45 m (ABNT, 1992). Por outro lado, a previsão de leito filtrante de maior espessura na filtração ascendente é necessária para prevenir o trespasse, pois, neste caso, a filtração se filtração ocorre em profundidade, no sentido da granulometria mais grossa para a mais fina.

2.4.5.2. *Tamanho e distribuição dos grãos*

Leitos filtrantes com granulometria mais fina, em geral, provocam carreiras de filtração mais curtas, com encerramento determinado pelo incremento de perda de carga. Por outro lado, em leitos filtrantes constituídos por grãos de maior diâmetro, as carreiras de filtração podem ser mais longas, mas com maior propensão ao trespasse.

Entre as características granulométricas dos leitos filtrantes, destacam-se o tamanho efetivo e o coeficiente de desuniformidade.

O tamanho efetivo (D_{10}) corresponde ao diâmetro da malha da peneira pela qual passa 10%, ou fica retida 90%, da massa do material filtrante, ou seja, expressa quão grossa ou fina é a granulometria. Como já referido, devido às lavagens no sentido ascensional, o leito filtrante se acomoda no sentido descendente da menor para a granulometria. Isso favorece a remoção superficial das partículas, porém, promove incremento de perda de carga mais intenso e,

consequentemente, carreiras de filtração mais curtas. Para filtros rápidos, de acordo com a NBR 12216 (ABNT, 1992), a camada filtrante deve apresentar tamanho efetivo entre 0,45 e 0,55 mm.

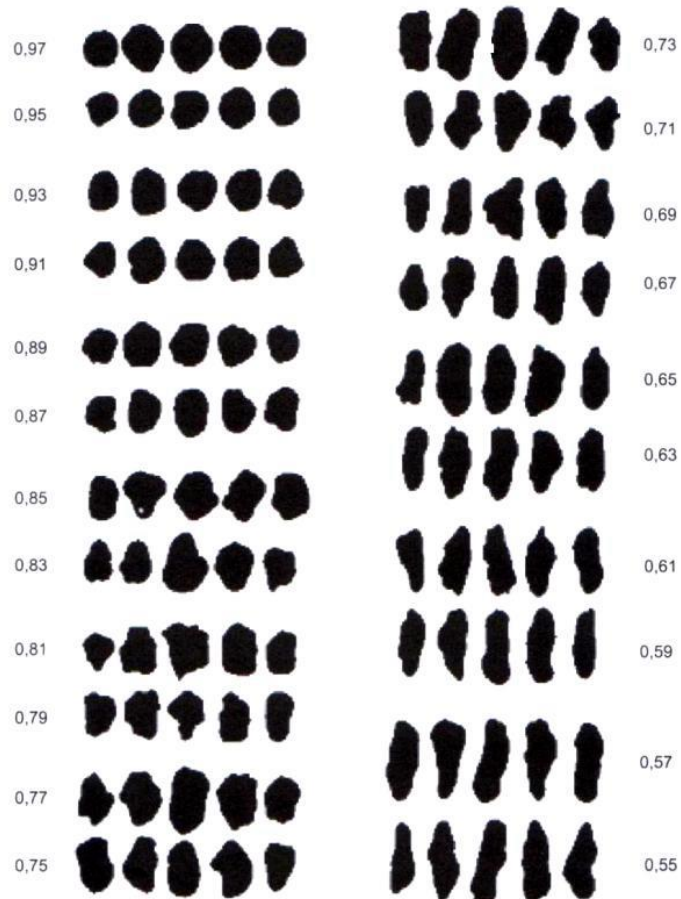
O coeficiente de desuniformidade (C_D) é a razão entre os diâmetros das malhas das peneiras pelas quais passam, nesta ordem, 60 e 10% da massa do material filtrante. Por conseguinte, esse parâmetro está diretamente relacionado à penetração de partículas no leito filtrante. Maiores valores do coeficiente de desuniformidade caracterizam materiais menos uniformes. A ação da filtração em leitos constituídos desses materiais será, sobretudo, superficial. Em contrapartida, menores valores de C_D estão associados a materiais mais uniformes, que favorecem a penetração de partículas ao longo da profundidade do leito filtrante. Para o projeto de filtros rápidos descendentes, recomendam-se valores de coeficiente de desuniformidade entre 1,4 e 1,6 (ABNT, 1992).

2.4.5.3. Geometria e forma dos grãos

A forma e geometria dos grãos determinam o arranjo destes no leito filtrante, sua capacidade de retenção de partículas e o fluxo hidráulico por meio deles. Quanto mais irregular a superfície de um grão maior será a porosidade do leito e a eficiência em recolher partículas suspensas na água (CLEASB E WOODS, 1975).

A forma dos grãos é caracterizada pelo coeficiente de esfericidade e está diretamente ligada à porosidade do meio filtrante, descritos a seguir.

Figura 8 – Escala de comparação visual: forma dos grãos relacionada aos valores de coeficiente de esfericidade



Fonte: Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017).

O C_e pode ser determinado pelo método de Sugio (1973) ou pelo método de Cleasby e Fan (1981). A determinação pelo primeiro método é realizada por comparação visual, utilizando-se uma lupa para observar o grão, e sua forma é comparada com a escala apresentada na Figura 12. No segundo método, determina-se o coeficiente de esfericidade por meio das perdas de carga do meio granular em estado fixo e fluidificado variando a velocidade de escoamento em uma dada temperatura. Aplica-se, então, uma equação que relaciona a perda de carga ao coeficiente de esfericidade (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

A porosidade é definida como a razão entre o volume de vazios e volume total do meio filtrante. Esse parâmetro tem influência direta na determinação das perdas de carga durante a

filtração e na velocidade ascensional necessária para expansão do leito filtrante durante a retrolavagem.

A porosidade pode ser assim determinada: coloca-se certa massa do material filtrante, de massa específica conhecida, em uma coluna com diâmetro interno conhecido. Em seguida, mede-se a altura ocupada pelo material e volume total ocupado por ele pode ser calculado. Calcula-se também o volume dos grãos dividindo a massa total pela massa específica dos mesmos. Por meio da razão entre os volumes obtém-se o valor da porosidade (TOBIASON *et al.*, 2011).

Conforme já apresentado, quanto menor o coeficiente de esfericidade (grãos mais irregulares) maior será a porosidade do leito filtrante. Em um leito constituído de material esférico (menos irregular) a porosidade é, aproximadamente, 38%; já a porosidade de um leito com grãos não esféricos (leito típico) varia entre 40 a 60% (CLEASBY e WOODS, 1975). Em outras palavras, o volume total de vazios é maior em meios filtrantes constituídos por materiais mais irregulares. No caso do uso de areia de rio como material filtrante, a porosidade do leito pode assumir valores entre 0,38 e 0,55 a depender da forma e tamanho dos grãos (IVES, 1970). O coeficiente de desuniformidade não exerce efeito sobre a porosidade, contudo a possibilidade de pequenos grãos alojarem-se nos espaços entre grãos maiores pode reduzir o volume de vazios do leito.

2.4.5.4. Relações entre massa e volume dos grãos

A massa específica dos grãos (ρ_s) é obtida pela razão entre a massa do material e seu volume. Esse parâmetro interfere na expansão do leito, na perda de carga e no volume de água necessário durante o processo de retrolavagem. Para grãos de massa específica elevada, em comparação com grãos de mesmo diâmetro, são necessárias maiores velocidades ascensionais para garantir a fluidificação do leito. Em geral, a areia utilizada em leitos filtrantes possui valores de massa específica entre 2650 e 2670 kg/m³. Para determinação da massa específica de um material o método mais utilizado é o do picnômetro (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

A densidade aparente dos grãos (ρ_t) é obtida pela razão entre a massa dos grãos e o volume ocupado pelo material. Neste caso, o volume do material inclui o volume dos vazios intergranulares. Para obter a massa de material necessária para o preenchimento do leito de um filtro calcula-se o volume necessário de material (produto da área de filtração pela espessura do

leito) e se multiplica o valor obtido pela densidade aparente. De acordo com os valores usuais da massa específica da areia (2650 a 2670 kg/m³) e da porosidade do leito (0,38 a 0,55) apresentados por Ives (1970), a densidade aparente da areia apresenta valores entre 1200 e 1650 kg/m³.

2.4.5.5.Solubilidade em ácido

A análise de solubilidade em ácido clorídrico é realizada para determinação de impurezas ou minerais solúveis em ácido presentes no meio filtrante. De acordo com a NBR 11799 (ABNT, 1990) a solubilidade em ácido da areia para uso em leitos filtrantes deve ser inferior a 5%. Para Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017) a solubilidade em ácido clorídrico não deveria ultrapassar 1%.

2.4.5.6.Materiais granulares empregados como meio filtrante

Nas estações de tratamento de água os materiais comumente utilizados em leitos filtrantes são a areia natural (principalmente) e o antracito. Mas há outros materiais granulares, não convencionais, que foram ou têm sido avaliados para uso como leito filtrante, como, por exemplo: púmice (MÖRGELI e IVES, 1979; JACKSON e LETTERMAN, 1980; FARIZOGLU *et al.*, 2003); perlita (ULUATAN, 1992); vidro reciclado moído (EVANS *et al.*, 2002; SOYER *et al.*, 2010); terras diatomáceas (FULTON, 2000); e areia de britagem (SILVA; BASTOS, R.; BASTOS, P., 2021).

Mais detalhes sobre a avaliação dos materiais não convencionais, como alternativa à areia em leitos filtrantes, são apresentados no Quadro 1. Entre as principais vantagens dos meios alternativos estudados, comparativamente à areia natural, destaca-se o menor incremento de perda de carga ao longo das carreiras de filtração.

Quadro 1. Materiais não convencionais estudados como meios de filtração alternativos a areia natural

Autores	Material	Características do leito filtrante	Taxa de filtração máxima (m/d)	Principais vantagens
Farizoglu <i>et al.</i> (2003)	Púmice	Tamanho efetivo: 0,59 mm Coeficiente de desuniformidade: 1,35 mm Altura do leito: 75 cm	360	- Elevada remoção de turbidez - Menor incremento de perda de carga ao longo do tempo - Volume de água para retrolavagem inferior ao utilizado para areia natural
Uluatam (1991) Uluatam (1992)	Perlita	Tamanho efetivo: 1,15 mm Coeficiente de desuniformidade: 1,65 mm Densidade: 2,27 kg.m ⁻³ Altura do leito: 96 cm	89	- Elevada remoção de turbidez, - Filtração em profundidade mais evidente (menor perda de carga)
EVANS <i>et al.</i> , 2002;	Vidro reciclado moído	Tamanho efetivo: 0,98 mm Coeficiente de desuniformidade: 1,31 mm Altura do leito: 90 cm	276	- Remoção de turbidez similar ao leito de areia; - Menor incremento de perda de carga ao longo do tempo; - Menor massa de material para preenchimento do filtro - Reciclagem de material.
SOYER <i>et al.</i> , 2010		Tamanho efetivo: 0,77 mm Coeficiente de desuniformidade: 1,41 mm Densidade: 2,5 kg.m ⁻³ Esfericidade: 0,41-0,43 Altura do leito: 62,5 cm	300	
Silva; Bastos, R.; Bastos, P. (2021)	Areia de Britagem	Tamanho efetivo: 0,45 mm Coeficiente de desuniformidade: 1,45 mm Densidade aparente: 1,3 g.cm ⁻³ Esfericidade: 0,77 Altura do leito: 45 cm	360	- Remoção de turbidez, incremento de perda de carga e duração das carreiras de filtração similares ao filtro de areia natural; - Vantagens econômicas e ambientais.

Dos materiais granulares citados, seguem comentários sobre o uso (já consagrado) da areia natural de rio e do antracito como materiais filtrantes, e do potencial de uso da areia de britagem.

(i) Areia natural de rio

A areia natural de rio, ou areia quartzosa, é um agregado miúdo (diâmetro menor que 4,75 mm) composto, em sua maior parte, de dióxido de silício (SiO₂). Caracteriza-se por alta

dureza e massa específica entre 2650 e 2670 kg/m³. O uso desse material em obras de engenharia é intenso e, por conseguinte, se tem observado o esgotamento progressivo de suas jazidas, acompanhado de incremento de custos (SBRIGHI NETO, 2005). Além disso, a extração da areia, por vezes desordenada, gera impactos ambientais consideráveis, como a agressão às calhas dos rios, as quais sofrem estreitamento devido a deposição de materiais particulados, o que provoca aumento da vazão nos rios e favorece a erosão das margens.

(ii) Antracito

O antracito é uma variedade compacta do carvão mineral, composto, essencialmente, por carbono (92 a 98%). A massa específica desse material é da ordem de 1300 a 1500 kg/m³. Por ser menos denso que a areia, o antracito, é utilizado em filtros de camada dupla. Isto permite que, mesmo após a retrolavagem, esse material permaneça acima da camada de areia. Assim, as partículas suspensas na água encontram-se inicialmente com a camada de maior granulometria, ou seja, a fração do leito com os maiores vazios intergranulares. Neste caso, pode-se obter carreiras de filtração mais longas, em contrapartida, o antracito é mais caro que a areia (CEPIS, 2004).

(iii) Areia de britagem

A areia de britagem é um agregado miúdo que resulta da britagem (quebra em pequenos fragmentos) de rochas (ABNT, 2011), sendo produzido em plantas de mineração em britadores de eixo vertical. Possui algumas vantagens em relação à areia natural, entre as quais o fato da granulometria controlada por processos de trituração e peneiramento da rocha, o que permite a obtenção de material mais uniforme e livre de impurezas. O princípio de sua produção é o aproveitamento total dos finos (BASTOS, P. *et al.*, 2006).

Na área da construção civil, vários estudos têm sido realizados visando a aplicação da areia de britagem como substituto da areia natural (BASTOS, P. *et al.*, 2006; BARBOSA *et al.*, 2008; KLEIN *et al.*, 2008; DRAGO *et al.*, 2009; MENOSSI *et al.*, 2010). Contudo, na aplicação no tratamento da água, como leito filtrante, a literatura registra apenas um estudo: Silva (2018), cujos resultados de caracterização do material são sintetizados no item 3.1.2.

2.4.6. Índices de filtrabilidade

Como já referido, a eficiência da filtração depende das características da suspensão, do meio filtrante e das condições hidráulicas de operação dos filtros (taxa de filtração e perda de carga). No intuito de analisar, conjuntamente, a influência dessas variáveis no desempenho da filtração Ives (1978) e Hudson Júnior (1981) propuseram, respectivamente, o índice de filtrabilidade de Ives e o índice de trespasse final, descritos a seguir, tal como apresentado em Di Bernardo, Dantas e Voltan (2017).

2.4.6.1. Índice de Ives

O índice de Ives (1978) avalia a eficiência de filtração a partir das perdas de carga ao longo da carreira de filtração, dos valores de turbidez da água afluyente e da água filtrada e da velocidade de aproximação, conforme apresentado na Equação 3.

$$IFI = \frac{H_f T_{ue}}{T_{ua} t V_{\infty}} \quad (3)$$

IFI = índice de filtrabilidade de Ives;

H_f : perda de carga no instante considerado (cm);

t = tempo considerado (min);

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

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

V_{∞} = velocidade de aproximação (cm/min).

De acordo com Ives (1978), quanto menor o valor de IFI, maior será a eficiência da filtração. Isto porque, menores incrementos de perda de carga ao longo do tempo e menores valores de turbidez da água filtrada são desejáveis e caracterizam carreiras de filtração mais longas. Não existem valores absolutos que indiquem boa ou má filtrabilidade, porém, para experimentos realizados sob as mesmas condições, menores valores de IFI representariam unidades de filtração com melhor eficiência (IVES, 1978).

2.4.6.2. Índice de Hudson

O Índice de Hudson, também conhecido como índice de trespasse final – ITF (*Breakthrough index*) foi proposto por Hudson Junior em 1981.

O autor define como trespasse final aquele que ocorre nos períodos de coagulação e/ou floculação ineficientes, e se inicia quando valor de turbidez da água filtrada ultrapassa 0,2 uT. Assim, o ITF pode ser interpretado da seguinte forma: valores mais baixos estão associados a flocos frágeis e valores mais altos a flocos resistentes. A resistência do floco é associada às características da água bruta e à qualidade da água afluenta aos filtros (coagulada), influenciando o desenvolvimento da perda de carga ao longo das carreiras de filtração. O ITF é calculado de acordo com a Equação 4 e os valores usuais de ITF propostos por Hudson Junior (1981) são apresentados na Tabela 5.

$$ITF = \frac{V_{\infty} D_{ef}^3 H_f}{L_f} \quad (4)$$

Em que:

ITF = índice de trespasse final (cm.mm³/min);

V_{∞} = velocidade de aproximação (cm/min);

D_{ef} = tamanho efetivo do material filtrante (mm);

H_f = perda de carga (m)

L_f = espessura do meio filtrante (m).

Tabela 5 – Valores usuais do índice de trespasse

Características dos flocos	ITF (com.mm ³ /min)
Muito fracos	1
Fracos	3
Pouco resistentes	4
Medianamente resistentes	8
Fortemente resistentes	12

Fonte: Hudson Junior (1981).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da unidade experimental

3.1.1. Estação de tratamento de água da Universidade Federal de Viçosa (ETA UFV)

A ETA UFV é localizada no campus universitário da cidade de Viçosa-MG e tem por manancial de abastecimento o Ribeirão São Bartolomeu (RSB). O RSB é um corpo hídrico de vazão reduzida, abaixo de 100 L s^{-1} em períodos de estiagem e acima de 200 L s^{-1} em períodos de chuva. A nascente e foz deste corpo d'água encontram-se no município de Viçosa, sendo que no campus universitário o RSB passa por cinco barramentos consecutivos. O ponto de captação é compartilhado com a ETA I do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE – Viçosa) e está localizado no segundo barramento. A ETA I abastece parte da cidade de Viçosa – MG.

A ETA – UFV opera em ciclo completo: (i) coagulação com sulfato de alumínio e mistura rápida em calha Parshall; (ii) floculador hidráulico de fluxo vertical; (iii) decantação convencional em decantador circular; (iv) filtração rápida em dois filtros de fluxo descendente e (v) desinfecção com cloro gás.

3.1.2. Unidade piloto de filtros rápidos descendentes

O sistema piloto foi composto por dois filtros rápidos de escoamento descendente: um com leito filtrante de areia de britagem e um, como unidade de controle, preenchido com areia natural de rio. Ambos eram estruturas de tubulação de acrílico com diâmetro interno de 19 cm, espessura da parede de 0,5 cm e altura total de 267 cm. A altura dividia-se em duas partes, inferior e superior, conectadas por flanges de acrílico e fixadas em uma mesa de apoio de 30 cm de altura fabricada em madeira. A parte inferior e superior dos filtros possuía, respectivamente, 100 e 165 cm de altura.

A parte inferior dos filtros continha camada suporte de 30 cm de altura constituída por seixos rolados distribuídos conforme apresentado Tabela 6, e leito filtrante de 45 cm de espessura com características granulométricas como apresentado nas Tabelas 7 e 8 para areia de britagem e areia natural de rio, respectivamente. Na Tabela 9, são apresentados o tamanho efetivo e o coeficiente de desuniformidade para o material de ambos os leitos filtrantes. Além

disso, a parte inferior das unidades possuía as seguintes estruturas: (i) uma flange responsável pela fixação da unidade à mesa de apoio; (ii) uma flange não removível em acrílico com 56 orifícios de 4,76 mm de diâmetro, instalada a 10 cm de altura do fundo e que desempenha a função de fundo falso; (iii) tubulação de 32 mm de diâmetro em PVC conectada a uma tubulação de 24 mm de diâmetro por meio de um tê, utilizadas para injeção de água tratada no sistema para desenvolvimento da retrolavagem; (iv) oito válvulas pneumáticas de 5 mm de diâmetro conectadas a mangueiras de silicone com igual diâmetro por meio de pequenos tubos de PVC de 2 cm de comprimento e 5 mm de diâmetro. As duas primeiras válvulas distanciam-se 10 cm entre si e as restantes 5 cm uma das outras, em relação ao topo da camada suporte. As mangueiras de silicone são utilizadas para leitura do nível da água para determinação da perda de carga e para coleta das amostras de água nas diferentes profundidades do leito. A apresenta o corte lateral de um dos filtros e a apresenta a foto da unidade piloto instalada.

Tabela 6. Características granulométricas da camada suporte dos filtros da unidade piloto

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

Fonte: Silva (2018).

Tabela 7. Características granulométricas da areia de britagem e da areia natural de rio (convencional)

Abertura da malha (mm)	Massa retida (g)		Massa retida acumulada (g)		Massa retida acumulada (%)		Massa que passou (%)	
	AB	AC	AB	AC	AB	AC	AB	AC
1,70	1,00	2,6	1,00	2,6	0,20	0,4	99,8	99,6
0,850	17,93	22,63	18,93	25,23	3,30	3,5	96,7	96,5
0,600	277,71	342,55	296,64	367,78	51,1	50,3	48,9	49,7
0,425	271,67	343,63	568,31	711,41	97,8	97,3	2,20	2,7
0,300	12,69	19,61	581,00	731,02	100,0	100	0,00	0

AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional.

Fonte: Silva (2018).

Tabela 8. Composição química dos materiais empregados como leito filtrante

Componente (%)	Areia de britagem	Areia convencional
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

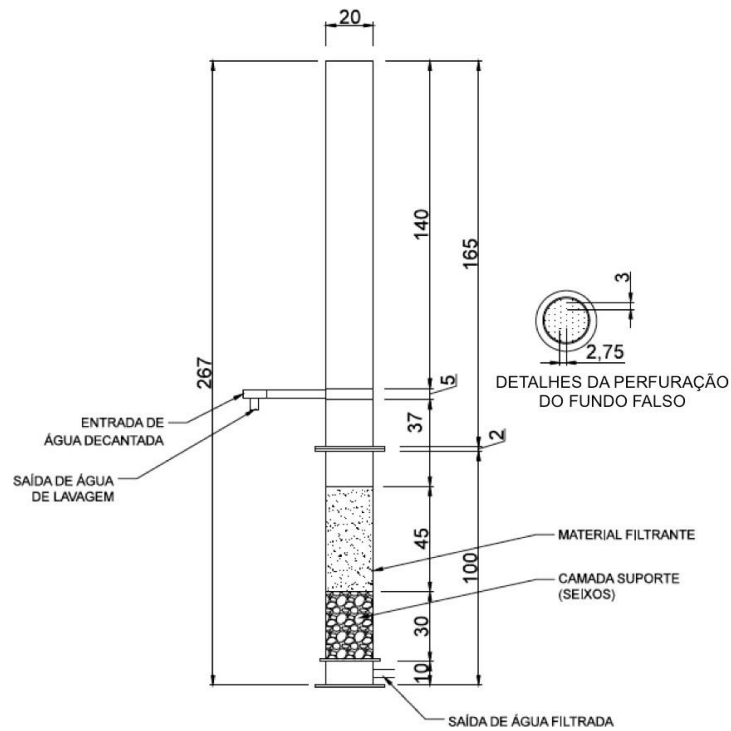
Fonte: Silva (2018).

Tabela 9. 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

Fonte: Silva (2018).

Figura 9 – Corte lateral do filtro piloto com medidas em cm



Fonte: Silva (2018).

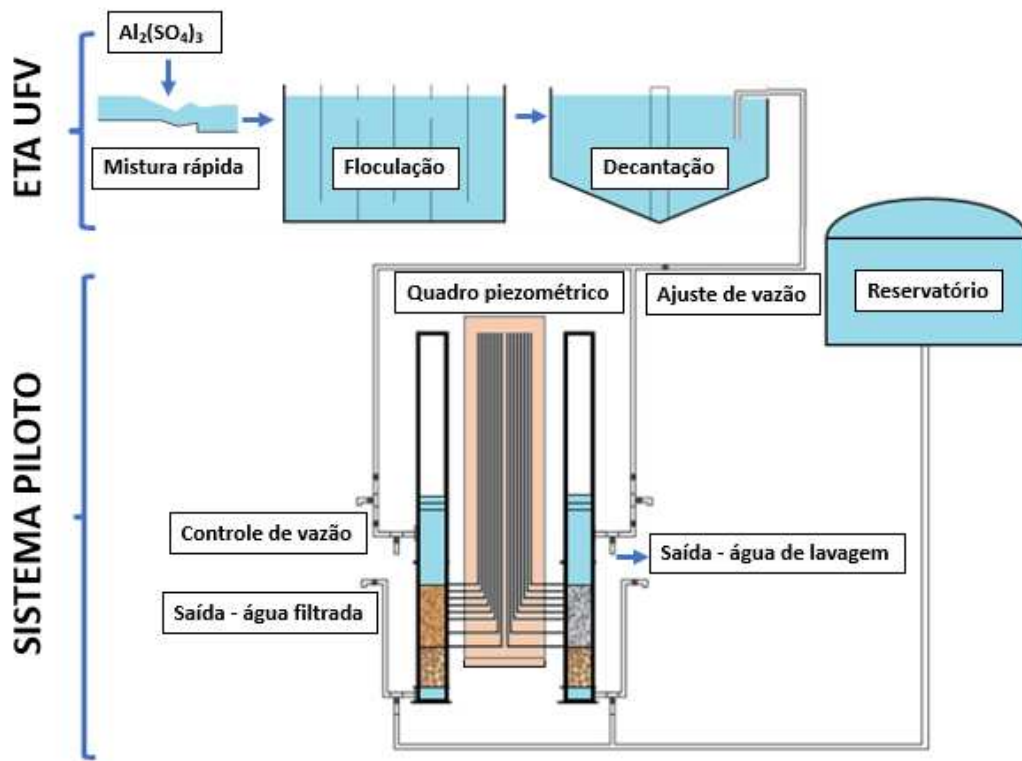
Figura 10 – Vista geral da unidade piloto



Fonte: Silva (2018).

Os filtros estão instalados nas dependências da Divisão de água e esgoto (DAG UFV) e foram alimentados com água decantada da ETA UFV, descrita no item 3.1.1. Os dois filtros foram operados simultaneamente ao longo de 14 meses com taxas de filtração de 180, 270 e 360 $\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{dia}^{-1}$. O arranjo experimental para o ensaio em escala piloto está representado de maneira esquemática na .

Figura 11 – Representação esquemática do arranjo experimental para os ensaios com a unidade piloto de filtros rápidos descendentes



Fonte: a autora.

As carreiras de filtração foram consideradas finalizadas quando da ocorrência de trespasse que provocasse turbidez acima do padrão de potabilidade brasileiro (0,50 uT), ou quando do esgotamento da carga hidráulica disponível (180 cm). Após o encerramento de cada carreira de filtração foi realizada retrolavagem dos filtros de forma padronizada com duração de dez minutos e expansão do leito de 33%. No período de estiagem, devido à floração de algas no manancial, foi realizada, também, a cloração dos leitos filtrantes como solução de cloro (25 mgL^{-1}), os filtros foram preenchidos com a solução e deixados em repouso por 24 horas, em seguida foi realizada a retrolavagem.

Durante as carreiras de filtração foram monitorados: (i) potencial zeta da água decantada; (ii) perda de carga e turbidez ao longo da profundidade dos leitos filtrantes; (iii) cor verdadeira – apenas no início do período de estiagem –, contagem de esporos de bactérias aeróbias, coliformes totais e *E. coli* das amostras de água afluente e efluente dos filtros e; (iv) contagem de organismos fitoplanctônicos na água decantada. Para tanto, as amostras de água

decantada foram coletadas na tubulação entre o decantador e os filtros e a coleta de amostras de água filtrada foi realizada por meio das mangueiras de silicone instaladas ao longo da profundidade do leito filtrante. A perda de carga foi mensurada com base no registro da altura da coluna d'água nas mesmas mangueiras de silicone utilizadas para coleta de amostras – que, nesse caso, se caracterizam como piezômetros.

As coletas para análise de potencial zeta, turbidez e cor verdadeira foram realizadas em intervalos de duas horas. Devido a limitações analíticas, as coletas para análise de esporos de bactérias aeróbias foram realizadas em intervalo de quatro horas, assim como as coletas para determinação de coliformes totais e *E. coli*, neste caso, porém, apenas com uma repetição para cada taxa de filtração (180, 270 e 360 m³m⁻²dia⁻¹) em cada período (estiagem e chuvoso).

Para cada um dos dois filtros foram realizadas, simultaneamente, 13 carreiras de filtração no período de estiagem e 9 carreiras no período chuvoso. As taxas de filtração aplicadas foram as anteriormente adotadas por Silva (2018): 180 m³/m².d valor máximo recomendado para filtros rápidos na NBR 12216 (ABNT, 1992) 270 e 360 m³/m².d, correspondentes a, respectivamente, 1,5 vezes e o dobro do valor recomendado na norma. Os valores adotados tinham por objetivo promover a filtração em profundidade de modo a avaliar a operação dos filtros em condições extremas comparadas àquelas propostas em norma.

3.1.3. Resumo do arranjo experimental

No Quadro 2 é apresentado um resumo do arranjo experimental.

Quadro 2. Resumo do arranjo experimental

Unidade	Material filtrante	Período	Taxa de aplicação (m ³ m ⁻² dia ⁻¹)	Número de carreiras de filtração	Análises realizadas
Filtração piloto	Areia natural de rio e areia de britagem	Chuvoso	180	3	Físico-químicas: turbidez e potencial zeta.
			270	3	
			360	3	
		Estiagem	180	4	Microbiológicas: esporos de bactérias aeróbias e coliformes totais.
			270	5	
			360	4	

3.2. Avaliação da eficiência de filtração

A eficiência da filtração nos filtros de areia natural de rio e de areia de britagem foi avaliada de modo comparativo de acordo com: (i) a duração das carreiras de filtração; (ii) a caracterização das carreiras de filtração a partir de parâmetros físico-químicos e microbiológicos; (iii) o valor do IFI; (iv) o valor de ITF considerando 0,5 uT como referência de turbidez da água filtrada; e (v) as características da água decantada.

3.3. Análises de qualidade da água

As análises de qualidade da água foram realizadas no Laboratório de Controle de Qualidade da Água, vinculado à DAG-UFV, segundo às disposições do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). As análises de turbidez foram realizadas em turbidímetro de bancada marca HACH, modelo 2100 NA. Para aferir o pH das amostras foi utilizado pHmetro Digimed DM-32 e para análise do potencial zeta foi utilizado o equipamento ZetaSizer Z90 Malvern. A contagem de EBA foi realizada como descrito em NIEMINSKI *et al.* (2000), envolvendo as seguintes etapas: : (i) tratamento térmico; (ii) filtração

em membrana; (iii) incubação; e (iv) contagem de unidades formadoras de colônia. A quantificação de coliformes totais e *E. coli* foi realizada por meio da técnica do substrato definido (cromogênico-fluorogênico), utilizando o meio de cultura Colilert® (Quanta-tray®, Idexx Laboratories Inc, US). A contagem de organismos fitoplanctônicos foi realizada de acordo com as seguintes etapas: (i) conservação da amostra com lugol; (ii) concentração da amostra por sedimentação; e (iii) contagem de células por meio de visualização em microscópio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização das carreiras de filtração no período de estiagem

O intervalo entre fevereiro e julho de 2019 foi denominado período de estiagem, em virtude da reduzida incidência de chuvas. Por conseguinte, este período foi caracterizado por baixos valores de turbidez da água bruta e da água decantada. Além disso, floração de algas no manancial de captação e carreiras de filtração de curta duração foram observadas. Neste período foram monitoradas 12 carreiras de filtração.

Durante o período de operação dos filtros em escala piloto, a turbidez afluyente à ETA UFV esteve entre 3,71 e 46,5 uT, com média igual a 8,83 uT; 83% e 65% das amostras de água bruta apresentaram turbidez igual ou inferior a 10 uT e 5,0 uT, respectivamente. Por conseguinte, as doses de coagulante (Al_2SO_4) aplicadas na etapa de mistura rápida também foram baixas com valores mínimo, médio e máximo, respectivamente, de 6,0; 8,9; e 12 mg.L⁻¹.

Os valores de turbidez da água decantada, afluyente aos filtros, também foram baixos: entre 0,19 e 4,38 uT, com média de 1,18 uT, 92% dos dados abaixo de 2,0 uT e 46% com valores iguais ou inferiores a 1 uT.

Além dos baixos valores de turbidez, uma característica marcante do período de estiagem foi a floração de algas no manancial de captação; fato esse que pode ser constatado pela contagem de fitoplâncton total nas amostras de água afluyente aos filtros em escala piloto: entre 746 e 5663 cel.mL⁻¹, com média de 3041 cel.mL⁻¹. A presença desse elevado número de células na água afluyente aos filtros acarretou interferências na filtração, tanto com areia convencional, como com areia de britagem. Uma das consequências foi a redução da duração das carreiras de filtração. No geral, as carreiras tiveram duração entre 5 e 20,4 h para o filtro de areia de britagem e entre 5 e 20 h para o filtro de areia convencional. Em 10 das 12 carreiras de filtração, a operação do filtro de areia de britagem foi encerrada por esgotamento da carga hidráulica disponível; o mesmo ocorreu em nove carreiras do filtro de areia convencional. Os elevados incrementos de perda de carga podem estar associados à colmatação dos leitos filtrantes provocada pela proliferação das algas.

A seguir, encontra-se uma análise mais detalhada das carreiras de filtração de acordo com as taxas de filtração aplicadas: 180, 270 e 360 m³m⁻²d⁻¹.

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

As carreiras 1, 2, 3 e 13 foram operadas com taxa de filtração de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$. No período em que os filtros piloto foram operados com essa taxa de filtração a turbidez da água bruta variou de 4,12 a 15,25 uT com média de 6,70 uT. A turbidez da água decantada, afluyente aos filtros, permaneceu baixa, inferior a 2,0 uT em 97% do tempo. Por sua vez, a turbidez da água filtrada, tanto no filtro de areia de britagem como no de areia convencional, permaneceu abaixo de 0,5 uT em 81 % do tempo, mas duas entre as quatro carreiras de filtração foram encerradas por trespasse – turbidez da água filtrada superior a 0,50 uT.

A duração das carreiras de filtração para a taxa de filtração de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ esteve abaixo do esperado. Para essa mesma taxa, Silva (2018) reportou carreiras de filtração com valores médios de 33,5 horas para o filtro de areia de britagem e 32,8 horas para o filtro de areia convencional. Entretanto, no presente trabalho, a duração das carreiras permaneceu inferior a 20,3 h para o filtro com areia de britagem e a 20 h para o filtro com areia convencional.

As curtas carreiras de filtração podem estar associadas à floração de algas no manancial superficial que fornece água para a ETA UFV, quando problemas na operação da estação foram notórios, como, por exemplo, doses de coagulante mais elevadas, ressuspensão de lodo no decantador e menor duração das carreiras de filtração nos filtros em escala real (carreiras de filtração inferiores a 12 horas). Na Figura 16 é possível visualizar os flocos depositados sobre o leito de areia convencional da instalação piloto. Também, na Figura 17 se pode observar a presença de quantidade considerável de flocos na água decantada sobre o leito de areia de britagem.

Figura 12 – Presença de flocos na superfície do leito filtrante de areia convencional (carreira 2)



Figura 13 – Presença de flocos na superfície do leito filtrante de areia de britagem (carreira 2)



As Figuras 16 e 17 foram registradas durante a operação da carreira 2, quando a turbidez média da água bruta foi de 4,15 uT, porém a dose média de coagulante (Al_2SO_4) aplicada foi de $10,1 \text{ mg.L}^{-1}$, dose mais elevada que a comumente utilizada para esse valor de turbidez. Além disso, durante a carreira de filtração, o potencial zeta da água decantada permaneceu a maior parte do tempo superior a 10 mV, o que pode indicar má neutralização dos flocos presentes na água decantada.

Durante a operação dos filtros com taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, a turbidez da água decantada (afluente aos filtros) variou de maneira diferente entre as carreiras de filtração: valores mais

elevados para as carreiras 1, 2 e 3 (entre 0,88 uT e 2,01 uT), e mais baixos para a carreira 13 (0,48 uT e 1,29 uT), o que se fez refletir na turbidez da água filtrada (Tabela 10). Os valores registrados nas carreiras 1, 2 e 3 estão um pouco acima dos reportados por Silva (2018): 0,48 uT a 1,1 uT na água decantada, entre 0,13 uT e 0,42 uT para o filtro de areia de britagem e entre 0,14 uT a 0,56 uT para o filtro de areia convencional.

Tabela 10 – Turbidez da água filtrada nas carreiras operadas com taxa de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, período de estiagem.

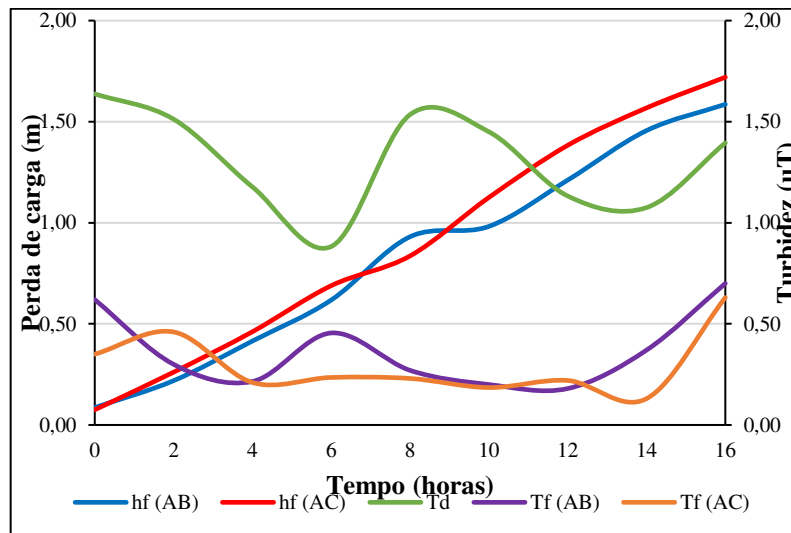
Carreira de filtração	Filtro 1			Filtro 2		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
1	0,18	0,36	0,61	0,13	0,29	0,63
2	0,28	0,48	0,81	0,31	0,47	0,89
3	0,39	0,48	0,59	0,28	0,52	0,69
13	0,10	0,15	0,35	0,10	0,14	0,33

As carreiras 1 e 2 foram encerradas por trespasse em ambos os filtros, enquanto na carreira 3, o trespasse ocorreu apenas no filtro de areia convencional. O comportamento da perda de carga e da turbidez da água decantada e filtrada ao longo das 16 horas de operação dos filtros na carreira 1 é apresentado na T_d = turbidez da água decantada; T_f (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); T_f (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); h_f (AB) = perda de carga (areia de britagem); h_f (AC) = perda de carga (areia convencional).. Nesta figura, observa-se que não houve aumento na turbidez da água decantada que provocasse, subitamente, trespasse. Além disso, o comportamento da perda de carga ao longo da carreira não sofreu alterações abruptas, sendo que o incremento de perda de carga permaneceu, na maior parte do tempo, superior no filtro de areia convencional. Este mesmo filtro apresentou menores valores de turbidez da água efluente ao longo da carreira de filtração.

A turbidez da água filtrada ao fim da carreira foi de 0,61 uT e 0,63 uT e a perda de carga 1,59 m e 1,72 m, respectivamente, nos filtros de areia de britagem e de areia natural de rio. Logo, o ITF obtido para esses filtros foi de 4,00 e 4,33 $\text{cm} \cdot \text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$; assim, de acordo com a classificação proposta por Hudson (1956), os flocos afluentes aos filtros são considerados como pouco resistentes; ou visto o problema por outro ângulo, os dois filtros mostraram capacidade similar de retenção dos flocos, já que os flocos afluentes a ambos os filtros foram produzidos sob as mesmas condições de coagulação, além do que os dois filtros foram operados com a mesma taxa de filtração e os respectivos leitos apresentavam as mesmas características físicas:

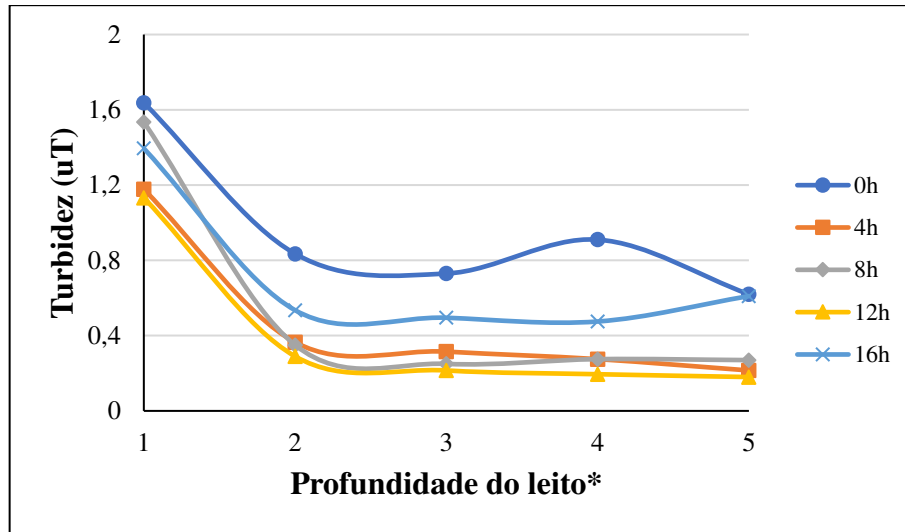
granulometria e profundidade De toda forma, a classificação dos flocos como pouco resistentes é condizente com o apresentado, na qual fica claro que com 16 horas de operação a turbidez ao longo da profundidade do leito filtrante se apresentou acima de 0,5 uT para ambos os filtros.

Figura 14 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 1

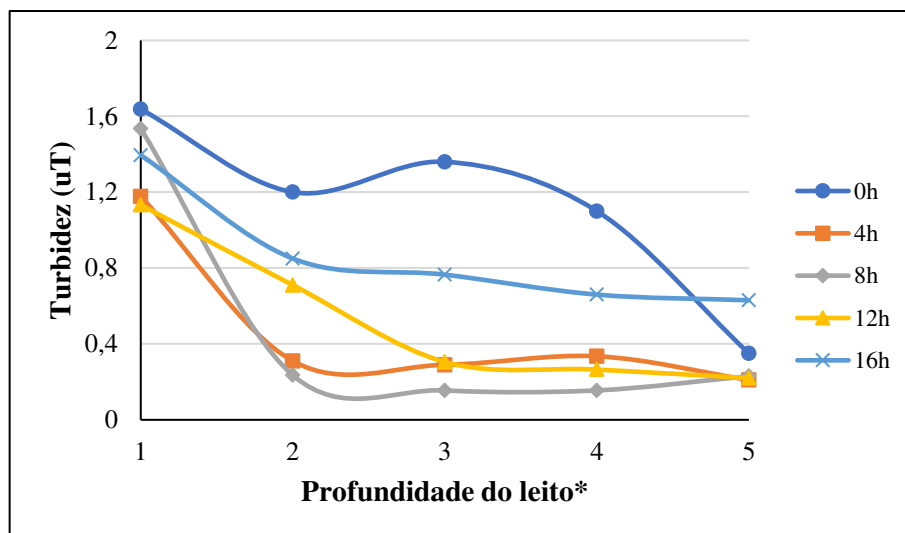


Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura 15 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 1



(a)

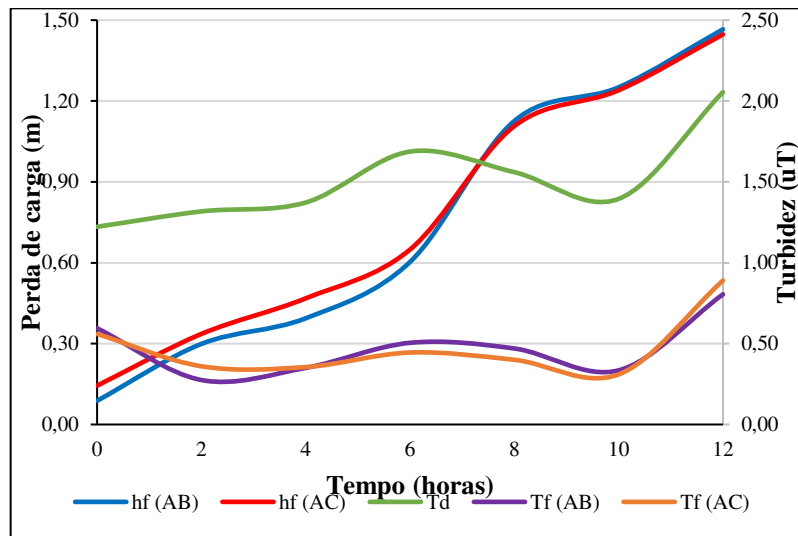


(b)

*1 = 0 cm; 2 = 5 cm; 3 = 10 cm; 4 = 15 cm; e 5 = 45 cm.

A carreira de filtração 2 também foi encerrada por trespasse. Como ilustrado na Figura 20, nesta carreira os dois filtros se comportaram de modo muito semelhante em termos de remoção de turbidez e incremento de perda de carga. Nota-se também que o trespasse coincidiu com aumento da turbidez da água decantada (entre 10 e 12 horas); ao fim da carreira de filtração a turbidez da água decantada atingiu 2,1 uT.

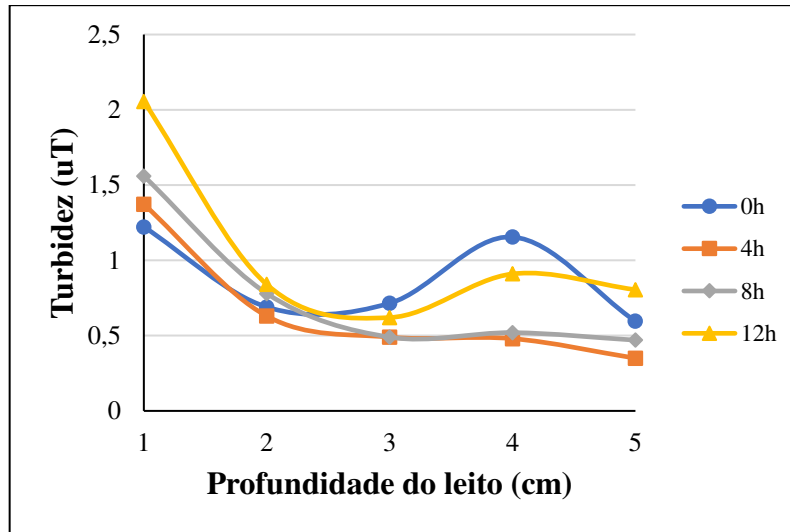
Figura 16 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 2



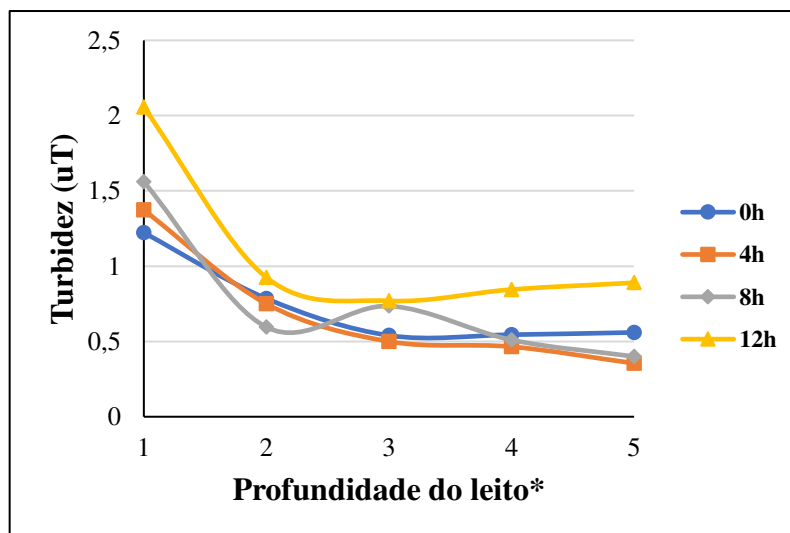
Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

A perda de carga e a turbidez afluente aos filtros na carreira 2 foram iguais a 1,47 m e 0,81 uT para o filtro de areia de britagem e 1,45 m e 0,89 uT para o filtro de areia convencional. A carreira de filtração durou 12 horas para ambos os filtros. Assim, o ITF para o filtro com areia de britagem foi igual a $3,70 \text{ cm} \cdot \text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ e $3,65 \text{ cm} \cdot \text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ para o filtro de areia convencional, o que caracteriza os flocos afluente aos filtros como fracos a pouco resistentes. Este fato pode ser observado na Figura 21, na qual além de se perceber valores de turbidez da água filtrada superiores a 0,5 uT ao longo dos leitos filtrantes, observa-se tendência de aumento da turbidez ao longo da profundidade dos leitos ao longo do tempo.

Figura 17 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 2



(a)

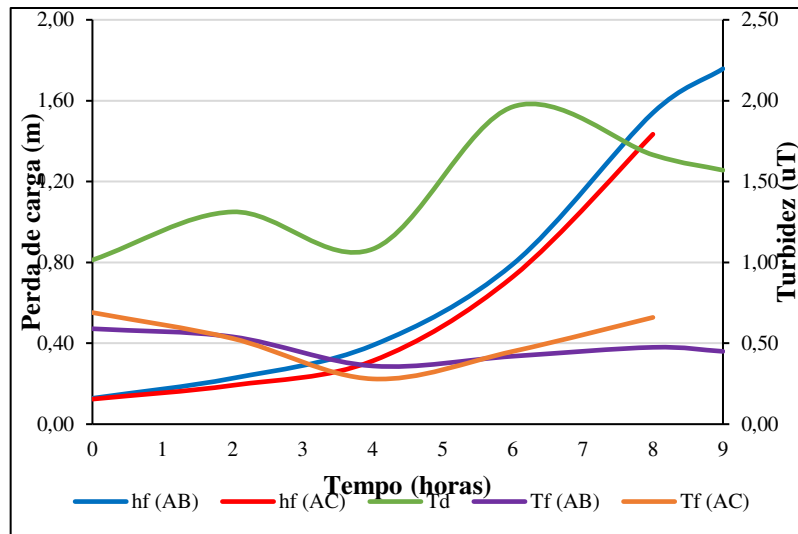


(b)

*1 = 0 cm; 2 = 5 cm; 3 = 10 cm; 4 = 15 cm; e 5 = 45 cm.

Por outro lado, na carreira 3 o trespasse ocorreu apenas no filtro de areia natural, sendo que nessa carreira foi registrado o menor tempo de operação com taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$. Ao se analisar a Figura 22 fica claro que, em termos de perda de carga e remoção de turbidez, os filtros apresentam desenvolvimento semelhante ao longo da carreira de filtração. Mesmo que não tenha tido a operação encerrada por trespasse, o filtro de areia de britagem foi operado apenas por mais uma hora até que se atingisse a carga hidráulica disponível máxima.

Figura 18 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 3

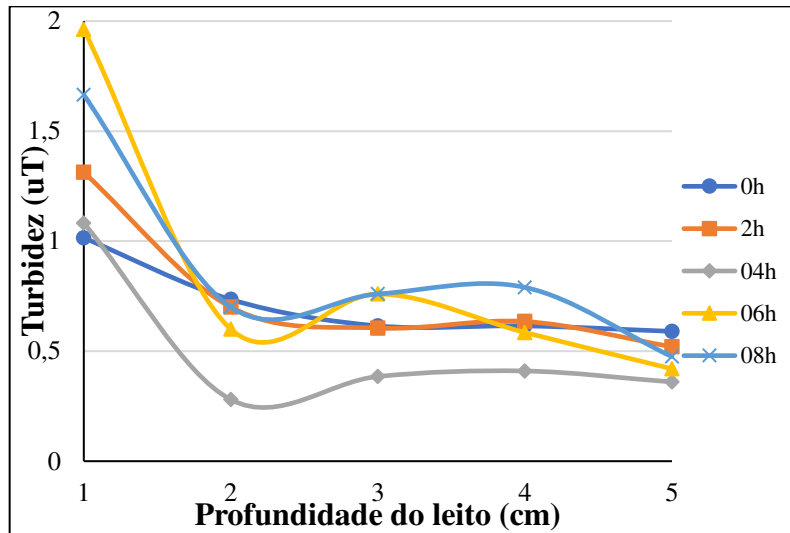


Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

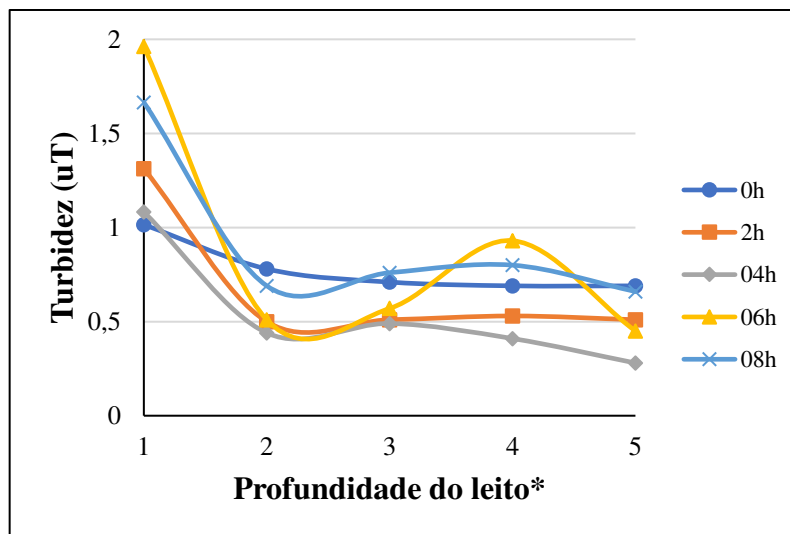
No momento em que se deu o trespasse, o desenvolvimento da carreira dos filtros era semelhante; por exemplo, a perda de carga nos filtros de areia de britagem e de areia convencional era de 1,54 m e 1,43 m, respectivamente. Mesmo no filtro de areia de britagem, em que não houve trespasse, pode ser observada tendência de aumento da turbidez da água filtrada. Os valores da turbidez afluyente eram então 0,48 uT para o filtro 1 e 0,66 uT no filtro 2. Para fins de comparação, calculou-se o ITF para o tempo de 8 horas: entre 2 e 4 $\text{cm} \cdot \text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ para os dois filtros, o que caracterizaria os flocos afluentes aos filtros como fracos a pouco resistentes.

Considerando toda a carreira, para o filtro de areia de britagem obteve-se ITF igual a $3,87 \text{ cm} \cdot \text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ e, para o filtro de areia convencional, $3,90 \text{ cm} \cdot \text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. A Figura 23 reforça a afirmação da presença de flocos frágeis, pois é possível perceber que desde o início da carreira 3 os valores de turbidez da água filtrada eram elevados em comparação ao padrão de potabilidade estabelecido pelo Ministério da Saúde: 0,5 uT (BRASIL, 2021).

Figura 19 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 3



(a)



(b)

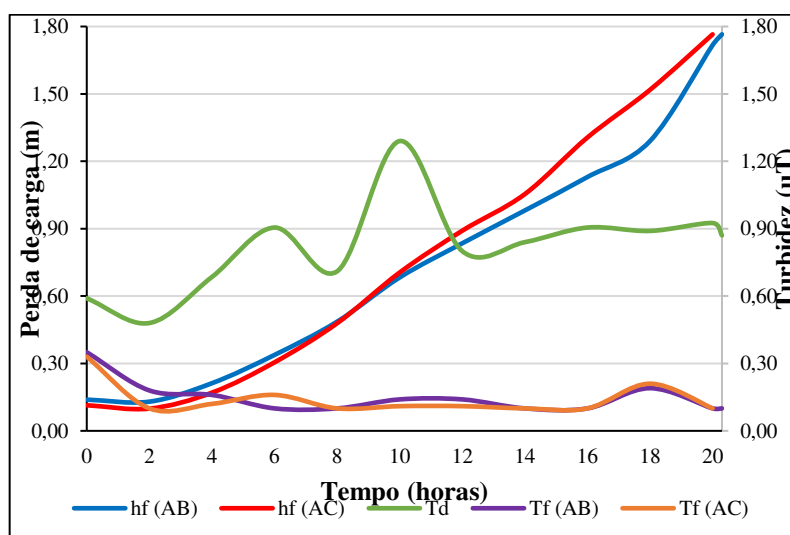
*1 = 0 cm; 2 = 5 cm; 3 = 10 cm; 4 = 15 cm; e 5 = 45 cm.

Em geral, no período de amadurecimento de um leito filtrante é comum que se observem valores mais elevados de turbidez, mas espera-se que a turbidez efluente se reduza gradativamente à medida que se desenvolve a carreira de filtração (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Na carreira 3, isso não foi observado, pois o trespasse ocorreu de maneira precoce. Outro fato intrigante foi o elevado incremento de perda de carga ao longo da operação dos filtros, pois, geralmente, flocos frágeis estão associados a baixos incrementos de

perda de carga no leito filtrante. No caso, a elevada perda de carga poderia estar à presença de algas na água afluyente aos filtros, o que, sabidamente pode provocar obstrução do meio filtrante e redução da carreira de filtração (DI BERNARDO, 1995). A fim de minimizar os efeitos da floração de algas, após a retrolavagem os leitos filtrantes foram submersos em solução de cloro 25 mg.L^{-1} por um período de 12 horas.

Em contrapartida, a carreira 13, em ambos os filtros, se encerrou por esgotamento da carga hidráulica e com a maior duração entre as carreiras com taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$: 20,3 h para o filtro 1 e 20,0 h para o filtro 2. Nessa carreira, a turbidez média da água bruta foi de 7,33 uT, inferior apenas à reportada para a carreira 1. Entretanto, a turbidez da água decantada apresentou valores de turbidez inferiores aos observados para as carreiras já apresentadas: 0,48 uT a 1,29 uT; média de 0,82 uT. Em ambos os filtros, a turbidez da água filtrada se manteve inferior a 0,30 uT durante toda a carreira de filtração, atingindo valores de 0,10 uT em 45% das amostras. A Figura 24 apresenta a perda de carga e a turbidez da água decantada e filtrada ao longo da carreira de filtração 13. Vale ressaltar que o comportamento dos filtros em relação a perda de carga e à qualidade da água filtrada foi semelhante: ao fim da carreira os dois filtros apresentaram perda de carga igual a 1,77 m e turbidez da água filtrada igual a 0,1 uT.

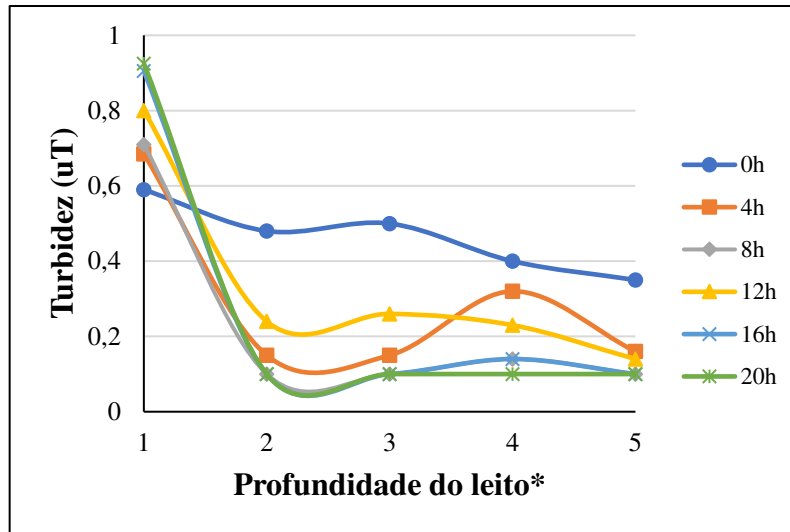
Figura 20 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 13



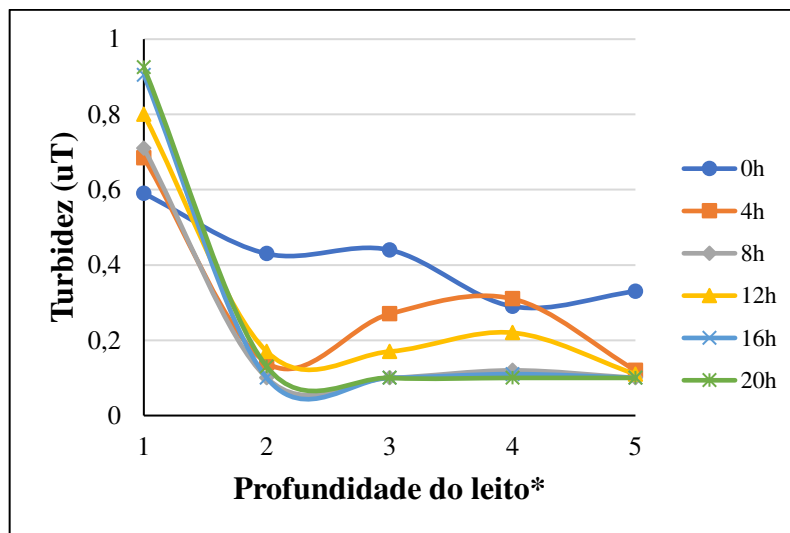
Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Infere-se, então, que a remoção da turbidez ao longo do leito filtrante ocorreu, essencialmente, de forma superficial. De fato, como pode ser observado na Figura 25, a remoção da turbidez foi acentuada até os primeiros 5 cm do leito filtrante. Diferentemente das demais carreiras já apresentadas, é possível perceber que a qualidade da água filtrada tendeu a melhorar ao longo do tempo de operação dos filtros. Entretanto, há uma exceção ao tempo de 12 h, quando a turbidez da água filtrada ao longo do leito se apresentou em valor um pouco superior à do tempo de 8 h. Esse fato pode decorrer de alguns fatores, entre os quais, a elevação da turbidez da água decantada no tempo de 10h (1,29 uT), e aumento do potencial zeta da água afluyente aos filtros (13,1 mV). O valor do potencial zeta um pouco mais elevado pode indicar neutralização menos eficiente dos flocos e, assim, estes acabam por ter menor aderência ao material filtrante e podem ser arrastados ao longo do leito com maior facilidade. Porém, mesmo nessas condições, os valores de turbidez da água filtrada não excederam 0,3 uT, ou seja, ambos os filtros produziram água de excelente qualidade.

Figura 21 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 13



(a)



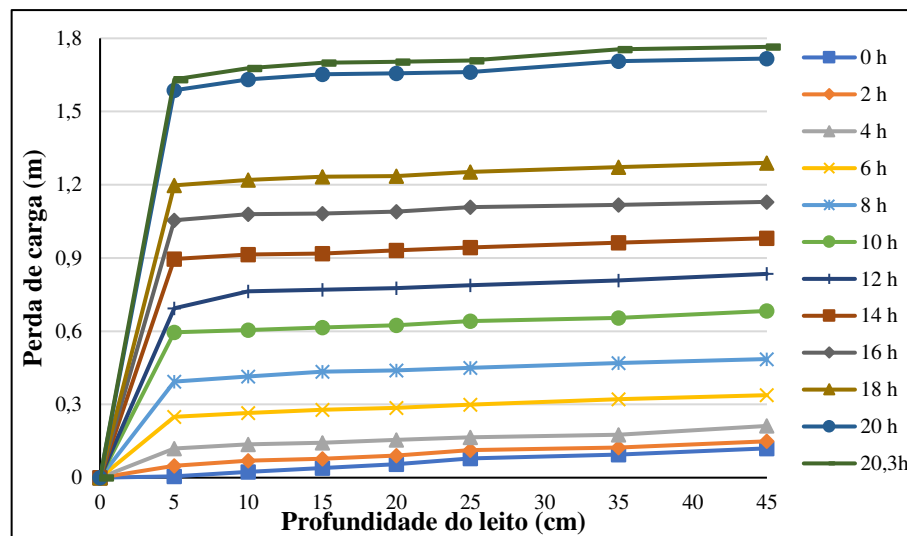
(b)

*1 = 0 cm; 2 = 5 cm; 3 = 10 cm; 4 = 15 cm; e 5 = 45 cm.

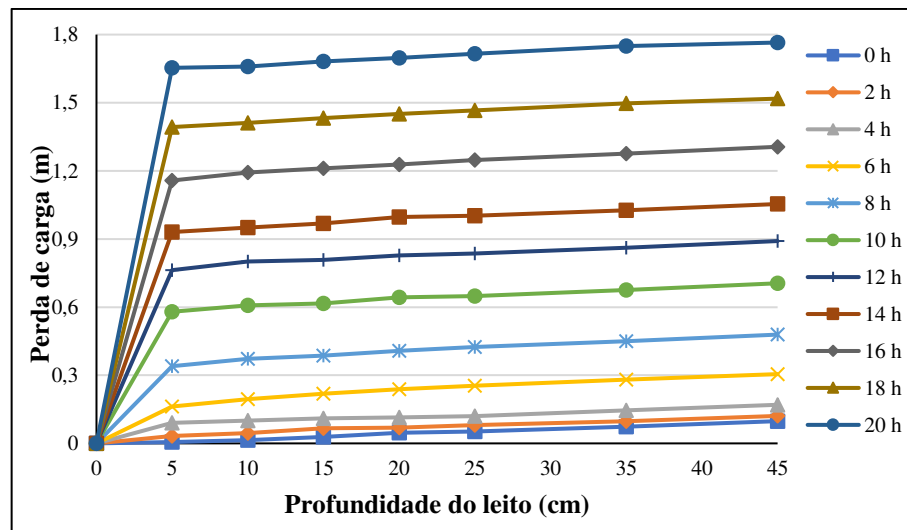
A perda de carga ao longo do leito filtrante demonstra também que a filtração ocorreu superficialmente em ambos os filtros; fato esse que pode ser observado na Figura 26, na qual se pode notar que a frente de impurezas não se movimentou de modo acentuado para profundidades superiores a 5 cm dos leitos filtrantes. Outro ponto interessante, é que o incremento de perda de carga ao longo do leito se deu de forma semelhante para ambos os filtros até 18 horas de operação, seguido de aumento expressivo da perda de carga no intervalo

entre 18 e 20 horas no leito de areia de britagem (a). O tempo de 20 horas corresponde ao retorno da operação dos filtros, os quais permaneceram 12 horas em inatividade, sendo possível que tenha ocorrido crescimento de fitoplâncton de modo mais acentuado no filtro 1 do que no filtro 2.

Figura 22 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 13



(a)

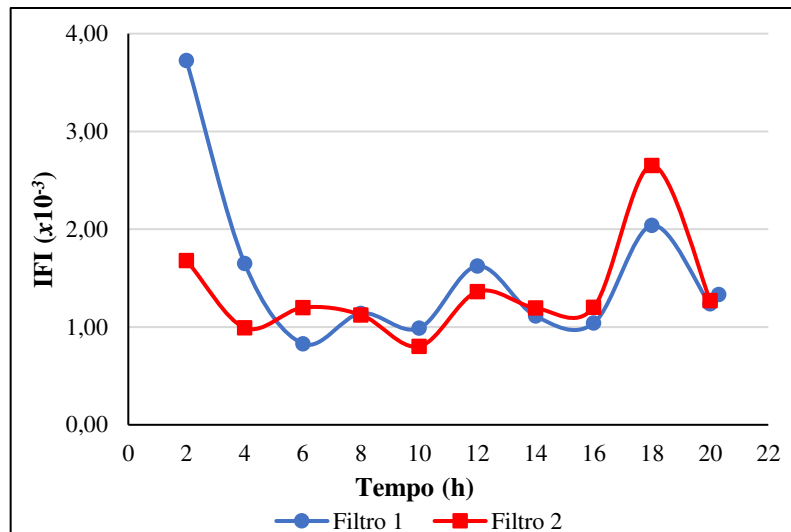


(b)

A eficiência dos filtros foi avaliada por meio da utilização do índice de filtrabilidade de Ives (IFI). Na carreira 13, foi também observado aumento da eficiência de filtração até 16 horas

de operação dos filtros, como mostra a Figura 27; inicialmente, os melhores valores de eficiência foram devidos à redução da turbidez da água filtrada, exceção apenas ao tempo de 12h, em que houve uma pequena elevação da turbidez afluente aos filtros.

Figura 23– Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração, carreira 13



Por fim, entre as carreiras apresentadas para a taxa de filtração de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ a que apresentou melhor eficiência de filtração foi a carreira 13: como pode ser observado na Tabela 11, a média do IFI para ambos os filtros é inferior na carreira 13 em comparação às demais carreiras. Além disso, para essa carreira de filtração, os dados estão menos dispersos em torno da média, o que se pode verificar pelo desvio padrão. Os valores elevados da turbidez afluente aos filtros levaram ao trespasse e ao encerramento das carreiras, com duração muito inferior a desejada.

Tabela 11 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) para as carreiras operadas a taxa de $180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, período de estiagem

Carreira	Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI $\times 10^{-3}$)					
	Filtro 1			Filtro 2		
	Mínimo	Média \pm Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média \pm Desvio Padrão	Máximo
1	1,81	3,82 \pm 2,07	7,08	1,81	3,42 \pm 1,71	6,47
2	3,35	4,59 \pm 1,16	6,38	3,67	4,89 \pm 1,36	6,96
3	3,76	5,82 \pm 1,70	7,46	2,70	5,30 \pm 2,98	9,17
13	0,83	1,26 \pm 0,81	2,04	0,80	1,35 \pm 0,51	2,65

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

As carreiras 5, 6, 10 e 11 foram operadas com taxa de filtração de $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Nessas carreiras, a turbidez da água bruta variou de 3,91 uT a 5,78 uT com média de 5,78 uT. Consequentemente, a turbidez da água decantada também permaneceu baixa, inferior a 2,0 uT em 100 % do tempo. Como resultado, obteve-se água filtrada com turbidez inferior a 0,5 uT em 97% do tempo em ambos os filtros. Assim, todas as carreiras de filtração foram encerradas por esgotamento da carga hidráulica disponível.

As carreiras 5 e 6 tiveram duração média de 6,9 horas e 7 horas para os filtros de areia de britagem e de areia natural de rio, respectivamente; nas carreiras 10 e 11 a duração média foi de 18,9 h para o filtro 1 e 18,7 h para o filtro 2. Comparativamente, a duração média das carreiras de filtração com taxa de $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ relatadas por Silva (2018) foi de 14,9 h para ambos os filtros

Silva (2018) também enfrentou dificuldades referentes à presença de algas na água afluyente aos filtros em carreiras de filtração com taxa de $270 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. No caso, a formação de bolhas no leito filtrante impossibilitou a obtenção de carreiras de filtração mais longas. No presente trabalho, foi identificada alta concentração de células de microalgas na água decantada: média nas carreiras 5 e 6 de, respectivamente, 5.233 e 2.173 cel.mL^{-1} . Esses valores elevados de concentração do fitoplâncton na água afluyente aos filtros interferiram diretamente na operação dessas unidades.

Em resumo, os valores de turbidez da água filtrada foram mais elevados na carreira 5: 0,22 uT a 0,82 uT para o filtro 1 e 0,30 uT a 0,83 uT para o filtro 2, em ambos os filtros, um único valor acima de 0,5 uT foi obtido no início da carreira (turbidez da água decantada igual

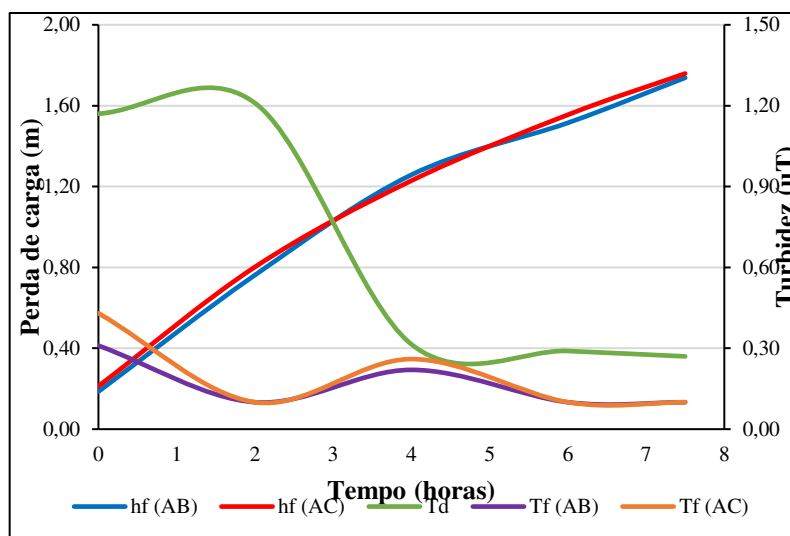
a 1,28 uT), dessa forma, não se caracterizando como trespasse. Nas demais carreiras de filtração a turbidez efluente dos filtros permaneceu em todo tempo inferior a 0,5 uT, sendo os menores valores registrados na carreira 11: 0,10 uT a 0,13 uT em ambos os filtros. Nesse caso, a turbidez afluyente aos filtros se encontrava entre 0,19 uT e 1,36 uT.

Para a simplificar a apresentação dos resultados, as figuras apresentadas a seguir são correspondentes às carreiras 6 e 11. Isto porque a carreira 6 assemelha-se à carreira 5, ambas se caracterizando por baixa eficiência de filtração, comparativamente às carreiras 10 e 11. Por sua vez, a carreira 11 desenvolveu-se de modo muito semelhante à carreira 10, com resultados melhores em termos de duração e turbidez da água filtrada em comparação com as outras duas referentes a taxa de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$. As demais figuras constam no apêndice deste trabalho.

As carreiras 6 e 11 foram encerradas por esgotamento da carga hidráulica disponível. Na Figura 28 são apresentados o comportamento da perda de carga e da turbidez da água decantada e filtrada ao longo das 7,5 horas de operação dos dois filtros. Nota-se que a turbidez da água decantada variou consideravelmente, ainda que em um curto espaço de tempo (0,29 uT a 1,21 uT), mas isto não impactou a qualidade da turbidez efluente em ambos os filtros, que permaneceu inferior a 0,3 uT na maior parte do tempo.

Aparentemente, os flocos afluentes aos filtros estavam bem neutralizados: o valor médio do PZ da água decantada foi de -6,30 mV (pH médio de 7,96), sendo que com duas 2 horas de operação dos filtros o valor era de -1,04 mV. Flocos bem neutralizados têm boa capacidade de aderência aos materiais filtrantes e de resistência às forças de cisalhamento, por conseguinte favorecem maior incremento de perda de carga (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). De fato, houve incremento considerável de perda de carga em curto período de tempo. Observa-se ainda na Figura 28 que a perda de carga total é muito similar entre o filtro de areia de britagem e o de areia convencional. Em relação ao esgotamento precoce da carga hidráulica disponível, isso pode ser associado, também, à aderência de algas no leito filtrante.

Figura 24 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 6

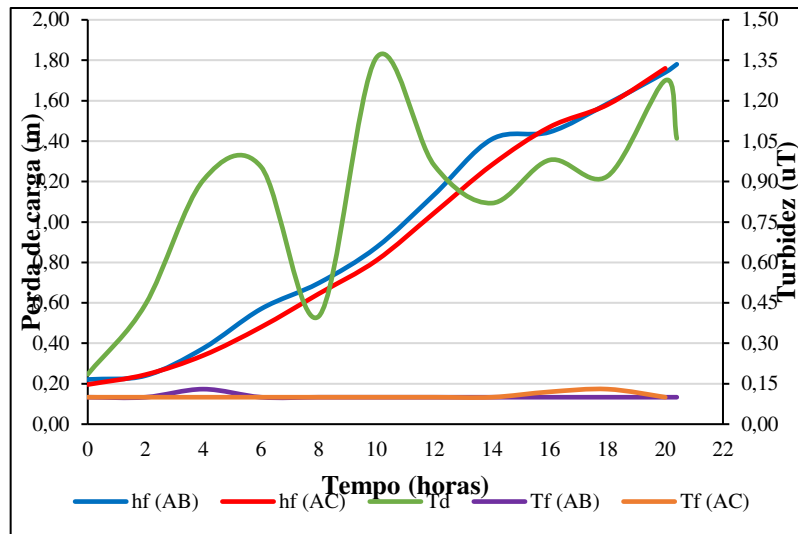


Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Em contraponto, a carreira 11 desenvolveu-se de maneira mais satisfatória que a carreira 6. Como se nota na Figura 29, essa carreira de filtração durou 20,4 horas para o filtro de areia de britagem e 20 horas para o filtro de areia convencional. Durante toda a carreira de filtração, a turbidez da água filtrada esteve abaixo de 0,15 uT em ambos os filtros (0,10 a 0,13 uT). Ingerese, assim, que a variação da turbidez da água decantada (0,19 a 1,36 uT; média de 0,84 uT) não afetou a qualidade da água produzida pelos filtros.

A perda de carga total nos leitos filtrantes ao longo da carreira de filtração foi similar nos dois filtros. Até 14 horas de operação, a perda de carga foi superior no filtro de areia de britagem, mas, a partir de 16 horas praticamente se igualou à apresentada no filtro de areia convencional. Ao término da carreira a perda de carga nos filtros de areia de britagem e de areia convencional foi de, respectivamente, 1,78 m e 1,76 m, e a turbidez da água filtrada foi igual a 0,10 uT em ambos os filtros.

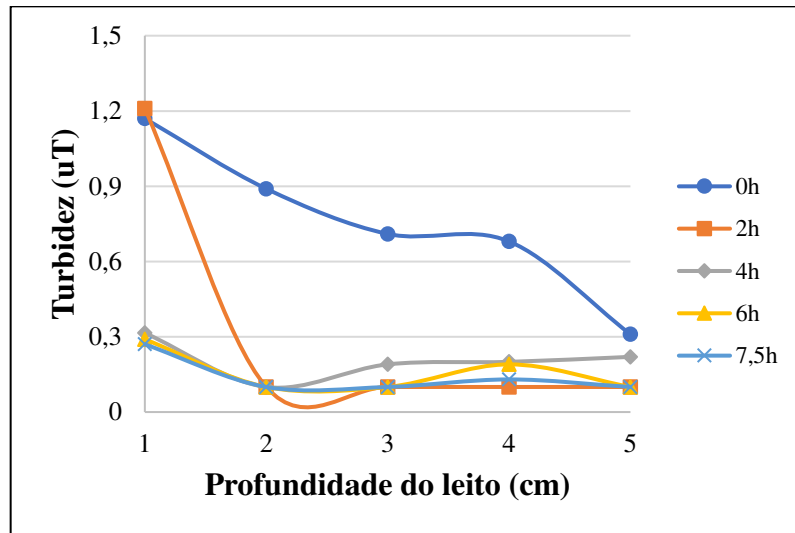
Figura 25 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 11



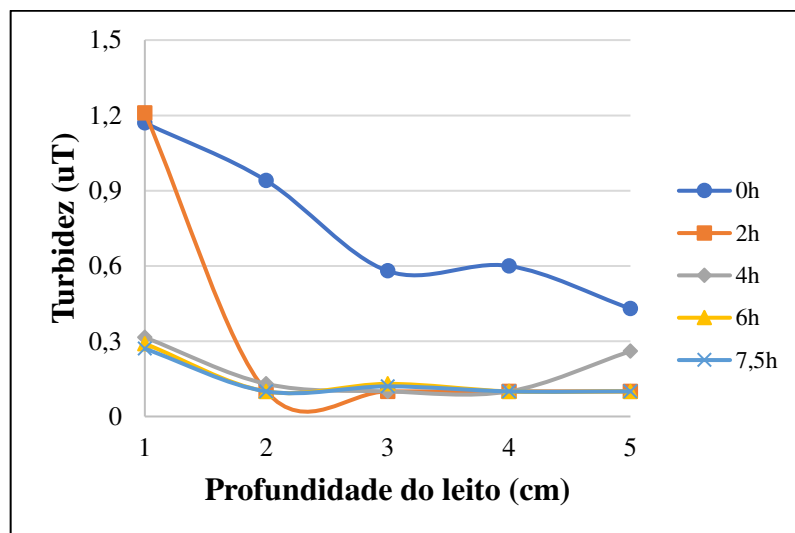
Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Em geral, taxas de filtração mais elevadas, favorecem a penetração dos flocos ao longo da profundidade do leito filtrante (CLEASBY E BAUMANN, 1962). Entretanto, o que é demonstrado nas Figuras 30 e 31 é que mesmo com taxa de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ a filtração ocorreu de forma, predominantemente, superficial. As duas figuras mostram que a remoção da turbidez foi mais acentuada até os primeiros 5 cm de profundidade dos leitos filtrantes. Com 20 horas de operação do filtro de areia convencional, é possível observar alguma tendência de deslocamento da frente de impurezas para profundidade superior a 5 cm, porém, já não havia carga hidráulica disponível para se confirmar tal fato.

Figura 26 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 6



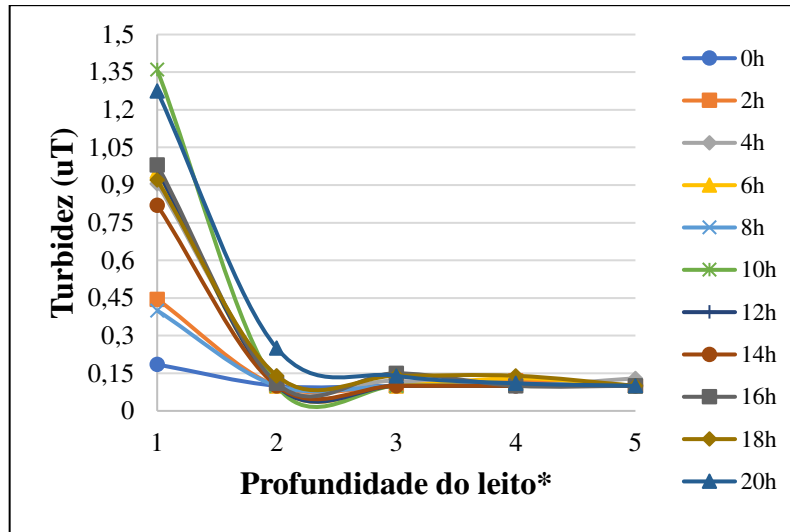
(a)



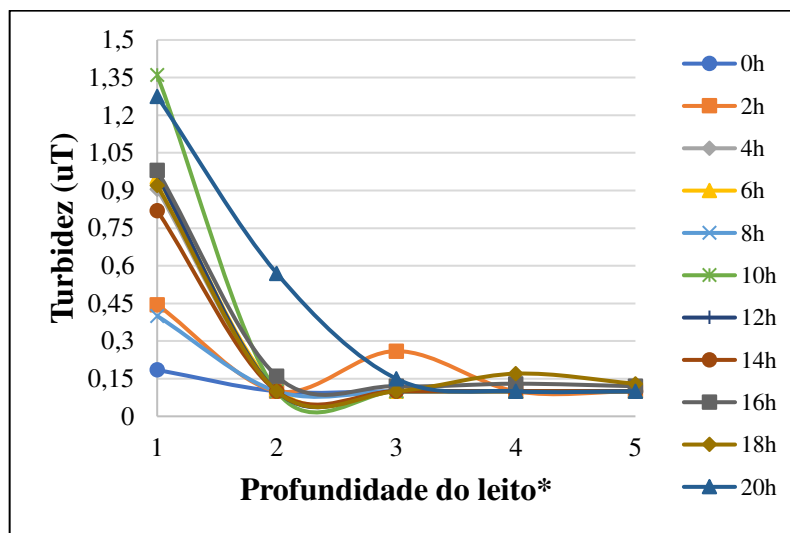
(b)

*1 = 0 cm; 2 = 5 cm; 3 = 10 cm; 4 = 15 cm; e 5 = 45 cm.

Figura 27 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 11



(a)

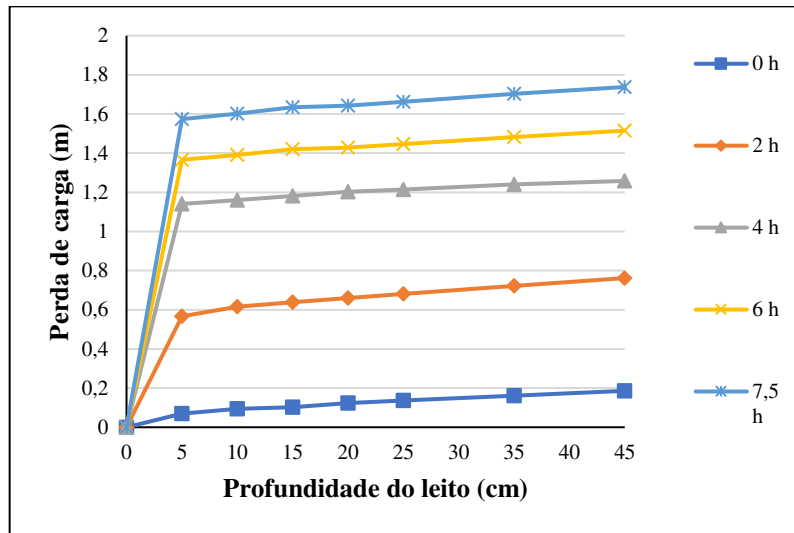


(b)

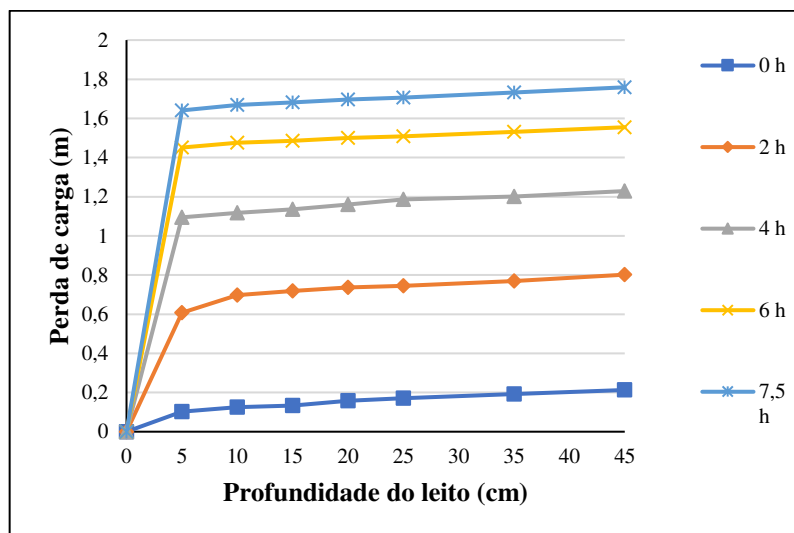
*1 = 0 cm; 2 = 5 cm; 3 = 10 cm; 4 = 15 cm; e 5 = 45 cm.

Do mesmo modo que para taxa de filtração de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, a perda de carga ao longo da profundidade do leito filtrante, também, confirma a predominância da filtração na camada superficial do leito. Como pode ser observado na Figura 32 e Figura 33 não há incrementos bruscos de perda de carga que justifiquem a movimentação da frente de impurezas para profundidades superiores a 5 cm.

Figura 28 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 6

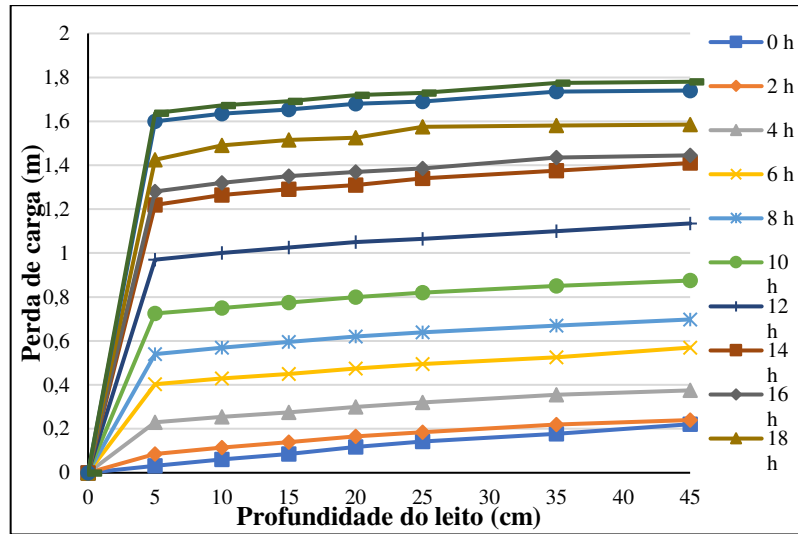


(a)

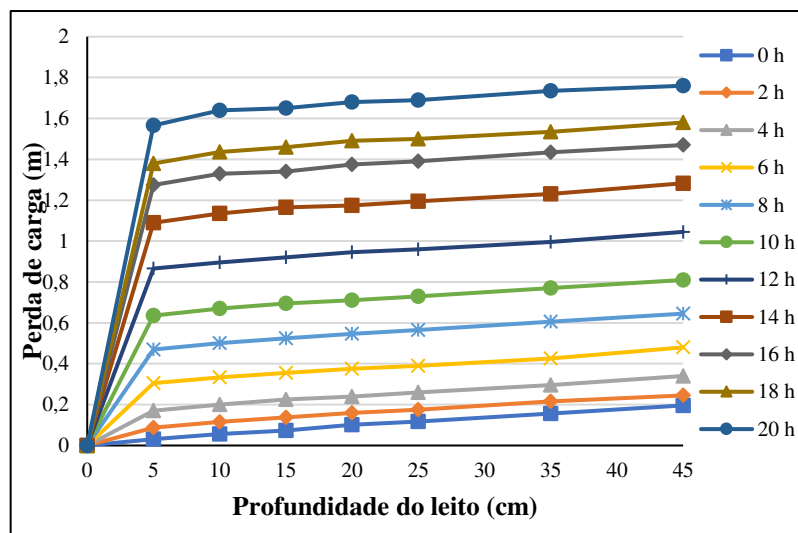


(b)

Figura 29 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 11



(a)



(b)

Até duas horas de operação, a turbidez da água afluyente aos filtros esteve entre 1,17 uT e 1,21 uT, após o que reduziu, consideravelmente, para valores entre 0,27 uT e 0,32 uT. Destaca-se ainda na Figura 32 o elevado incremento de perda de carga durante as primeiras quatro horas da carreira de filtração 6. Até duas horas de operação dos filtros, o potencial zeta da água decantada esteve próximo a zero (-1,04 mV), o que indica que as partículas tenham sido bem neutralizadas e apresentavam elevado potencial de serem retidas no leito filtrante. Além disso, nessa carreira de filtração havia muitas células de microalgas presentes na água afluyente aos

filtros, o que pode ter contribuído para a colmatção dos leitos filtrantes encurtamento da carreira.

O aumento mais expressivo na perda de carga na carreira 11 se deu após períodos em que os filtros permaneceram fora de operação, durante a noite (quando não era possível monitorar a carreira de filtração, devido ao horário de funcionamento da ETA UFV); isto é, no dia seguinte, com o reinício da operação dos filtros, fato relatado também por Silva (2018).

Os valores calculados do IFI, mostrados na Tabela 12, comprovam a diferença de desempenho dos filtros nas carreiras 10 e 11 (melhor) em comparação com as carreiras 5 e 6 (pior). Ressalta-se, assim, a influência negativa da floração de algas no desempenho da filtração: carreiras de filtração curtas, maior perda de carga no leito filtrante e pior qualidade da água afluenta aos filtros. A análise das informações da Tabela 12 permite ainda notar, em cada carreira, comportamento bem similar entre os dois filtros (valores de IFI próximos entre si). Ou seja, como já referido, uma vez que os flocos afluentes a ambos os filtros foram produzidos sob as mesmas condições de coagulação, que os dois filtros foram operados com a mesma taxa de filtração e que os respectivos leitos apresentavam as mesmas características físicas (granulometria e profundidade) não há indícios de propriedades intrínsecas ao material dos leitos filtrantes (areia natural e areia de britagem) que implique diferença de desempenho da filtração.

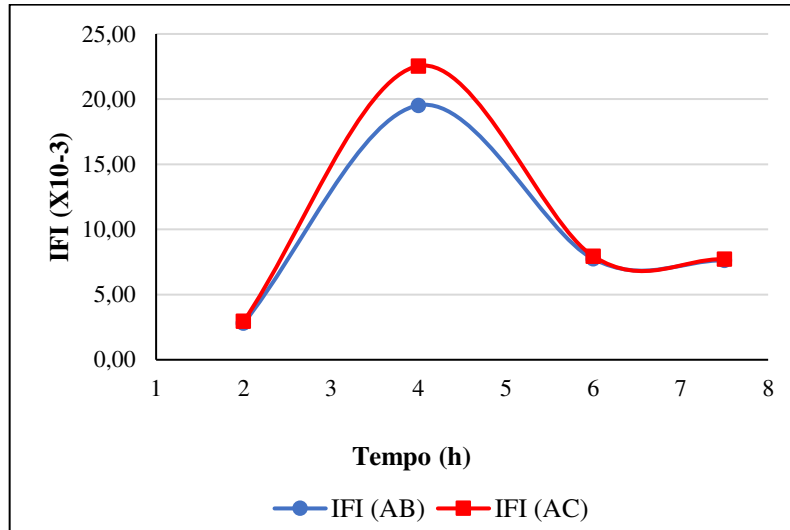
Tabela 12 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) nas carreiras operadas com taxa de filtração de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, período de estiagem

Carreira	Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI $\times 10^{-3}$)					
	Filtro 1			Filtro 2		
	Mínimo	Média \pm Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média \pm Desvio Padrão	Máximo
5	5,49	6,56 \pm 1,67	9,06	1,82	5,56 \pm 3,82	9,54
6	2,80	9,42 \pm 7,29	19,52	2,95	10,29 \pm 8,42	22,54
10	0,41	1,10 \pm 0,48	1,80	0,59	1,73 \pm 0,87	3,24
11	0,57	1,09 \pm 0,57	2,40	0,53	1,09 \pm 0,59	2,45

De modo mais detalhado, a Figura 34 apresenta o comportamento do IFI ao longo da carreira 6, na qual não foi possível notar aumento de eficiência ao longo do desenvolvimento da carreira de filtração. Além disso, com quatro horas de operação o IFI calculado elevou-se de forma brusca e pontual, violando a decair na sequência., o que foi resultado da turbidez efluente

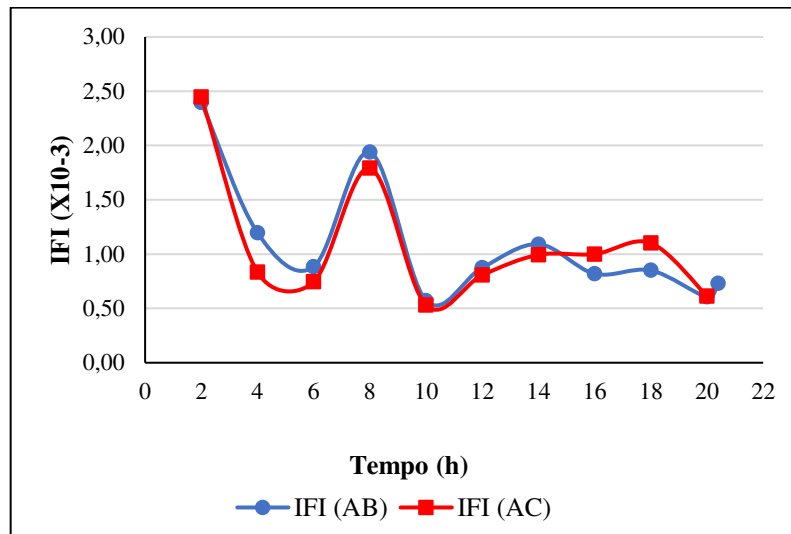
aos filtros mais elevada para turbidez da água decantada baixa (0,31 uT) e da perda de carga elevada.

Figura 30 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 6



Por outro lado, a eficiência dos filtros ao longo da carreira 11 tendeu a melhorar ao longo do tempo, com a exceção de um pico registrado com oito horas de operação, momento em que o valor da turbidez afluente aos filtros foi inferior aos obtidos anteriormente (0,40 uT), mas a turbidez da água filtrada se manteve igual à do tempo anterior. Em todo caso, a turbidez efluente foi igual a 0,1 uT para ambos os filtros, logo esse valor não expressa, necessariamente, comprometimento da filtração.

Figura 31 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 11



Em suma, os dados apresentados para as carreiras de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ reafirmam o já observado por Silva (2018). Ou seja, em termos de incremento de perda de carga, remoção de turbidez e eficiência de filtração, os filtros de areia de britagem e areia convencional apresentaram comportamento muito similar ao longo do desenvolvimento da carreira filtração.

Além disso, não foram verificadas diferenças marcantes no desempenho dos filtros com taxas de 180 ou $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, uma vez que os valores de IFI para as duas taxas foram próximos entre si. Essa avaliação necessita ser realizada sob a perspectiva das duas condições de operação observadas: floração intensa de algas no manancial de captação e abrandamento da floração devido a eventos isolados de chuvas.

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

As carreiras 7, 8, 9 e 12 foram operadas com taxa de filtração de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$. Nesse período, a turbidez da água bruta variou de 3,71 uT a 46,5 uT, com média de 16,2 uT. Por sua vez, a turbidez da água decantada permaneceu entre 0,44 uT e 4,38 uT, média de 1,48 uT. A turbidez da água afluyente aos filtros foi, predominantemente, baixa – menor que 2,0 uT em 74% do tempo. Consequentemente, todas as carreiras foram encerradas por esgotamento da carga hidráulica disponível.

As carreiras de filtração foram, em geral, mais curtas que as obtidas para as taxas de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, ao se considerar as condições favoráveis e desfavoráveis de

operação dos filtros. Na Tabela 13 é apresentada a duração das carreiras para cada um dos filtros.

Tabela 13 – Tempo de duração das carreiras de filtração operadas com taxa de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, período de estiagem

Carreira de filtração	Duração (horas)	
	Filtro de areia de britagem	Filtro de areia convencional
7	5,0	5,0
8	14,5	16,5
9	10,1	10,5
12	10,25	10,6

A carreira de filtração mais curta teve 5 horas de duração (carreira 7, em ambos os filtros), na qual a contagem de fitoplâncton na água afluyente aos filtros foi de 1855 cel.mL^{-1} . Por conseguinte, a perda de carga nas duas primeiras horas de operação foi de 76,2 cm no filtro de areia de britagem e 80 cm no filtro de areia convencional. O incremento de perda de carga no leito filtrante foi ainda maior entre 2 e 4 horas de operação, quando a perda de carga atingiu valores de 1,56 m e 1,52 m nos filtros de areia de britagem e areia convencional, respectivamente. Nesse período, as partículas presentes na água decantada encontravam-se bem neutralizadas (potencial zeta de -1,40 mV).

A carreira de filtração 8 foi a mais longa para a taxa de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, em ambos os filtros: 14,5 horas e 16,5 horas nos filtros de areia de britagem e areia convencional, respectivamente. Essa carreira, provavelmente, teve maior duração devido à chuva que promoveu diluição do fitoplâncton presente no manancial de captação. Prova disso é o resultado da contagem de fitoplâncton total na água decantada nesse período: média igual a 746 cel.mL^{-1} . Nessa carreira também foram observados os valores mais elevados de turbidez da água afluyente aos filtros – 1,89 uT a 4,38 uT, média igual a 2,57 uT.

Os valores da turbidez da água afluyente ao filtro foram menores nas carreiras 9 e 12, entre 0,44 uT e 1,51 uT, enquanto para as carreiras 7 e 8 variou entre 1,01 uT e 4,38 uT, mas isso não parece ter se refletido de forma tão nítida na turbidez da água filtrada, ao menos não no filtro 2; no caso do filtro 1, os valores de turbidez foram, de forma mais consistente, um pouco mais baixos nas carreiras 9 e 12 do que nas carreiras 7 e 8 (Tabela 14).

Tabela 14 – Turbidez da água filtrada para carreiras operadas com taxa de $360 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, período de estiagem

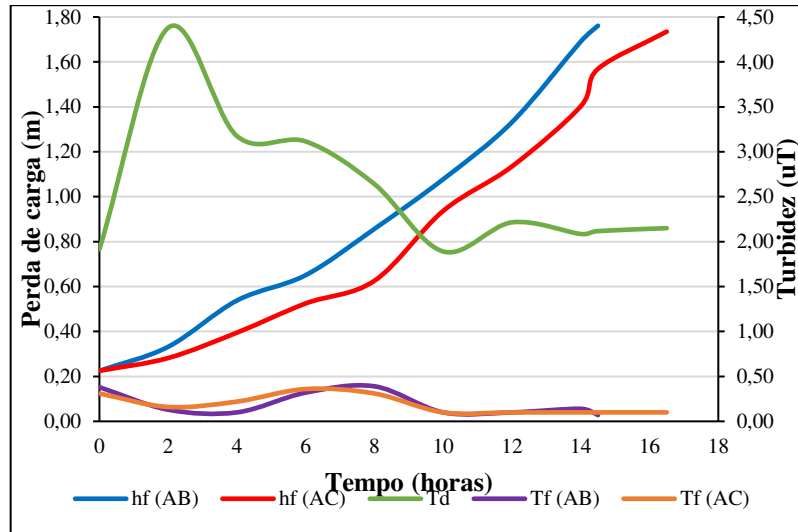
Carreira	Turbidez da água filtrada (uT)					
	Filtro de areia de britagem			Filtro de areia convencional		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
7	0,13	0,23	0,46	0,10	0,17	0,39
8	0,10	0,19	0,39	0,10	0,19	0,36
9	0,10	0,14	0,27	0,10	0,13	0,23
12	0,10	0,16	0,45	0,10	0,22	0,39

A fim de discutir o comportamento dos filtros de areia de britagem e de areia convencional serão apresentadas as figuras correspondentes à carreira 8. As demais figuras serão apresentadas no apêndice desse trabalho.

Durante toda a carreira de filtração 8 a turbidez da água filtrada esteve abaixo de 0,40 uT em ambos os filtros: 0,10 uT a 0,39 uT, no filtro 1; e 0,10 uT a 0,36 uT, no filtro 2. Aparentemente, a variação da turbidez da água decantada (1,89 uT a 4,38 uT) não afetou na qualidade da água produzida pelos filtros, como mostra a Figura 36.

O incremento de perda de carga ao longo da carreira de filtração foi um pouco superior no filtro de areia de britagem em comparação ao filtro de areia convencional, durante toda a carreira de filtração.

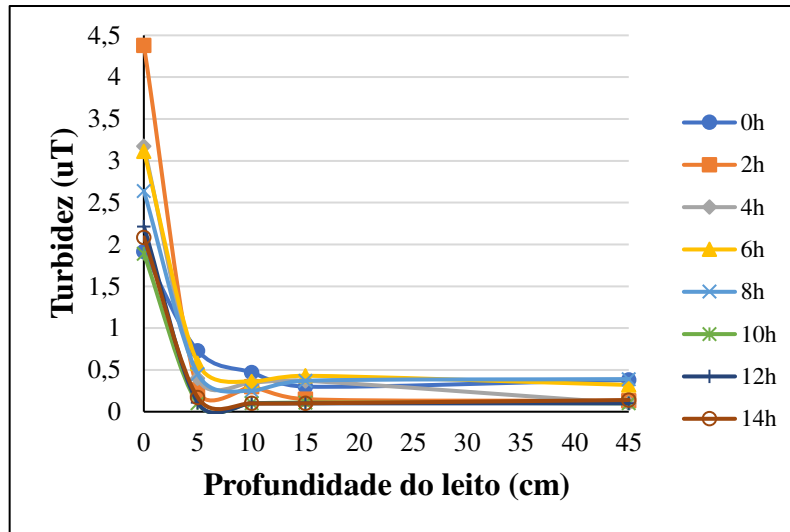
Figura 32 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 8



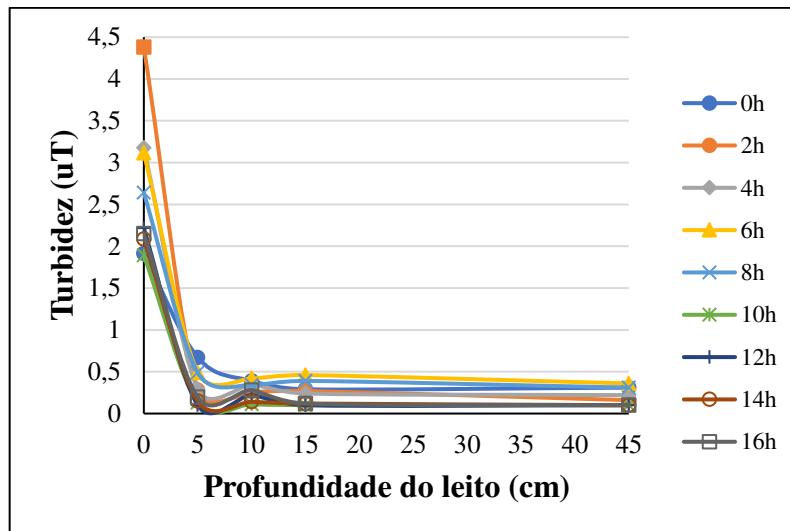
Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Da mesma forma que para as taxas de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, a filtração em profundidade não foi claramente observada e a remoção de turbidez se deu de modo mais efetivo até 5 cm de profundidade do leito filtrante (Figura 37), ainda que a taxa de filtração aplicada tenha sido o dobro da máxima recomendada em norma – NBR 12216 / 1992 (ABNT, 1992).

Figura 33– Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 8



(a)

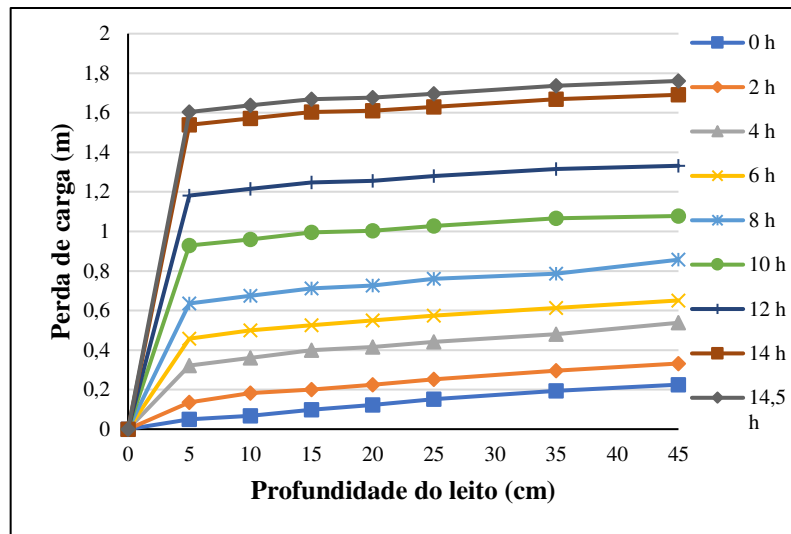


(b)

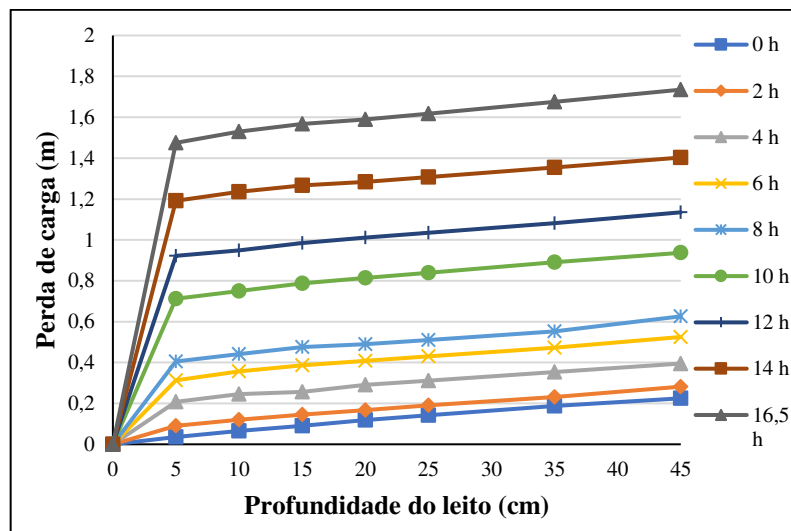
*1 = 0 cm; 2 = 5 cm; 3 = 10 cm; 4 = 15 cm; e 5 = 45 cm.

Não foi encontrada razão específica para a carreira filtro de areia de britagem ter sido um pouco mais curta. Como pode ser observado na Figura 38, durante toda a carreira as perdas de carga ao longo do leito filtrante foram maiores nesse filtro do que no de areia convencional, em especial, no intervalo entre o tempo de 12 e 14 horas de operação. No filtro de areia convencional o maior incremento de perda de carga se deu entre 8 e 10 horas de operação, devido ao tempo em que os filtros permaneceram fora de operação. Além disso, o potencial zeta esteve mais próximo a zero nesses dois momentos (-3,16 e -2,07 mV, respectivamente).

Figura 34 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 8



(a)



(b)

Na Tabela 15 nota-se que, como um todo, o IFI apresentou variação considerável entre as carreiras de filtração. Entretanto, quando vistos em cada carreira isoladamente, os valores médios de IFI dos dois filtros foram próximos. Ou seja, assim, como já discutido em itens anteriores, dadas as mesmas condições de operação, os filtros de areia e de areia de britagem apresentaram desempenho semelhante (ainda que, salvo exceções, os valores de IFI do filtro de areia de britagem tenham sido um pouco superiores aos do filtro de areia). Além disso, do mesmo modo que para as taxas de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, nota-se claramente a influência das algas presentes na água decantada - como pode ser observado na Tabela 15, os menores

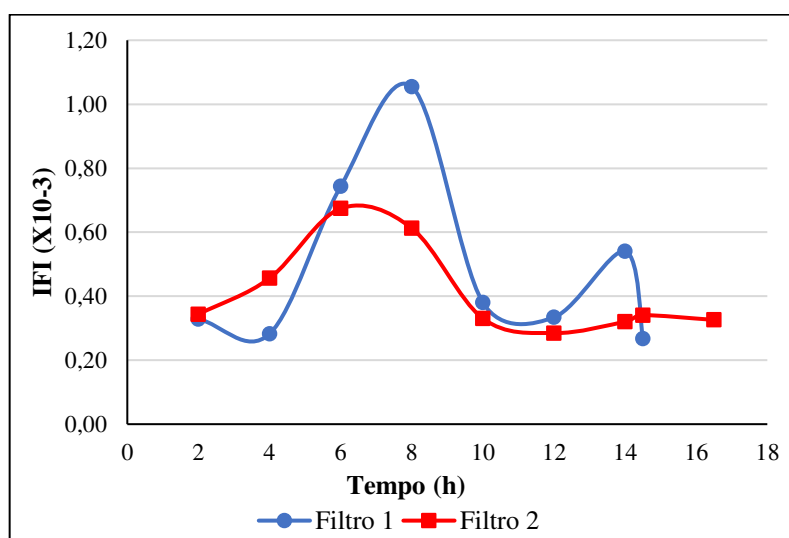
valores de IFI correspondem à carreira 8, justamente a que coincidiu com a menor contagem de fitoplâncton total.

Tabela 15 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) para carreiras operadas com $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, período de estiagem

Carreira	Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI $\times 10^{-3}$)					
	Filtro de areia de britagem			Filtro de areia convencional		
	Mínimo	Média \pm Desvio Padrão	Máximo	Mínimo	Média \pm Desvio Padrão	Máximo
7	2,52	5,13 \pm 4,29	10,09	1,70	4,21 \pm 4,16	9,01
8	0,27	0,49 \pm 0,29	1,06	0,28	0,41 \pm 0,14	0,67
9	0,91	2,32 \pm 1,50	5,00	0,89	1,79 \pm 1,07	3,89
12	1,15	2,27 \pm 1,83	5,92	1,13	3,02 \pm 1,58	5,70

A Figura 39 apresenta a evolução do IFI ao longo da carreira 8 nos dois filtros. Fica claro que até 8 horas de operação não houve melhora na eficiência da filtração para ambos os filtros. Isso ocorreu devido aos valores de turbidez da água filtrada mais elevados no início da carreira: 0,10 uT a 0,39 uT para o filtro 1 e 0,16 uT a 0,36 uT para o filtro 2. Logo após esse período a turbidez da água filtrada manteve-se praticamente estável até o fim da carreira de filtração, em valores baixos: 0,1 uT a 0,14 uT para o filtro de areia de britagem e 0,1 uT para o filtro de areia convencional. A partir de 6 horas de operação, o IFI do filtro 1 supera o do filtro 2, o que se deve a perda de carga no leito filtrante mais elevada para o primeiro filtro.

Figura 35 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 8



4.2. Caracterização das carreiras de filtração no período chuvoso

O período chuvoso correspondeu ao intervalo entre os meses de setembro de 2019 e março de 2020. Nesse período foram monitoradas nove carreiras de filtração, três para cada uma das taxas de filtração ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$). Neste período, fortes chuvas contribuíram para valores mais elevados de turbidez da água bruta e, por conseguinte, da água decantada na ETA UFV. No decorrer das carreiras de filtração a turbidez da água bruta, na entrada da ETA UFV, esteve entre 21,2 uT e 1.115 uT, percentil 95% de 673,4 uT e média de 157,5 uT. A turbidez da água decantada esteve entre 1,24 uT e 17,15 uT, percentil 95% de 8,18 uT e média de 4,37 uT. Em virtude disso, as doses de coagulante aplicadas, também foram mais elevada que as do período de estiagem: entre 10 mg.L^{-1} e 32 mg.L^{-1} de sulfato de alumínio.

A elevada turbidez da água bruta, combinada com as altas doses de coagulante, provavelmente favoreceu o mecanismo de varredura, com formação de flocos “frágeis” e, portanto, o desenvolvimento de carreiras de filtração mais longas. O tempo de duração das nove carreiras avaliadas esteve entre 25,5 horas e 44,5 horas para o filtro de areia de britagem, e entre 26 horas e 42,5 horas para o filtro de areia convencional.

Assim sendo, para cada taxa de filtração, as carreiras se comportaram de modo mais homogêneo. Dessa forma, para efeito de ilustração e discussão dos resultados, foram selecionados os gráficos de uma carreira para cada taxa de filtração. A seguir, encontra-se uma análise mais detalhada das carreiras de filtração desse período.

No período chuvoso, para cada taxa de filtração, as carreiras se comportaram de modo mais homogêneo. Dessa forma, para efeito de discussão dos resultados foram selecionados os gráficos de uma carreira para cada taxa de filtração. A seguir, encontra-se uma análise mais detalhada das carreiras de filtração desse período.

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

No período de chuvas, as carreiras 15, 20 e 22 foram operadas com taxa de filtração de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$. Durante essas carreiras de filtração, a turbidez da água bruta permaneceu elevada (entre 23,2 uT e 1115 uT, média = 164,1 uT; percentil 90 = 789 uT), com alta variabilidade ($\sigma = 293,3$ uT e coeficiente de variação = 179%). As variações da qualidade da água bruta foram bem absorvidas na etapa de decantação, de modo que a turbidez da água decantada esteve entre 1,84 uT a 6,87 uT ($\sigma = 1,2$ uT e coeficiente de variação = 30%), média de 4,01 uT e percentil 90 = 6 uT. Mesmo assim, os valores de turbidez da água afluenta aos filtros foram mais elevados que os observados no período de estiagem:

Mesmo com valores mais elevados de turbidez da água decantada, os filtros produziram água de boa qualidade: a turbidez da água filtrada esteve entre 0,07 uT e 0,44 uT (média = 0,13 uT) no filtro de areia de britagem, e 0,07 uT e 0,43 uT (média = 0,13 uT) no filtro de areia convencional. Esses valores de turbidez obtidos foram melhores que os observados nas carreiras de filtração do período de estiagem para a taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (média de 0,33 uT e 0,32 uT nos filtros 1 e 2, respectivamente).

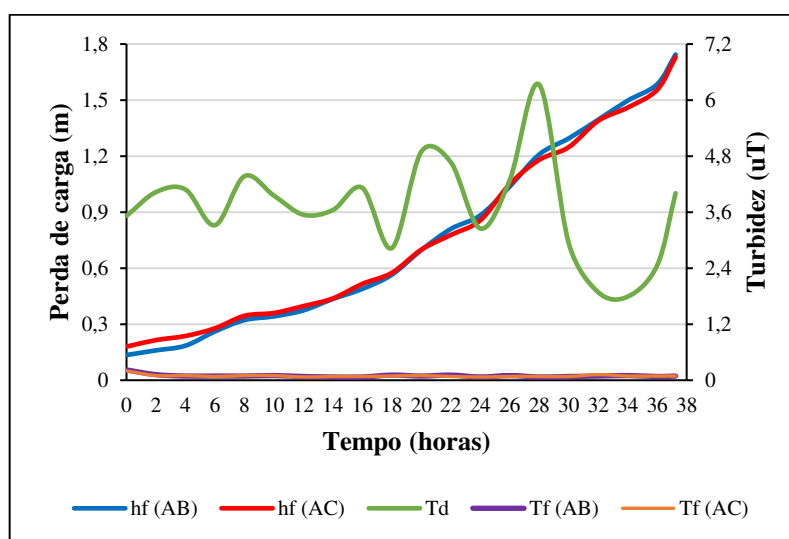
Além dos valores de turbidez remanescente mais baixos, as carreiras de filtração foram mais longas no período chuvoso em comparação com o período de estiagem: superior a 37 horas, máximo de 44,5 horas. Em média, o filtro de areia de britagem teve carreira de filtração de 42 horas e o de areia convencional de 41 horas. Em comparação, para essa mesma taxa no período de estiagem, a duração média das carreiras foi de 14,3 horas para o filtro de areia de britagem e 14 horas para o filtro de areia convencional.

O tipo de floco formado na coagulação e floculação e a taxa de filtração aplicada são fatores que influenciam na duração de uma carreira de filtração (CEPIS, 2004). Como referido, os filtros foram operados em condições de águas com elevada turbidez, caso em que a coagulação tende, predominantemente, a ser realizada pelo mecanismo de varredura (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Assim, com os flocos formados são mais frágeis e com menor capacidade de aderência, à medida que a carreira se desenvolve há menor

incremento de perda de carga. Como não houve trespasse em nenhuma das carreiras, o resultado foram carreiras de filtração mais longas.

Na carreira de filtração 20 é possível visualizar com clareza a semelhança no desempenho dos filtros de areia de britagem e de areia convencional. Percebe-se na Figura 40 que a perda de carga no leito filtrante aumentou gradualmente e de modo muito similar em ambos os filtros. Além disso, as oscilações de qualidade da água decantada não impactaram a turbidez da água filtrada, que se manteve abaixo de 0,25 uT em 90% do tempo em ambos os filtros. Valores abaixo de 0,11 uT foram obtidos em 75% das amostras de água filtrada. Observa-se ainda na Figura 40 que as curvas correspondentes à turbidez da água filtrada nos filtros de areia de britagem e de areia convencional se sobrepõem, o que indica que os filtros produziram água com, praticamente, a mesma qualidade.

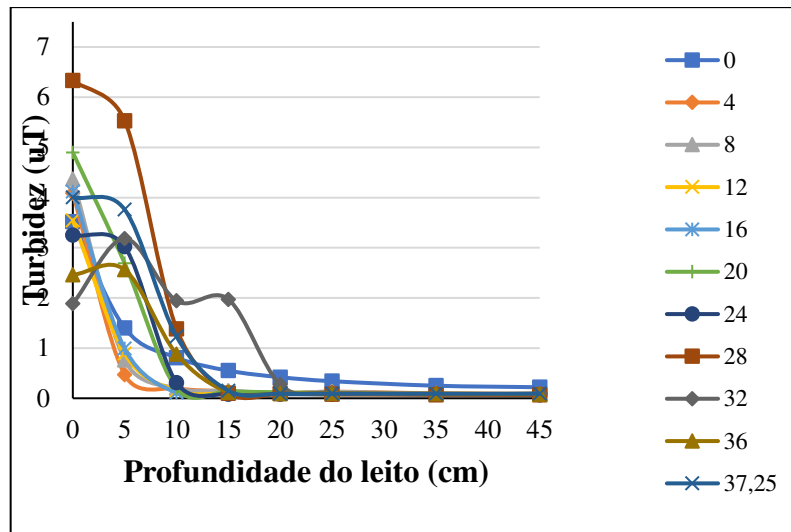
Figura 36 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 20, período chuvoso.



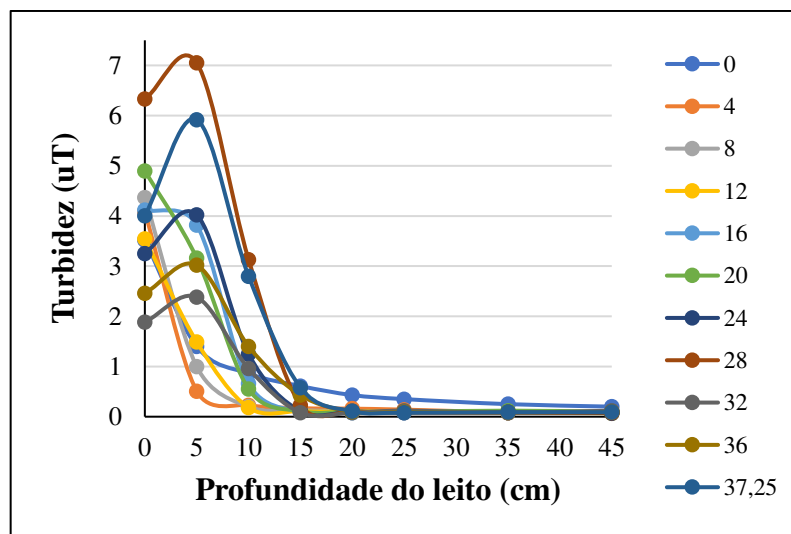
Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Nessa carreira de filtração foi possível observar o movimento da frente de impurezas no leito filtrante para profundidades superiores a 5 cm. Como se pode notar na Figura 41, em determinados tempos de operação do filtro a turbidez na profundidade de 5 cm esteve mais próxima daquela verificada para a água decantada; em seguida, aos 10 cm de profundidade do leito a turbidez atinge valores mais elevados que os da água filtrada. Depreende-se, assim, que a remoção de turbidez tenha se dado de modo mais efetivo nos 15 cm de profundidade.

Figura 37 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 20, período chuvoso



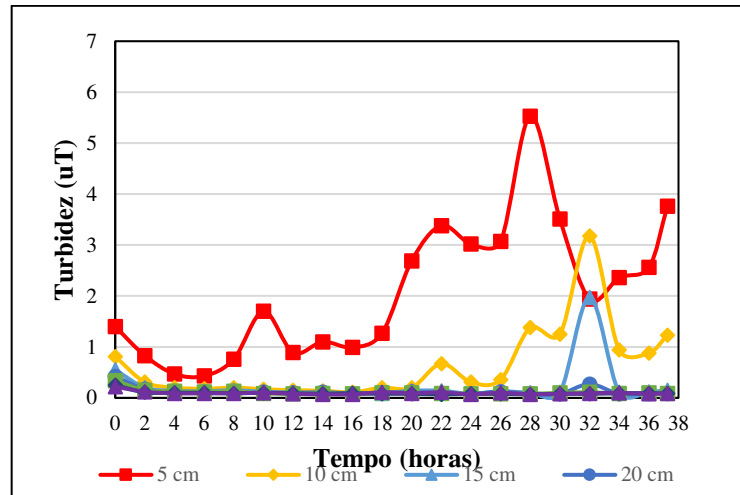
(a)



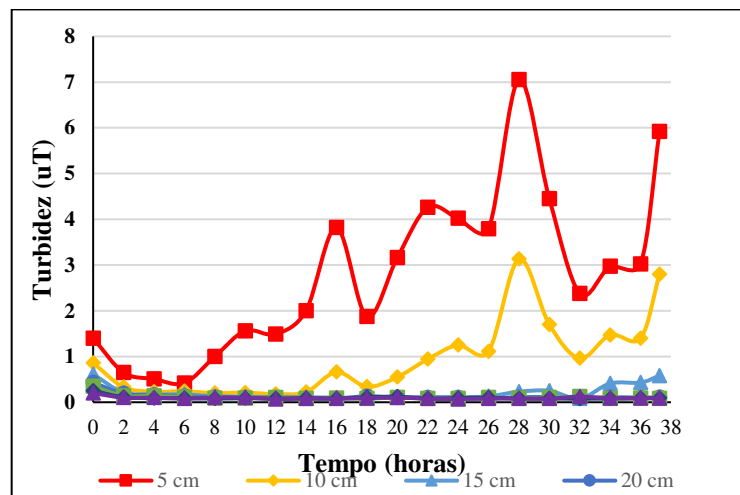
(b)

Na Figura 42 apresenta-se a turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração. A partir de 28 horas de operação, nota-se, nos dois filtros, tendência de aumento da turbidez na profundidade de 10 cm e valores bem mais próximos entre a turbidez da água decantada e a turbidez na profundidade de 5 cm do leito. Os valores de potencial zeta da água decantada estiveram entre -11,1 e -2,1 mV, com média de -6,20 mV, valores estes próximos à neutralidade e que devem ter favorecido a retenção dos flocos nas camadas mais superficiais dos leitos filtrantes.

Figura 38 – Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração: (a) filtro de areia de britagem (b) filtro de areia convencional – Carreira 20, período chuvoso



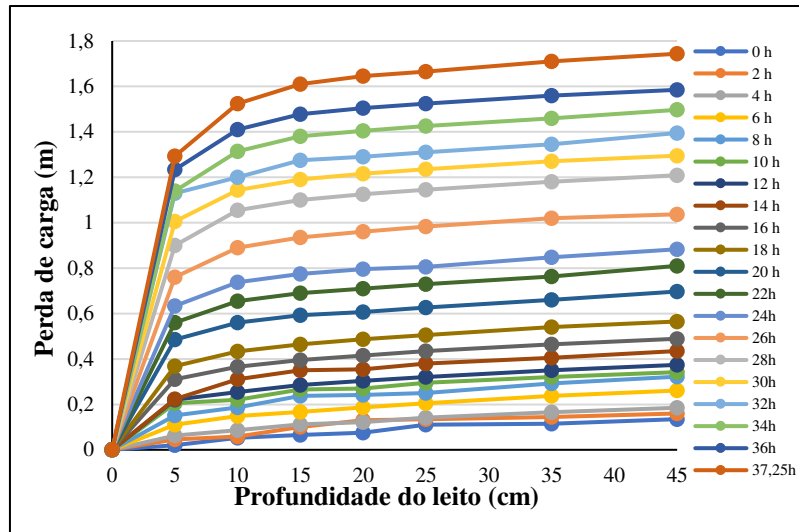
(a)



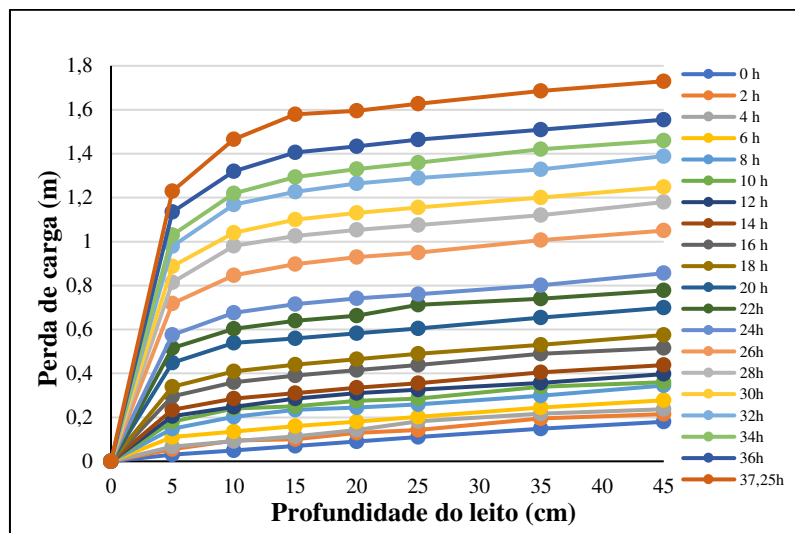
(b)

A figura 43 mostra a evolução da perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes. De modo diferente do registrado no período de estiagem, a movimentação da frente de impurezas pode ser observada no incremento de perda de carga na profundidade de 10 cm e, de modo menos acentuado, na profundidade de 15 cm do leito. Como já mencionado, ainda que neste caso a filtração se caracterize como superficial para ambos os filtros, houve ganho em relação ao prolongamento das carreiras de filtração devido a este incremento gradual da perda de carga.

Figura 39 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 20, período chuvoso



(a)



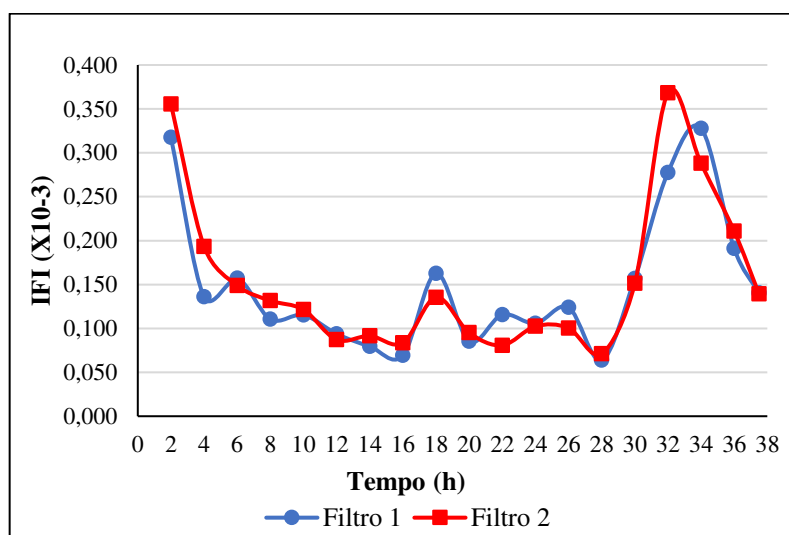
(b)

Devido à elevada remoção de turbidez e às carreiras de filtração mais longas no período de chuvas, os valores de IFI calculados para as carreiras 15, 20 e 22 foram bem inferiores aos observados no período de estiagem para a mesma taxa de filtração ($180 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$): $5,28 \times 10^{-5}$ a $3,7 \times 10^{-4}$ e $7,38 \times 10^{-5}$ a $4,51 \times 10^{-4}$, respectivamente para os de areia de britagem e de areia natural no período de chuvas; $8,30 \times 10^{-4}$ a $7,46 \times 10^{-3}$ (areia de britagem) e $8,00 \times 10^{-4}$ a $9,17 \times 10^{-3}$ (areia natural), no período de estiagem.

A Figura 44 ilustra o comportamento do IFI ao longo da carreira de filtração para os filtros de areia de britagem e de areia natural, o que reforça o entendimento que os dois filtros

apresentaram desempenho muito similar. Os valores um pouco mais elevados próximos ao fim da carreira não se devem à redução da qualidade da água filtrada, mas sim, aos valores de turbidez da água decantada inferiores aos do início da carreira.

Figura 40 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 20, período chuvoso



4.2.2. Taxa de filtração de 270 m³m⁻²d⁻¹

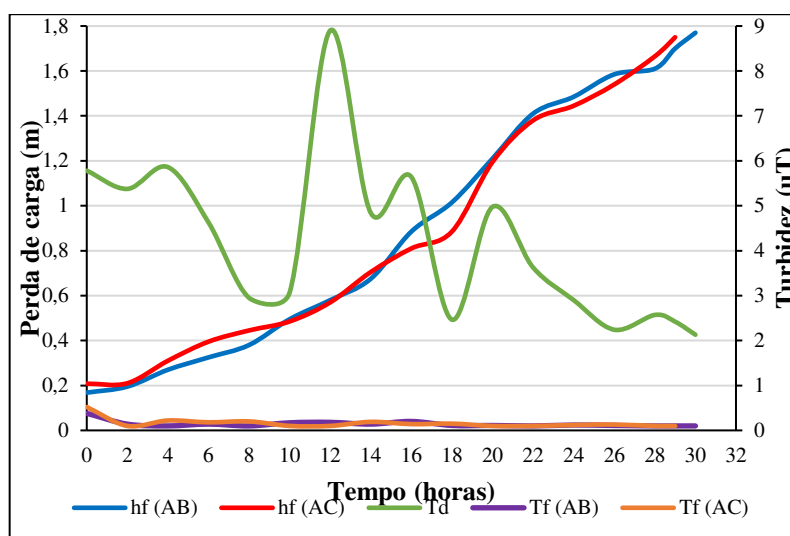
As carreiras 14, 18 e 21 foram operadas, no período chuvoso, com taxa de filtração de 270 m³m⁻²d⁻¹. Nessas carreiras a turbidez da água bruta permaneceu entre 31,2 uT e 195,3 uT, média de 91 uT (percentil 90 de 172,2 uT). Além dos valores de turbidez da água bruta serem inferiores aos observados para a taxa de 180 m³m⁻²d⁻¹, a variabilidade dos dados também foi menor ($\sigma = 48,51$ uT e coeficiente de variação = 53%). Por sua vez, a variação na turbidez da água decantada foi superior à das demais carreiras de filtração: entre 1,34 uT e 17,15 uT (média = 4,57 uT; $\sigma = 2,95$ uT e CV = 64%).

Assim como nas carreiras de 180 m³m⁻²d⁻¹, os filtros produziram água filtrada com baixos valores de turbidez: 0,06 uT a 0,23 uT (média = 0,11 uT, percentil 95 = 0,19 uT), para o filtro de areia de britagem; 0,05 a 0,26 uT (média = 0,12 uT, percentil 95 = 0,21 uT), para o filtro de areia convencional. Durante todo o período de operação dos filtros a turbidez do efluente esteve abaixo de 0,3 uT, sendo este o padrão de turbidez de água filtrada em normas de qualidade da água em vários países, por exemplo a dos EUA (USEPA, 2006), e tido como indicador da remoção de oocistos de *Cryptosporidium*.

As carreiras de filtração com taxa de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ foram bem mais longas no período chuvoso do que no período de estiagem. Em média, a duração das carreiras foi de 32,3 horas para o filtro de areia de britagem e 32,5 horas para o de areia convencional. Por outro lado, no período de estiagem, para essa mesma taxa de filtração, a duração média das carreiras foi de 12,9 horas para o filtro de areia de britagem e 12,8 horas para o filtro de areia convencional.

Como pode ser observado na Figura 45, mesmo que com valores de turbidez mais elevados da água afluyente aos filtros, ao longo de toda a carreira 14 foi produzida água filtrada com turbidez abaixo de 0,3 uT, com exceção do início da carreira de filtração (tempo 0). A turbidez da água decantada esteve entre 2,13 uT e 8,9 uT, média igual a 4,14 uT, e em 75 % do tempo a turbidez da água filtrada foi inferior a 0,16 uT no filtro de areia de britagem e 0,19 uT no filtro de areia convencional. Mais uma vez, as curvas correspondentes à turbidez da água filtrada nos filtros de areia de britagem e de areia convencional se sobrepõem, o que demonstra a similaridade dos filtros na qualidade da água produzida (Figura 45).

Figura 41 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 14

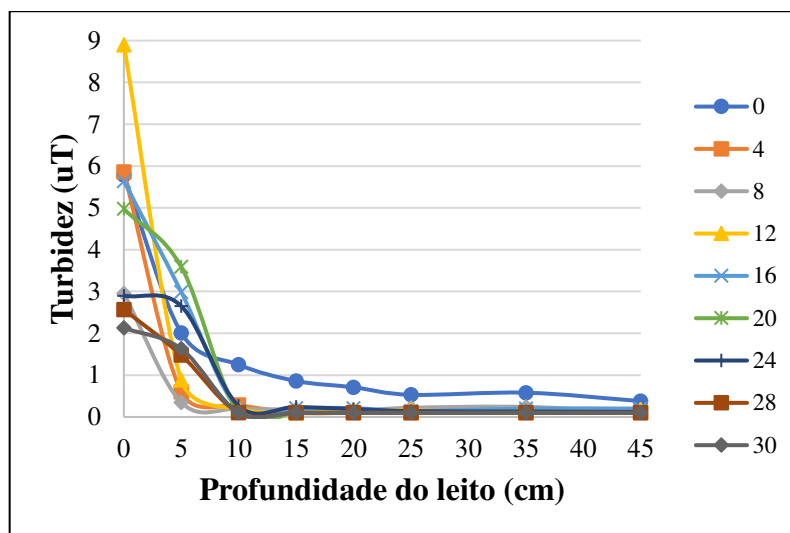


Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

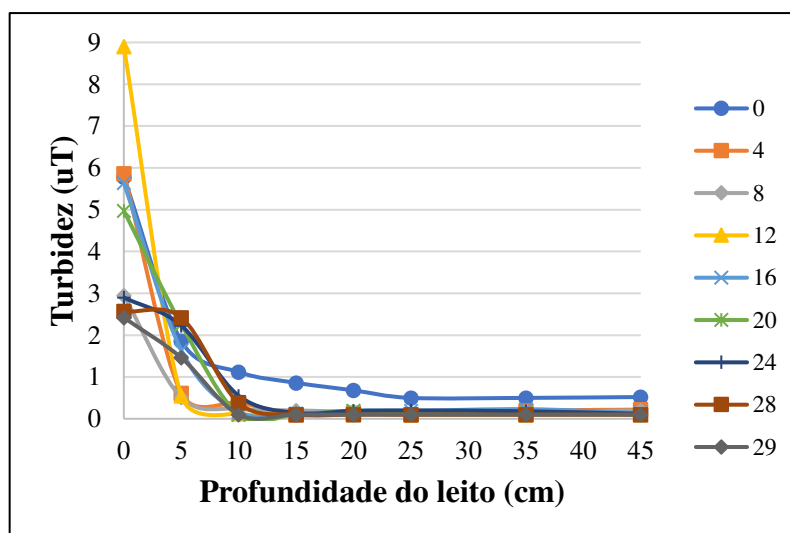
Da mesma forma que para taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, é possível observar uma pequena movimentação da frente de impurezas ao longo do leito filtrante. Na Figura 46, observa-se que a partir de 20 horas de operação dos filtros a turbidez em 5 cm de profundidade do leito

aproxima-se da turbidez da água decantada e que a remoção de impurezas se dá de forma mais acentuada na profundidade de 10 cm.

Figura 42 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 14, período chuvoso



(a)

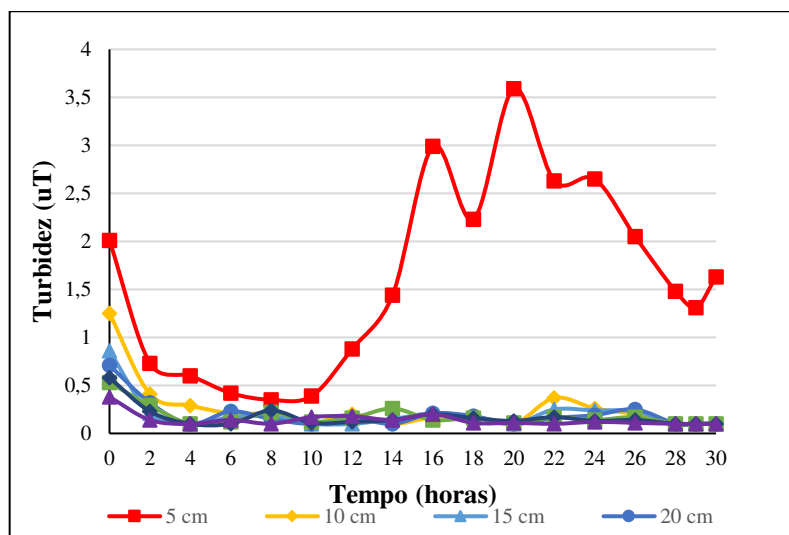


(b)

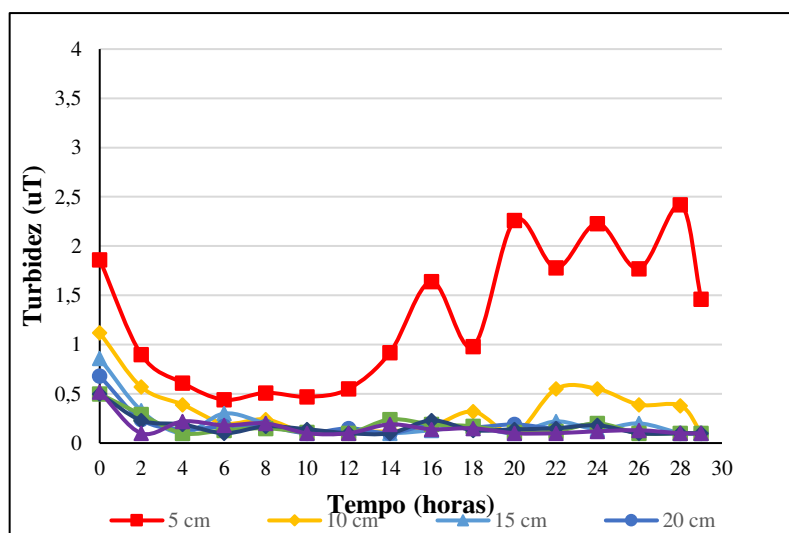
Na Figura 47 é possível notar aumento da turbidez na profundidade de 5 cm do leito, de maneira mais acentuada no leito de areia de britagem. Contudo, com taxa de filtração mais elevada ($270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$), esperava-se maior movimentação da frente de impurezas ao longo do leito filtrante. No entanto -é preciso notar que o potencial zeta na água afluyente aos filtros estava

suficientemente reduzido, de modo a favorecer a aderência das partículas nos grãos do leito filtrante: entre -19,2 e -4,78 mV, média igual a -12,56 mV e pH médio de 6,4 (na carreira 14).

Figura 43 – Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração: (a) filtro de areia de britagem (b) filtro de areia convencional – Carreira 14, período chuvoso



(a)

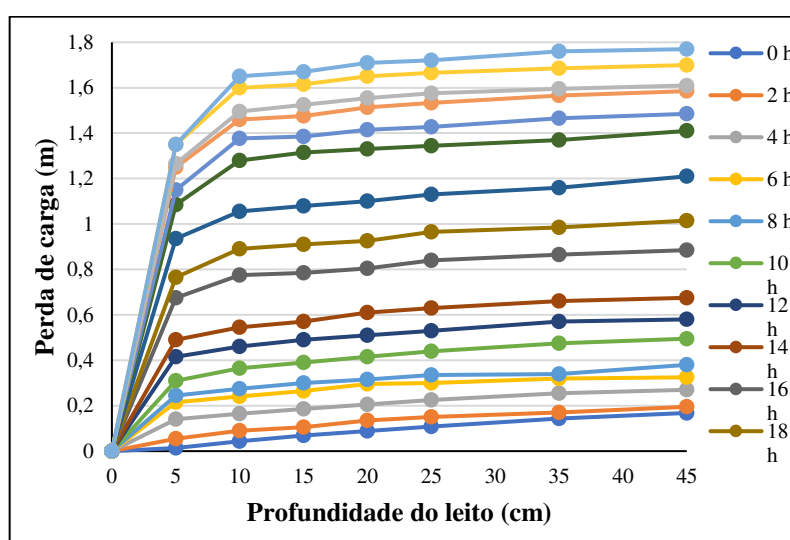


(b)

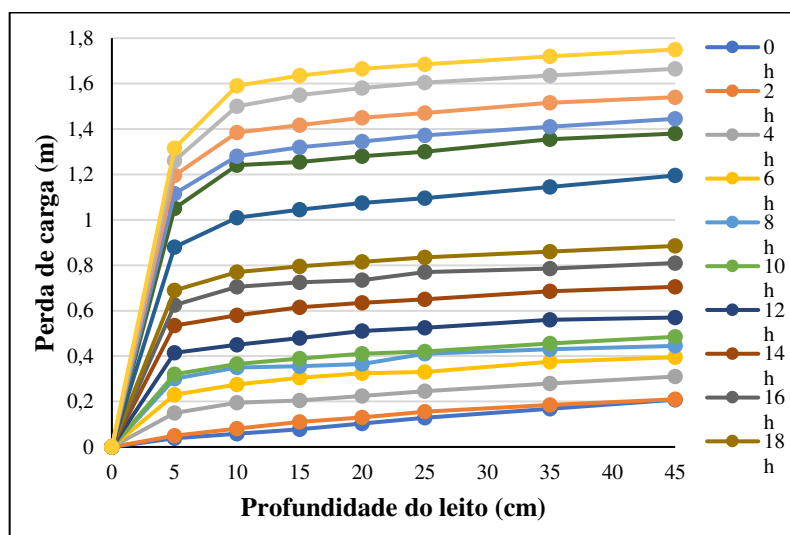
Na Figura 48 é apresentada a evolução da perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes. Similarmente às carreiras com taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, se observa tendência de incremento de perda de carga na profundidade de 10 cm do leito, o que indica o movimento da frente de impurezas na camada do leito entre 5 cm e 10 cm. Portanto, ainda que entendendo a

filtração nesse caso como superficial, as carreiras de filtração foram mais longas que as observadas no período de estiagem.

Figura 44 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 14



(a)

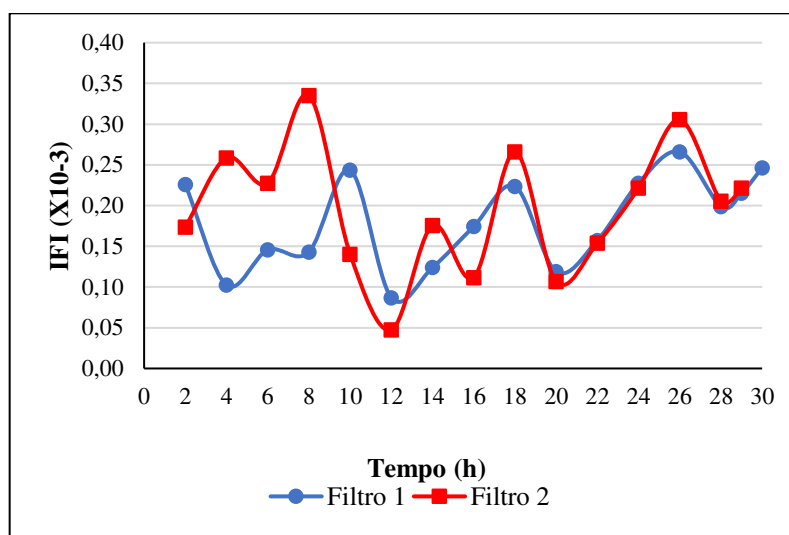


(b)

Os valores do IFI calculados para a carreira 14 são da mesma ordem de grandeza dos correspondentes à taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$; $1,39 \times 10^{-5}$ a $6,65 \times 10^{-4}$ para o filtro de areia de britagem, e $4,74 \times 10^{-5}$ a $7,87 \times 10^{-4}$ para o de areia convencional; ou seja, duas a três vezes menores, em ordem de grandeza, que os obtidos no período de estiagem, o que se justifica devido à elevada remoção de turbidez e à carreira de filtração mais longa.

Na Figura 49 se apresenta a evolução do IFI ao longo da carreira de filtração 14, o que mais uma vez demonstra a desempenho semelhante dos dois filtros. Os valores um pouco mais elevados no início da carreira para o filtro de areia convencional devem-se à turbidez efluente um pouco superior em comparação ao filtro de areia de britagem. As demais oscilações nos valores, devem-se a variação da turbidez da água decantada, pois a turbidez da água filtrada permaneceu estável até o encerramento da carreira por esgotamento da carga hidráulica disponível.

Figura 45 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 14, período chuvoso



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

As carreiras 16, 17 e 19 foram operadas com taxa de filtração de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, as quais foram, todas, encerradas por esgotamento da carga hidráulica disponível. Nesse período, a turbidez da água bruta manteve-se elevada, entre 21,2 uT e 593,8 uT, média igual a 215,7 uT ($\sigma = 186,03 \text{ uT}$ e coeficiente de variação = 86%). Devido à elevada variação da turbidez da água bruta, a água decantada, também, apresentou valores mais elevados, entre 1,24 e 12,15 uT, média igual a 4,64 uT ($\sigma = 2,52 \text{ uT}$ e coeficiente de variação = 54%). Mais uma vez, como esperado, a turbidez afluente aos filtros foi maior que a observada no período de estiagem para a mesma taxa de filtração.

Ainda que a turbidez da água afluente aos filtros fosse alta, os valores obtidos de turbidez da água filtrada estiveram dentro do estabelecido no padrão de potabilidade brasileiro:

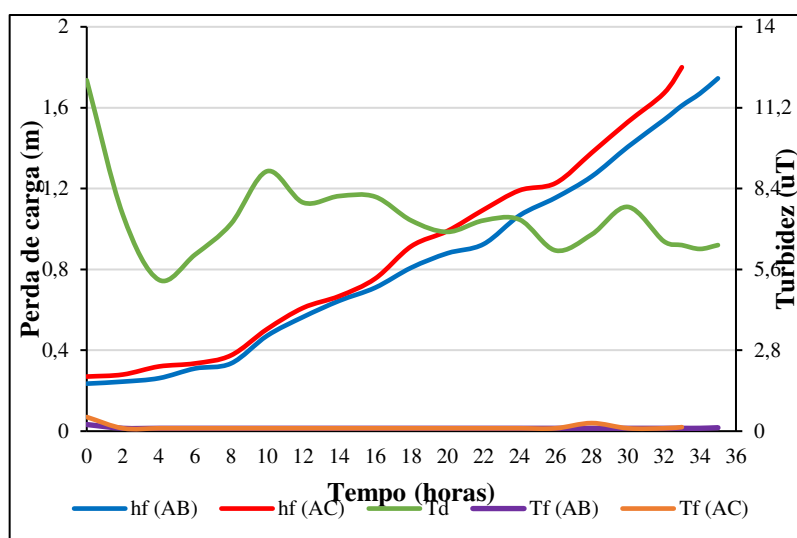
0,5 uT (BRASIL, 2021), valor este entendido como indicador da remoção de cistos de *Giardia* (BASTOS *et al.*, 2009). A turbidez remanescente no filtro de areia de britagem esteve entre 0,06 uT e 0,27 uT, média igual a 0,11 uT ($\sigma = 0,04$ uT e coeficiente de variação = 35%); e no filtro de areia convencional entre 0,06 uT e 0,49 uT, média igual a 0,11 uT ($\sigma = 0,07$ uT e coeficiente de variação = 57%). Além disso, na maior parte do tempo, a turbidez da água filtrada esteve abaixo de 0,30 uT: percentil 95 = 0,23 uT e 0,25 uT, para os filtros de areia de britagem e de areia convencional, respectivamente.

Analogamente às taxas de filtração de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, as carreiras de filtração com $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ foram mais longas que no período de estiagem: duração média de 31,7 horas com o filtro de areia de britagem e 30,3 horas com o de areia convencional. Além disso, a duração das carreiras foi muito semelhante às registradas com a taxa de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$: 32,3 horas e 32,5 horas, para os filtros de areia de britagem e de areia convencional, respectivamente).

Na Figura 50 mostra-se a evolução da perda de carga e da turbidez da água filtrada na carreira 16, para os dois filtros. A turbidez da água decantada permaneceu elevada durante toda a carreira: 5,24 uT a 12,15 uT (média = 7,34 uT; $\sigma = 1,42$ uT e coeficiente de variação = 19%). Ainda assim, o filtro de areia de britagem produziu água com turbidez entre 0,10 uT e 0,23 uT (média = 0,11 uT; $\sigma = 0,03$) e o de areia convencional, entre 0,10 uT e 0,49 uT (média = 0,13 uT; $\sigma = 0,10$). Na maior parte do tempo foi produzida água com turbidez inferior a 0,30 uT por ambos os filtros; percentil 90 igual a 0,12 uT e 0,30 uT, para os filtros de areia de britagem e de areia convencional, respectivamente. Além disso, a turbidez da água filtrada foi tão semelhante nos dois filtros que as respectivas curvas praticamente se sobrepuseram. Enfim, mais uma vez, o desempenho dos filtros de areia de britagem e de areia convencional foi muito semelhante.

Além disso, como também mostrado na Figura 50, a evolução na perda de carga nos dois filtros foi também bem similar, com incremento um pouco mais acentuado no filtro de areia convencional.

Figura 46 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 16

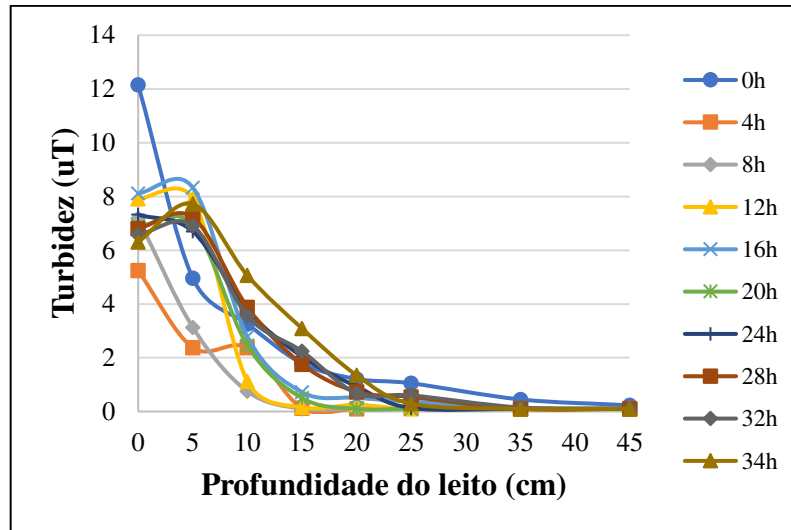


Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

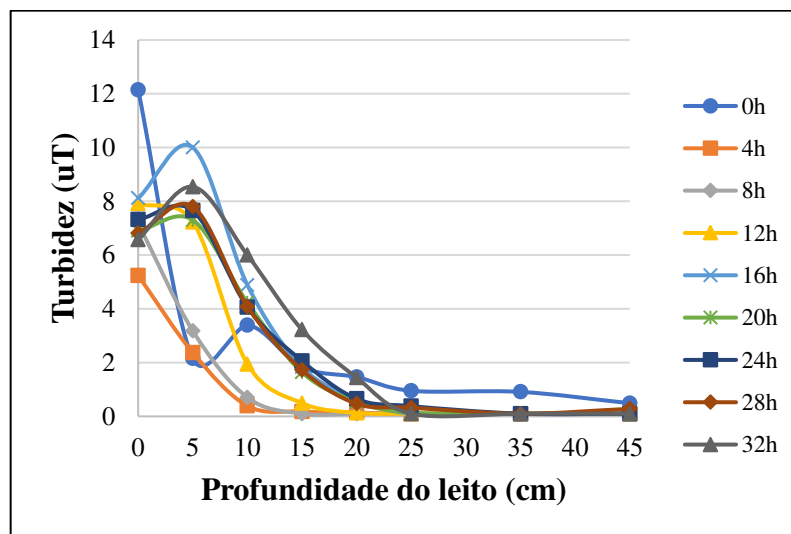
Com a taxa de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ foi possível observar o movimento da frente de impurezas ao longo da profundidade do leito filtrante, em especial a partir de 12 horas de operação (Figura 51), quando a turbidez na profundidade de 5 cm atingiu valores muito próximos da turbidez da água decantada. Logo depois, foi observada turbidez cada vez mais elevada nas camadas inferiores do leito filtrante, em maiores profundidades, até o momento em que a turbidez passa a ser removida de forma mais efetiva a 25 cm de profundidade do leito filtrante.

Na Figura 52 é possível observar que o movimento da frente de impurezas resultou em incremento na perda de carga das subcamadas iniciais do filtro (Figura 53). Em contrapartida ao verificado nas carreiras do período de estiagem, a perda de carga foi mais bem distribuída ao longo do leito. Além disso, as linhas que representam a perda de carga nas camadas iniciais apresentam declive mais acentuado que nas demais carreiras avaliadas. Conseqüentemente, a duração das carreiras foi prolongada e, inclusive, aproximou-se da obtida para a taxa de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, no período chuvoso.

Figura 47 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 16

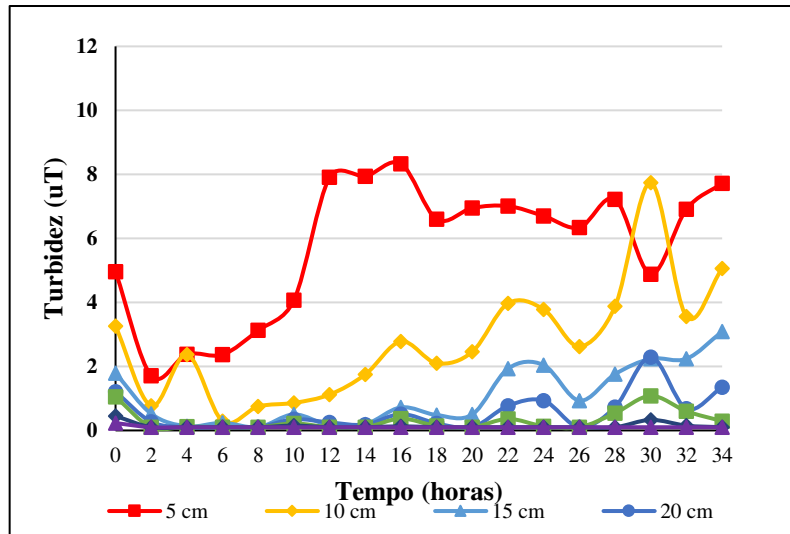


(a)

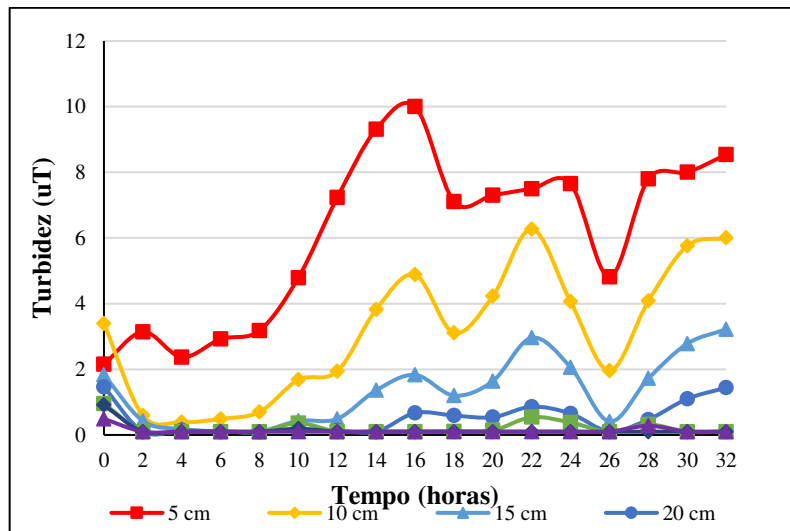


(b)

Figura 48 – Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração: (a) filtro de areia de britagem (b) filtro de areia convencional – Carreira 16

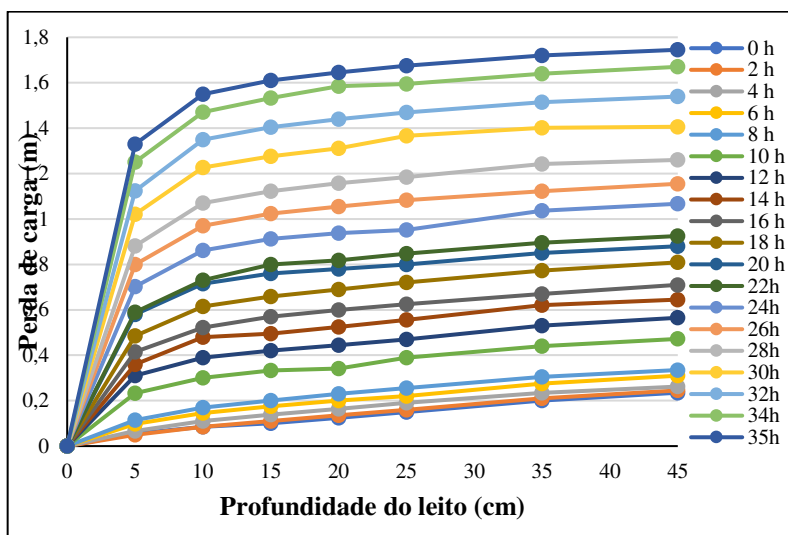


(a)

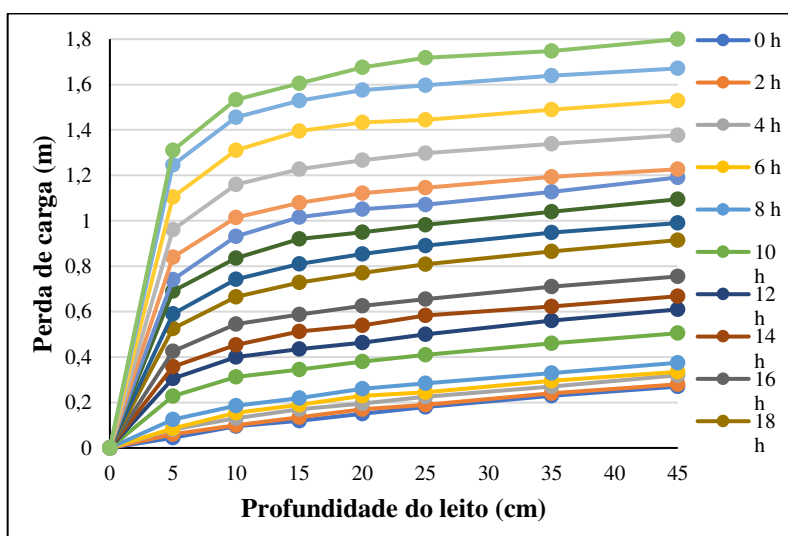


(b)

Figura 49 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 16



(a)

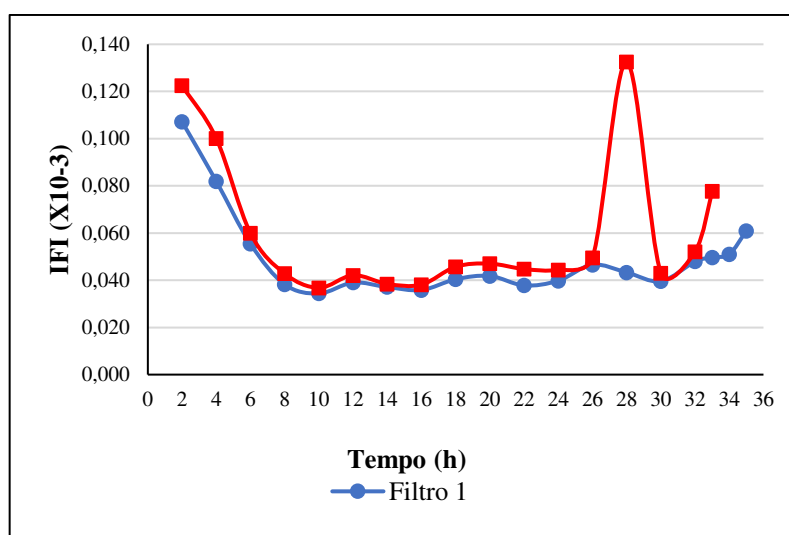


(b)

Por fim, os valores de IFI calculados para a taxa de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ foram da mesma ordem de grandeza que os obtidos para taxas de filtração de 180 e $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, no período chuvoso: $3,44 \times 10^{-5}$ a $8,07 \times 10^{-4}$ para o filtro de areia de britagem, e $3,21 \times 10^{-5}$ a $6,27 \times 10^{-4}$ para o filtro de areia convencional. Novamente, os valores de IFI foram duas a três vezes menores que os observados no período de estiagem.

Na Figura 54 se apresenta a evolução do IFI ao longo da carreira de filtração 16, o que mais uma vez demonstra a desempenho semelhante dos dois filtros. Como já registrado, nesse caso, a carreira de filtração mais longa foi consequência da filtração em profundidade, o que, proporciona incrementos de perda de carga ao longo do leito filtrante menos intensos e promove a melhor utilização do leito e da carga hidráulica disponível. O IFI no filtro de areia de britagem permaneceu um pouco inferior ao da areia natural durante toda carreira de filtração. O pico observado no filtro de areia convencional com 28 horas de operação foi devido a um aumento pontual da turbidez da água filtrada. De toda forma, no geral, a evolução do IFI ao longo da carreira de filtração 14 mais uma vez demonstra a desempenho semelhante dos dois filtros.

Figura 50 – Índice de filtrabilidade de Ives (IFI) ao longo da carreira de filtração – Carreira 16



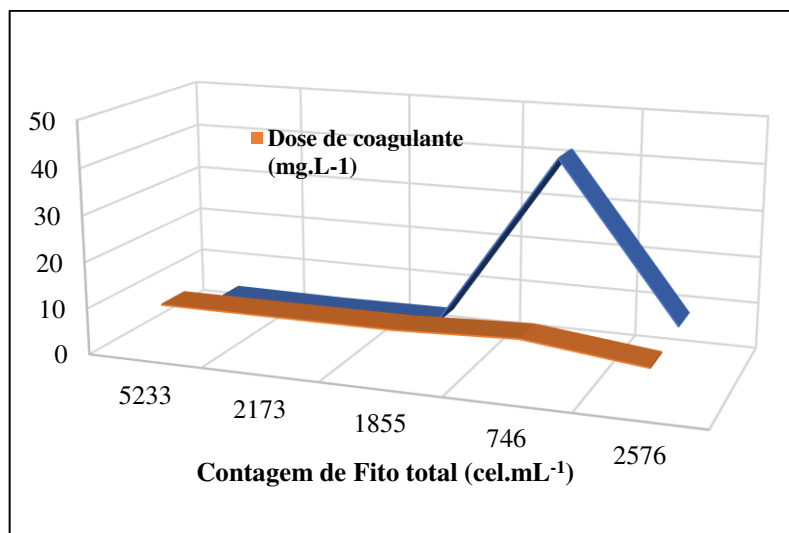
4.3. Análises microbiológicas

4.3.1. Influência da floração de algas no desempenho das carreiras de filtração

Como mencionado no item 1.1., a floração de algas no manancial de captação exerceu grande influência no desempenho das carreiras de filtração do período de estiagem.

Foi possível realizar a contagem de fitoplâncton total na água decantada para as carreiras de filtração 4, 5, 6, 7, 8 e 9. Considerando, que um elevado número de células desses organismos na água decantada, corresponde também a uma concentração elevada no manancial de captação, a Figura 55 apresenta a relação entre turbidez da água bruta e a dose de coagulante ($Al_2(SO)_4$) com a contagem de células de fitoplâncton total na água afluyente aos filtros.

Figura 51 – Dose de coagulante em função da turbidez da água bruta e da concentração de algas na água decantada

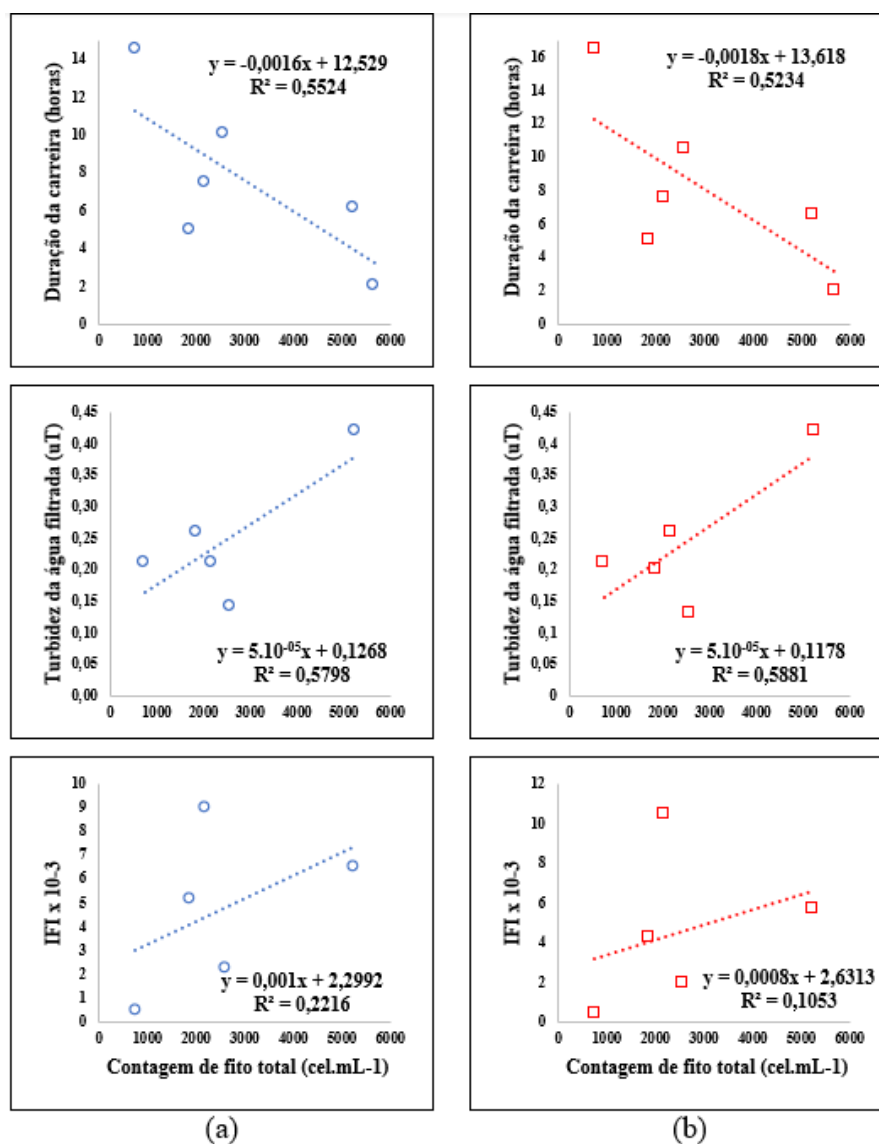


Observa-se na Figura 55 que doses de coagulante semelhantes foram aplicadas para valores baixos e mais elevados de turbidez da água bruta. Maiores concentrações de células de fitoplâncton estão associadas a doses de coagulante superiores às que seriam aplicadas na rotina de operação da ETA em tempos de turbidez baixa. De fato, a presença de algas na água bruta que torna necessário aumento da dose de coagulante e de alcalinizante (CHENG e CHI, 2003).

Além disso, em eventos de floração, na etapa de floculação são formados flocos mais leves com características de flotabilidade e, conseqüentemente, há redução da eficiência da decantação. Assim, a água que segue para etapa de filtração tem turbidez mais elevada do que em condições normais de operação da ETA, o que leva a obstrução do meio filtrante, redução da carreira de filtração e aumento no consumo da água de lavagem (DI BERNARDO, 1995).

Na Figura 56 são apresentados alguns dos efeitos da floração de algas observados na operação dos filtros de areia de britagem e areia convencional. É possível observar que, em ambos os filtros, contagens mais elevadas do fitoplâncton total na água afluente aos filtros resultaram em carreiras de filtração encurtadas. Além disso, o aumento da concentração de algas se mostrou associado ao aumento da turbidez da água filtrada. Por fim, ainda que de maneira mais tênue, a eficiência do filtro, avaliada pelo IFI, tendeu a diminuir em contagens mais elevadas do número de células de algas.

Figura 52 – Efeitos da floração de algas na duração das carreiras de filtração, turbidez da água filtrada e no IFI nos filtros de areia de britagem (a) e areia convencional (b)

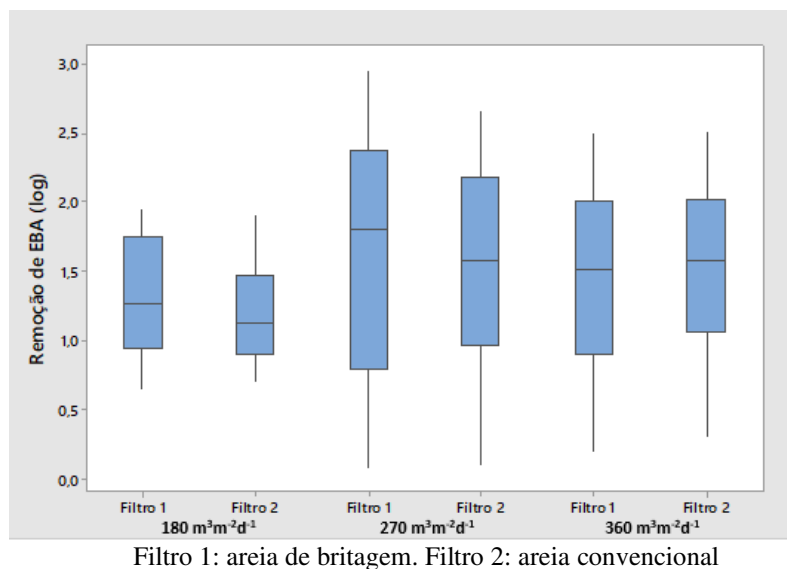


4.3.2. Remoção de esporos de bactérias aeróbias

Os esporos de bactérias aeróbias foram utilizados como indicadores da remoção de cistos e oocistos de protozoários na etapa de filtração.

Na Figura 57 encontra-se uma representação gráfica da estatística descritiva dos valores de remoção de EBA nos filtros de areia de britagem e de areia no período de estiagem para cada uma das taxas de filtração avaliadas ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$).

Figura 53 – Representação gráfica da estatística descritiva da remoção de EBA no período de estiagem de acordo com taxa de filtração



Para a taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, a remoção de esporos de bactérias aeróbias no filtro de areia de britagem variou de 0,65 log a 1,96 log (média de 1,34 log) e no filtro de areia convencional de 0,70 log a 1,92 log (média de 1,20 log). Em relação à taxa de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, os valores obtidos foram: 0,21 log a 2,96 log (média 1,66 log) e 0,14 log a 2,66 log (média 1,53 log), respectivamente nos filtros de areia de britagem e de areia convencional. Para a taxa de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, as remoções variaram de 0,19 log a 2,51 log (média 1,45 log) no filtro de areia de britagem e de 0,30 log a 2,51 log (média 1,57 log) no filtro de areia convencional. Verifica-se, assim, que para dada taxa de filtração a remoção de EBA foi semelhante em ordem de grandeza e em magnitude nos dois filtros, o que sugere que, para as condições de operação no período de estiagem, a remoção de esporos de bactérias aeróbias se deu pelos mesmos mecanismos em ambos os filtros.

A fim de discutir o comportamento da remoção de EBA ao longo das carreiras de filtração no período de estiagem, foram selecionadas as figuras 58, 59 e 60. Em geral, nota-se que a remoção de esporos de bactérias aeróbias cresce ao longo da carreira de filtração. Os piores desempenhos no início das carreiras são típicos do período de amadurecimento dos filtros devido a partículas que permanecem na caixa do filtro após o ciclo de retrolavagem (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017). Por sua vez, a queda de desempenho mais ao final das carreiras pode estar relacionada a eventos de trespasse, típicos de final de carreira de

filtração. Porém, este comportamento no início e no final das carreiras não necessariamente, ou nem sempre, encontrou correspondência nas informações de turbidez da água filtrada (vide figuras 18, A44, A47 e A65)

Figura 54 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 1, operada com $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$

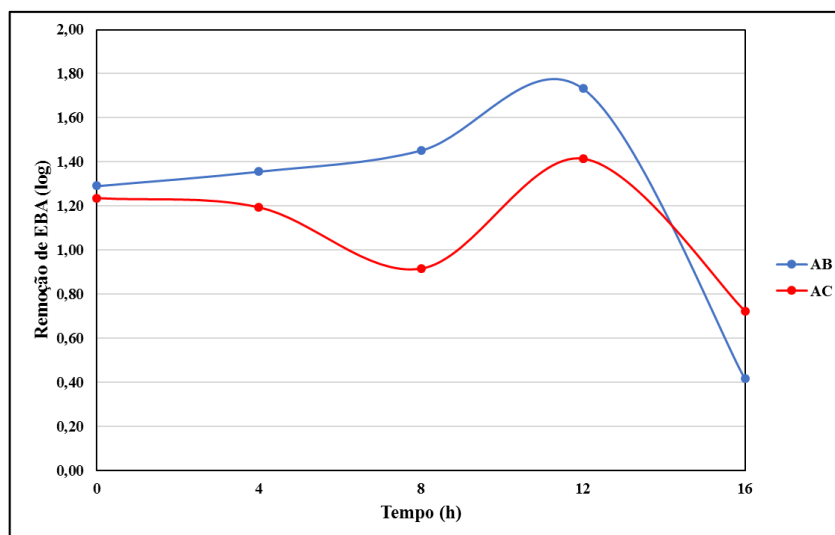


Figura 55 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 10, operada com $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$

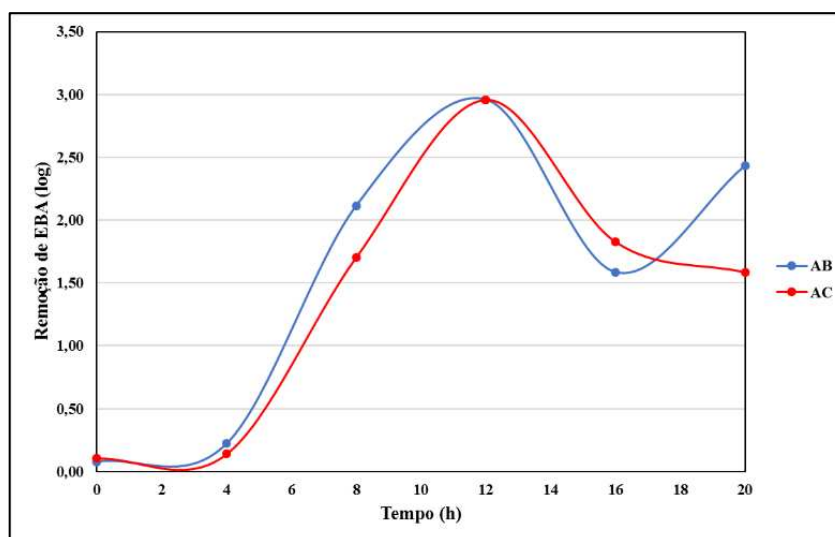
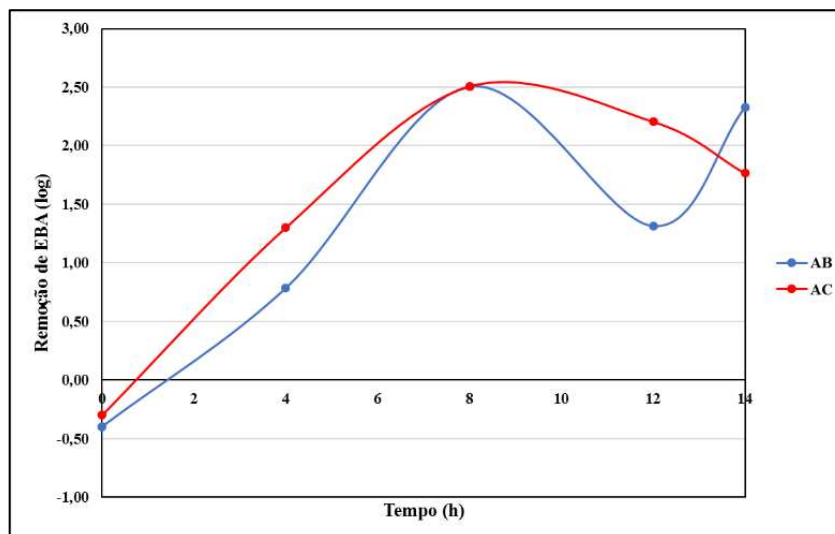
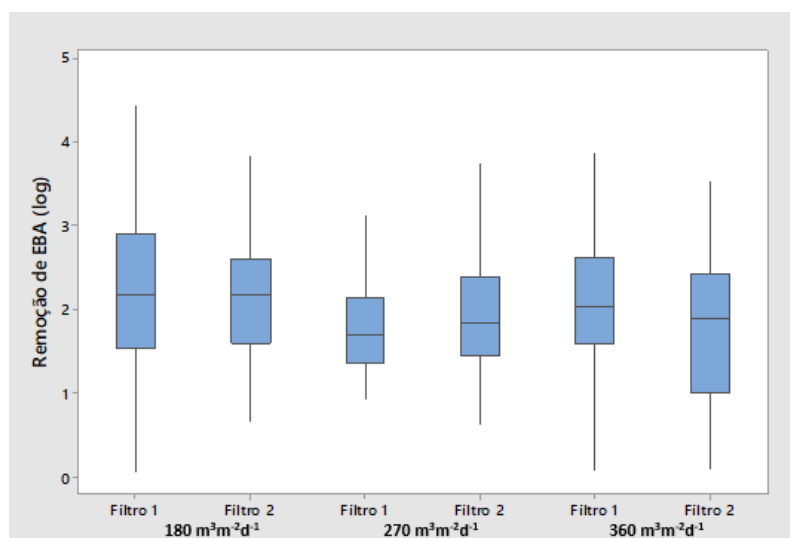


Figura 56 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 8, operada com $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)



Na Figura 61 Filtro 1: areia de britagem. Filtro 2: areia convencional tem-se uma representação gráfica da estatística descritiva dos valores de remoção de esporos de bactérias aeróbias no período chuvoso, nos filtros de areia e de areia de britagem no período de estiagem para cada uma das taxas de filtração avaliadas ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$).

Figura 57 – Representação gráfica da estatística descritiva (*Boxplot*) da remoção de EBA no período chuvoso de acordo com taxa de filtração



Filtro 1: areia de britagem. Filtro 2: areia convencional

A remoção de EBA foi superior no período chuvoso em comparação com o período de estiagem. Com a taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, a remoção de esporos de bactérias aeróbias no filtro de areia de britagem esteve entre 1,00 log e 4,44 log (média de 2,33 log) e no filtro de areia convencional entre 0,83 log e 3,83 log (média de 2,19 log). Para a taxa de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, os valores obtidos foram 0,93 log a 3,63 log (média igual a 1,89 log) e 0,63 log a 4,33 log (média de 2,08 log). Por fim, com taxa de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, a remoção variou de 0,34 log a 3,88 log (média de 2,19 log) no filtro de areia de britagem e de 0,35 log a 3,53 log (média 1,87 log) no filtro de areia convencional. Mais uma vez é possível observar desempenho similar entre os filtros na remoção de EBA.

Para exemplificar o comportamento da remoção de esporos de bactérias aeróbias ao longo das carreiras de filtração no período chuvoso, são apresentadas as figuras 62, 63 e 64. Em geral, a remoção de EBA se deu de maneira mais uniforme ao longo das carreiras de filtração do que no período de estiagem, mas ainda assim, salvo exceções, o desempenho foi inferior no início e, por vezes ao final das carreiras

Figura 58 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 18, operada com $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$

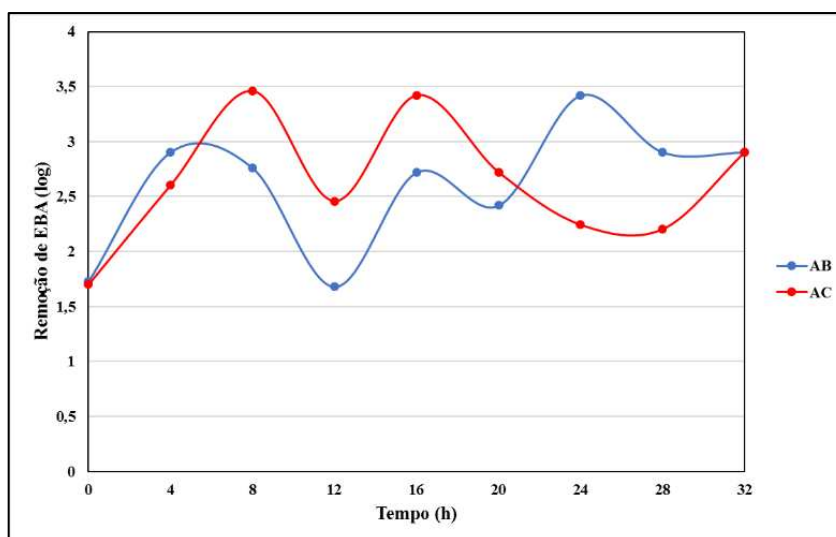


Figura 59 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 20, operada com $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$

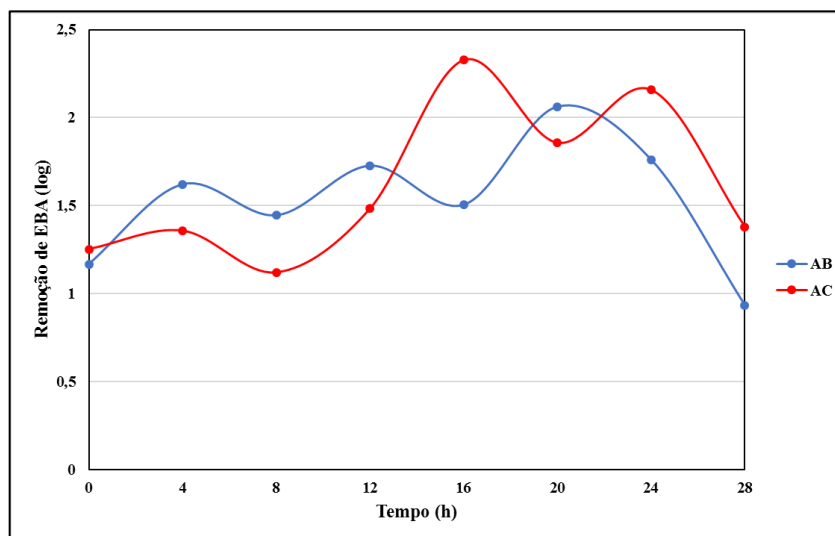
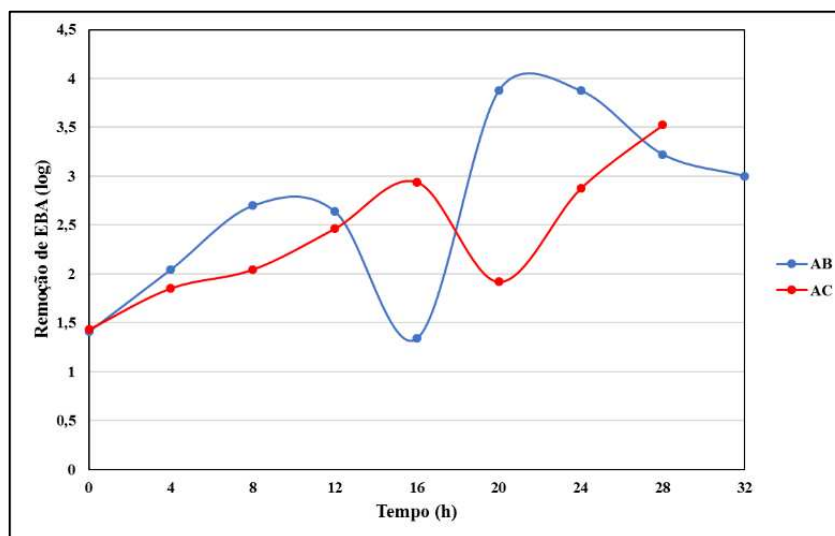


Figura 60 – Remoção de EBA ao longo da carreira de filtração 16, operada com $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$



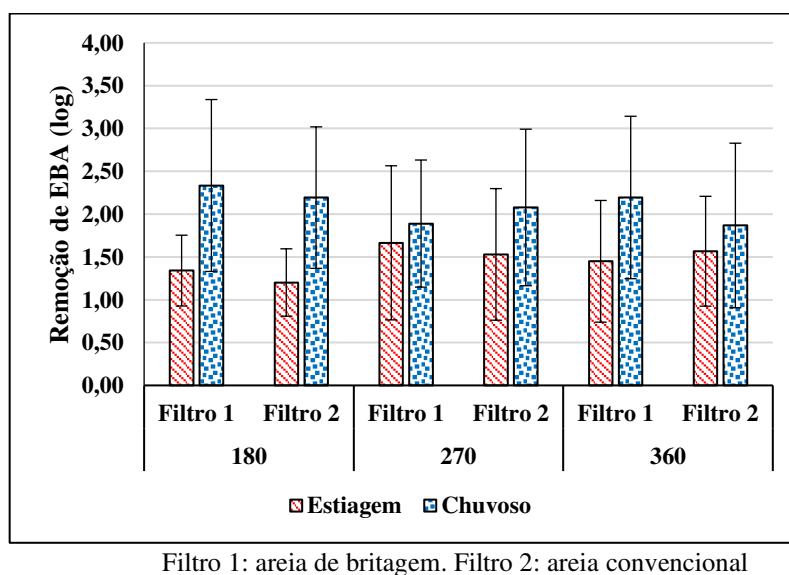
Para efeito de síntese, na Figura 65 apresentam-se as médias e o desvio padrão dos valores de remoção de EBA nos filtros de areia de britagem e de areia convencional para cada taxa de filtração, nos períodos de chuvas e de estiagem. Nota-se, em geral, grande variabilidade na remoção de EBA em ambos os filtros. No entanto, para cada taxa de filtração e considerando o mesmo período (chuvas ou estiagem), a remoção de EBA se deu com valores médios semelhantes em magnitude nos dois filtros: (i) estiagem: $\approx 1,3 \text{ log } (180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1})$; $\approx 1,6 \text{ log}$

($270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); $\approx 1,5 \text{ log}$ ($360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); (ii) chuvas: $\approx 2,2 \text{ log}$ ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); $\approx 2 \text{ log}$ ($270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$). Isso pode ser interpretado como indício que a remoção de esporos de bactérias aeróbias tenha se dado pelos mesmos mecanismos em ambos os filtros. Analisando ainda em separado os períodos de chuva e de estiagem, não se observa, em geral, influência da taxa de filtração; exceção foi a operação com $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ no período estiagem, em que a remoção de EBA foi um pouco mais baixa em ambos os filtros (aproximadamente $0,7 \text{ log}$ a $1,9 \text{ log}$, média em torno de $1,2 \text{ log}$), o que pode estar associado à ocorrência de trespasse na maioria das carreiras operadas com essa taxa de filtração.

Observa-se, ainda, que a remoção de EBA no período de estiagem foi sempre inferior à do período de chuvas, nos dois filtros, o que poderia ser explicado pela também elevada remoção de turbidez na época de chuvas. A propósito, Oliveira *et al.* (2018) também encontraram correspondência entre a remoção de EBA e a de turbidez.

Em linhas gerais, esses resultados confirmam informações de literatura sobre remoção de EBA na filtração. Dugan *et al.* (2001), experimentos em instalação piloto: média de $1,0 \text{ log}$ em condições inadequadas de coagulação e 2 log com doses adequadas de coagulante; Rice *et al.* (1996), ETA em escala real: $1,69\text{-}2,57 \text{ log}$; Oliveira *et al.* (2018), em ETA piloto: $0,49 \text{ log}$ a $3,29 \text{ log}$ (mediana igual a $1,62 \text{ log}$ e média igual a $1,71 \text{ log}$).

Figura 61 – Remoção média e desvio-padrão de esporos de bactérias aeróbias nos filtros de areia e de areia de britagem para cada taxa de filtração ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$) nos períodos chuvoso e de estiagem

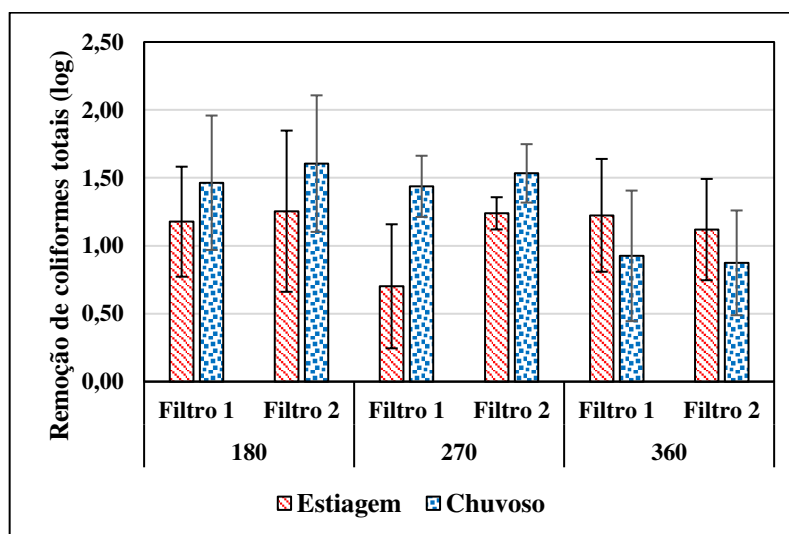


4.3.3. Remoção de coliformes totais

O monitoramento de coliformes totais foi realizado com intuito de avaliar a eficiência de remoção de bactérias nos filtros de areia de britagem e de areia convencional. Os coliformes são comumente utilizados como indicadores de qualidade da água tratada, no entendimento que, a ausência desses organismos indica a ausência de patógenos (menos resistentes) pela inativação e/ou remoção por meio dos processos de tratamento (BRASIL, 2006).

Devido a limitações práticas, foi monitorada apenas uma carreira correspondente a cada taxa de filtração em cada período. No período de estiagem foram monitoradas as carreiras 6, 9 e 13 (taxas de filtração, respectivamente de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$), e no período chuvoso as carreiras 19, 20 e 21 (taxas de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$). Na Figura 66 são apresentadas os valores médios e desvio-padrão de remoção de coliformes totais nos filtros de areia de britagem e de areia convencional para cada taxa de filtração.

Figura 62 – Valores médios e desvio-padrão de remoção de coliformes totais nos filtros 1 e 2 para cada taxa de filtração aplicada (180 , 270 e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$) no período chuvoso e de estiagem



Filtro 1: areia de britagem. Filtro 2: areia convencional

Nota-se na Figura 66 que, à exemplo dos EBA, a remoção de CT também apresentou larga variabilidade nos dois filtros, mas os valores médios relativos à cada taxa de filtração, considerando o mesmo período (chuvas ou estiagem), foram semelhantes em ambos os filtros (exceto com $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); em resumo: (i) estiagem: $\approx 1,2 \text{ log}$ ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); $0,7 \text{ log}$ (F1) e

1,2 log (F2) ($270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); $\approx 1,2 \log (360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1})$; (ii) chuvas: $\approx 1,5 \log (180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1})$; $\approx 1,5 \log (270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1})$; $\approx 0,9 \log (360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1})$.

Também como observado para EBA, a remoção de CT se deu de maneira mais efetiva durante o período chuvoso, exceto com a taxa de $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (nos ensaios com essa taxa de filtração no período de estiagem, devido à curta duração da carreira 9, não foi possível a coleta de muitas amostras, o que pode interferir na avaliação dos resultados). Novamente, o melhor desempenho no período de chuvas poderia ser explicado pela também maior remoção de turbidez, considerando que os microrganismos podem estar aderidos aos flocos suspensos na água.

Cabe ainda notar que a remoção de CT foi, em geral, inferior à de EBA, principalmente no período de chuvas, o que é condizente com a maior dimensão de bactérias esporuladas e, provavelmente, melhor aderência destas ao material granulado dos leitos filtrantes. Entretanto, isso não representa preocupação em termos de qualidade da água filtrada, visto que, em geral, bactérias, bem como vírus, serão inativadas na etapa seguinte de desinfecção (BASTOS, R. *et al.*, 2001).

Mais detalhadamente os resultados de remoção de coliformes totais no período de estiagem foram os seguintes: (i) $1800 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ - 0,72 log a 1,64 log (média de 1,18 log) no filtro de areia de britagem (filtro 1) e 0,60 log a 1,94 log (média = 1,25 log) no filtro de areia convencional (filtro 2); (ii) $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ - 0,30 log a 1,34 log (média = 0,70 log) no filtro 1 e 1,10 log a 1,38 log (média = 1,24 log) no filtro 2; (iii) $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ - 0,82 log a 1,71 log (média = 1,22 log) no filtro 1 e 0,77 log a 1,58 log (média = 1,12 log) no filtro 2.

Já no período chuvoso: (i) $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ - 0,96 log a 2,42 log (média de 1,46 log) no filtro de areia de britagem (filtro 1) e 0,96 log a 2,42 log (média = 1,60 log) no filtro de areia convencional (filtro 2); (ii) $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ - 0,97 log a 1,68 log (média = 1,44 log) no filtro 1 e 1,17 log a 1,86 log (média = 1,53 log) no filtro 2; (iii) $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ - 0,41 log a 1,88 log (média = 0,93 log) no filtro 1 e 0,41 log a 1,52 log (média = 0,87 log) no filtro 2.

Na Figura 67 e 68 são ilustradas as remoções de coliformes totais ao longo das carreiras de filtração, respectivamente nos períodos de estiagem e de chuvas. Salvo exceções (por exemplo, na carreira operada com $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ no período de estiagem) nota-se o desempenho bastante similar dos dois filtros na remoção de CT. Salvo também exceções, nota-se ainda ganho de eficiência de remoção com o amadurecimento do filtro ao longo das carreiras.

Figura 63 – Remoção de coliformes totais ao longo das carreiras de filtração: (a) carreira 13 ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); (b) carreira 6 ($270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); (c) carreira 9 ($360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$), período de estiagem

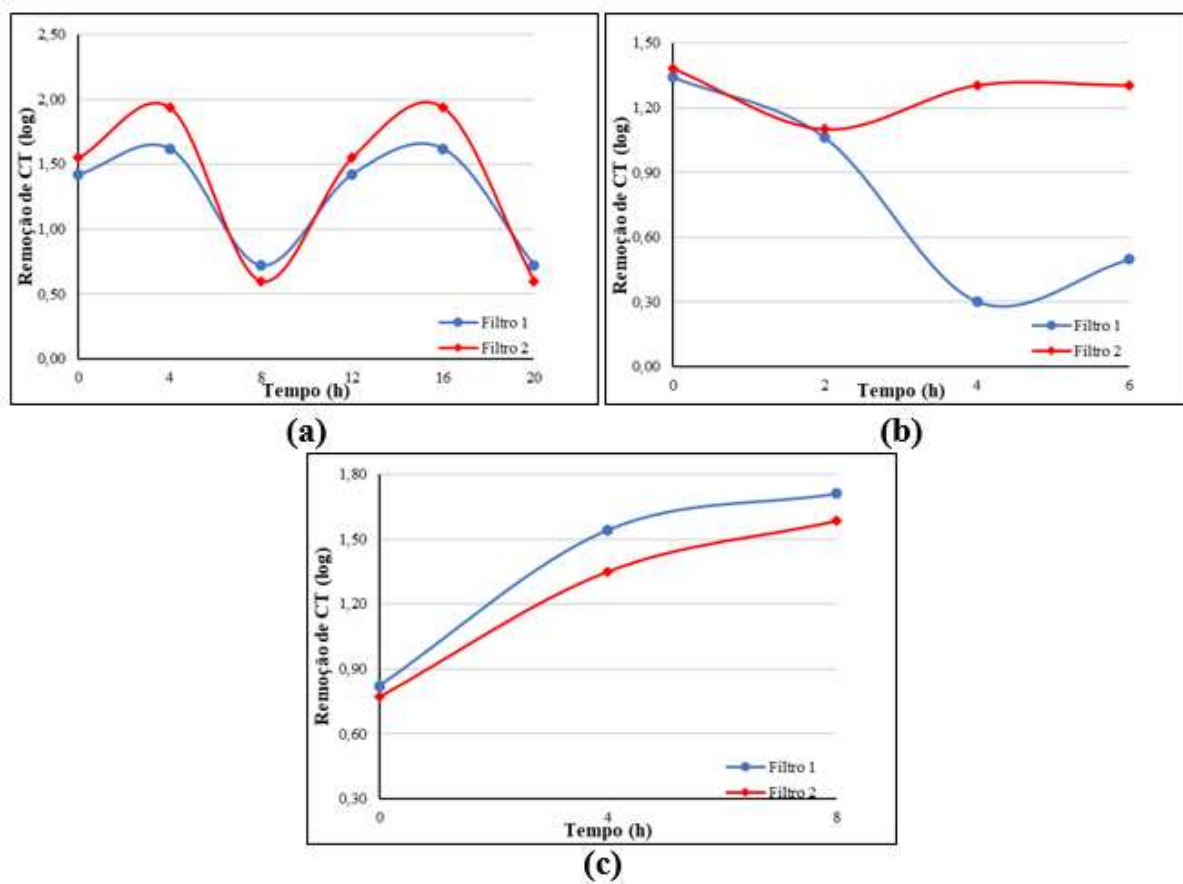
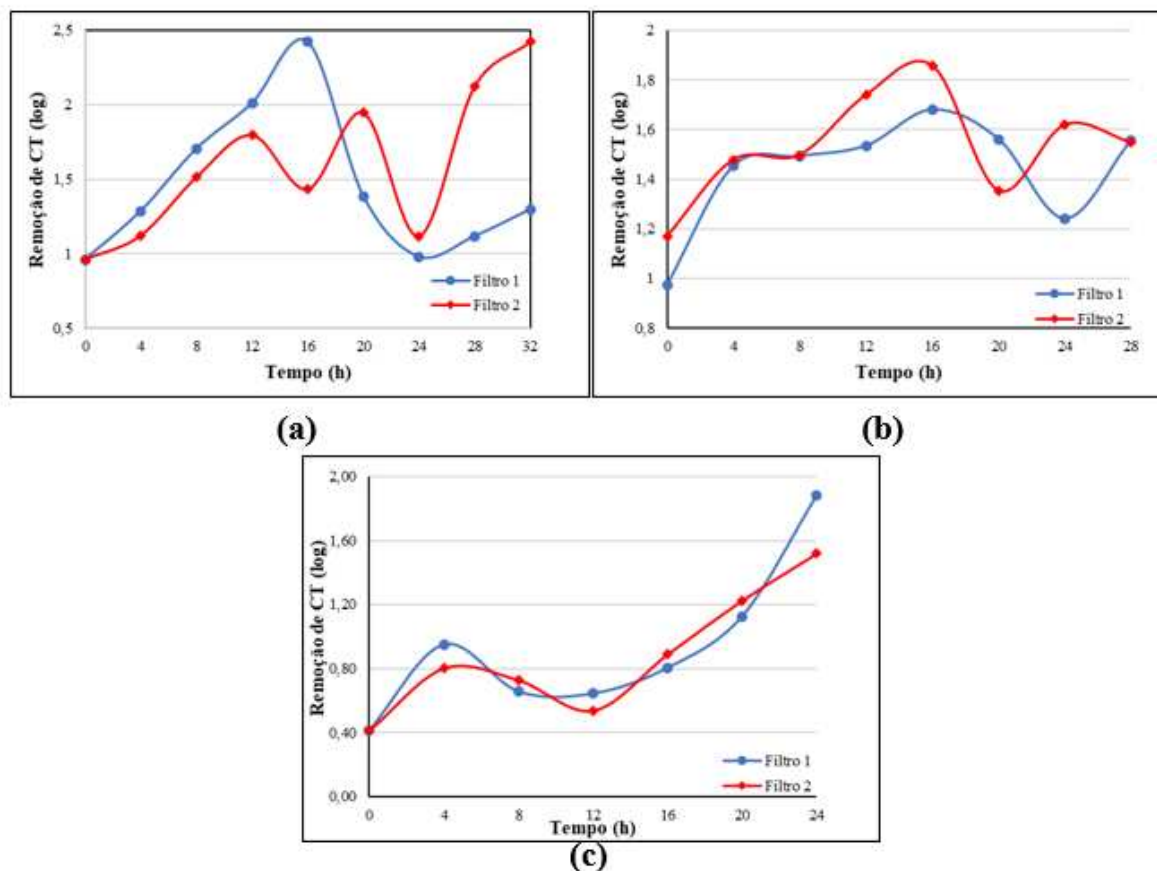


Figura 64 – Remoção de coliformes totais ao longo das carreiras de filtração (a) carreira 20 ($180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); (b) carreira 21 ($270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); (c) carreira 19 ($360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)



Por fim, nas carreiras monitoradas no período chuvoso, foi possível observar o aumento da eficiência na remoção de coliformes totais ao longo do desenvolvimento da carreira de filtração. Verifica-se, então, que a medida do amadurecimento do leito filtrante se observa valores mais elevados de remoção desses microrganismos. Além da eficiência de remoção similar entre os filtros.

4.4. Relação entre potencial zeta e remoção de turbidez

A Tabela **Erro! Fonte de referência não encontrada.16** resume os resultados dos testes de correlação de Pearson aplicados aos dados de potencial zeta da água decantada e de turbidez da água filtrada para o filtro de areia de britagem e de areia convencional, além dos dados de turbidez remanescente para ambos os filtros.

De modo geral, as correlações se mostraram muito tênues (valores muito baixos dos coeficientes de correlação), ainda que, por vezes, estatisticamente significativas. Depreende-se, assim, que a variação observada nos valores de potencial zeta registrados ao longo da operação dos filtros (0,41 mV a 19,50 mV, média de 7,99 mV), não tenha sido suficiente para provocar interferências na remoção de turbidez.

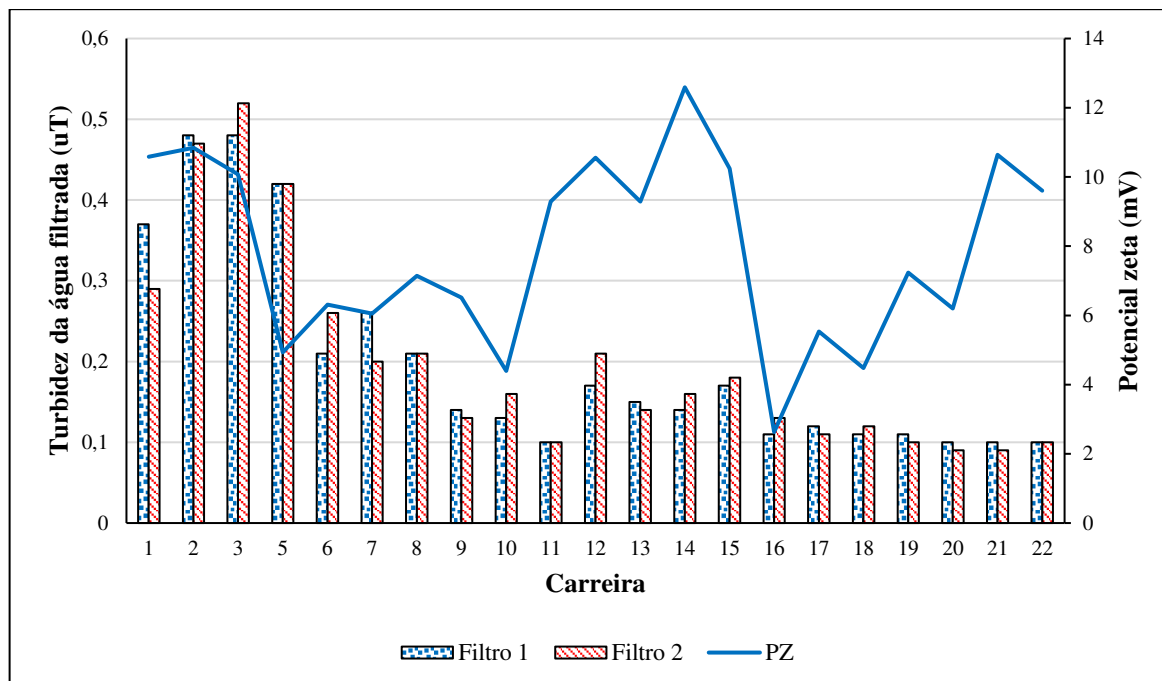
Tabela 16 – Resultados dos testes de correlação de Pearson entre valores de potencial zeta da água decantada, turbidez da água filtrada e turbidez remanescente dos filtros de areia de britagem e de areia convencional

Variáveis	Coefficiente de correlação de Pearson	p-valor
Turbidez da água filtrada 1	0,132	0,03
Turbidez da água filtrada 2	0,086	0,18
Turbidez remanescente 1	0,131	0,04
Turbidez remanescente 2	0,104	0,10

1: Filtro de areia de britagem e 2: Filtro de areia convencional

Enfim, mesmo com variações no potencial zeta da água coagulada, os filtros de areia de britagem e de areia convencional produziram água filtrada com turbidez muito semelhante, como mostra a Figura 69. Pode-se observar que ao longo de todas as carreiras de filtração a média da turbidez da água filtrada foi muito semelhante em ambos os filtros. Além disso, na Figura 69 confirma-se que valores de PZ mais elevados ou mais próximos de zero, não necessariamente foram acompanhados por valores mais ou menos elevados de turbidez da água filtrada.

Figura 65 – Turbidez média da água filtrada e potencial zeta (módulo) médio para as carreiras de filtração monitoradas



4.5. Análise conjunta da eficiência dos filtros

O presente item tem por objetivo uma visão geral do desempenho dos filtros de areia de britagem e de areia convencional em termos de duração das carreiras de filtração, perda de carga final e turbidez da água filtrada (Tabela 17).

Tabela 17 – Principais parâmetros avaliados nas carreiras de filtração para os filtros em escala piloto de areia de britagem e areia convencional

C	Taxa de Filtração (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	Duração (horas)		Perda de carga final (m)		Turbidez da água decantada (uT)		Turbidez da água filtrada (uT)			
		Filtro AB	Filtro AC	Filtro AB	Filtro AC	Mín	Máx	Filtro AB		Filtro AC	
								Mín	Máx	Mín	Máx
1	180	16,0	16,0	1,59	1,52	0,88	1,64	0,18	0,70	0,13	0,63
2	180	12,0	12,0	1,47	1,45	1,22	2,06	0,28	0,81	0,31	0,89
3	180	9,0	8,0	1,76	1,43	1,02	1,96	0,36	0,59	0,28	0,69
5	270	6,2	6,5	1,76	1,77	0,96	1,35	0,21	0,81	0,11	0,83
6	270	7,5	7,5	1,74	1,76	0,29	1,21	0,10	0,31	0,10	0,43
7	360	5,0	5,0	1,76	1,74	1,01	1,48	0,16	0,46	0,10	0,39
8	360	14,5	16,5	1,76	1,74	1,89	4,38	0,10	0,32	0,10	0,36
9	360	10,1	10,5	1,75	1,74	0,89	0,61	0,10	0,13	0,27	0,23
10	270	17,3	17,5	1,76	1,75	0,26	1,87	0,10	0,24	0,10	0,29
11	270	20,4	20,0	1,74	1,76	0,18	1,36	0,10	0,13	0,10	0,13
12	360	10,3	10,6	1,74	1,75	0,56	0,95	0,10	0,45	0,10	0,39
13	180	20,3	20,0	1,77	1,77	0,48	1,29	0,10	0,35	0,10	0,33
14*	270	30,0	29,0	1,77	1,75	2,13	8,9	0,10	0,38	0,10	0,52
15*	180	44,3	42,5	1,76	1,75	2,28	6,85	0,10	0,44	0,10	0,43
16*	360	35,0	33,0	1,74	1,8	5,24	12,15	0,10	0,23	0,10	0,49
17*	360	34,5	32,0	1,75	1,73	2,03	3,26	0,10	0,27	0,10	0,22
18*	270	34,0	34,5	1,76	1,76	1,34	3,85	0,10	0,15	0,10	0,26
19*	360	25,5	26,0	1,73	1,72	1,23	7,53	0,06	0,17	0,06	0,13
20*	180	37,3	37,3	1,74	1,73	1,84	6,22	0,07	0,22	0,07	0,12
21*	270	33,0	34,0	1,71	1,76	3,42	17,15	0,06	0,23	0,05	0,19
22*	180	44,5	40,5	1,72	1,71	2,32	6,87	0,08	0,19	0,08	0,20

C: carreira de filtração; Filtro AB: areia de britagem; Filtro AC: areia convencional; Mín: mínimo; e Máx: máximo. *carreiras monitoradas no período chuvoso.

Em geral, de acordo com os dados apresentados na Tabela 17, o filtro de areia de britagem apresentou desempenho análogo ao filtro de areia convencional em termos de duração da carreira de filtração, perda de carga total e de qualidade da turbidez efluente. Resultados estes que corroboram os obtidos por Silva (2018) e acrescentam informações em relação ao

desempenho em condições desfavoráveis da qualidade da água decantada – presença de algas – e nas variações provocadas devido aos eventos de chuva e de estiagem – turbidez elevada ou baixa.

As limitações enfrentadas devido à presença de algas na água decantada foram comuns a ambos os filtros: trespasse, mesmo para água afluyente aos filtros com baixa turbidez e elevado incremento de perda de carga, o que resultou no encurtamento das carreiras de filtração. Com exceção da carreira 3, que foi encerrada por trespasse apenas no caso do filtro de areia convencional, as demais carreiras operadas no período em que houve floração de algas no manancial de captação da ETA UFV comportaram-se de maneira semelhante: encerramento por trespasse em ambos os filtros nas carreiras 1 e 2 e encerramento muito precoce das carreiras 5, 6 e 7.

Nas carreiras em que ocorreu o trespasse (turbidez superior a 0,5 uT), os flocos formados na coagulação foram caracterizados como fracos ou pouco resistentes - valores de ITF estavam entre 2 e 4 $\text{cm}\cdot\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$, mesmo na carreira 3 (ocorrência de trespasse apenas no filtro de areia convencional). Novamente, o trespasse não era esperado para águas de baixa turbidez, porém há evidências da interferência das algas na qualidade da coagulação..

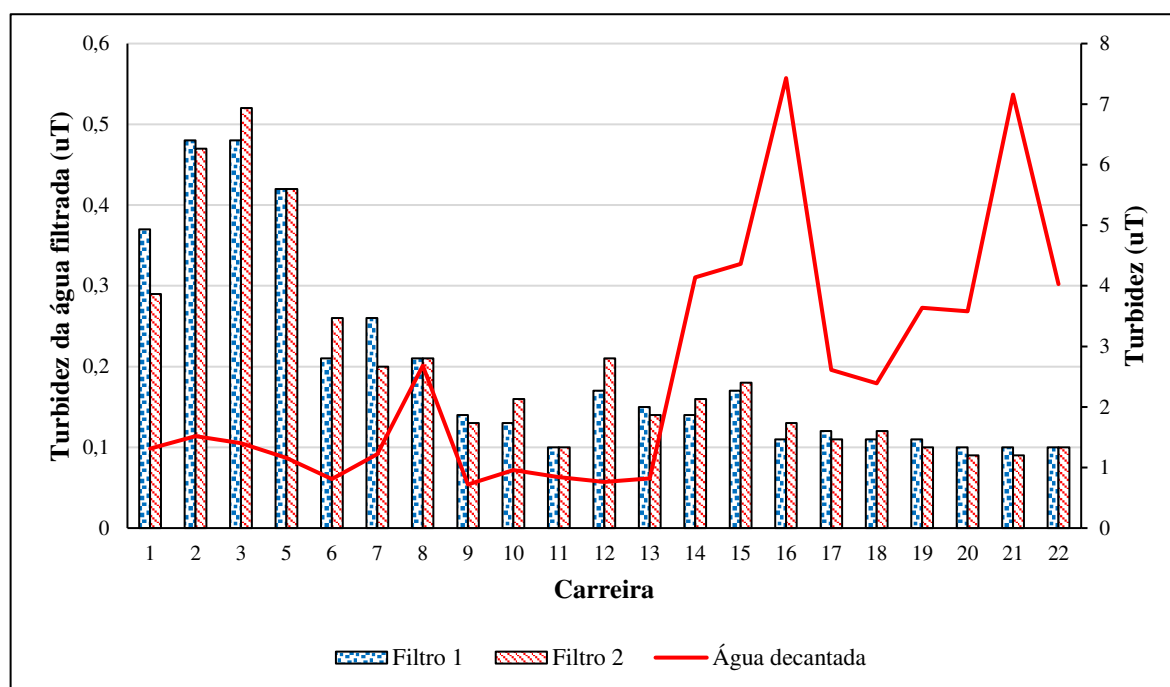
As carreiras de filtração de ambos os filtros foram mais longas no período chuvoso do que no período de estiagem. Além disso, no período chuvoso foi observado desempenho melhor dos filtros em termos de qualidade da água filtrada. Em tese, no tratamento de águas de elevada turbidez a probabilidade de ocorrência de trespasse é maior, porém, em nenhuma das carreiras de filtração do período de chuvas foi observada turbidez da água filtrada superior a 0,50 uT. Na verdade, uma única exceção foi registrada, no início da carreira 14 do filtro de areia convencional, isto é no período de amadurecimento dos filtros.

O filtro de areia de britagem produziu água com turbidez sempre inferior à 0,5uT (padrão de potabilidade brasileiro e indicador da remoção de cistos de *Giardia*) em 17 carreiras de filtração, e em nove destas inferior a 0,30 uT (padrão de potabilidade da norma dos EUA e indicador da remoção de oocistos de *Cryptosporidium*). No filtro de areia convencional foram 16 carreiras de filtração com turbidez da água filtrada sempre abaixo de 0,50 uT e nove sempre abaixo de 0,30 uT

Além disso, a operação dos filtros com diferentes taxas de filtração não influenciou diretamente na qualidade da água filtrada. Observa-se na Figura 70 que a turbidez média da água filtrada apresentou maiores oscilações em relação aos diferentes períodos em que os filtros

foram operados – período de estiagem e chuvoso – do que em relação às taxas de filtração aplicadas – $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$. Ainda na Figura 70, é possível observar que as variações da qualidade da água decantada também não exerceram influência nítida nos valores de turbidez da água filtrada.

Figura 66 – Turbidez média da água filtrada e da água decantada nas carreiras de filtração dos filtros de areia convencional e de areia de britagem



Filtro 1: areia de britagem; e Filtro 2: areia convencional

Na Tabela **Erro! Autoreferência de indicador não válida.18** é apresentada a produção de água em cada um dos filtros para as diferentes taxas de filtração. É importante ressaltar que as taxa de $270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$, são, respectivamente, 1,5 e 2,0 vezes maiores que o valor máximo recomendado pela NBR 12216 para filtração rápida descendente em filtro de camada única de areia: $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (ABNT, 1992).

Nota-se que as carreiras operadas com taxas de filtração mais elevadas ($270 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $360 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$) foram mais curtas, mas produziram volume de água maior ou semelhante ao obtido com a taxa de $180 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$. Ou seja, houve melhor aproveitamento do filtro nas carreiras com taxas de filtração mais elevadas. Ao se considerar que o processo de retrolavagem utiliza volumes elevados para limpeza dos filtros – 2 a 5% do volume de água captada (HELLER & PÁDUA, 2006), a aplicação de taxas de filtração maiores poderia favorecer ganhos em

eficiência na operação. De toda forma, cabe notar que os filtros de areia e de areia de britagem se equipararam em termos de produção de água.

Tabela 18 – Produção de água nas carreiras de filtração dos filtros de filtros de areia convencional e de areia de britagem

Carreira de filtração	Taxa de Filtração ($\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	Produção de água m^3m^{-2}	
		Areia de britagem	Areia convencional
1	180	122	122
2	180	92	92
3	180	69	61
5	270	70	74
6	270	86	86
7	360	76	76
8	360	221	252
9	360	154	160
10	270	198	201
11	270	234	229
12	360	156	162
13	180	155	153
14	270	344	332
15	180	337	324
16	360	534	503
17	360	526	488
18	270	390	395
19	360	389	397
20	180	284	284
21	270	378	390
22	180	339	309

Na Tabela **Erro! Autoreferência de indicador não válida.19** é apresentada a variação dos valores de IFI dos filtros de areia de britagem e areia convencional em todas as carreiras de filtração. Em cada carreira, os valores de IFI dos dois filtros foram muito próximos em magnitude, reforçando entendimento já veiculado anteriormente neste trabalho que sob as mesmas condições operacionais, os filtros de areia de britagem e areia convencional apresentaram desempenho semelhante.

Tabela 19 – Variação do Índice de Filtrabilidade de Ives (IFI) nas carreiras de filtração dos filtros de filtros de areia convencional e de areia de britagem

Carreira	IFLx10 ⁻³			
	Areia de britagem		Areia convencional	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1	1,81	7,08	1,81	6,47
2	3,35	6,38	3,67	6,96
3	3,76	7,46	2,70	9,17
5	5,49	9,06	1,82	9,54
6	2,80	19,52	2,95	22,54
7	2,52	10,09	1,70	9,01
8	0,27	1,06	0,28	0,67
9	1,15	5,92	1,13	5,70
10	0,41	1,80	0,59	3,24
11	0,57	2,40	0,53	3,24
12	1,15	5,92	3,02	5,70
13	0,83	2,04	0,80	2,65
14	0,09	0,27	0,05	0,33
15	0,07	0,33	0,08	0,45
16	0,03	0,10	0,04	0,13
17	0,08	0,48	0,10	0,38
18	0,13	0,66	0,12	0,79
19	0,04	0,48	0,03	0,63
20	0,06	0,33	0,07	0,37
21	0,01	0,10	0,01	0,02
22	0,05	0,25	0,07	0,30

Não se observam diferenças nítidas em relação a variação das taxas de filtração. As diferenças observadas nos valores de IFI associam-se mais à qualidade da água afluyente aos filtros, sendo que os piores resultados de IFI foram registrados nas carreiras com presença de concentração elevada de algas na água decantada, em especial, nas carreiras 5 e 6, com valores de IFI da ordem de 10⁻².

Por outro lado, o desempenho da filtração no período chuvoso se mostrou superior ao do período de estiagem. Verifica-se que no período chuvoso foram obtidos valores de IFI da

ordem de 10^{-5} em oito das nove carreiras avaliadas do filtro de areia de britagem e em sete carreiras do filtro de areia convencional. Entende-se, que a presença de flocos mais frágeis na água decantada possibilitou melhor aproveitamento dos leitos filtrantes, com menor incremento de perda de carga e maior duração das carreiras de filtração.

Os filtros também apresentaram desempenho similar em termos de remoção de microrganismos indicadores. Na Tabela 20 é apresentada a remoção de esporos de bactérias aeróbias em cada um dos filtros em todas as carreiras de filtração. Assim como a remoção de turbidez, a eficiência de remoção de esporos de bactérias aeróbias foi superior no período chuvoso em comparação ao período de estiagem, mas em cada carreira a remoção de EBA nos dois filtros se deu em valores bem próximos. Resultados similares foram obtidos para a remoção de coliformes (Tabela 21).

Tabela 20 – Remoção de esporos de bactérias nos filtros de areia de britagem e areia natural ao longo das carreiras de filtração

Carreira	Remoção de EBA (log)			
	Areia de britagem		Areia convencional	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1	1,24	1,74	0,92	1,66
2	0,65	1,23	0,70	1,03
3	0,94	1,96	0,76	0,99
5	0,70	1,44	0,55	1,11
6	0,21	2,51	0,85	2,45
7	0,94	1,21	0,97	1,31
8	0,40	2,51	0,30	2,51
9	1,95	2,08	1,88	2,50
10	1,81	2,66	1,26	2,66
11	0,08	2,96	0,10	2,48
12	0,19	1,73	0,88	1,85
13	0,80	1,85	0,91	1,92
14	1,00	2,90	1,36	2,90
15	0,06	3,65	0,10	3,83
16	1,34	3,88	1,43	3,53
17	0,08	3,48	0,11	3,48
18	0,93	2,06	1,12	2,33
19	1,53	2,54	0,35	2,77
20	1,68	3,42	1,70	3,46
21	1,16	3,63	0,63	4,33
22	1,00	4,44	1,36	2,74

Tabela 21 – Remoção de coliformes totais nos filtros de areia de britagem e areia natural ao longo das carreiras de filtração

Carreira de filtração	Tf (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	Remoção de coliformes totais (log)			
		Areia de britagem		Areia convencional	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
6	270	0,30	1,34	1,10	1,38
9	360	0,82	1,71	0,77	1,58
13	180	0,72	1,62	0,60	1,94
19	360	0,41	1,88	0,41	1,52
20	180	0,96	2,42	0,96	2,42
21	270	0,97	1,68	1,17	1,86

5. CONCLUSÕES

Do resultado das 22 carreiras de filtração com os filtros de areia de britagem e de areia convencional operando simultaneamente, pode-se concluir que a filtração rápida descendente com areia de britagem apresentou desempenho equiparável à com areia convencional em termos de remoção de turbidez, duração de carreiras de filtração, evolução das perdas de carga e remoção de microrganismos indicadores.

Merecem destaque as seguintes observações:

- o filtro com leito de areia de britagem apresentou plena capacidade de atendimento do padrão de turbidez de água filtrada estabelecido na norma brasileira de qualidade da água para consumo humano: 0,5 uT
- as remoções de turbidez e de esporos de bactérias aeróbias no filtro com leito de areia de britagem foram similares às obtidas com areia natural para todas as taxas testadas; infere-se, portanto, que os filtros revelarem eficiência equiparável de remoção potencial de cistos de protozoários.
- a remoção de coliformes totais foi similar em ambos os filtros, ou seja, ambos os filtros revelaram eficiência equiparável de remoção de bactérias;
- os filtros de areia de britagem e de areia convencional apresentaram ainda desempenho, ou resiliência semelhante em condições desfavoráveis da qualidade da água decantada – turbidez afluyente elevada e floração de microalgas
- .

Conclui-se, portanto, que os resultados apresentados reforçam o potencial de emprego da filtração rápida descendente com areia de britagem para o tratamento de água para consumo humano.

6. RECOMENDAÇÕES

Em que pese a relevância dos resultados obtidos no presente trabalho, permanecem algumas lacunas sobre o uso de areia de britagem no tratamento da água, sobre o que se sugerem recomendações para estudos complementares (algumas já apresentadas por Silva ,2018):

- caracterizar processos e custos para a preparação, condicionamento e transporte da areia de britagem às condições requeridas para o tratamento da água;
- avaliar o desempenho da areia de britagem na remoção de cor da água

7. REFERÊNCIAS

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

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 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 9935**: Agregados— Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT 2011. 12p.

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 microrganismosemergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2009, p 109-149 (Projeto ProSab)

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria n.º. 888**, de 04 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n.º 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, 07 de maio de 2021.

BLACK, A. P. e CHRISTMAN, R. F. Characteristics of colored surface Waters. J. **AWWA**, Denver, Colorado, n. 55, p753-770, junho.

BRADFORD, S. A; KIM, H; HEADD; B, TORKZABAN, S. Use of aerobic spores as a surrogate for cryptosporidium oocysts indrinking water supplies. **Environ. Sci. Technol**, 2016, v. 50 n. 1295.

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. **Teoria, diseño y control de los process de clarificacion del agua**. P. 558. Lima, Peru: CEPIS/OPS, 1973.

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.

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

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 e VOLTAN, P. E. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 3ªed. São Carlos: LDiBe, 2017, 1296 p.

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

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.; 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.
- FRANCO, R. M. B. Protozoários de veiculação hídrica: relevância em Saúde Pública. **Revista Panamericana Infectologia**, v. 9, n. 4, p. 36-43, 2007.
- 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.
- 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. The Scientific Basis of Filtration, **NATO Advanced Study Institute Series E**, 2, 1975.
- 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.

KLEIN, N. S. ; TORALLES-CARBONARI, B. ; GUIZILINI, R. P. . Estudo do agregado miúdo para a produção de argamassas autoadensável: substituição da areia natural por areia de britagem. In: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2008, Fortaleza - CE. XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Fortaleza: ANTAC, 2008. p. 1-10.

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

MENDES C. G. N. Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com cor e turbidez variáveis. São Carlos. 144p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade do Estado de São Paulo, 1989.

MENOSSE, 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.

MUHAMMAD, N.; SINHA, R.; KRISHNAN, E.R., *et al.* Ceramic filter for small system drinking water treatment: Evaluation of membrane pore size and importance of integrity monitoring. **Journal of Environmental Engineering-Asce**, v. 135, p. 1181-1191, 2009.

MURTHA, N.A.; HELLER, L. (1999) - Avaliação da Eficiência da Filtração Lenta em Areia Segundo a Profundidade do Leito Filtrante. Anais: 20o. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro

NIEMINSKI E.C.; ONGERTH, J.E. Removing Giardia and Cryptosporidium by conventional treatment and direct filtration. **Journal of the American Water Works Association**, v.87, n.9, p.96-112, 1995.

OLIVEIRA, F.L. & MELLO, E.F. A mineração de areia e os impactos ambientais na bacia do rio São João, RJ. In: **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 374-389, 2007.

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).

QUARESMA, L. F.. Relatório Técnico 31: Perfil de areia para construção civil. J. Mendo Consultoria, 2009.

SBRIGHI NETO. C. Agregados para concreto. In: II SULFFIB SEMINÁRIO :O USO DA FRAÇÃO FINA DA BRITAGEM. Anais... São Paulo, 2005.

SCHONTAG, J. M. ; SENS, MAURÍCIO L. . Effective production of rapid filters with polystyrene granules as a media filter. *Water Science and Technology: Water Supply (Print)* , v. 15, p. 1088, 2015.

SILVA, B.M.R. Avaliação do emprego de areia de britagem como leito filtrante de filtros rápidos para tratamento de água.2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SILVA, B.M.R.; BASTOS, R.K.X.; BASTOS, P.K.X. Comparison of crushed rock sand and natural river sand as filter media for rapid filtration. **Water Supply**, v.21, n.1, p. 401-411, 2021.

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: 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).

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.

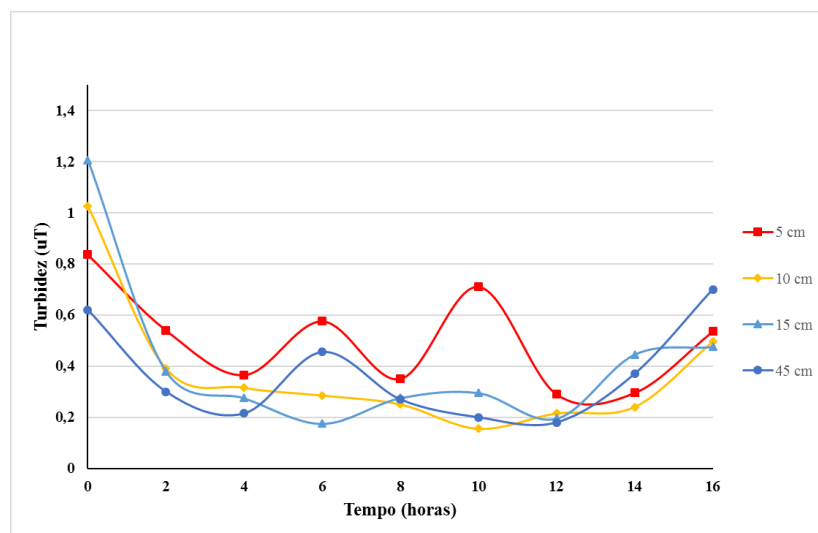
YAO, K.M.; HABIBIAN, M.T.; O'MELIA, C.R. Water and wastewater filtration. Concepts and applications. **Environmental science & technology**, v.5, n.11, p.1105-1112, 1971.

APÊNDICE A. RESULTADOS DAS VARIÁVEIS AVALIADAS NAS CARREIRAS DE FILTRAÇÃO

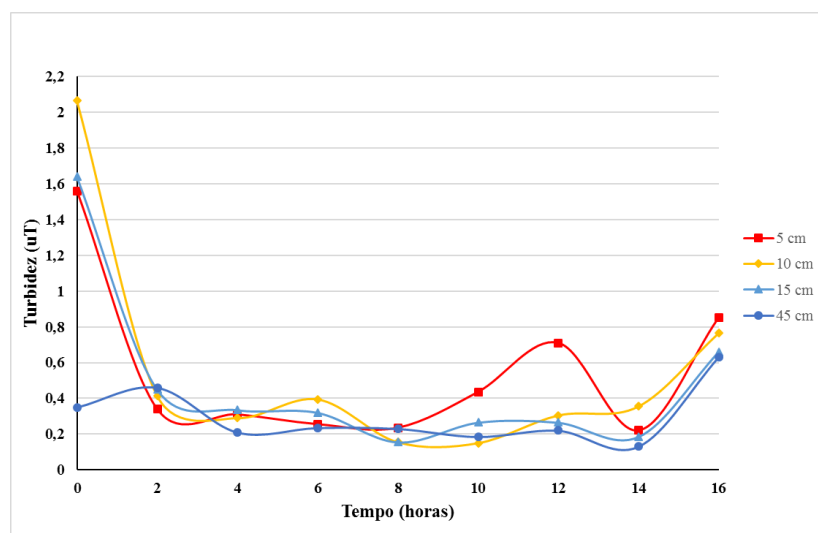
Período de estiagem – taxa de Filtração: $180 \text{ m}^3\text{m}^{-1}\text{d}^{-1}$

Carreira 1

Figura A1 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 1

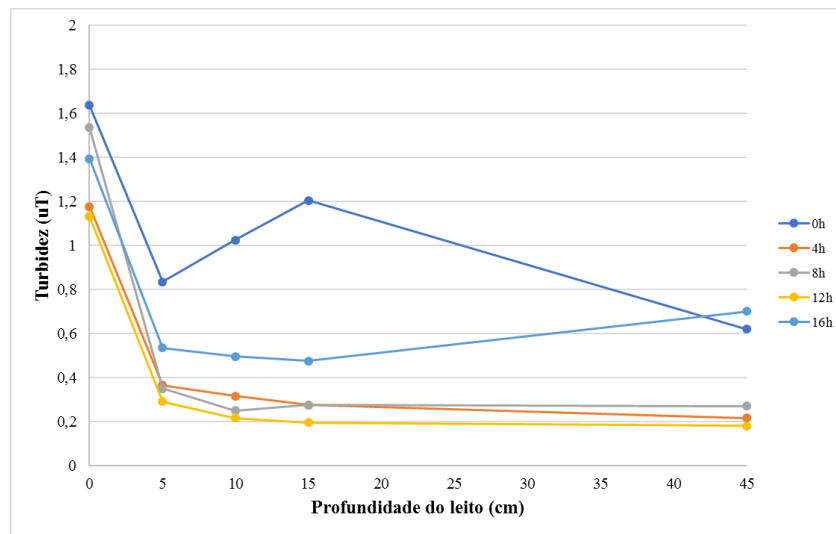


(a)

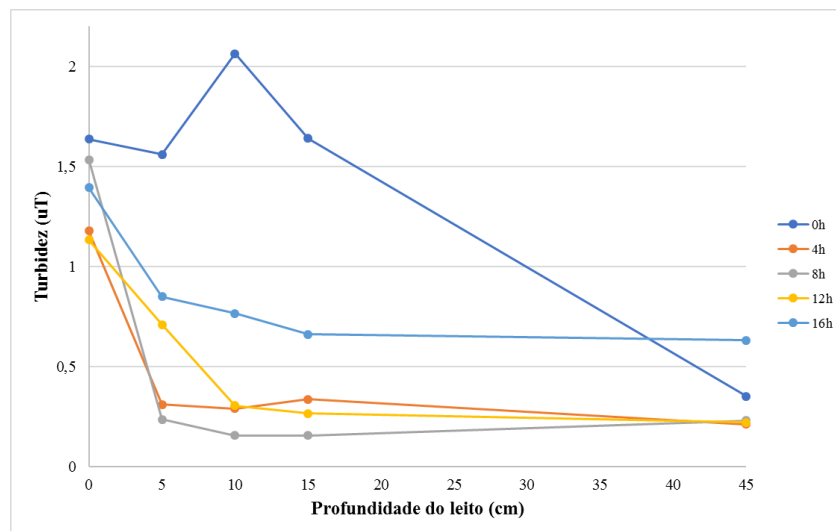


(b)

Figura A2. Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 1.

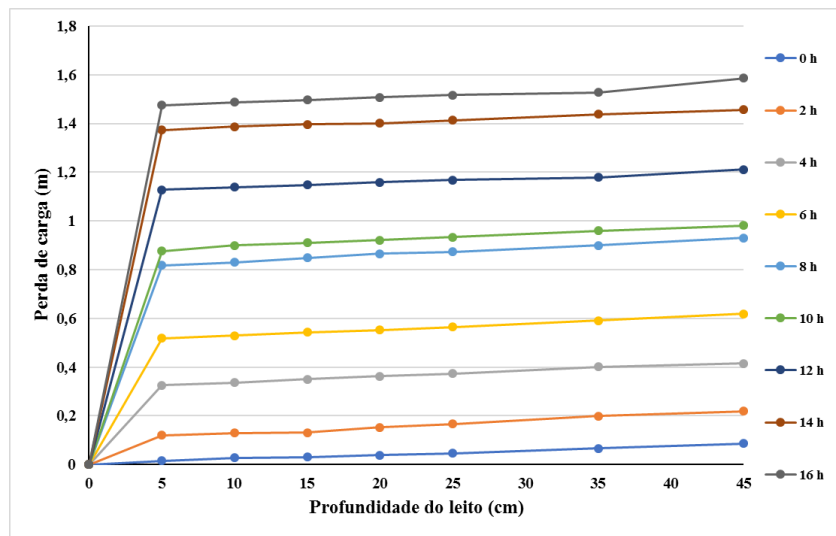


(a)

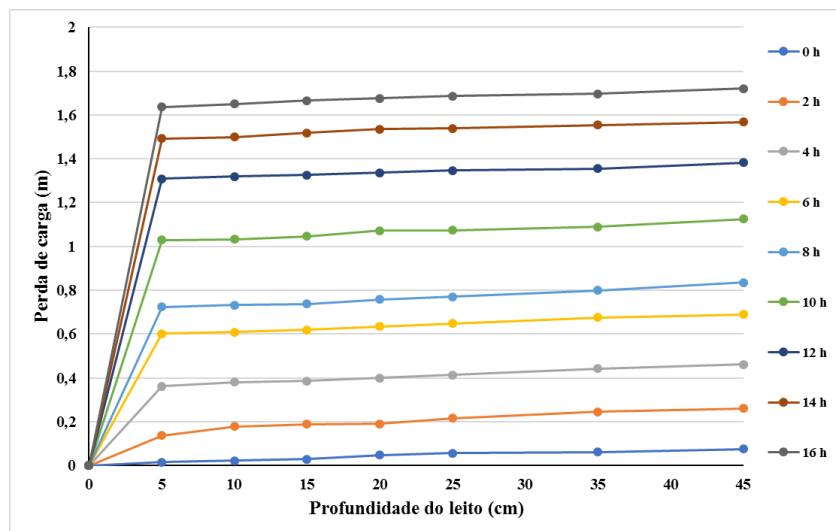


(b)

Figura A3 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 1

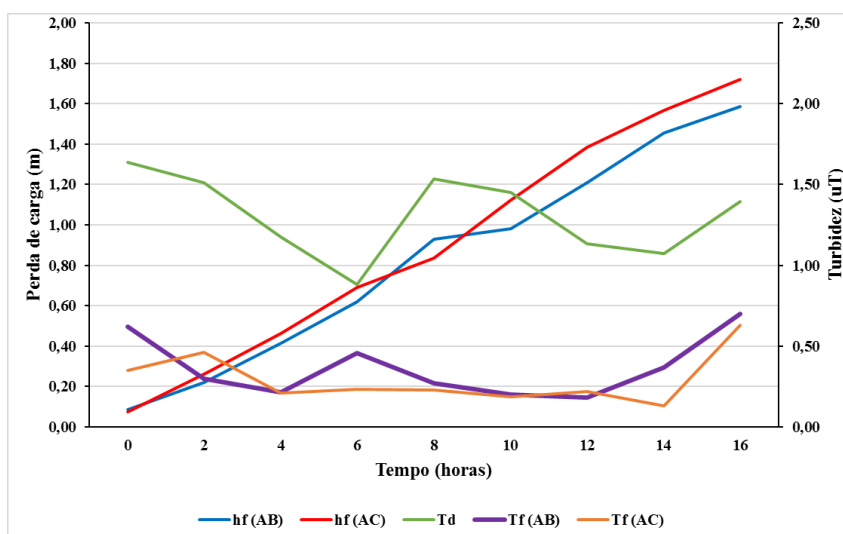


(a)



(b)

Figura A4 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 1



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional)

Figura A5 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 1. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

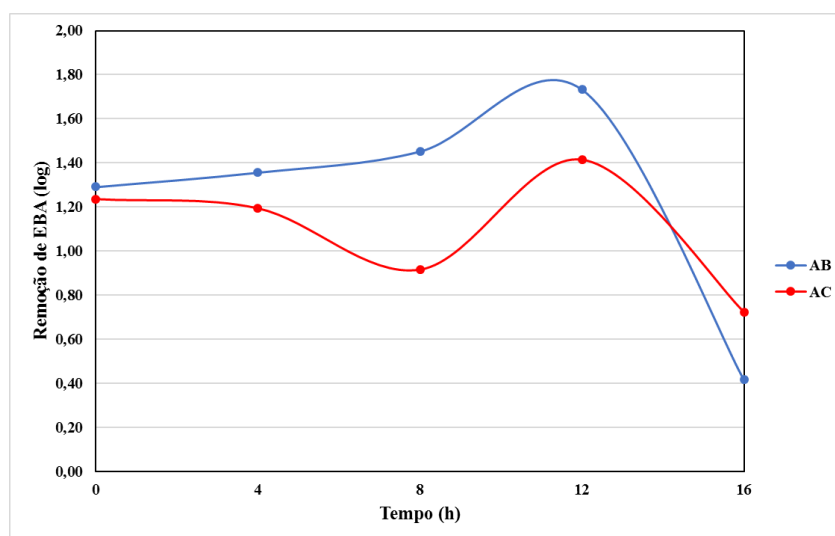


Figura A6 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 7,0) – carreira 1.

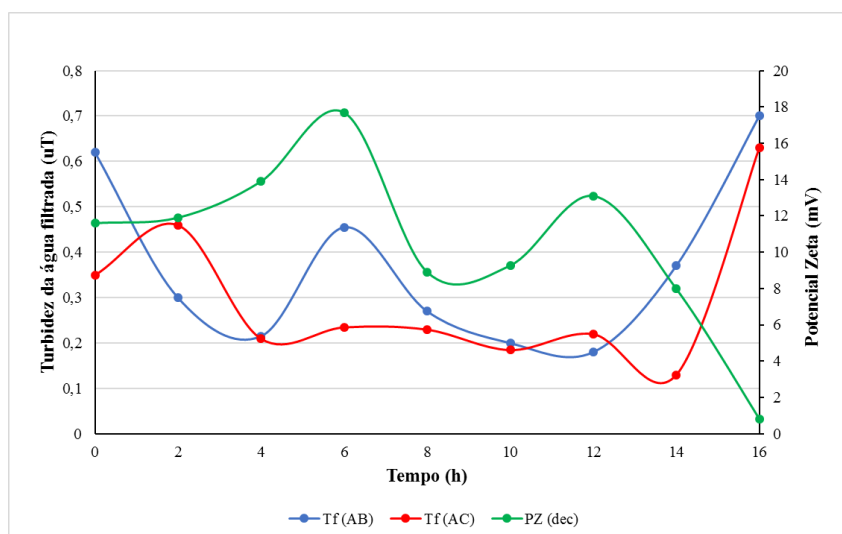
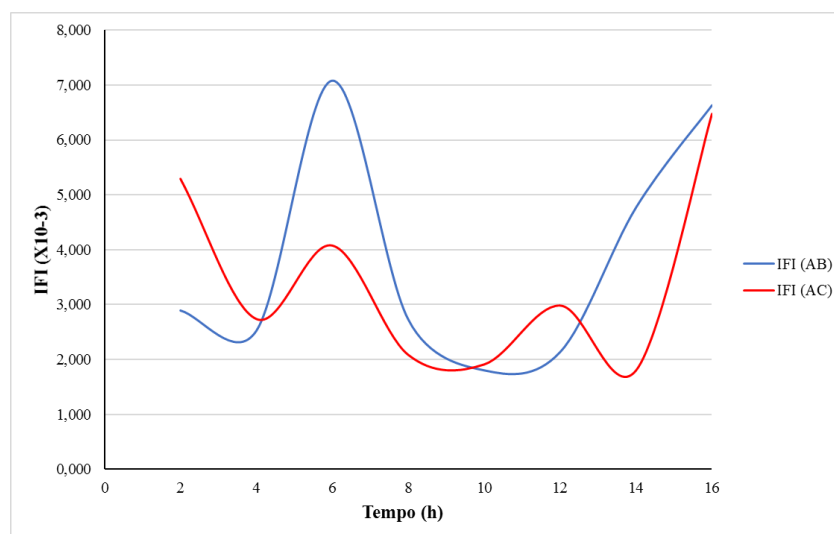
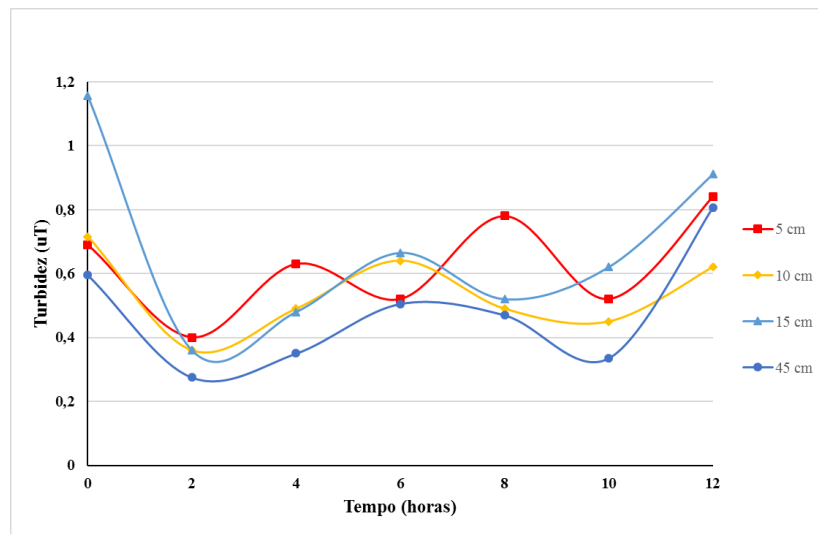


Figura A7 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 1

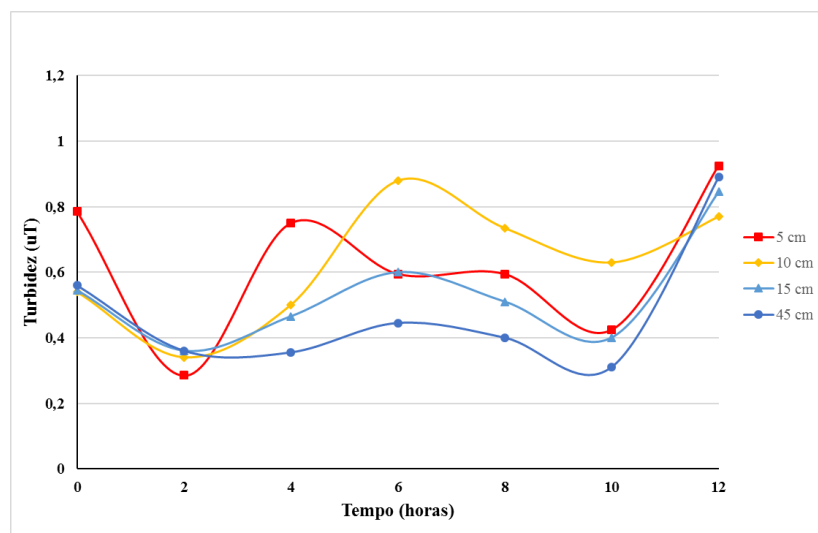


Carreira 2

Figura A8 – Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 2

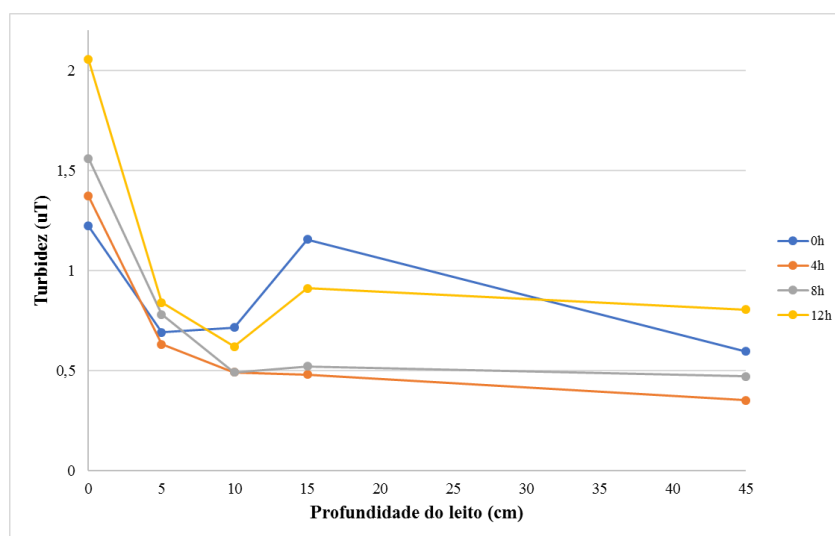


(a)

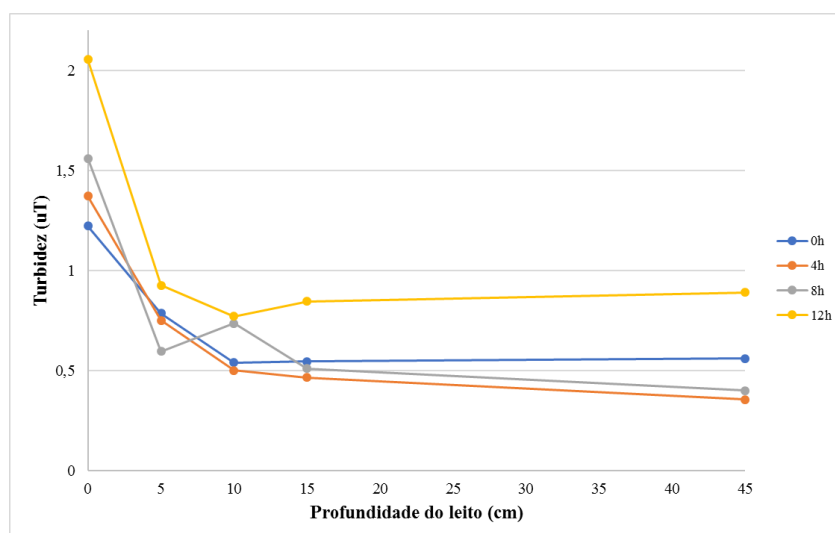


(b)

Figura A9 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 2

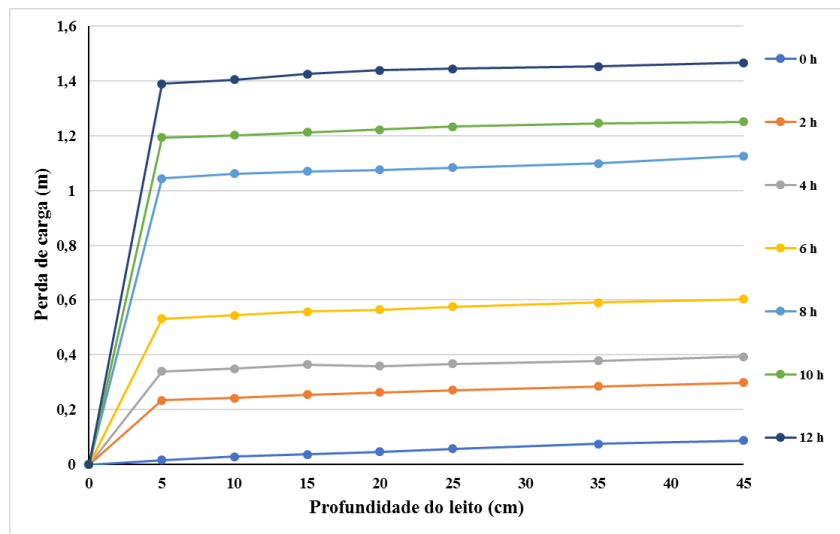


(a)

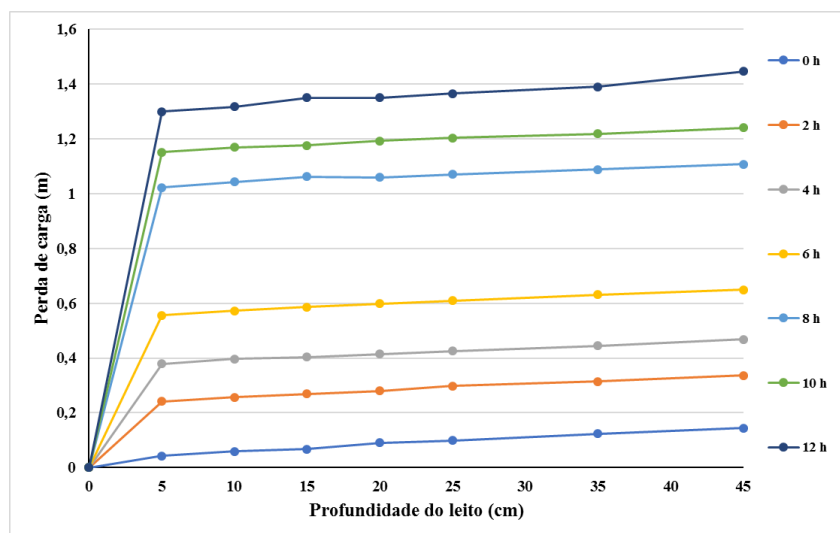


(b)

Figura A10 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem
(b) areia convencional – Carreira 2

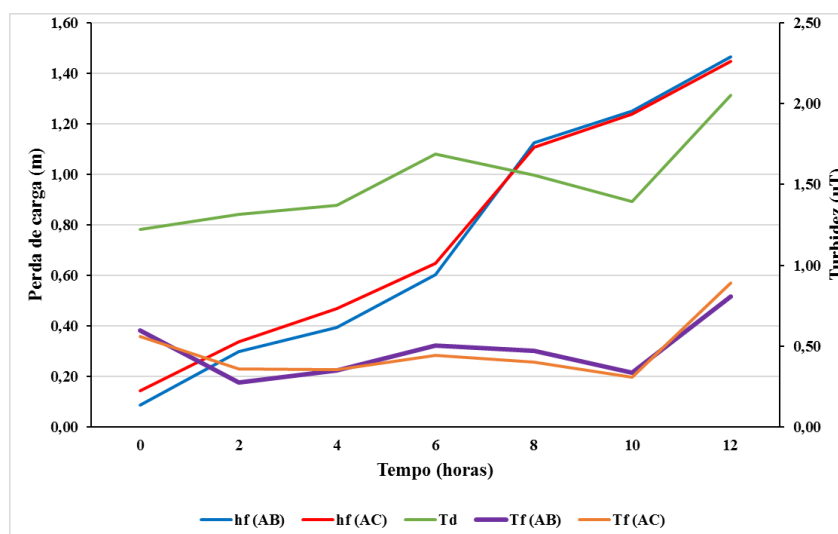


(a)



(b)

Figura A11 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 2



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional)

Figura A12 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 1. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

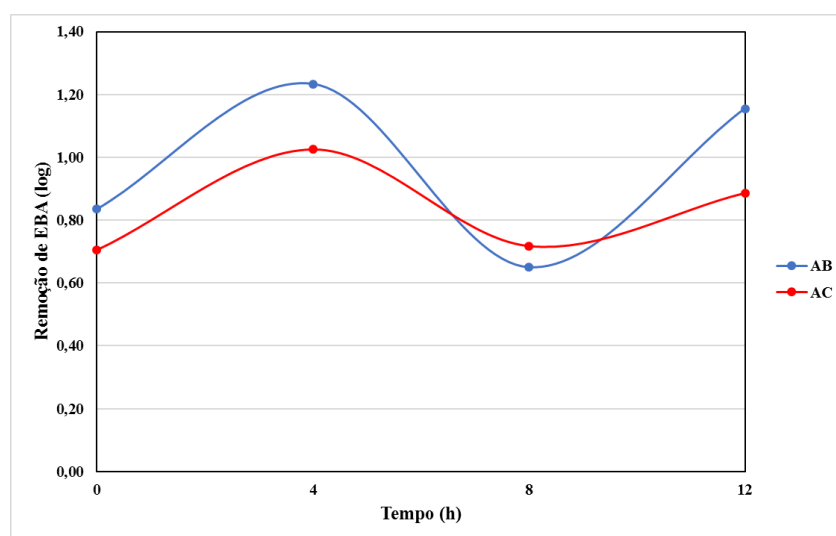


Figura A13 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 7,7) – carreira 2

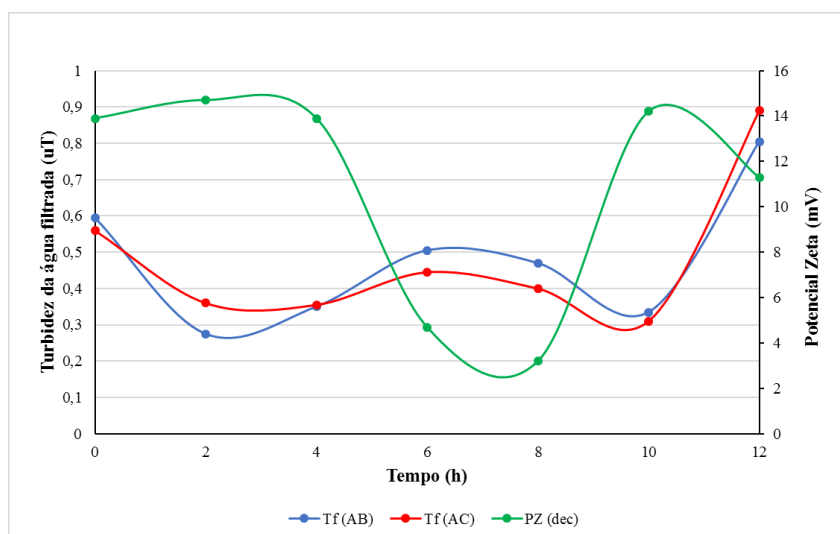


Figura A14 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 2

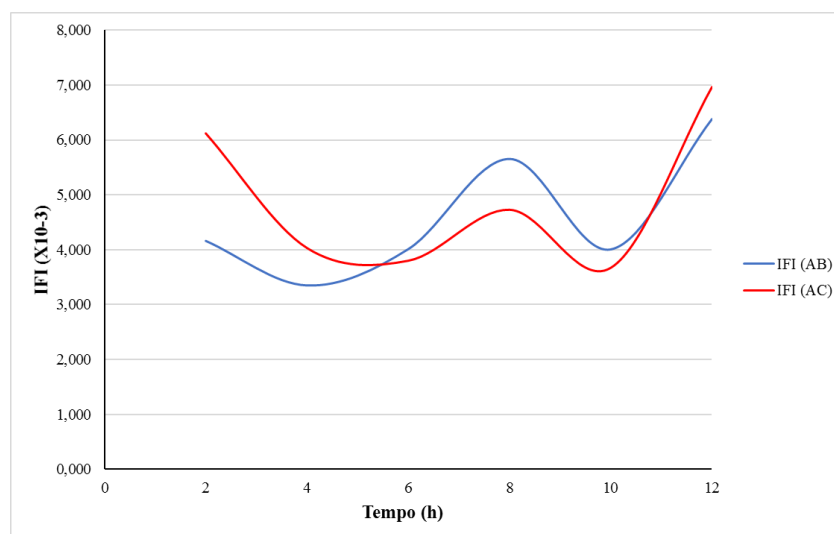
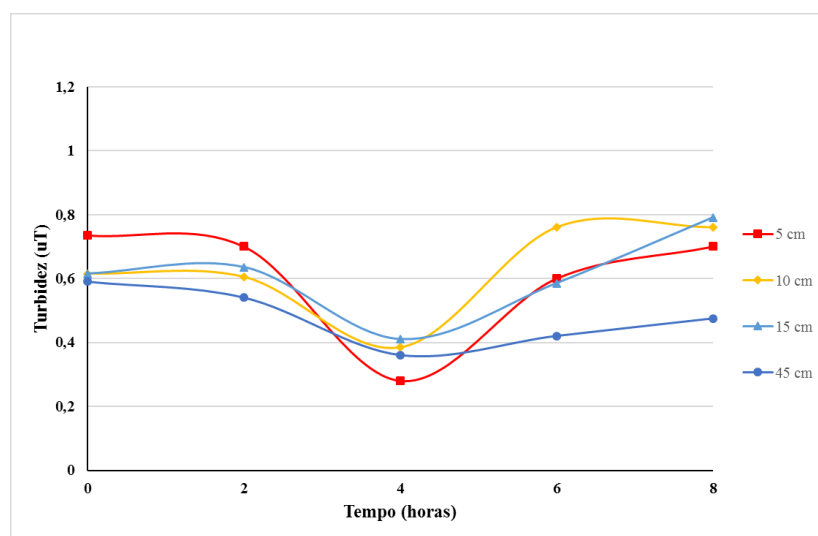
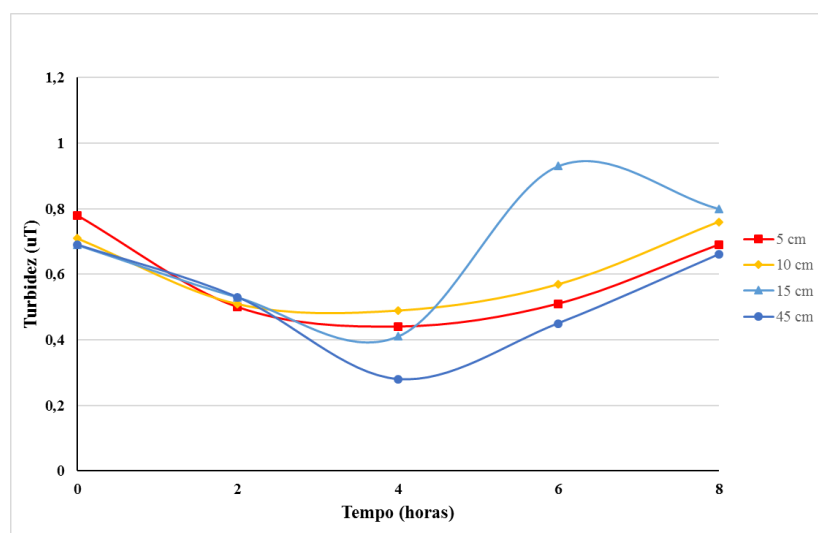


Figura A15 – Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 3

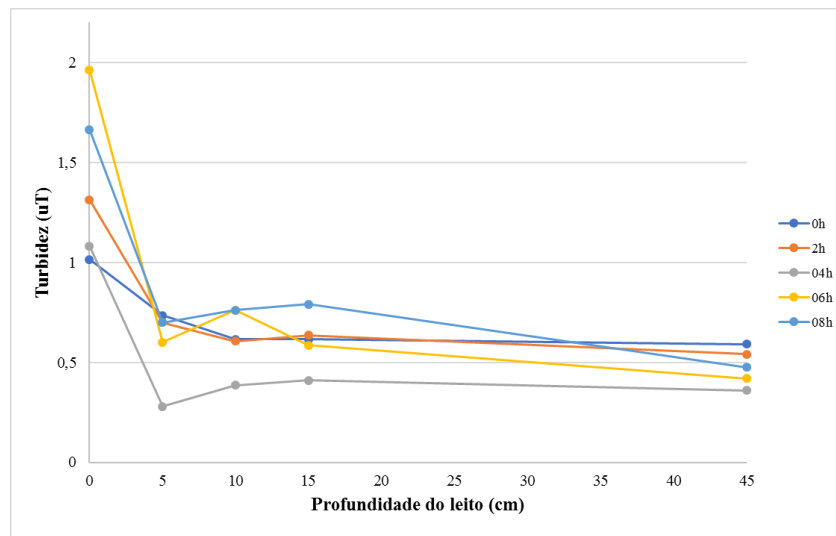


(a)

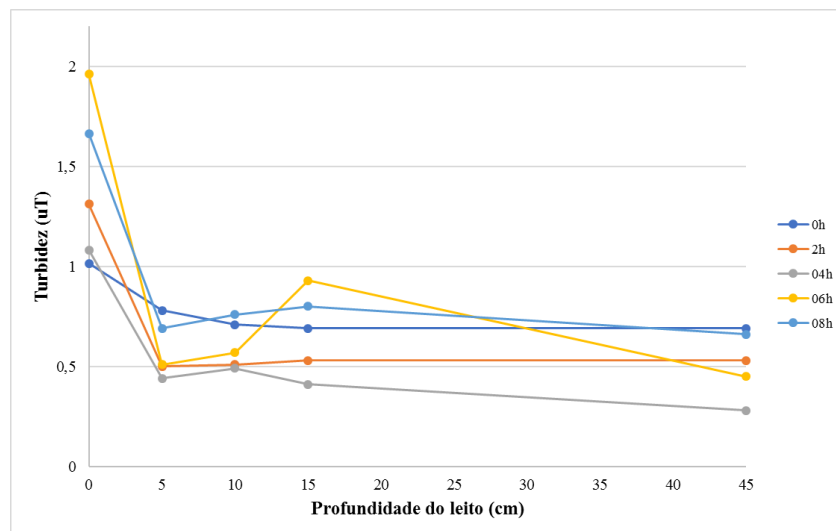


(b)

Figura A16 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
 (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 3

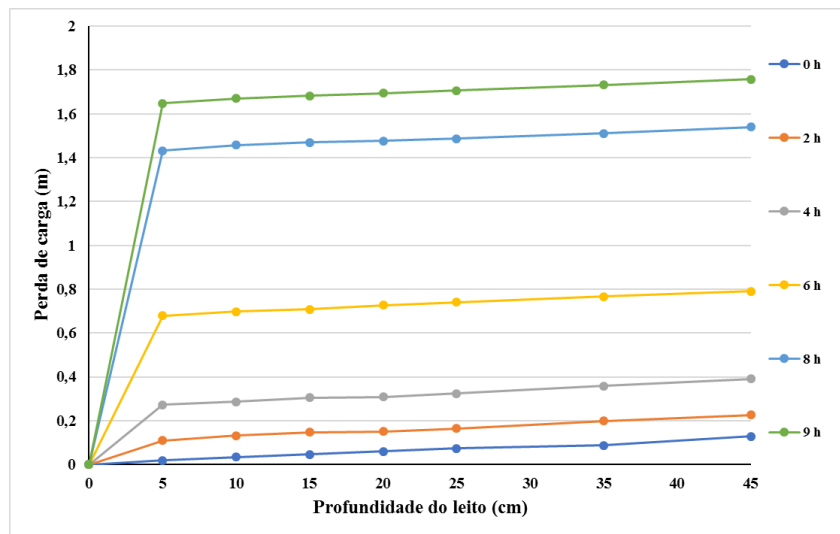


(a)

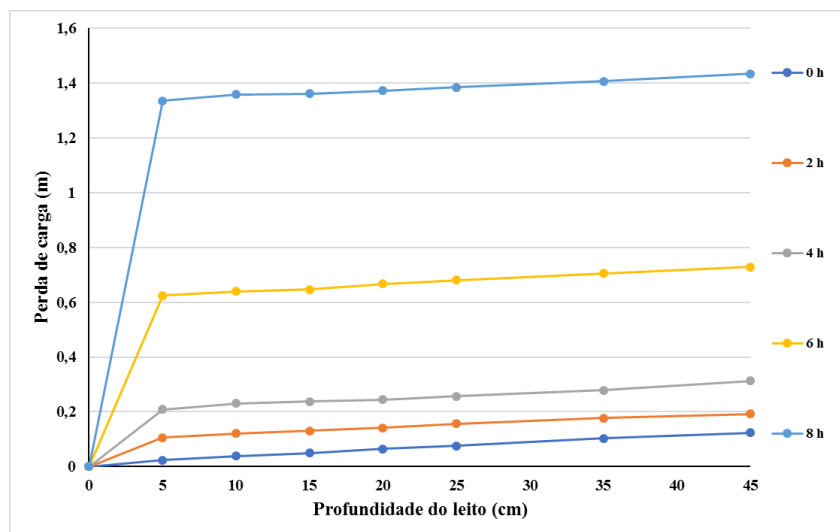


(b)

Figura A17 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem
(b) areia convencional – Carreira 3

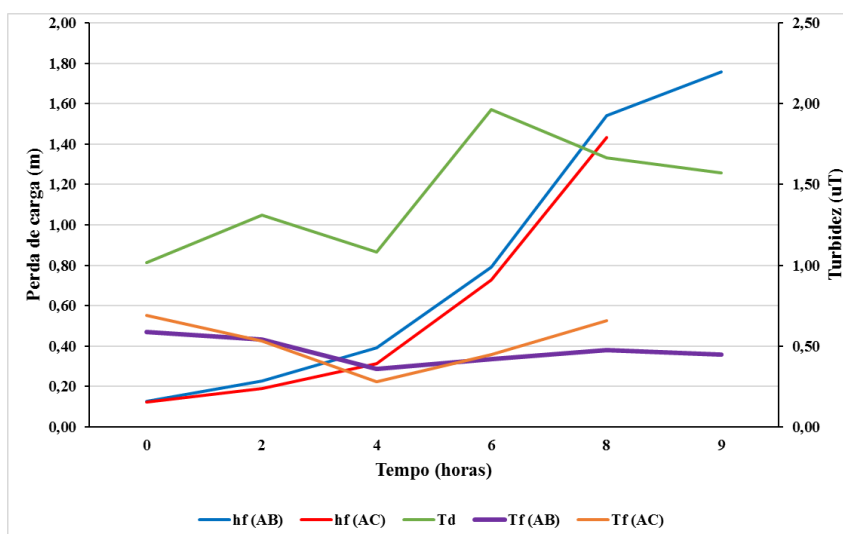


(a)



(b)

Figura A18 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 3



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A19 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 3. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

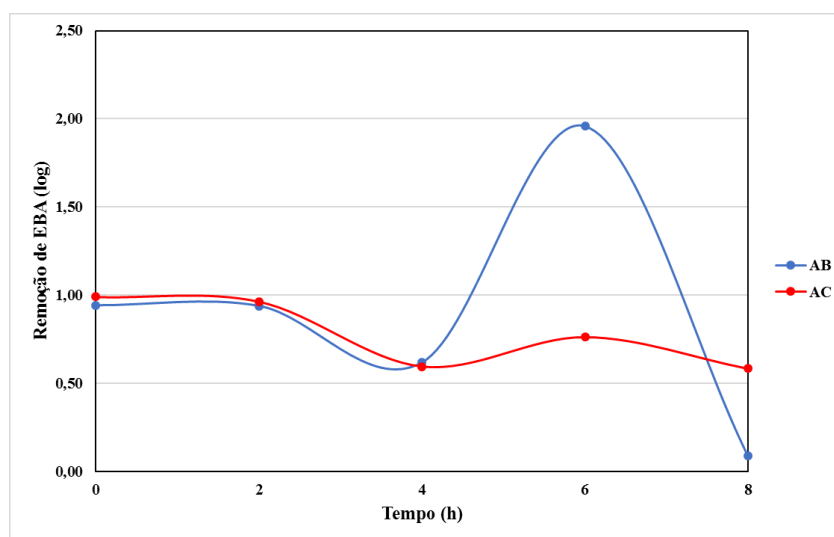


Figura A20 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 7,8) – carreira 3

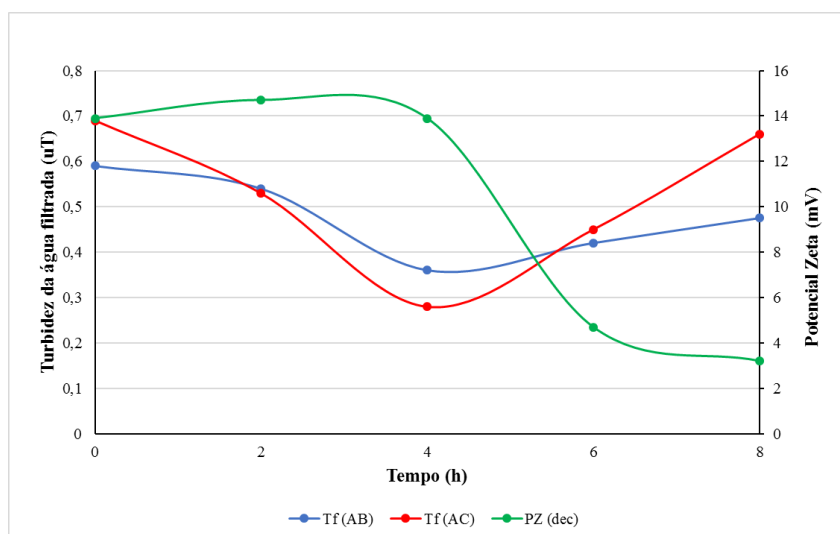
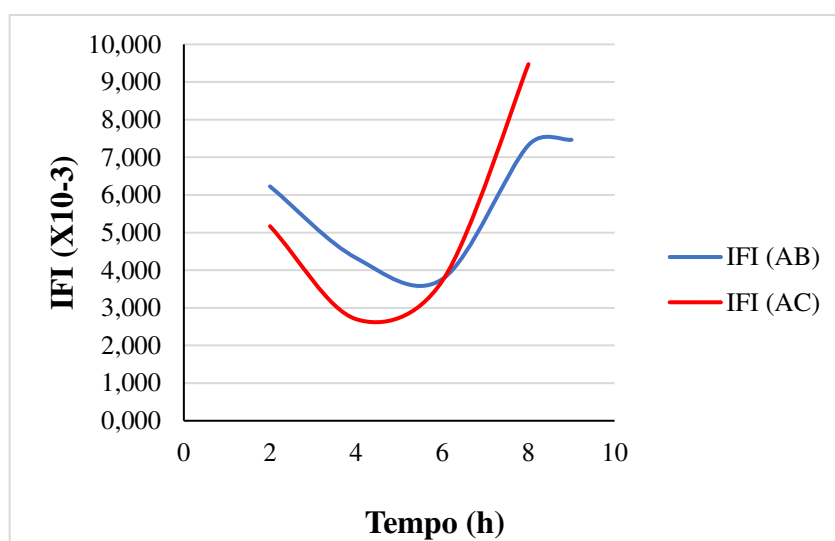
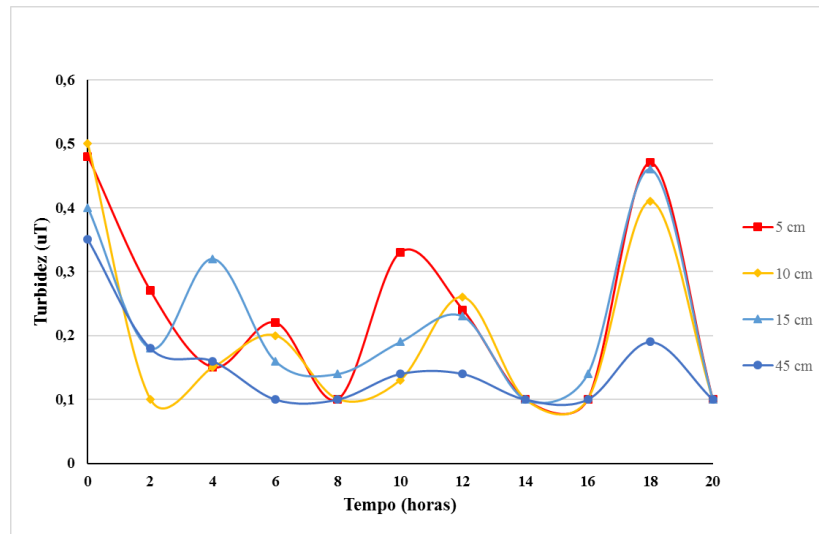


Figura A21 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 3

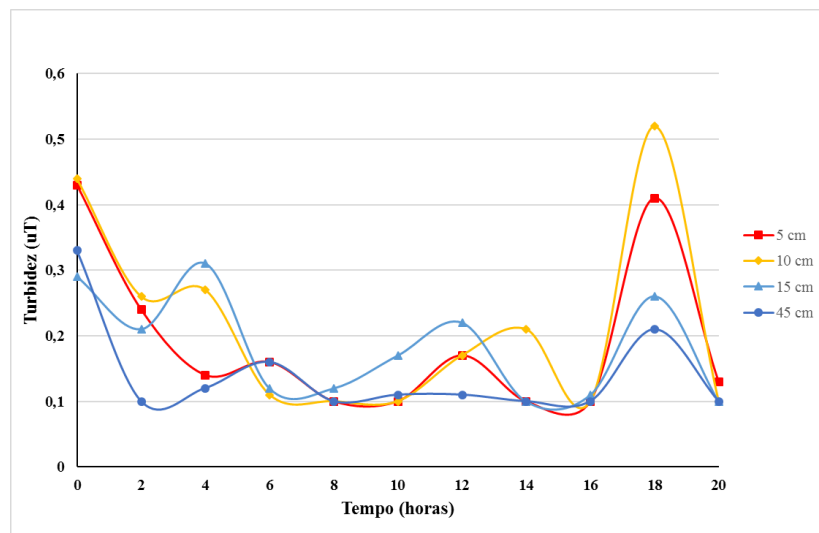


Carreira 13

Figura A22 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 13

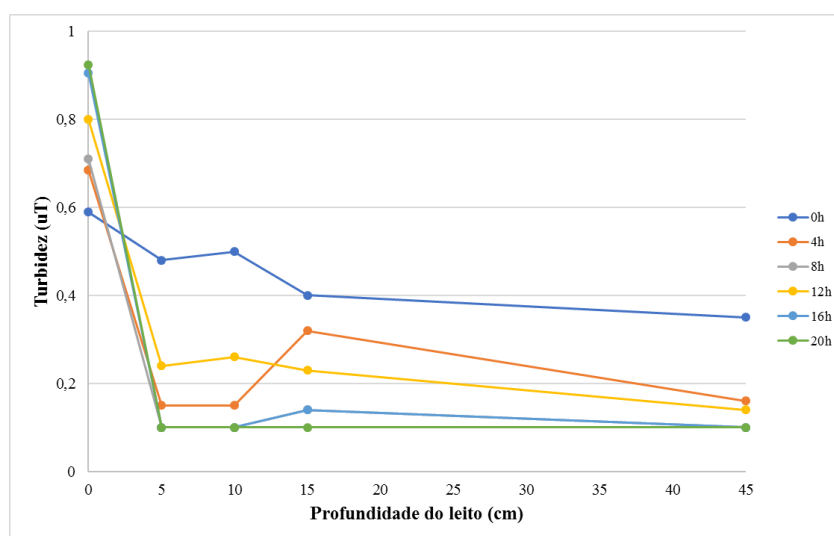


(a)

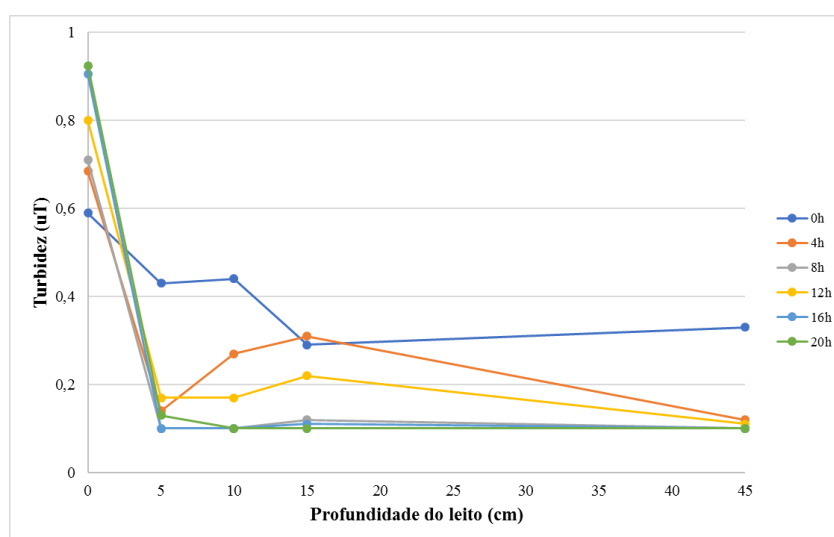


(b)

Figura A23 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 13

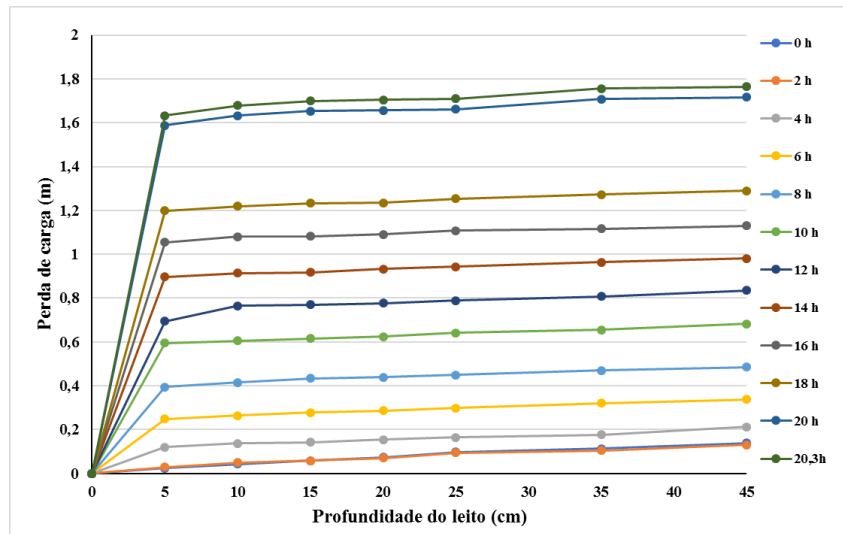


(a)

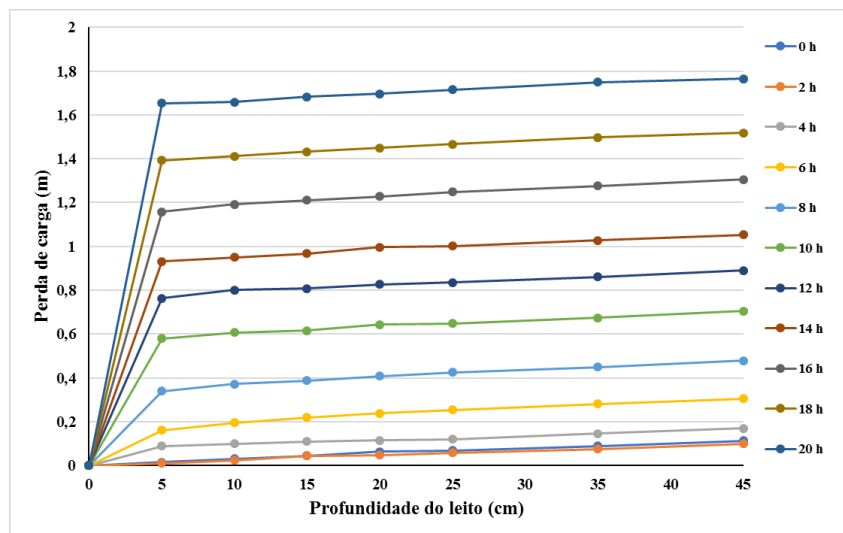


(b)

Figura A24 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 13

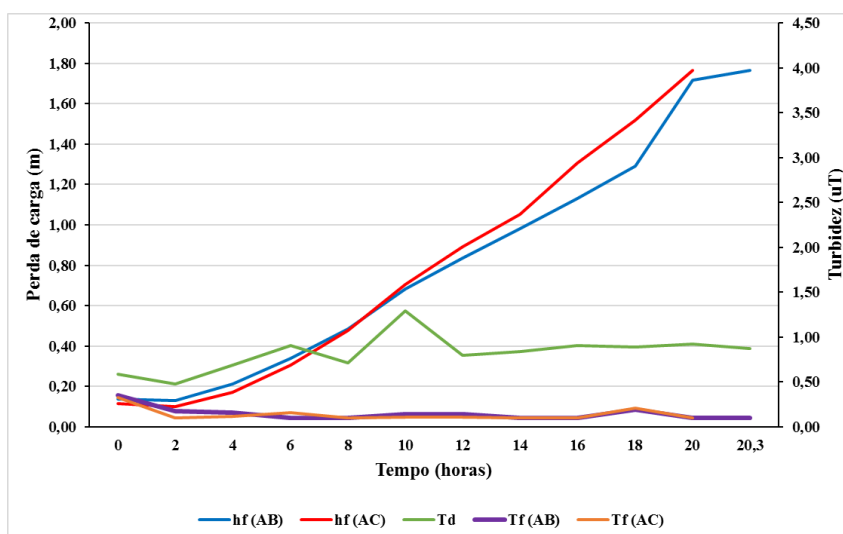


(a)



(b)

Figura A25 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 13



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A26 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 13. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

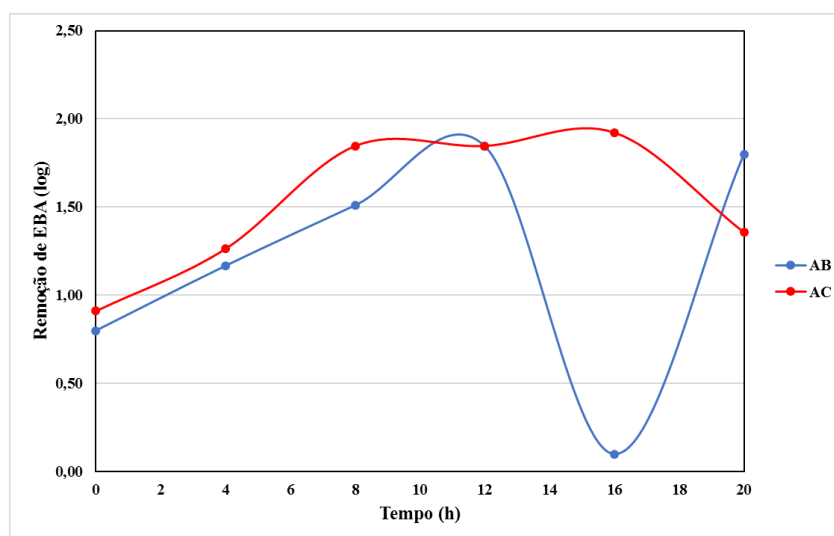


Figura A27 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 7,0) – carreira 13

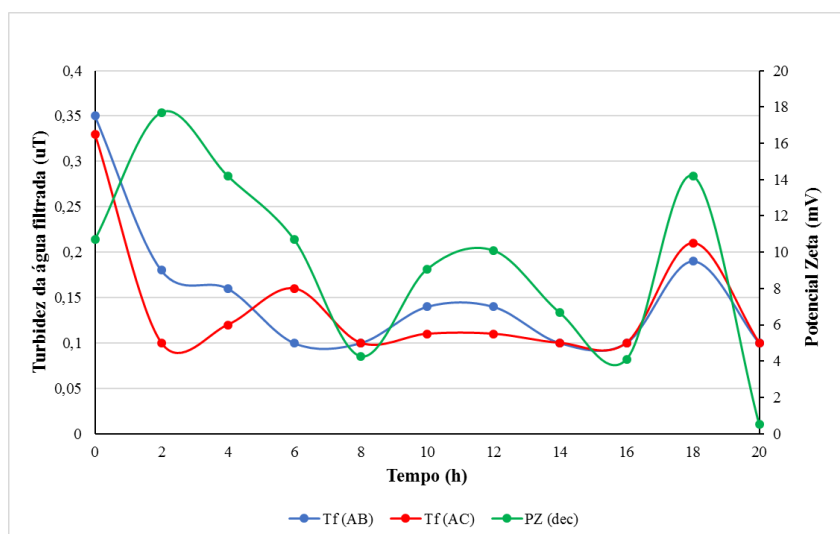
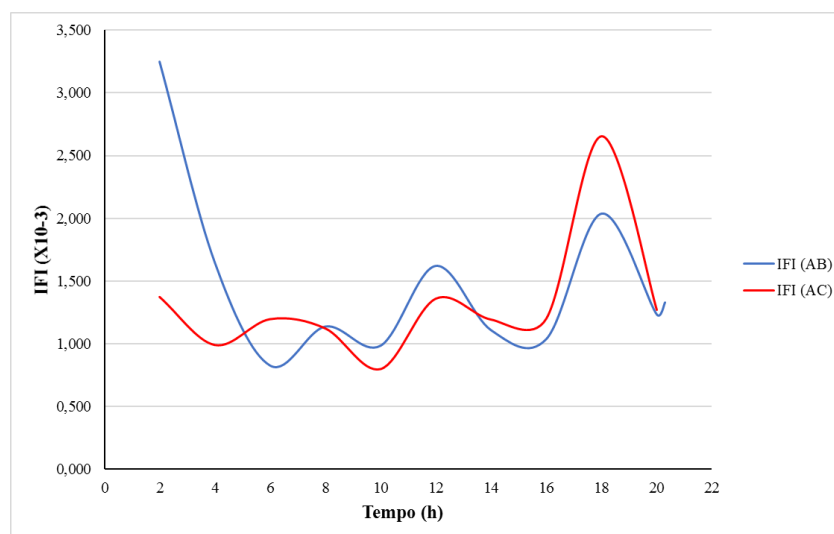


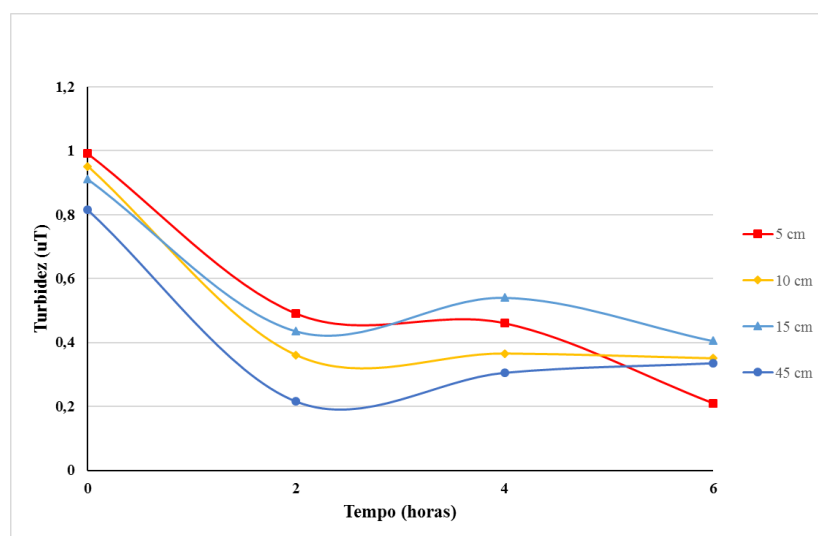
Figura A28 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 13



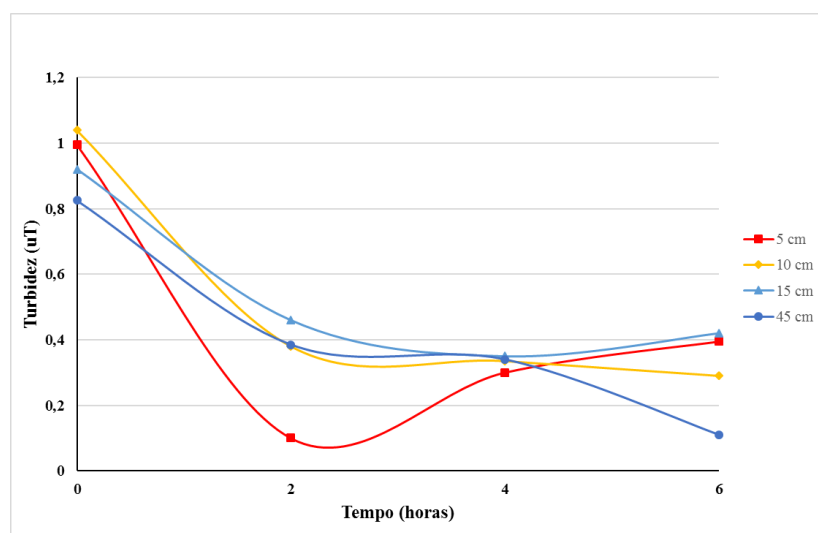
Taxa de Filtração: 270 m³m⁻¹d⁻¹

Carreira 5

Figura A29 – Turbidez da água filtrada ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 5

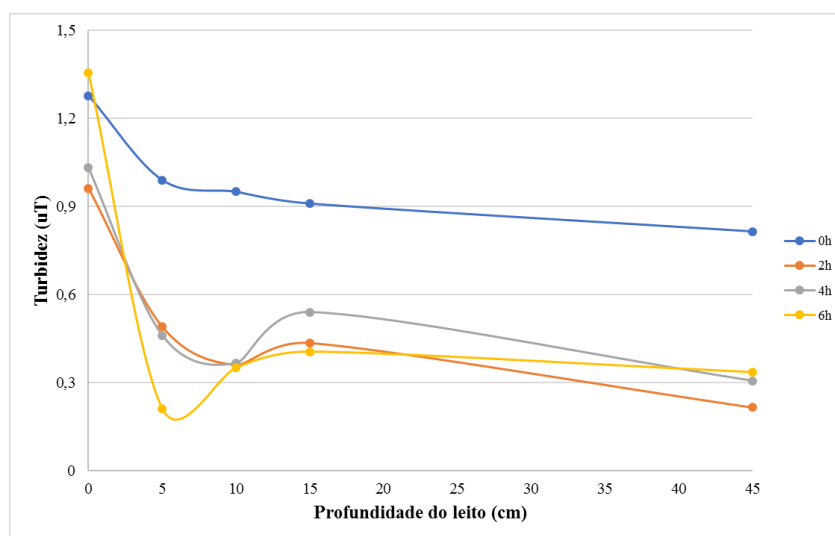


(a)

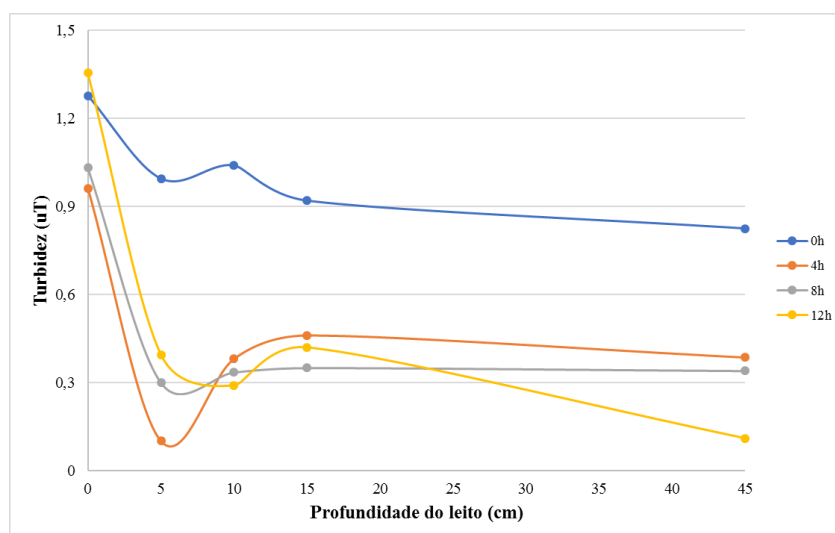


(b)

Figura A30 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 5

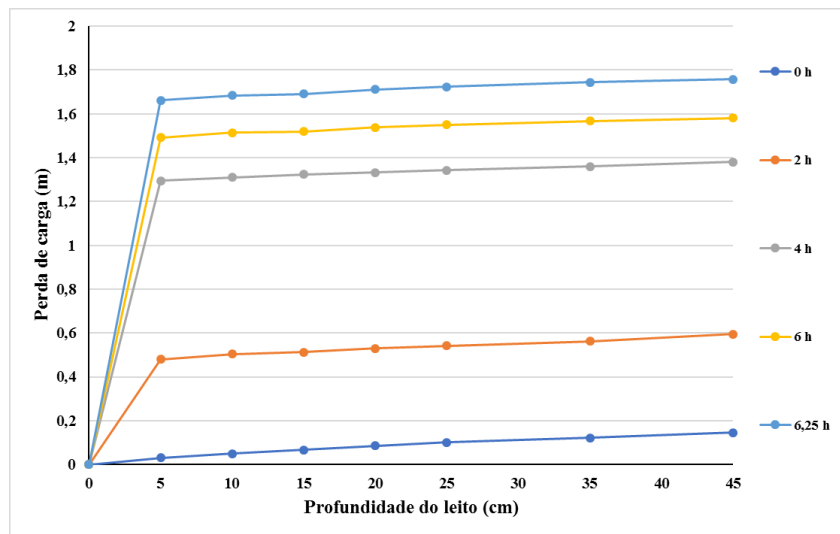


(a)

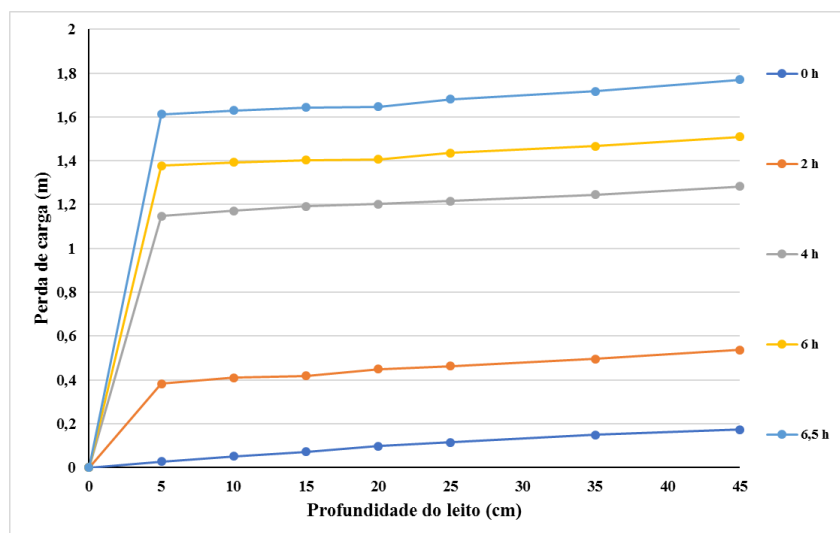


(b)

Figura A31 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 5

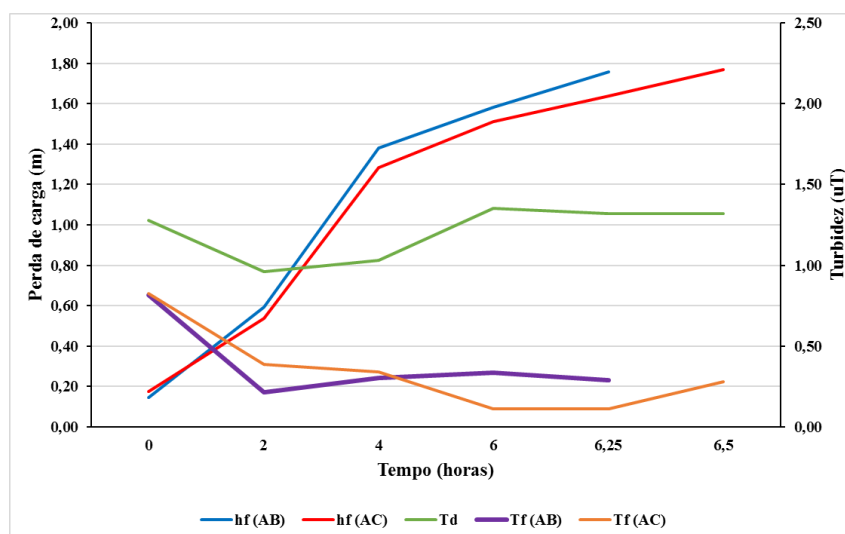


(a)



(b)

Figura A32 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 5



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A33 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 5. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

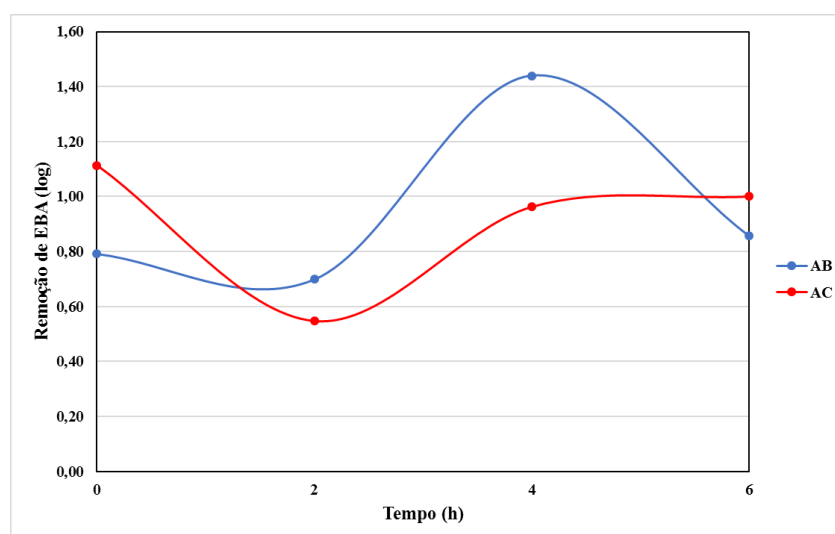


Figura A34 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 8,1) – carreira 5

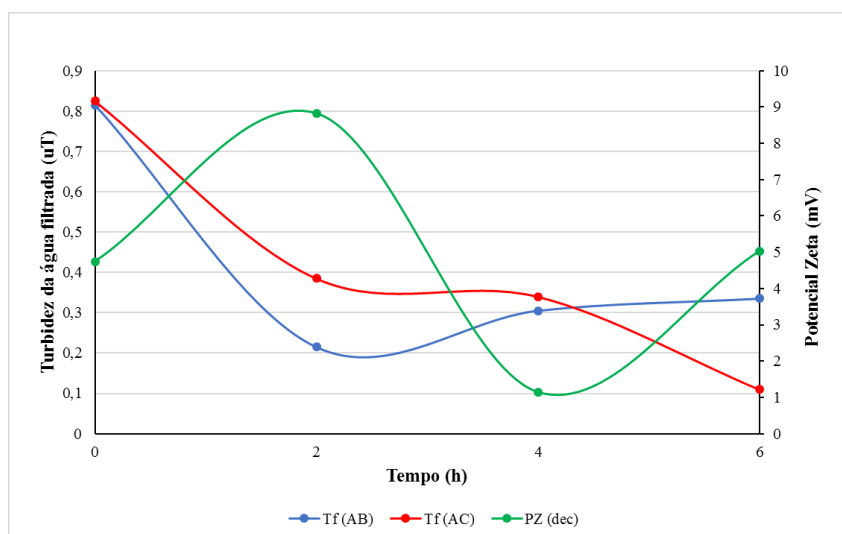
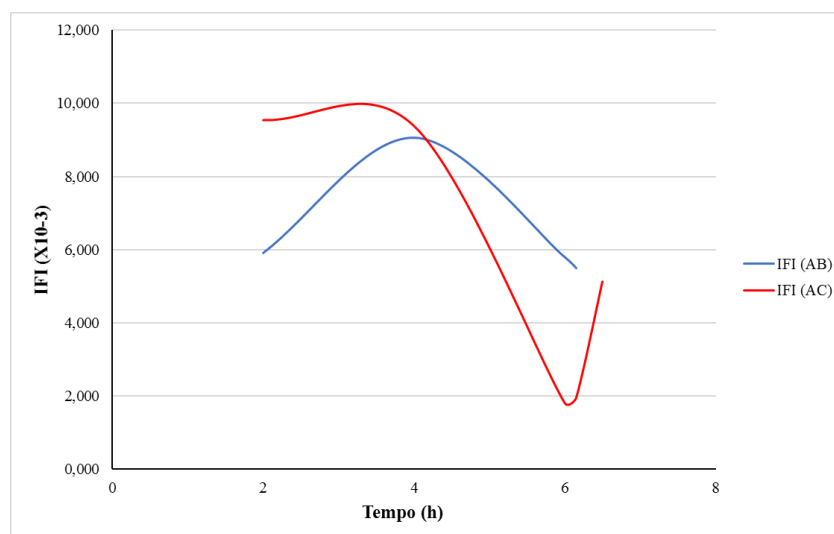
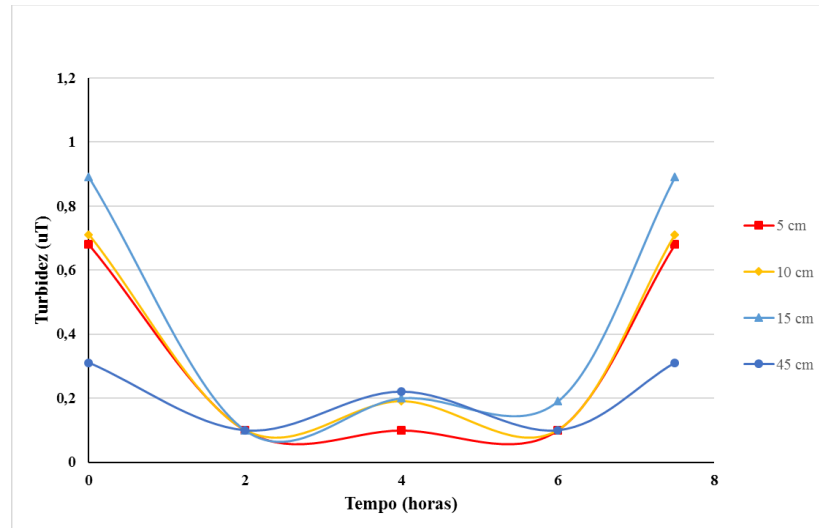


Figura A35 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 5

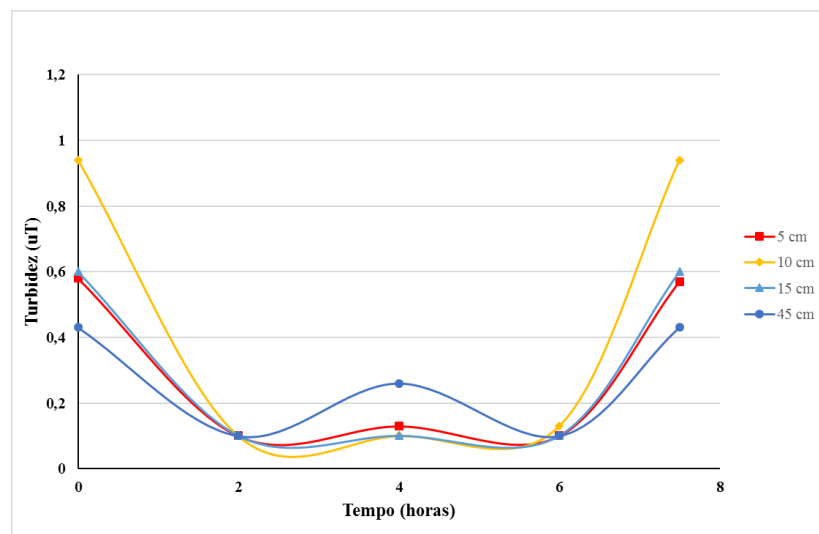


Carreira 6

Figura A36 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 6



(a)

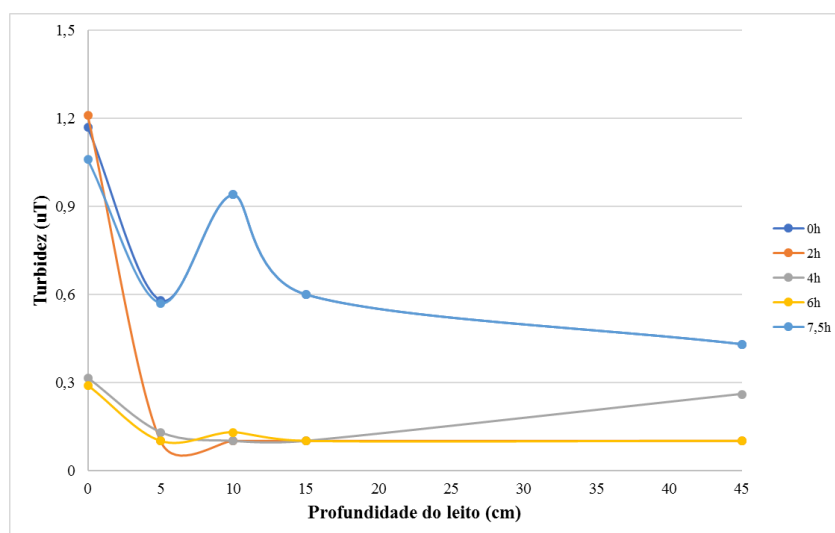


(b)

Figura A37 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 6

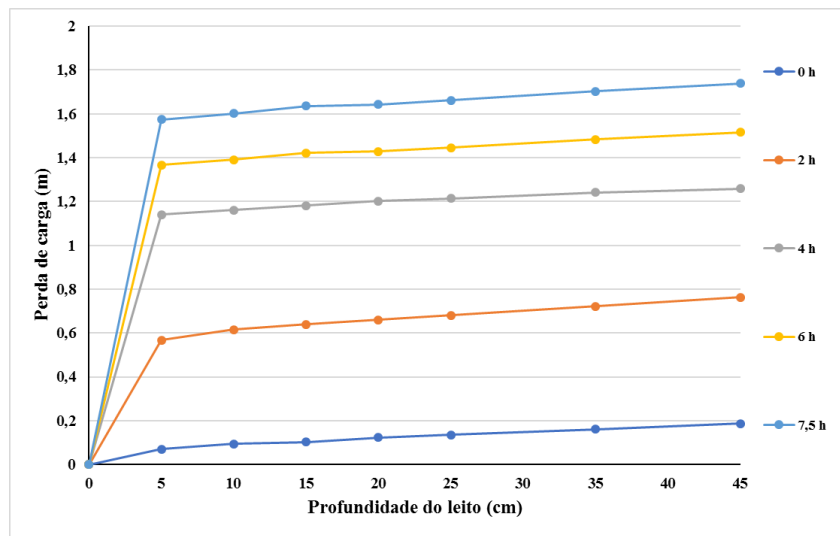


(a)

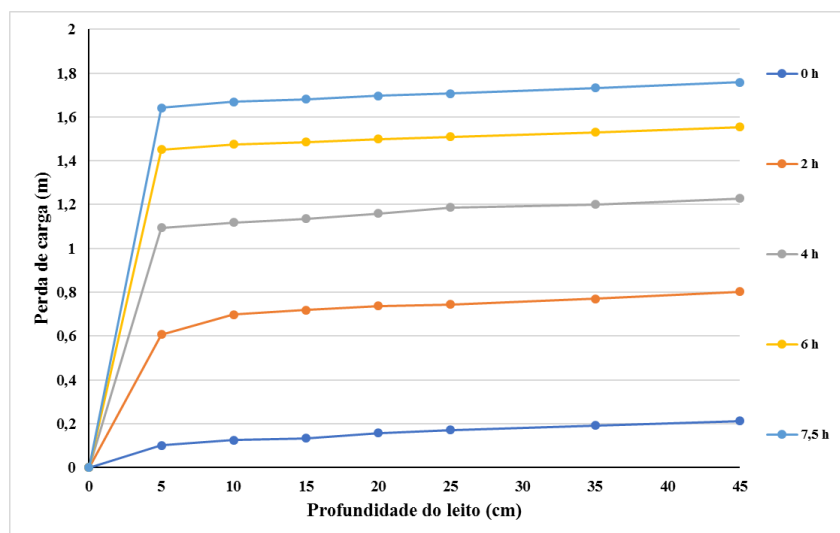


(b)

Figura A38 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem
(b) areia convencional – Carreira 6

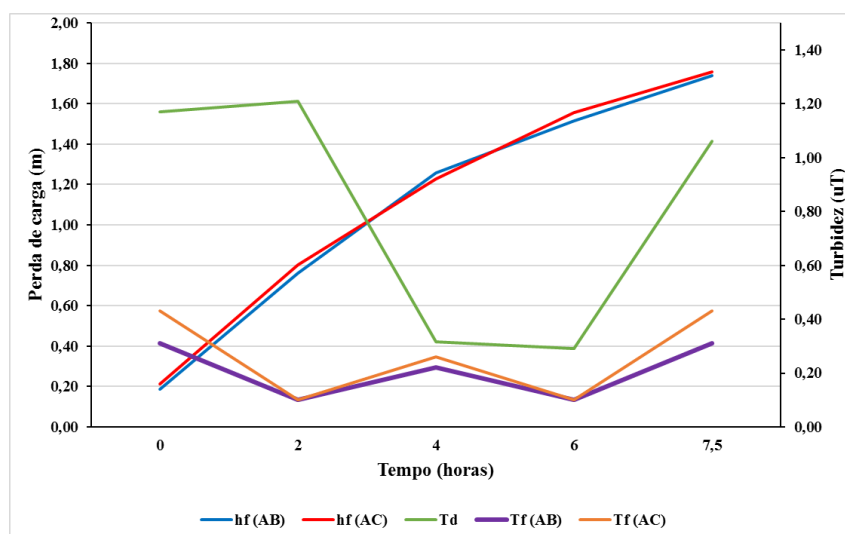


(a)



(b)

Figura A39 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 6



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A40 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 6. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

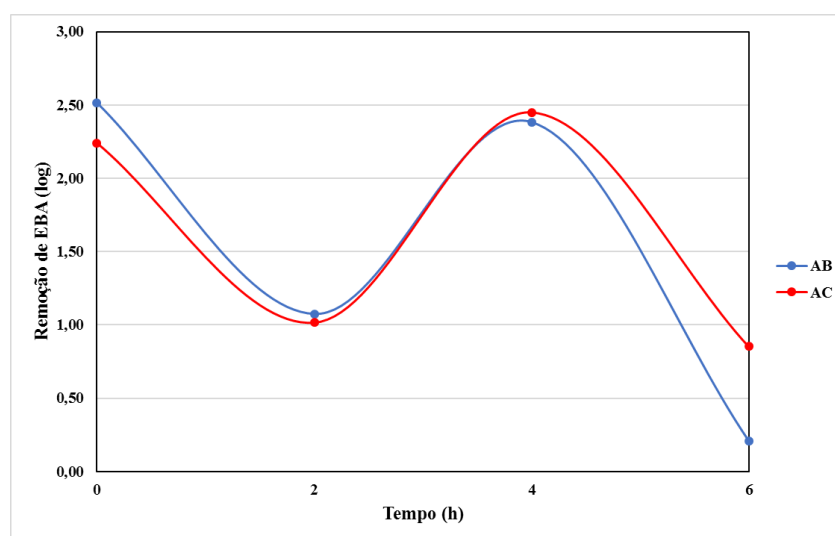


Figura A41 – Remoção de Coliformes totais (em log) ao longo da carreira de filtração 6. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

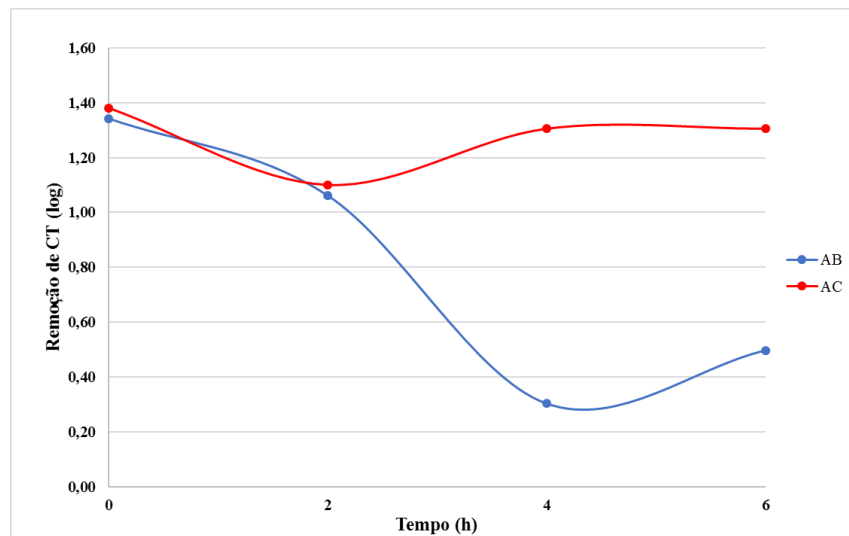


Figura A42 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 8,0) – carreira 6

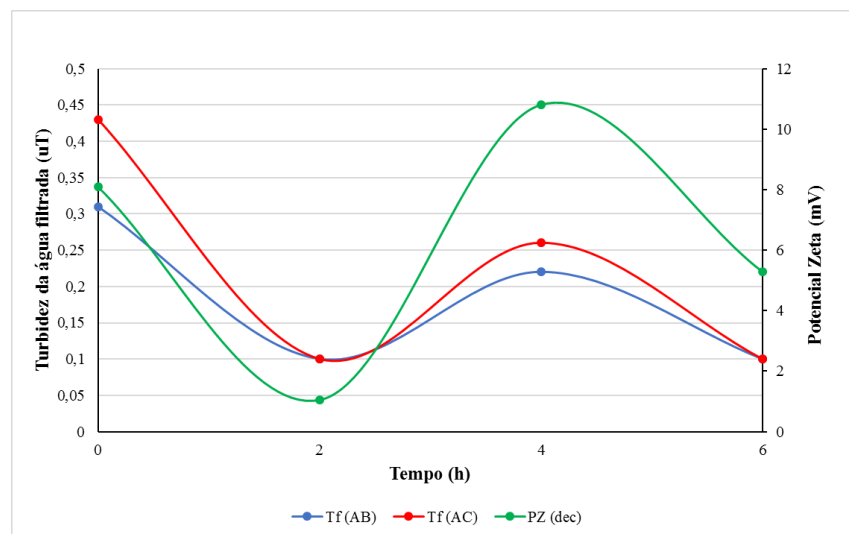
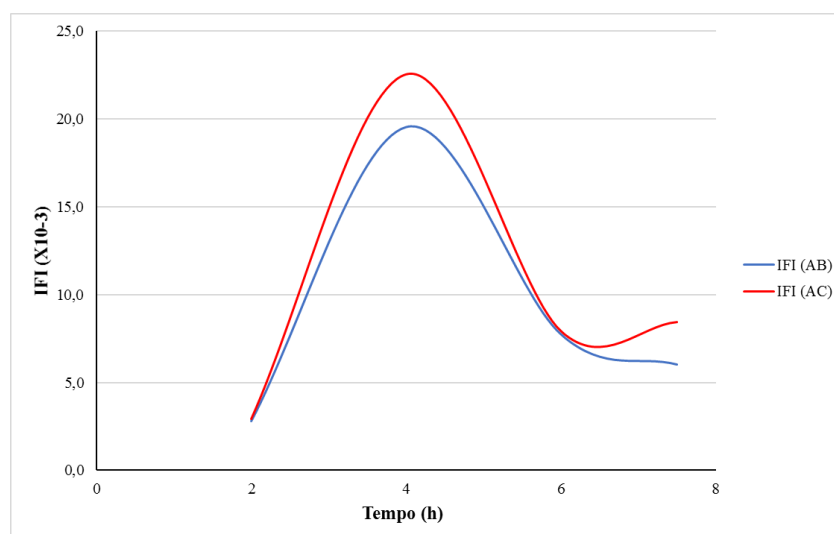
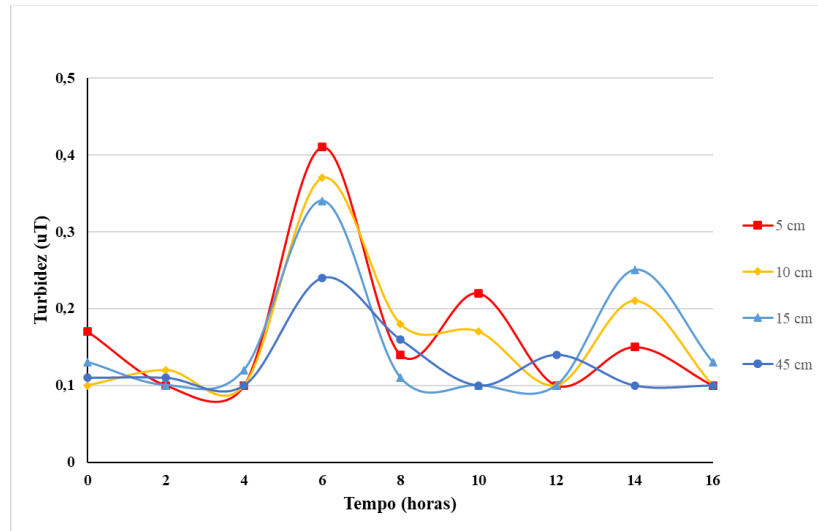


Figura A43 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 6

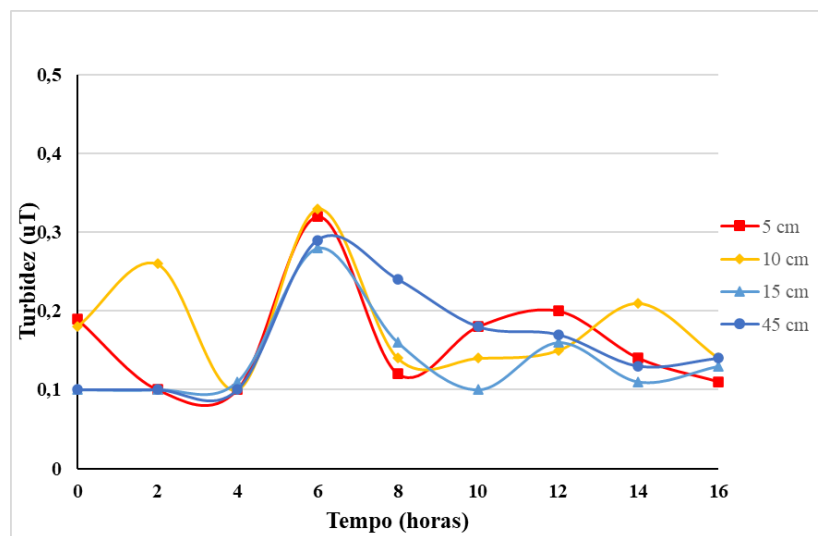


Carreira 10

Figura A44 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 10

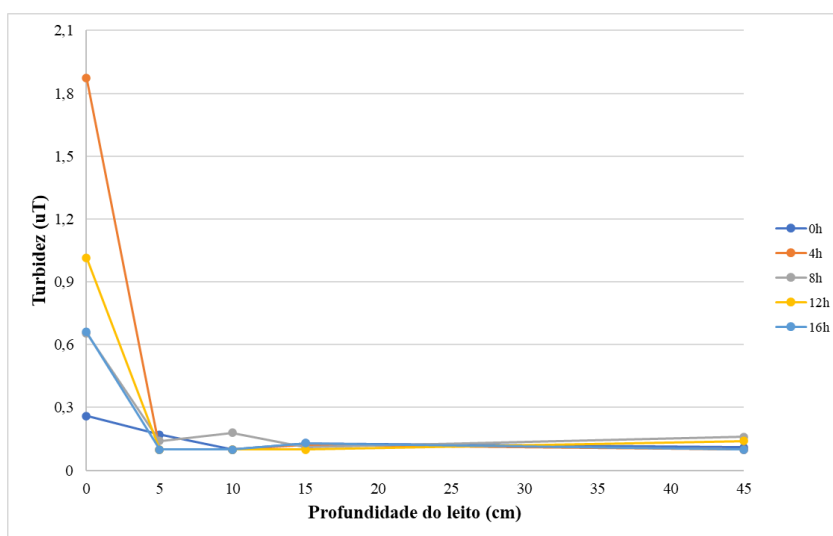


(a)

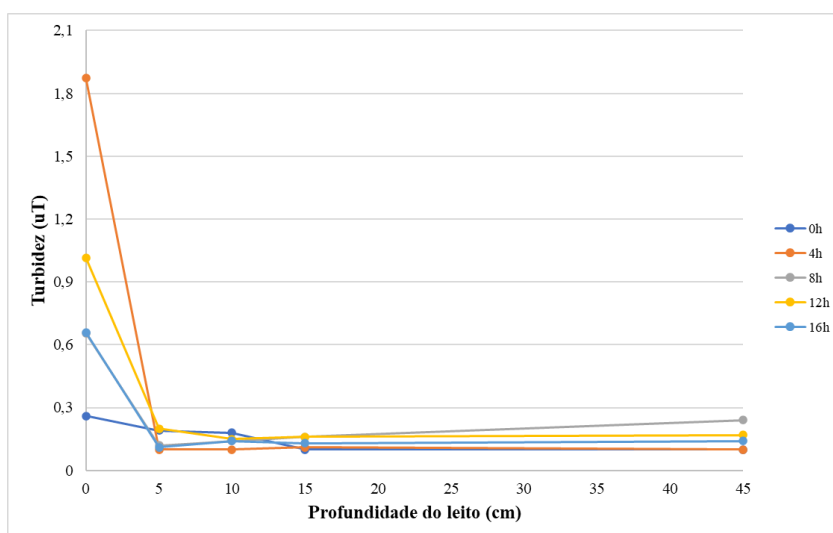


(b)

Figura A45 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 10

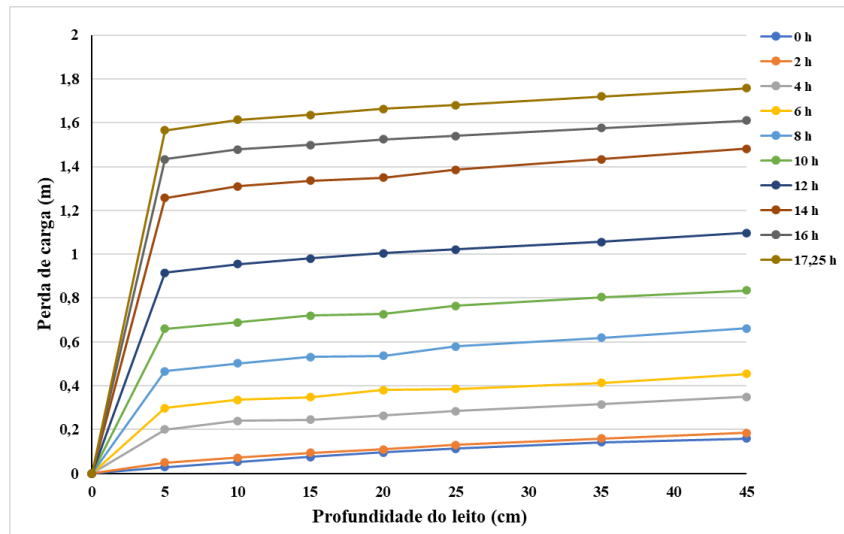


(a)

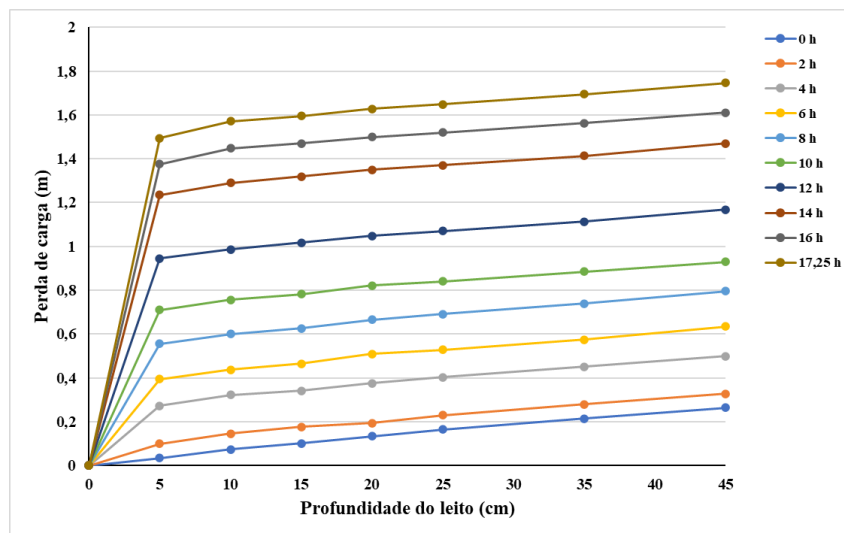


(b)

Figura A46 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 10

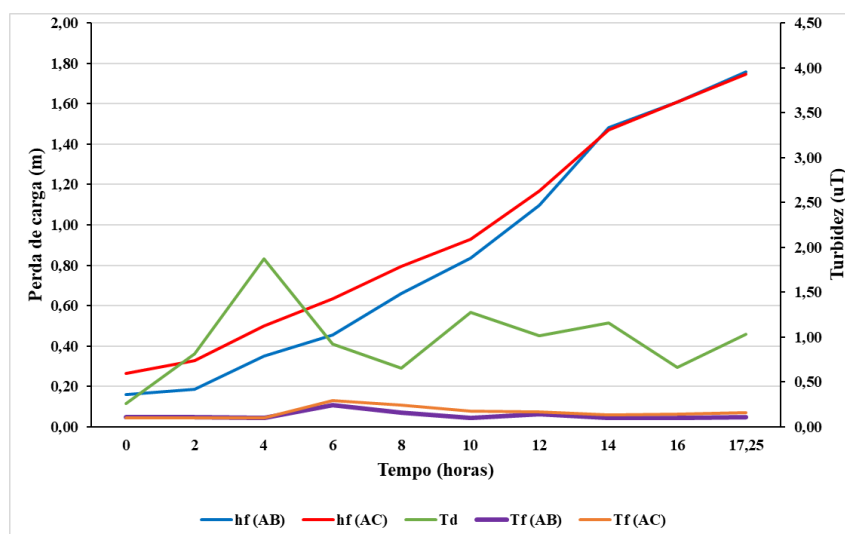


(a)



(b)

Figura A47 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 10



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A48 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 10. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

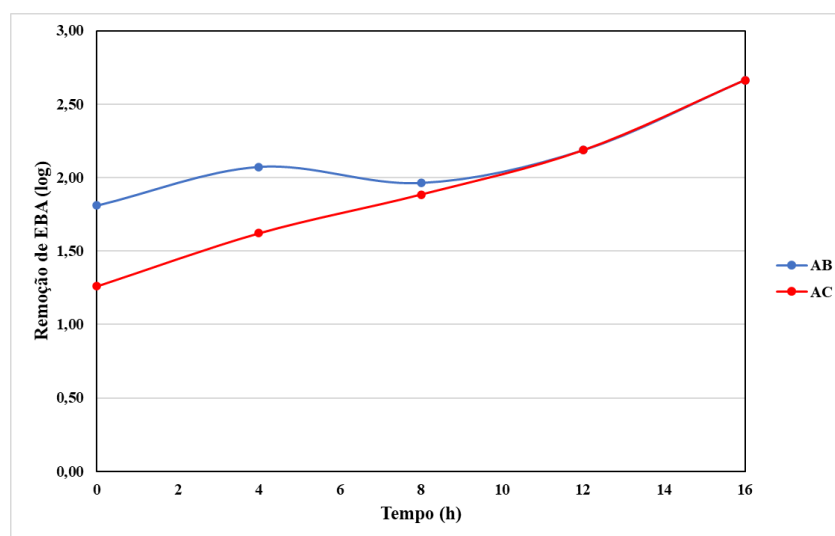


Figura A49 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 7,2) – carreira 10

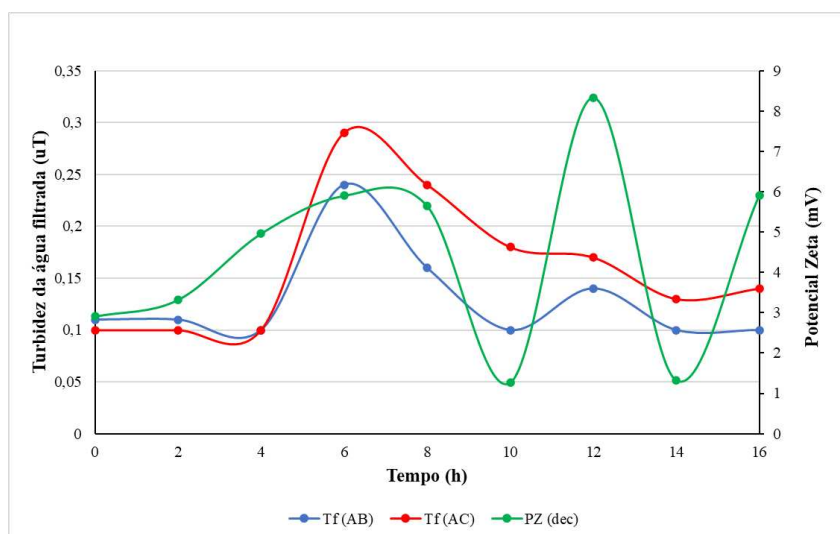
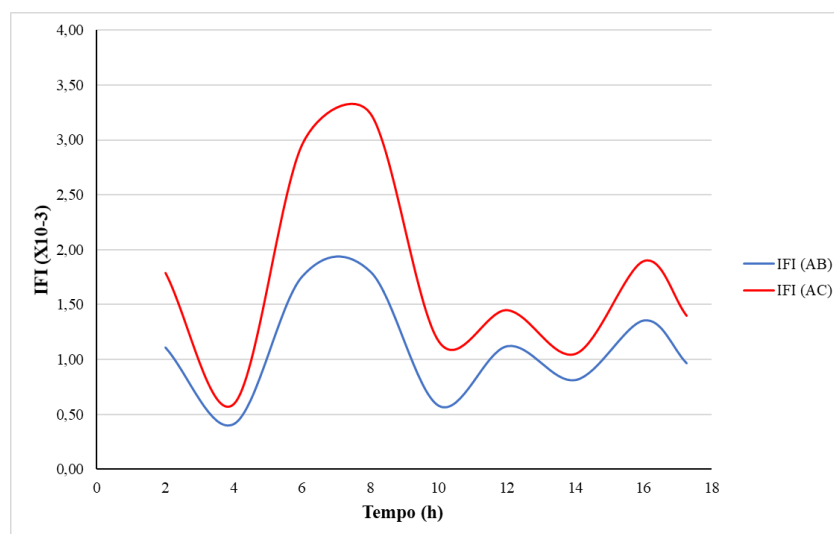
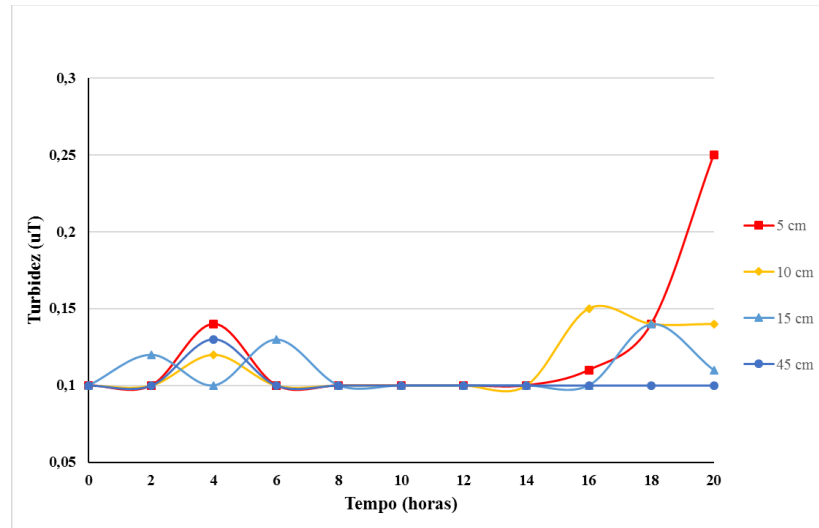


Figura A50 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 10

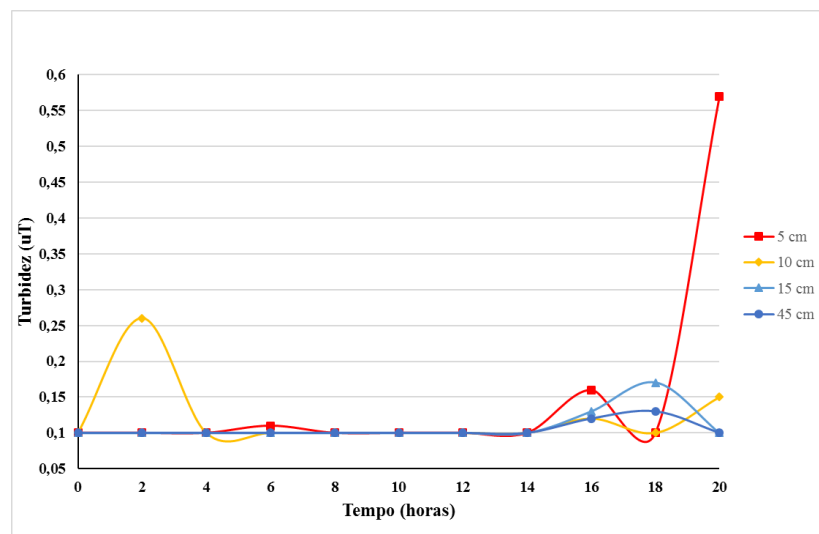


Carreira 11

Figura A51 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 11

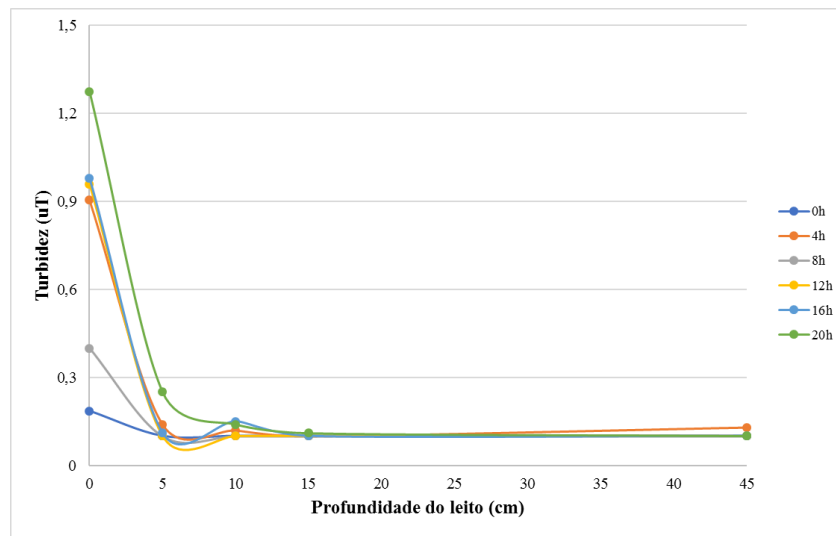


(a)

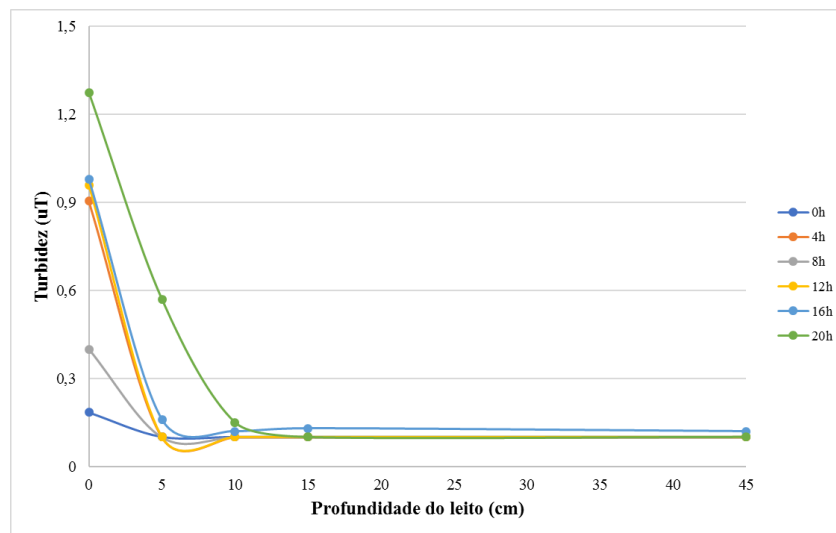


(b)

Figura A52 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 11

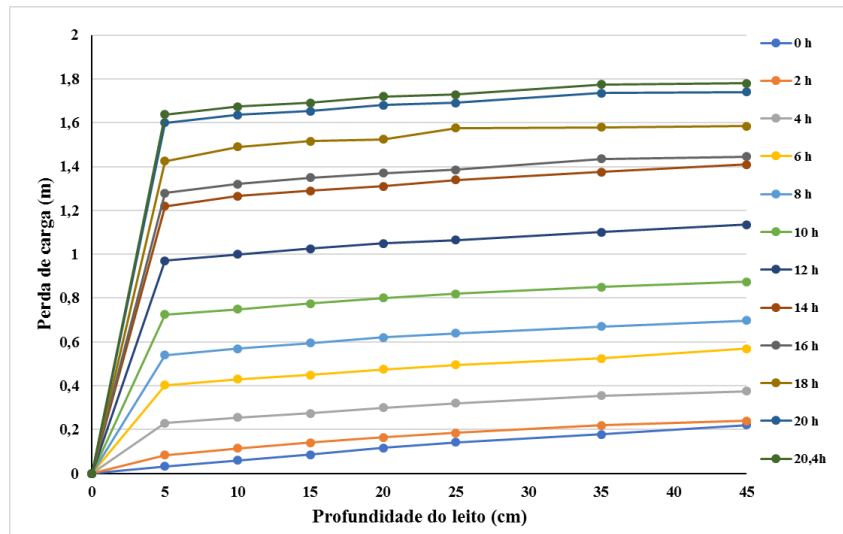


(a)

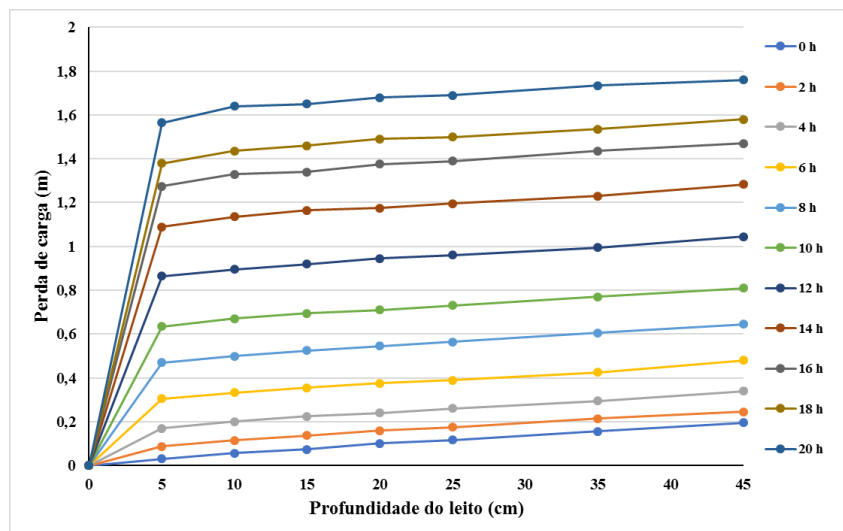


(b)

Figura A53 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 11



(a)



(b)

Figura A54 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 11. Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água

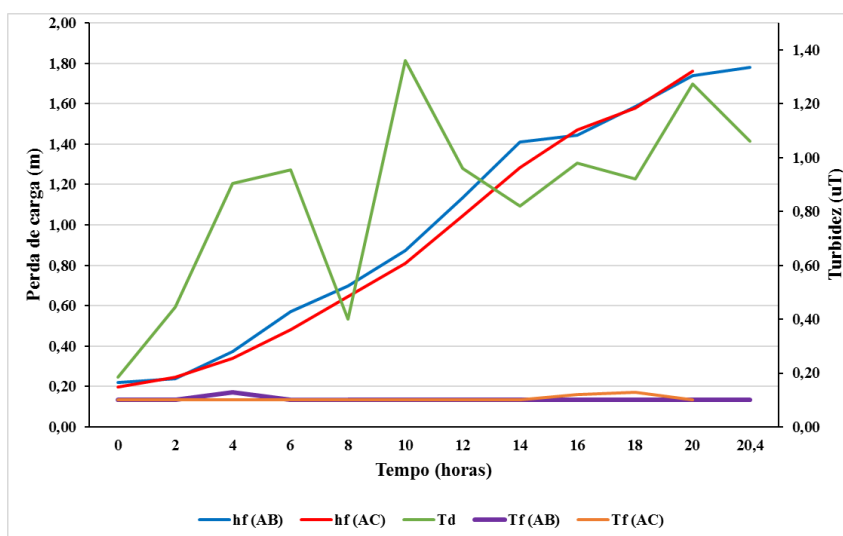


Figura A55 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 11. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

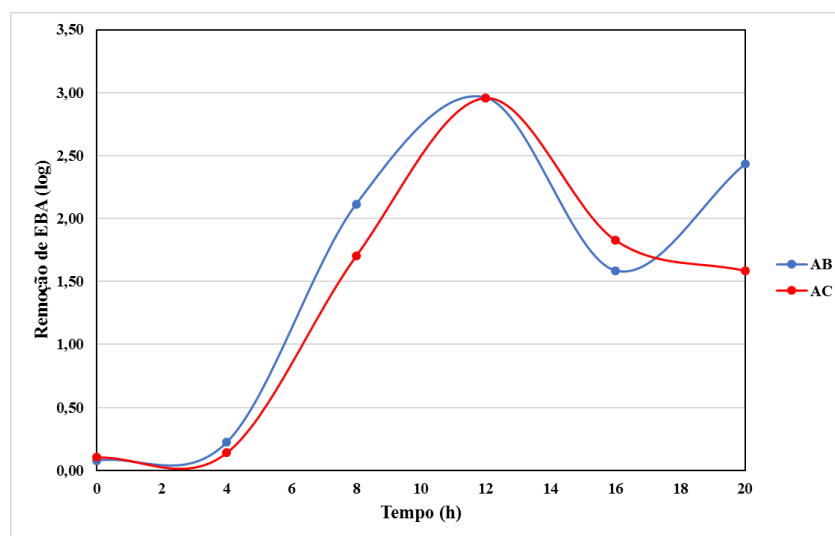


Figura A56 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 7,0) – carreira 11

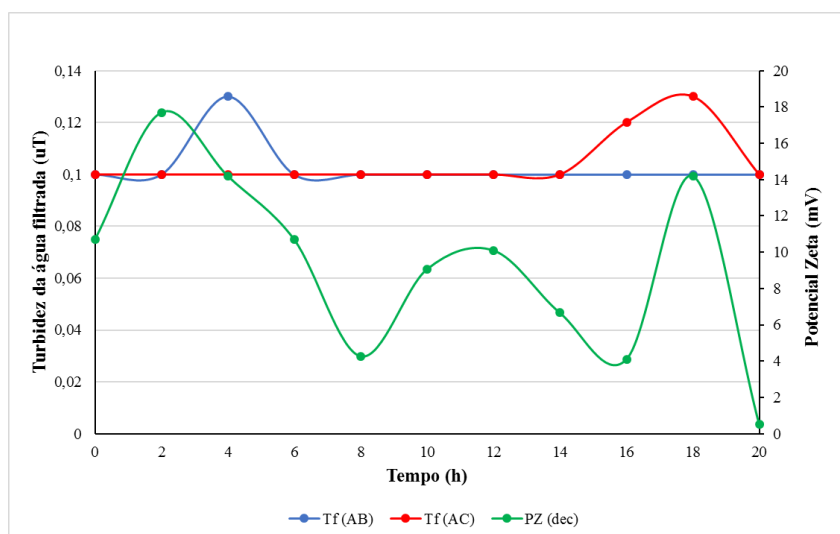
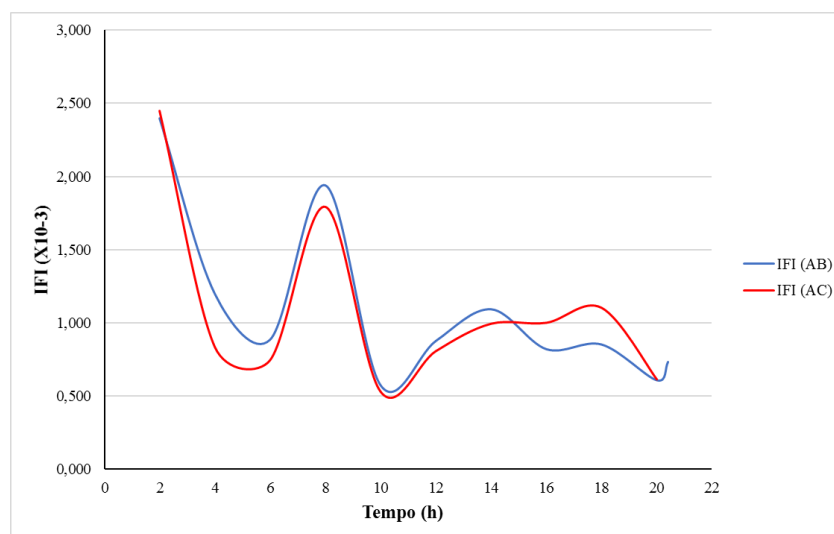


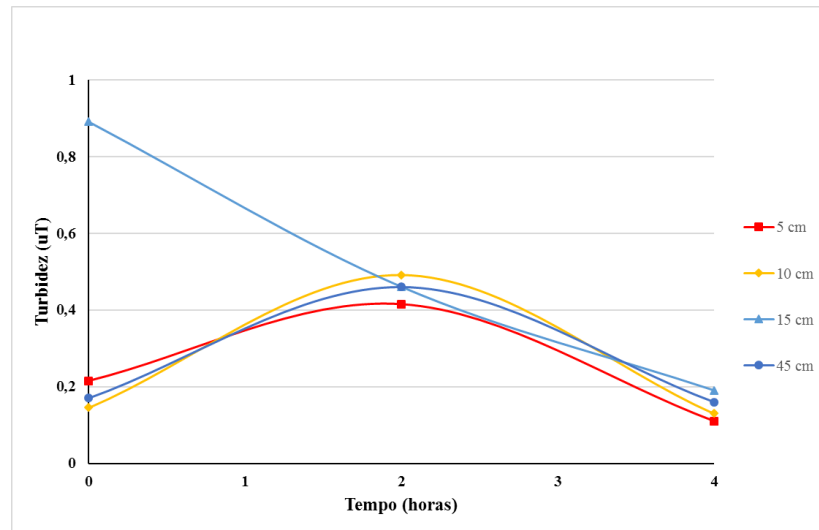
Figura A57 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 11



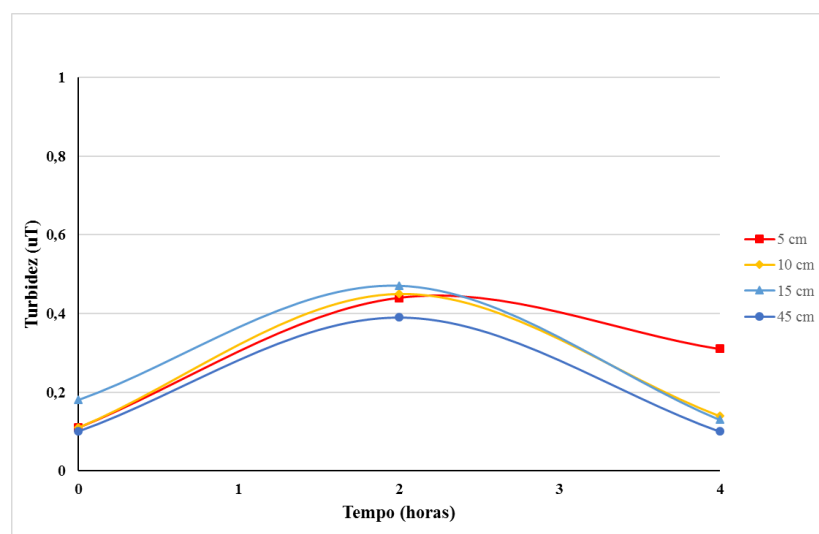
Taxa de Filtração: $360 \text{ m}^3\text{m}^{-1}\text{d}^{-1}$

Carreira 7

Figura A58 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 7

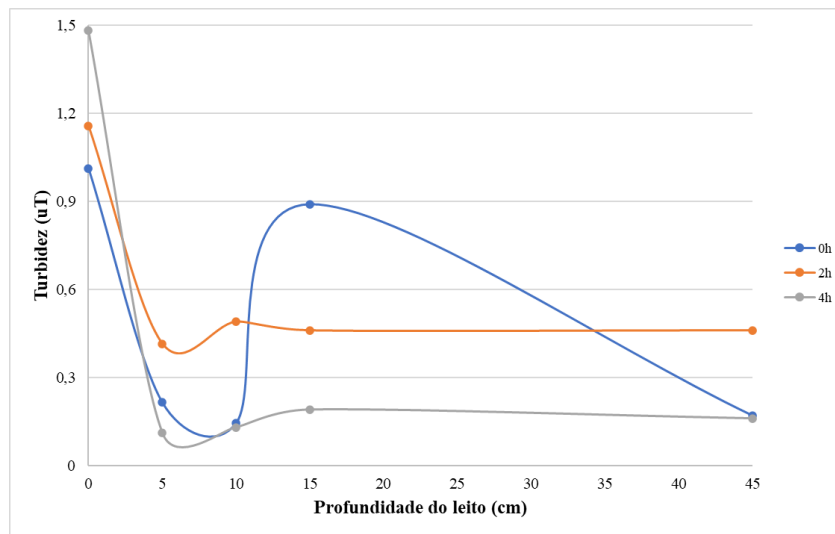


(a)

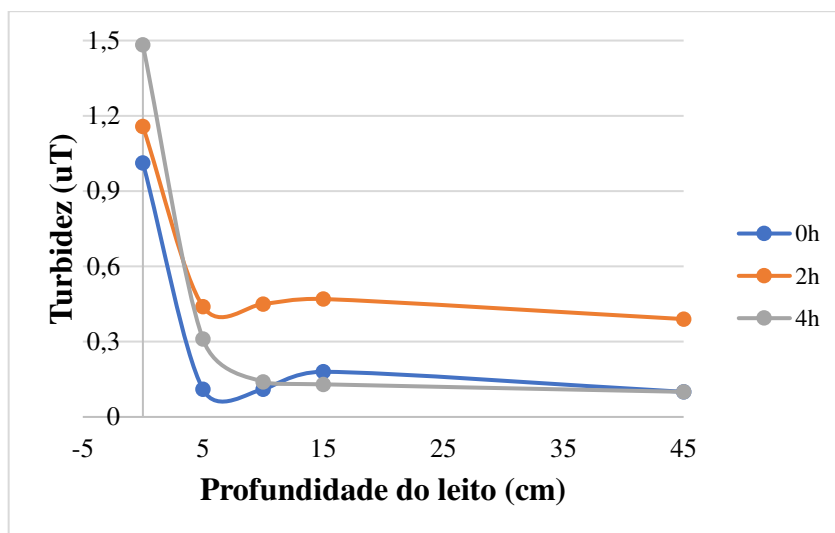


(b)

Figura A59 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 7

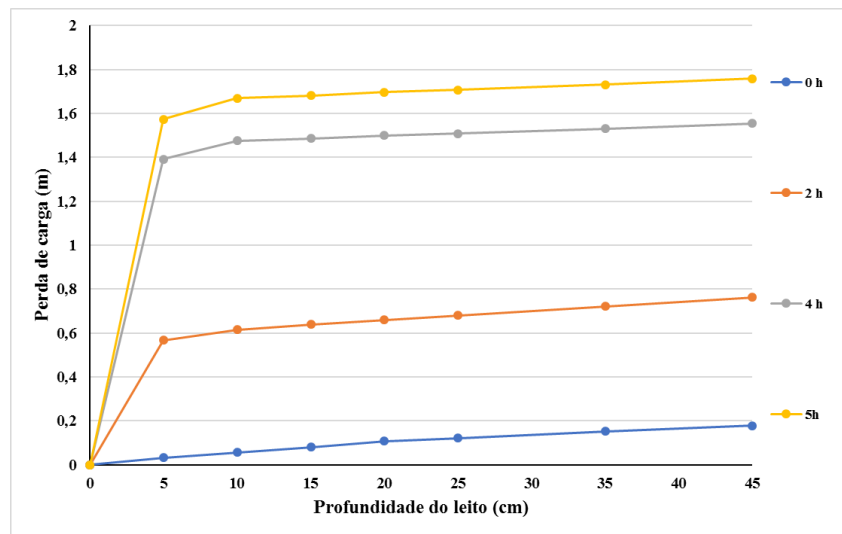


(a)

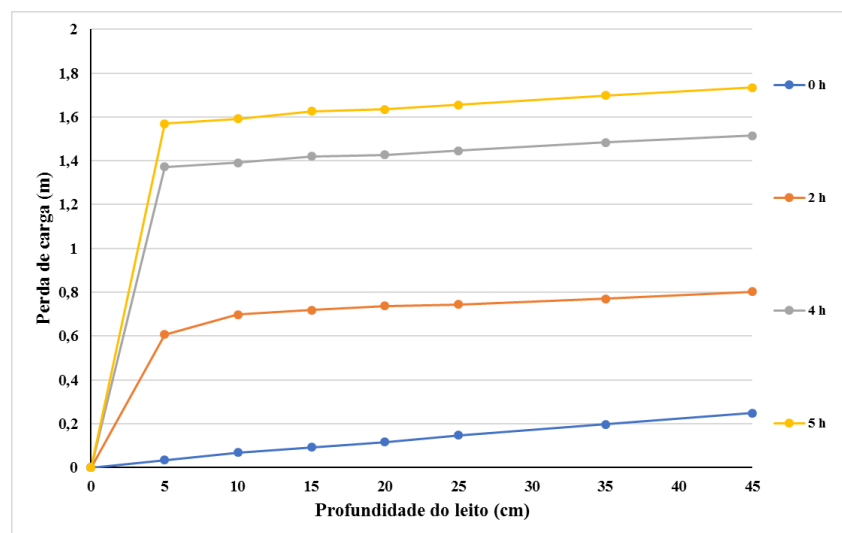


(b)

Figura A60 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem
(b) areia convencional – Carreira 7

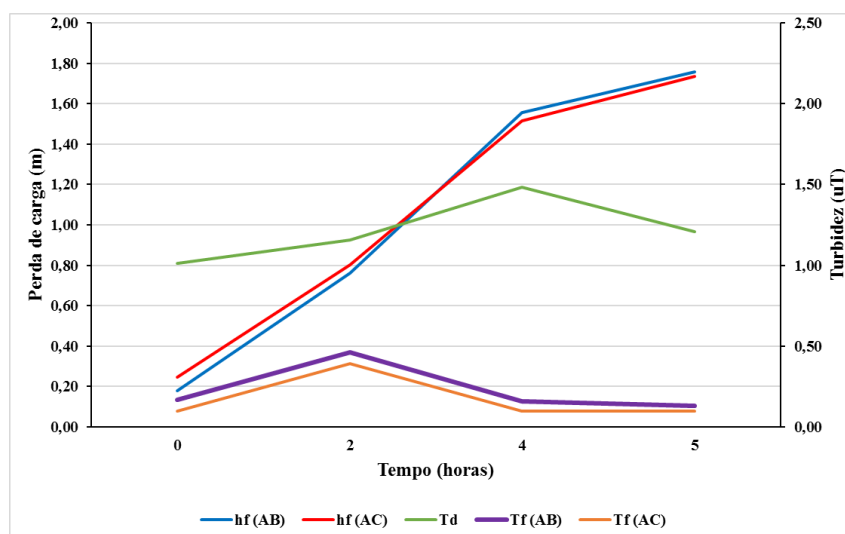


(a)



(b)

Figura A61 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 7



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional)

Figura A62 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 7. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

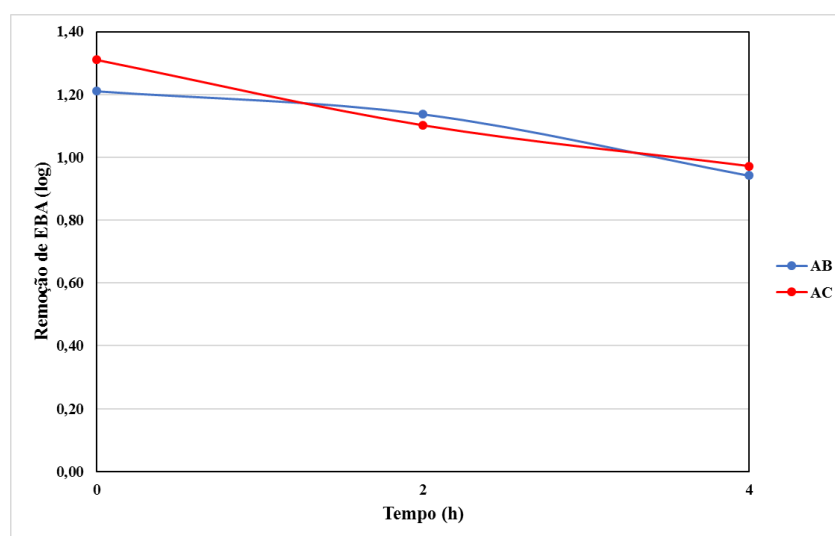


Figura A63 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 5,5) – carreira 7

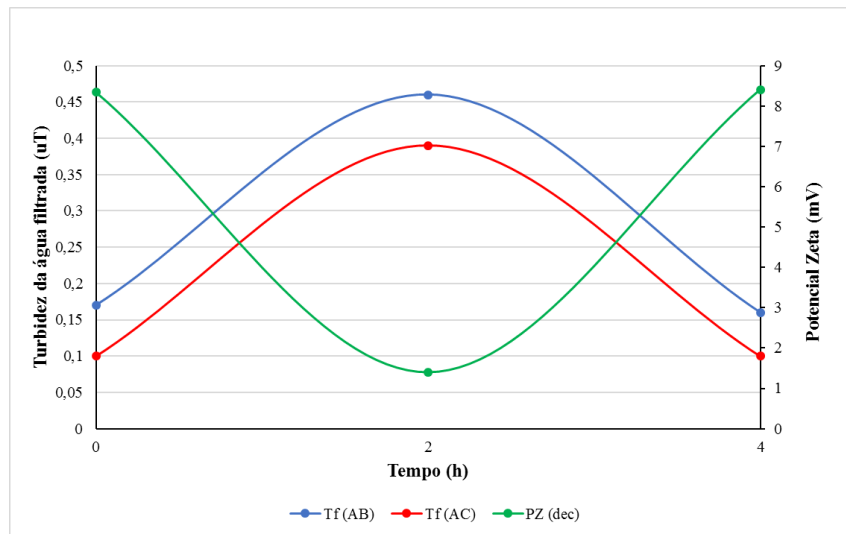
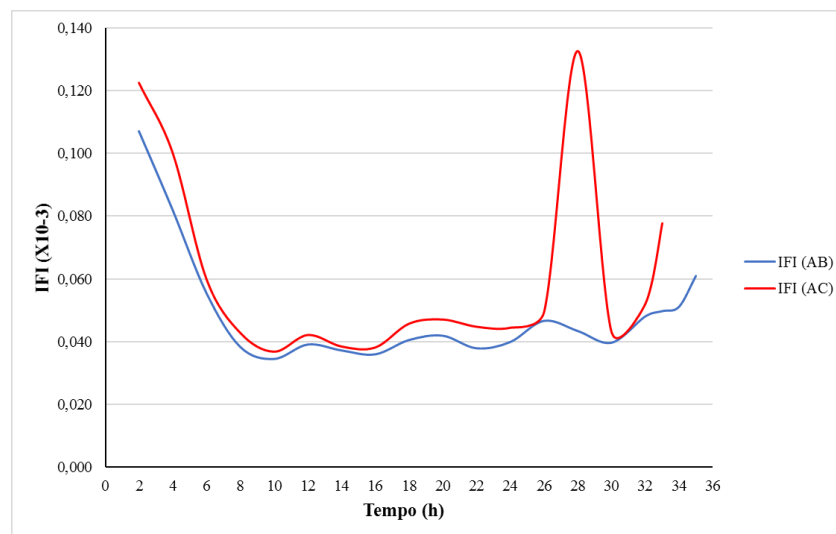
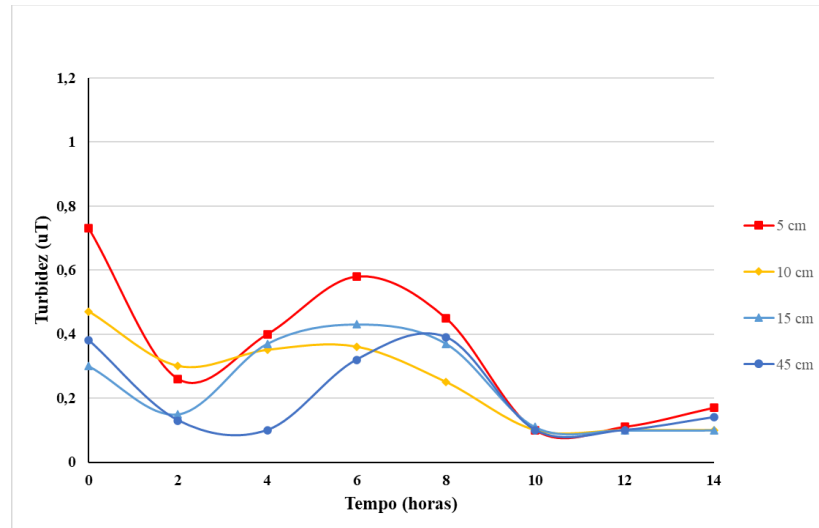


Figura A64 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 7

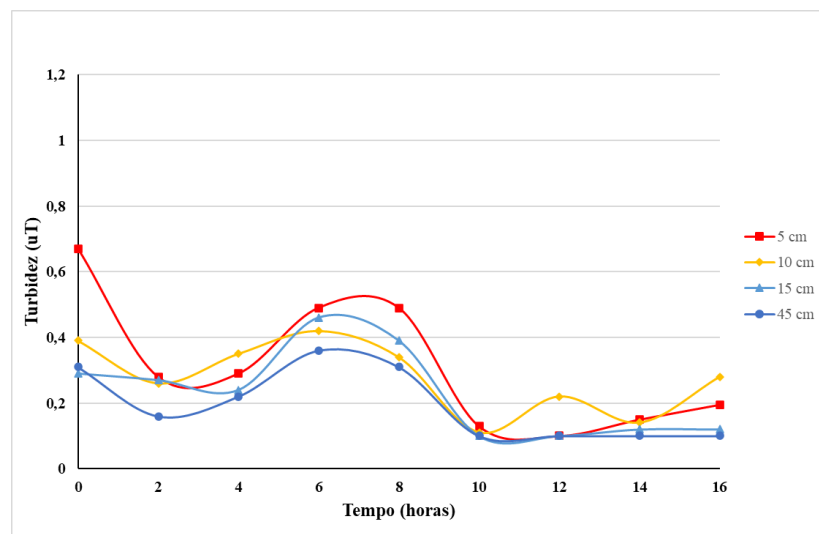


Carreira 8

Figura A65 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 8

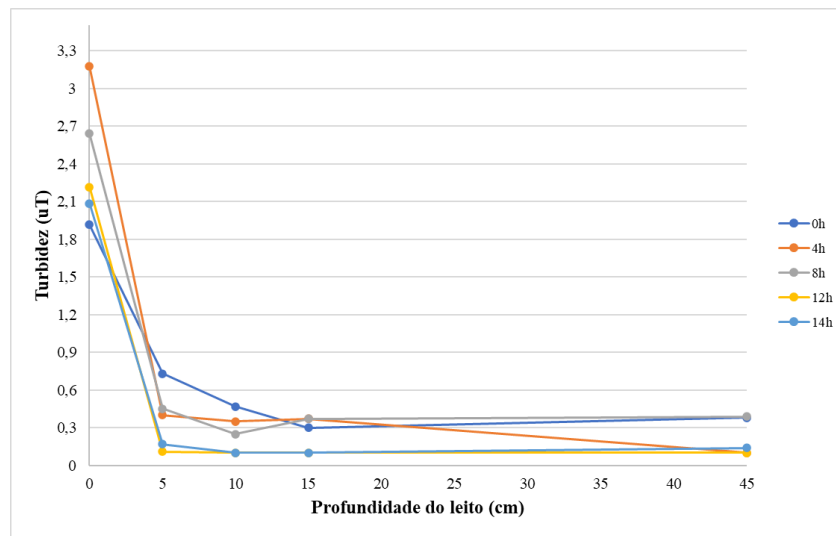


(a)

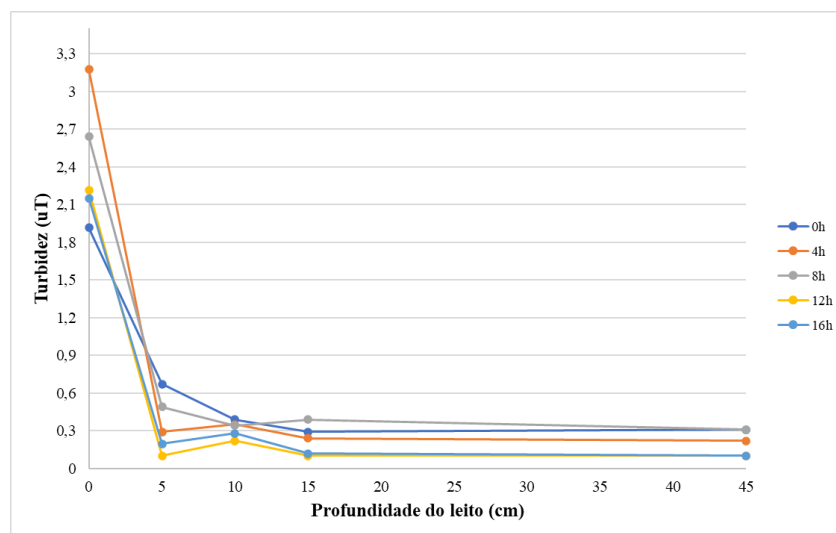


(b)

Figura A66 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 8

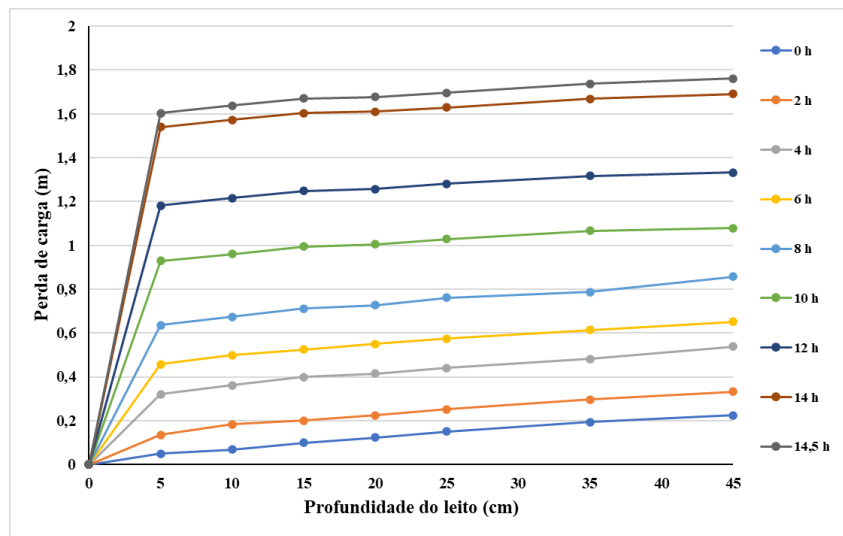


(a)

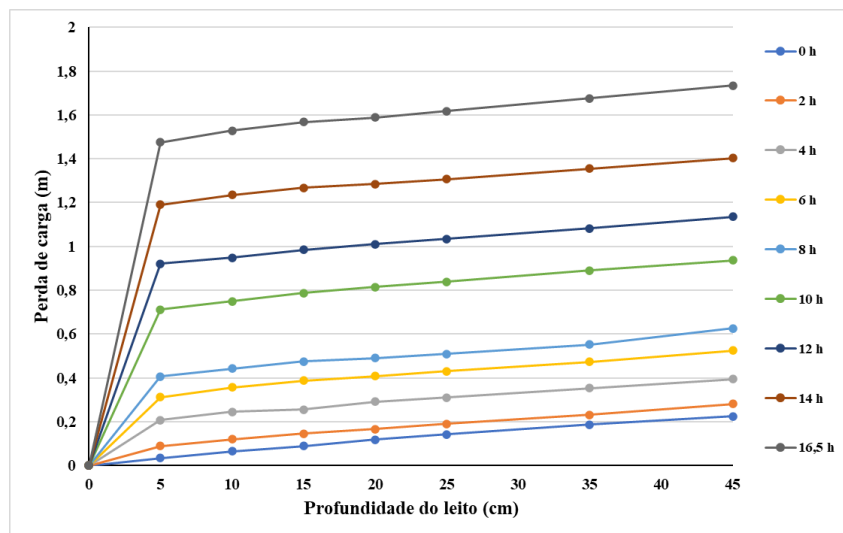


(b)

Figura A67 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 8

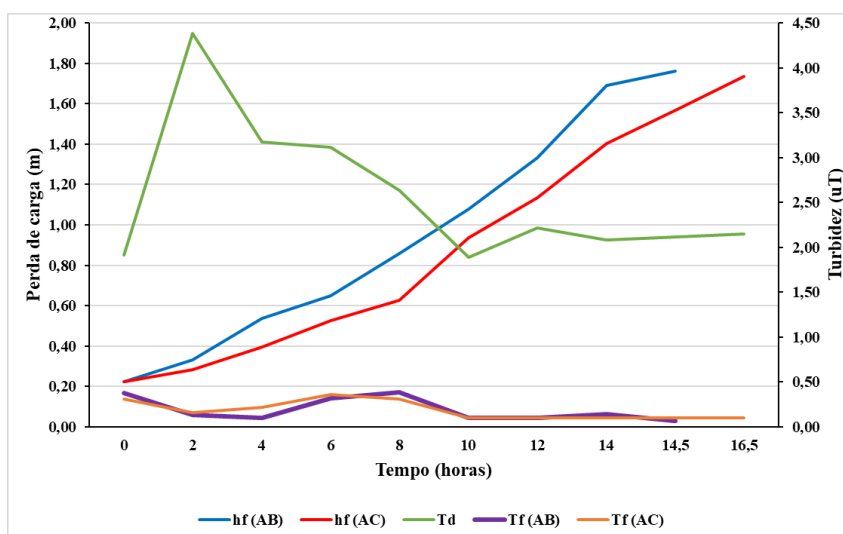


(a)



(b)

Figura A68 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 8



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A69 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 8. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

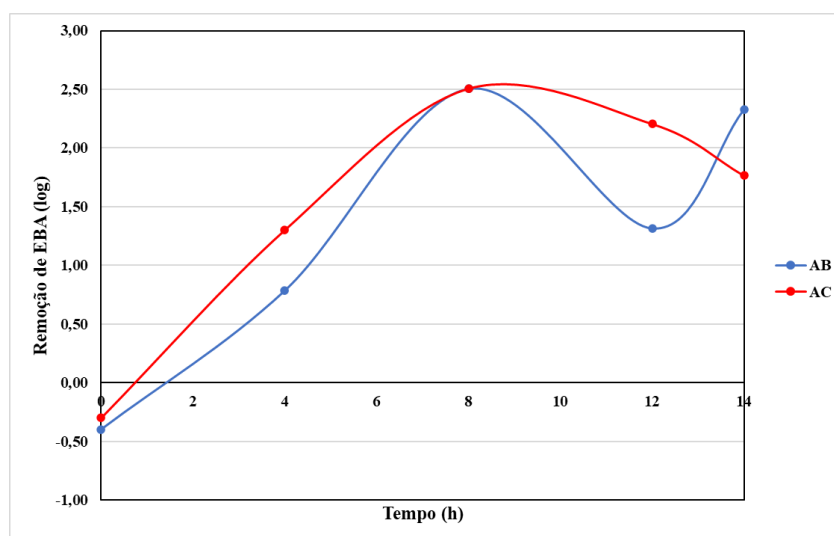


Figura A70 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 7,8) – carreira 8

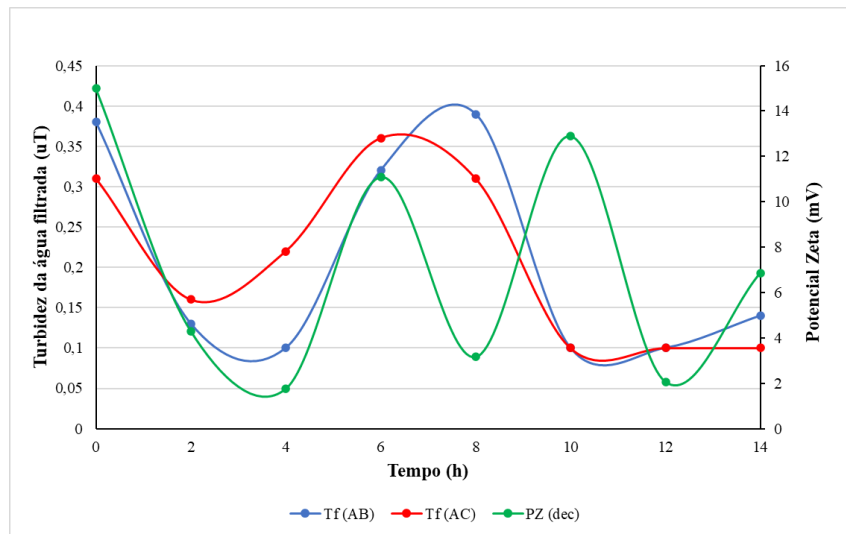
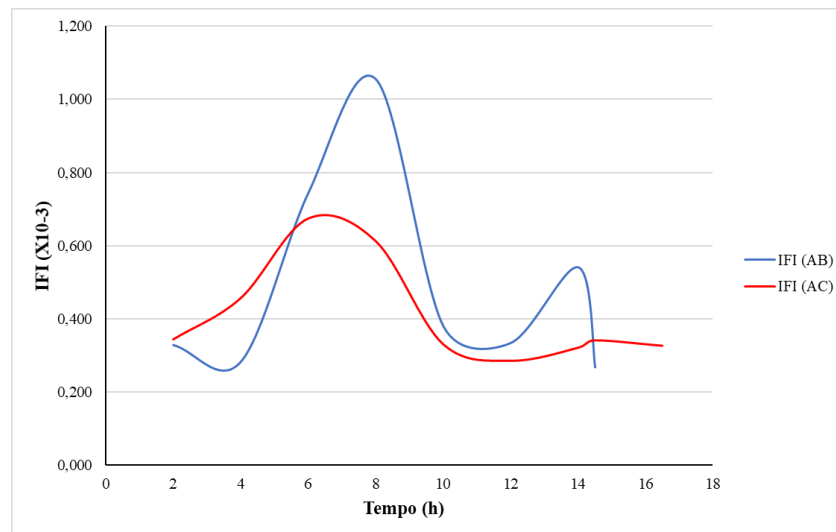
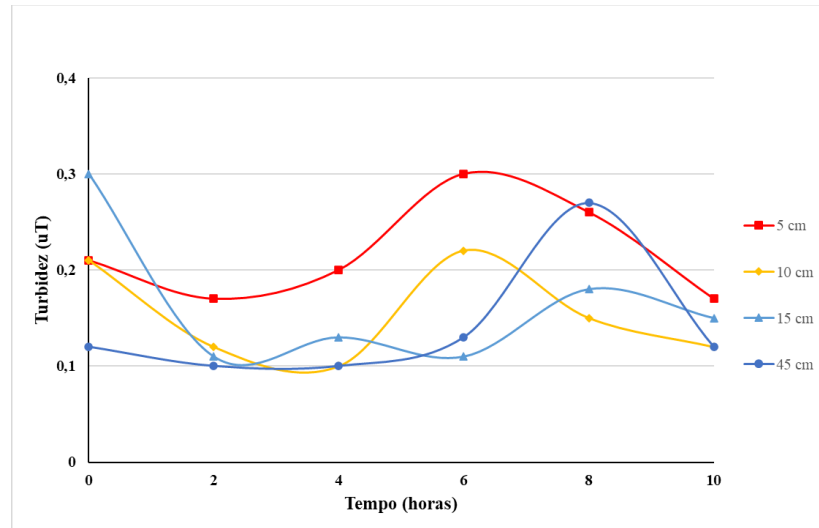


Figura A71 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 8

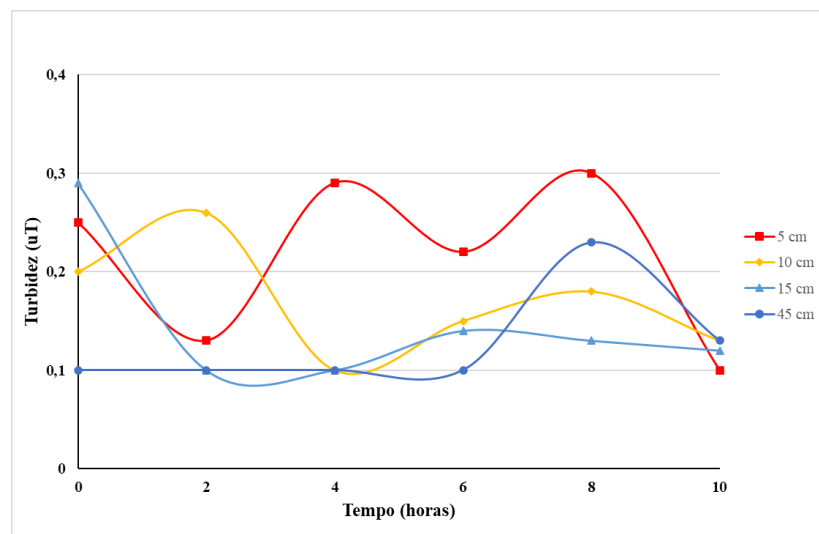


Carreira 9

Figura A72 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 9

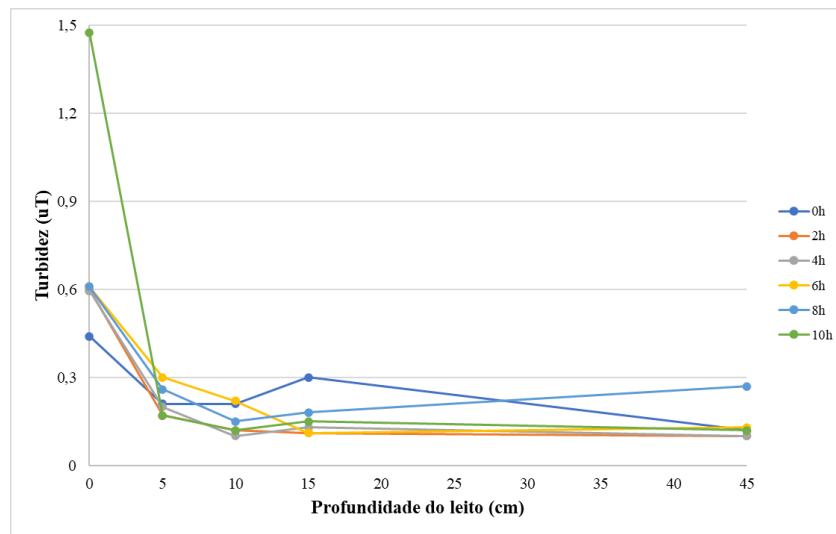


(a)

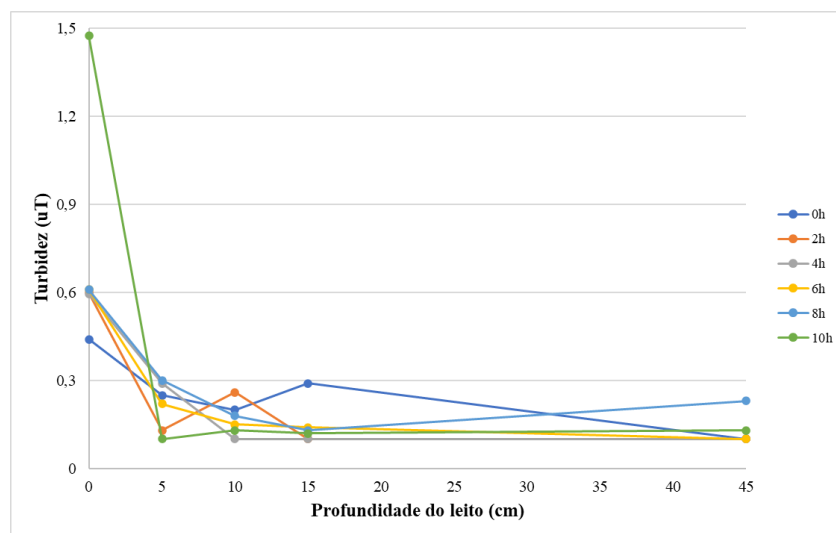


(b)

Figura A73 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 9

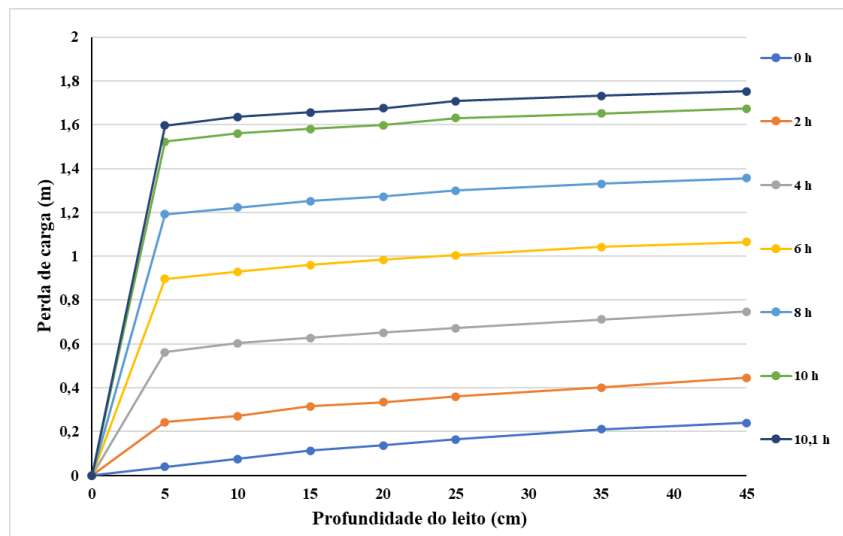


(a)

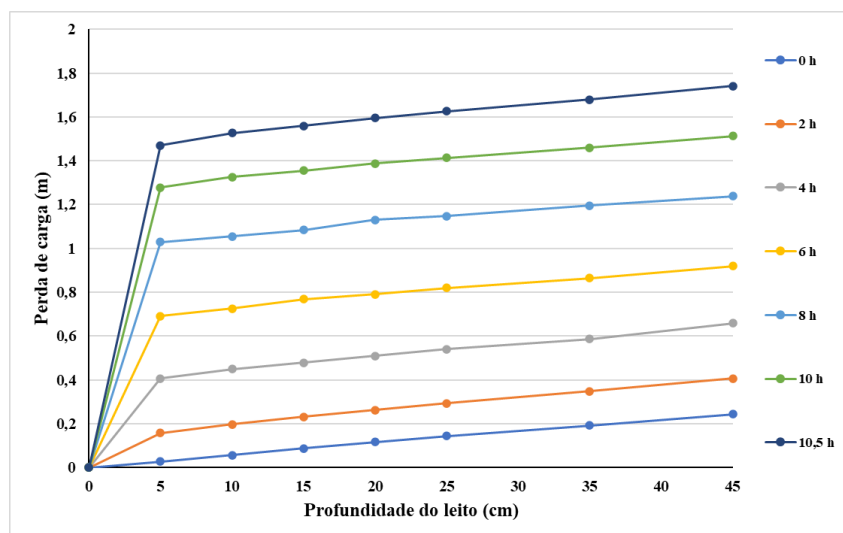


(b)

Figura A74 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 9

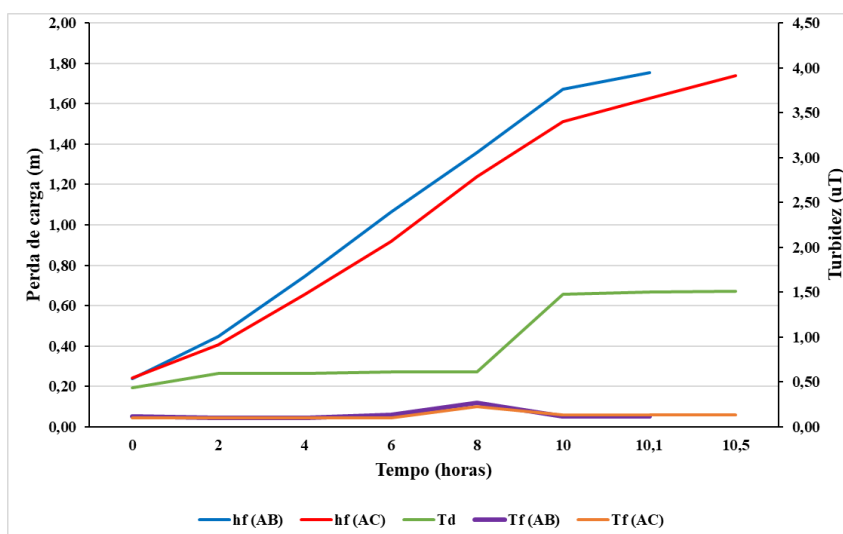


(a)



(b)

Figura A75 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 9



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A76 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 9. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

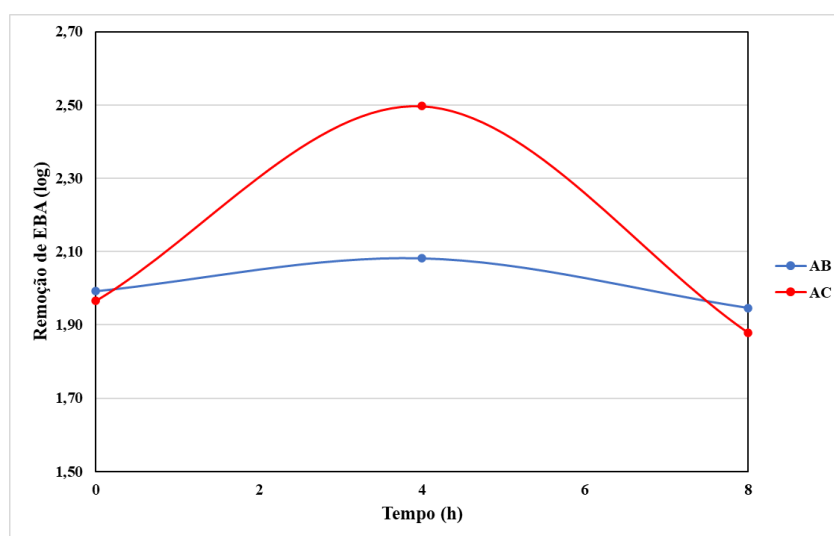


Figura A77 – Remoção de coliformes totais (em log) ao longo da carreira de filtração 9. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

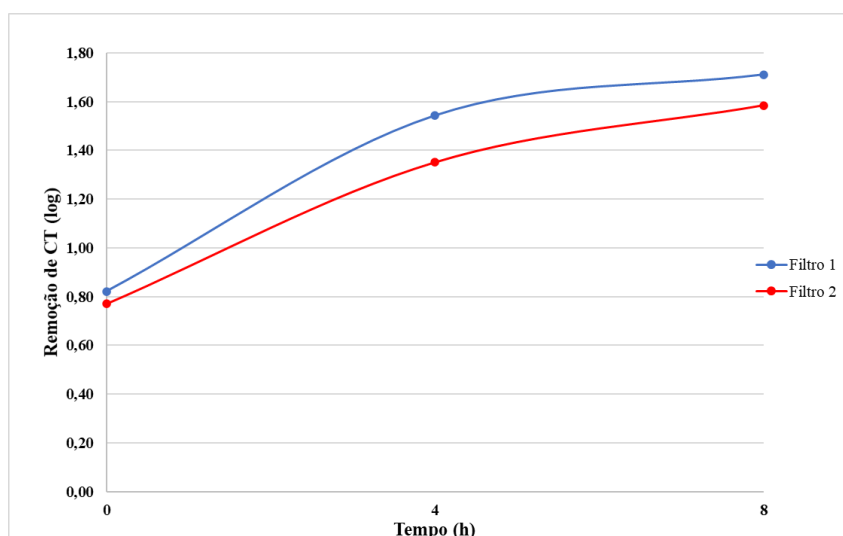


Figura A78 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 7,1) – carreira 9

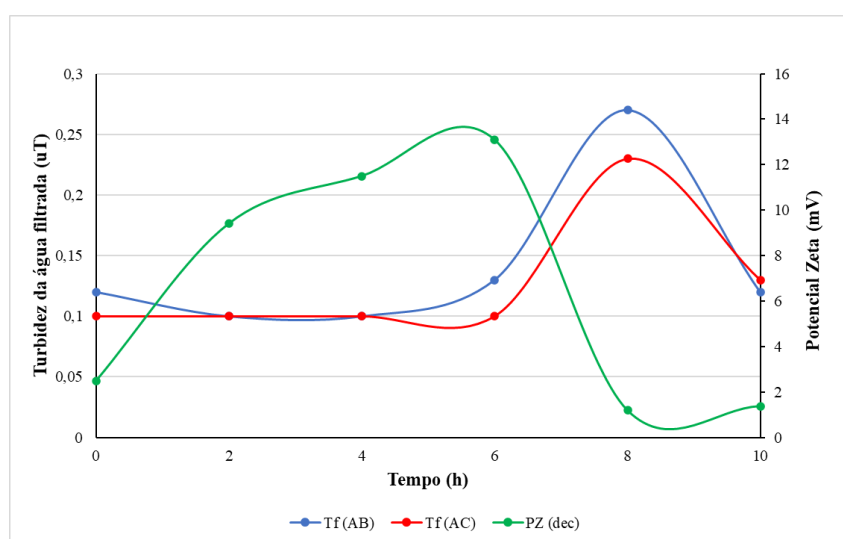
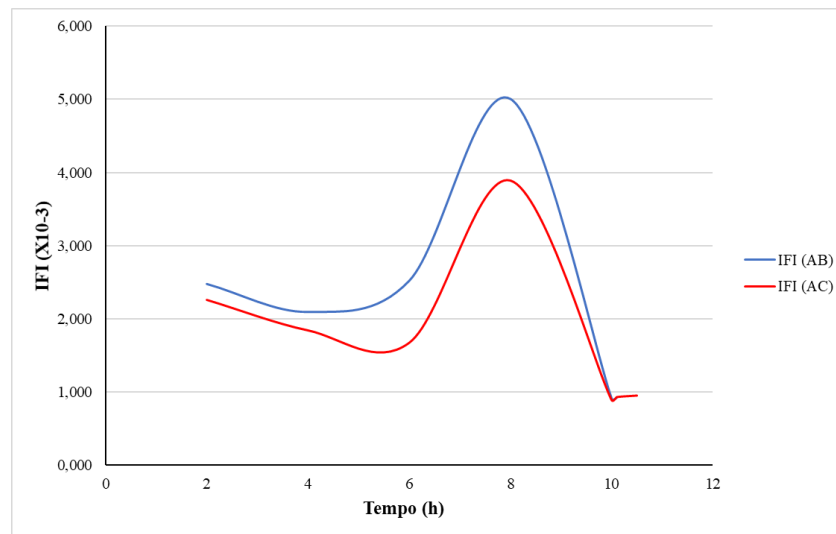
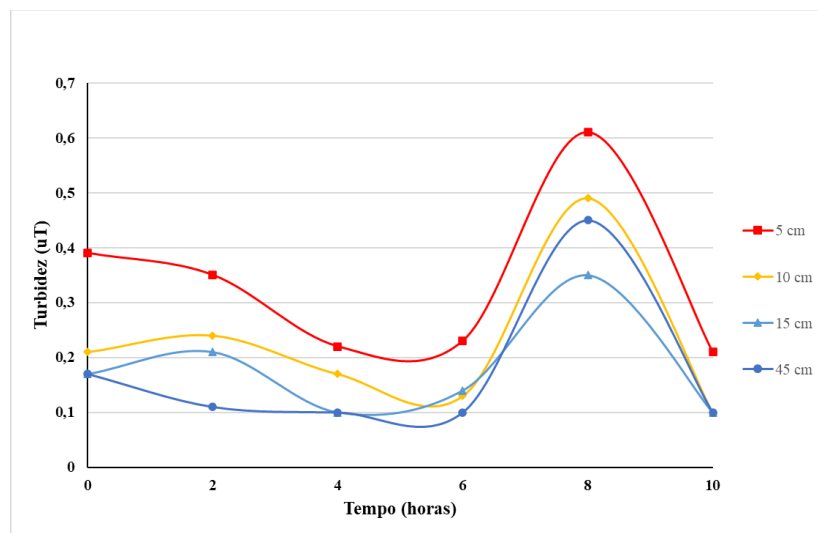


Figura A79 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 9

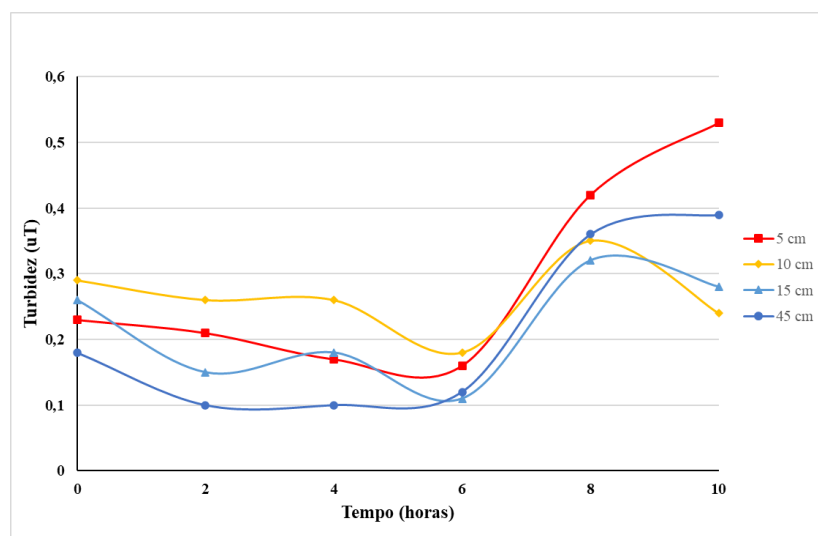


Carreira 12

Figura A80 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 12

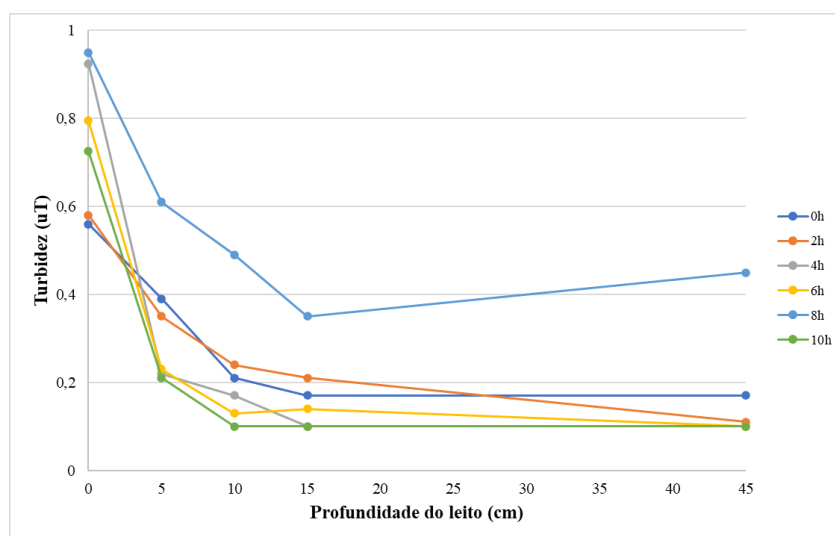


(a)

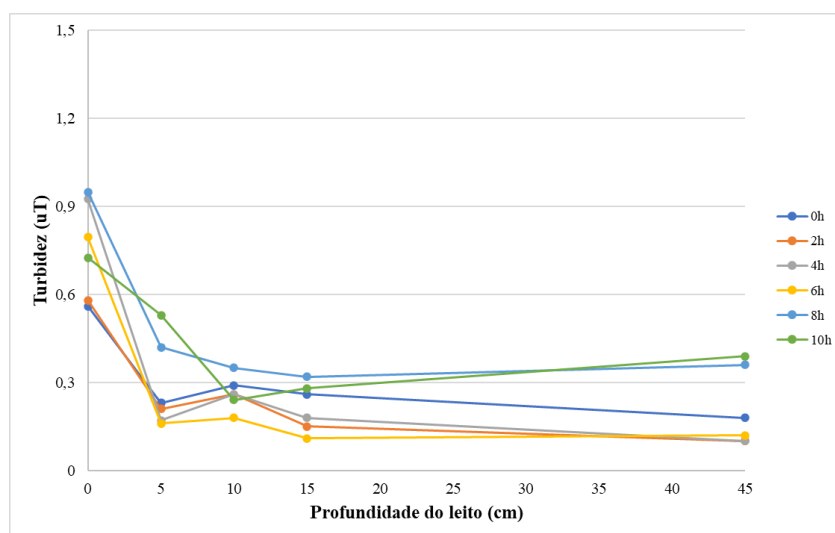


(b)

Figura A81 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 12

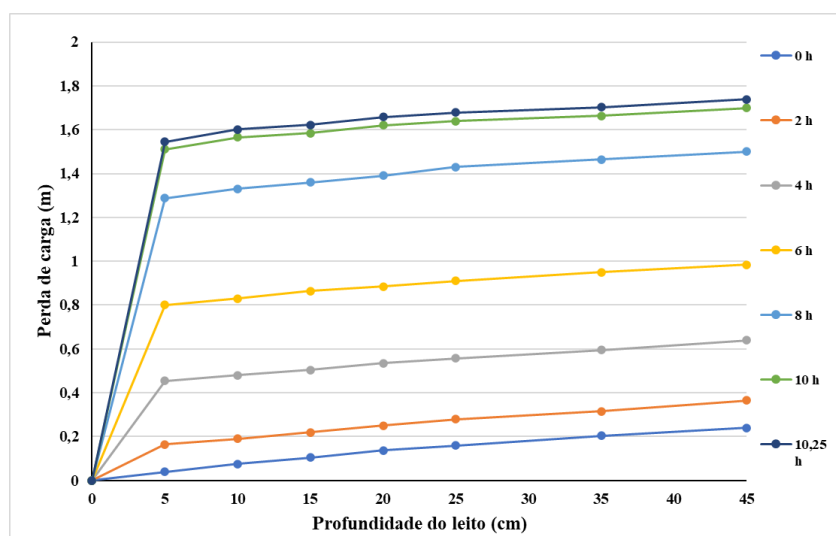


(a)

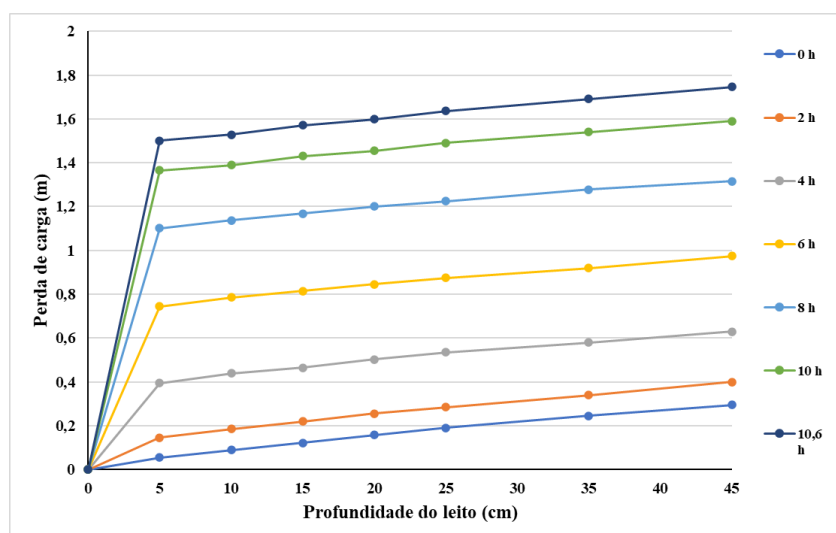


(b)

Figura A82 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 12

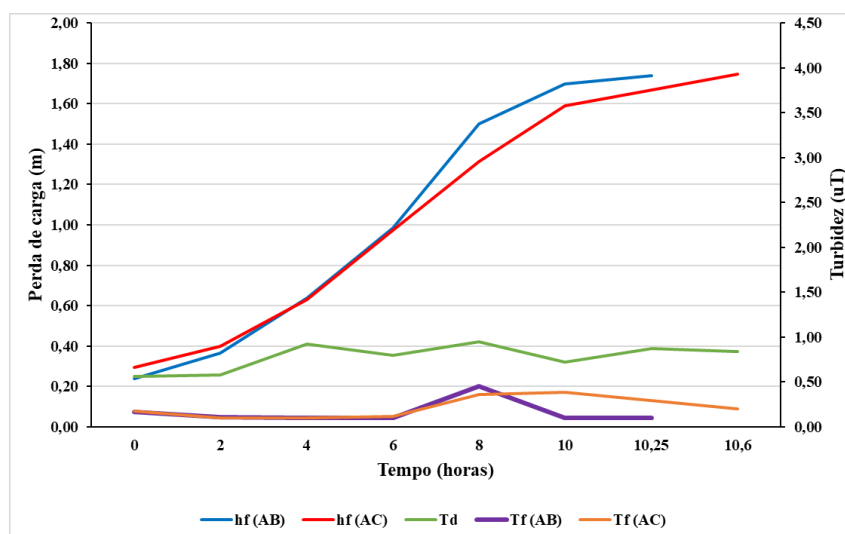


(a)



(b)

Figura A83 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 12



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A84 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 12. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

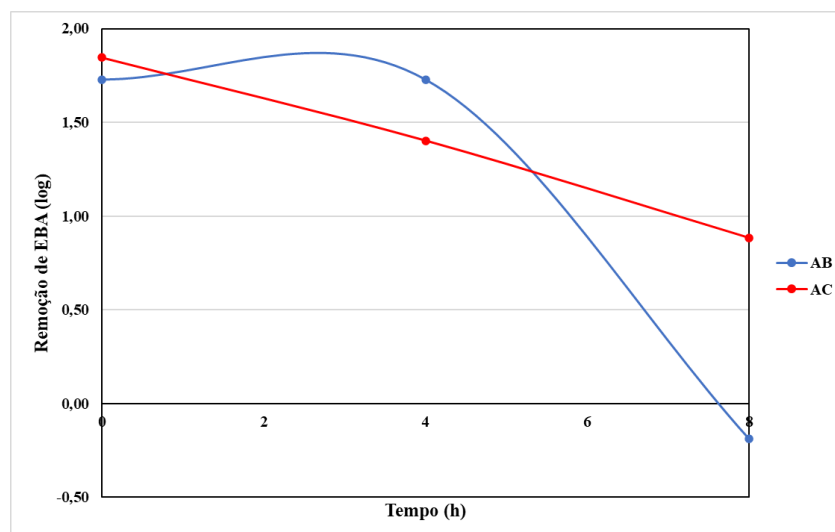


Figura A85 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 7,3) – carreira 12

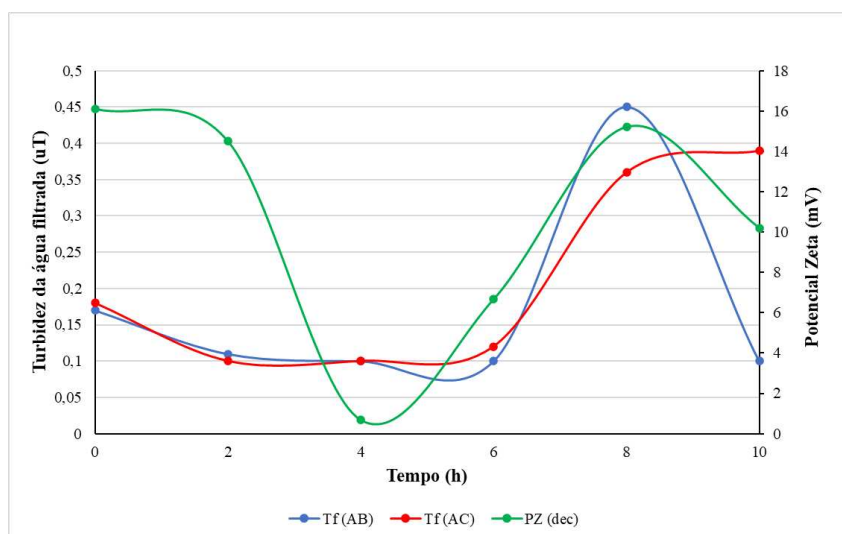
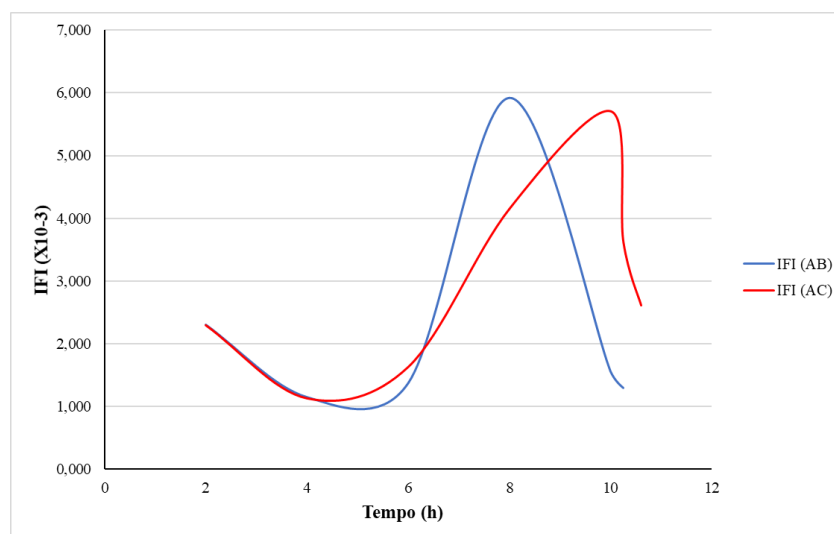


Figura A86 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 12

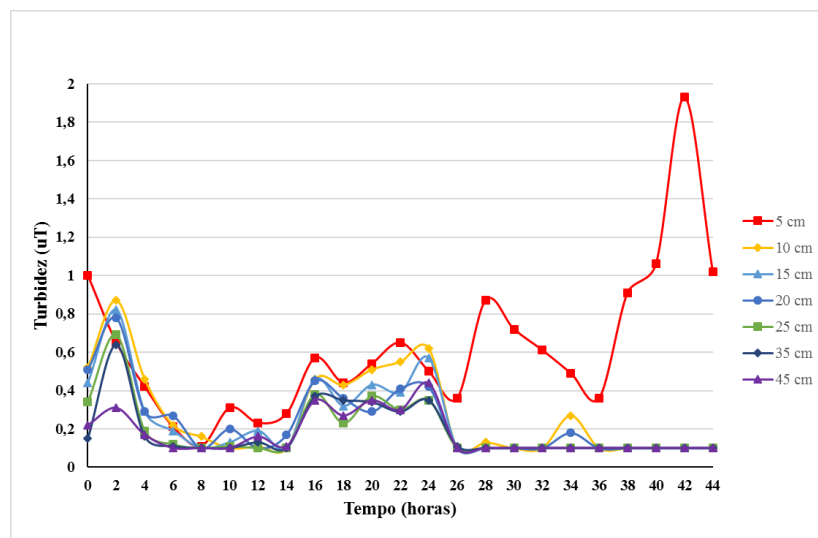


Período chuvoso

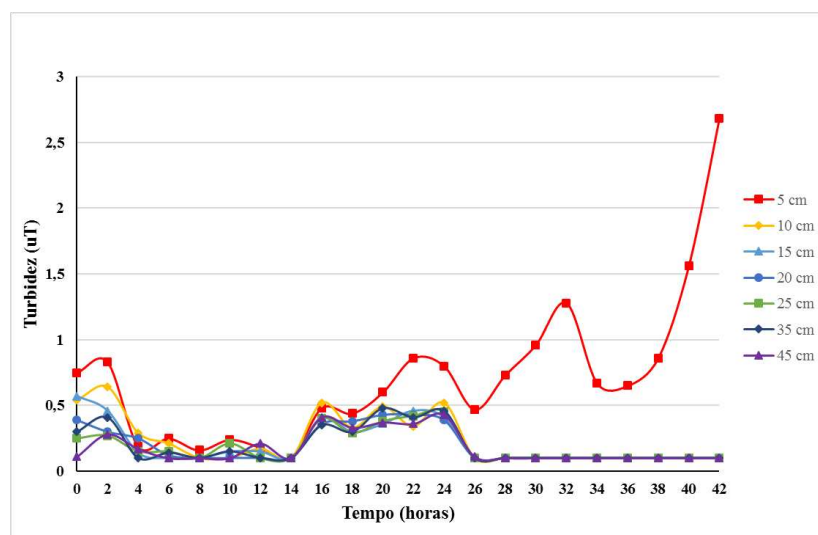
Taxa de Filtração: $180 \text{ m}^3\text{m}^{-1}\text{d}^{-1}$

Carreira 16

Figura A87 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 16

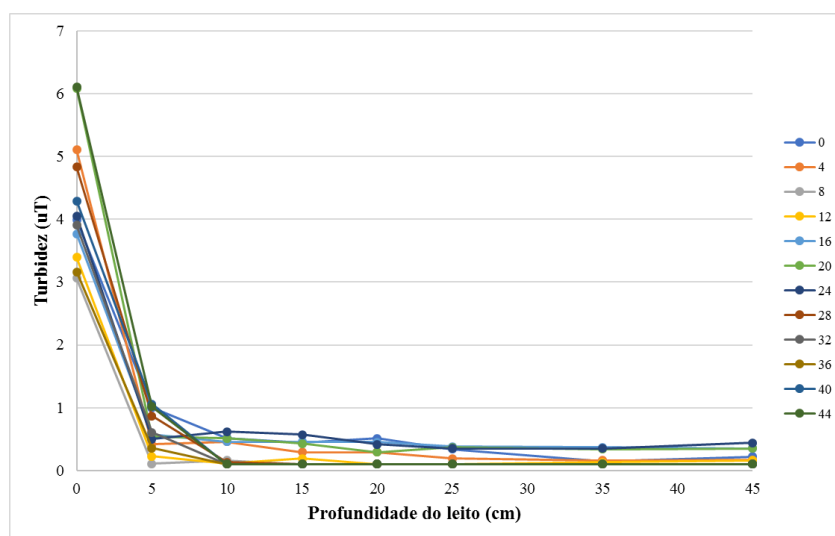


(a)

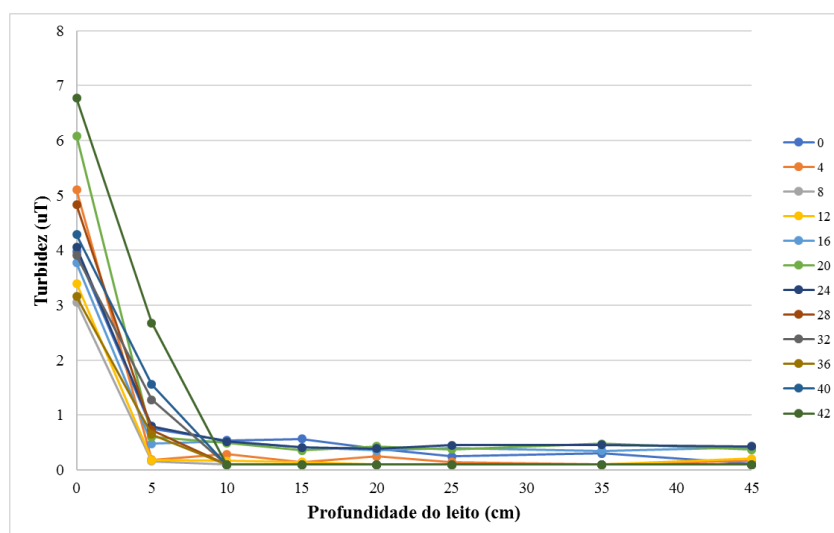


(b)

Figura A88 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 16

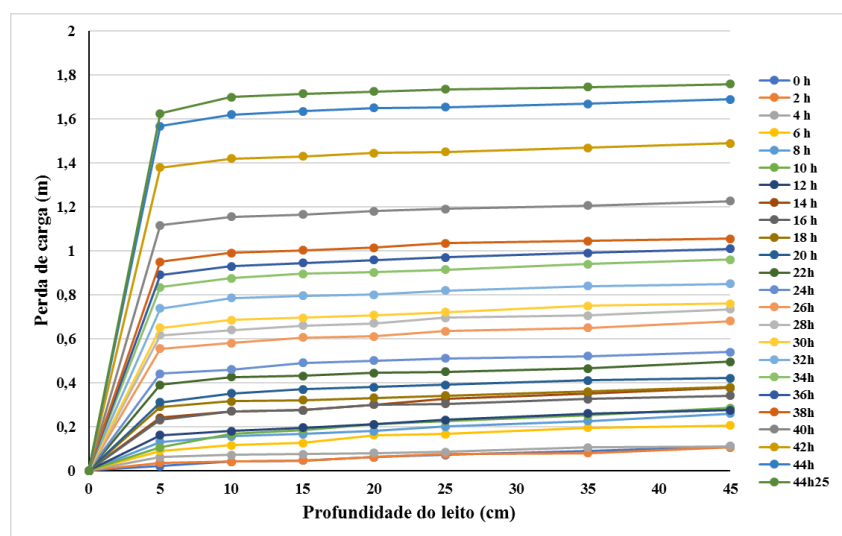


(a)

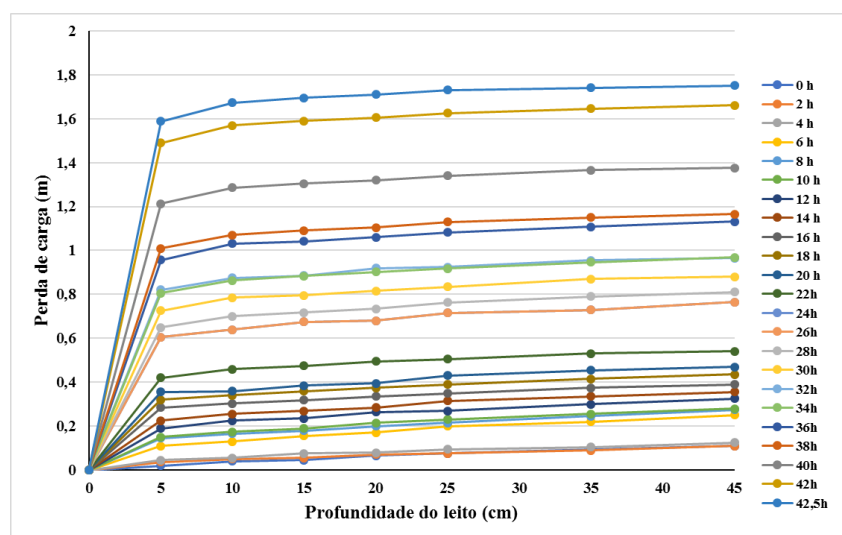


(b)

Figura A89 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 16

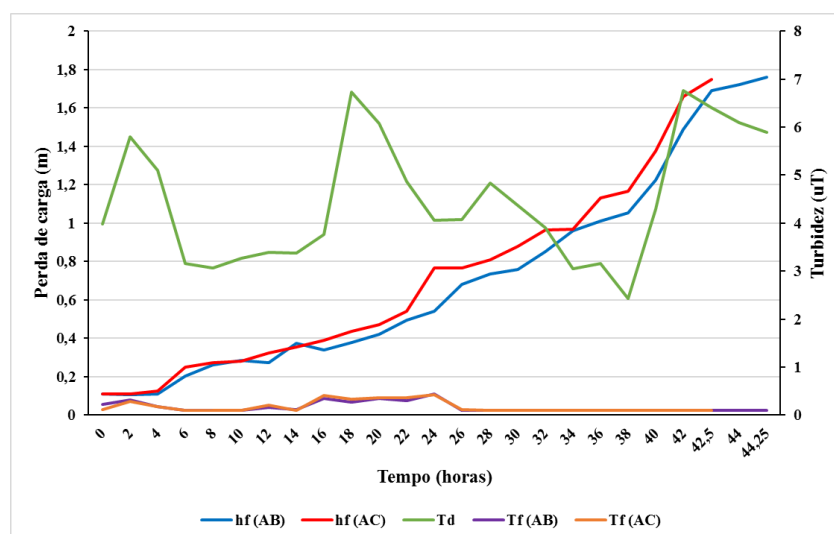


(a)



(b)

Figura A90 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 16



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A91 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 16. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

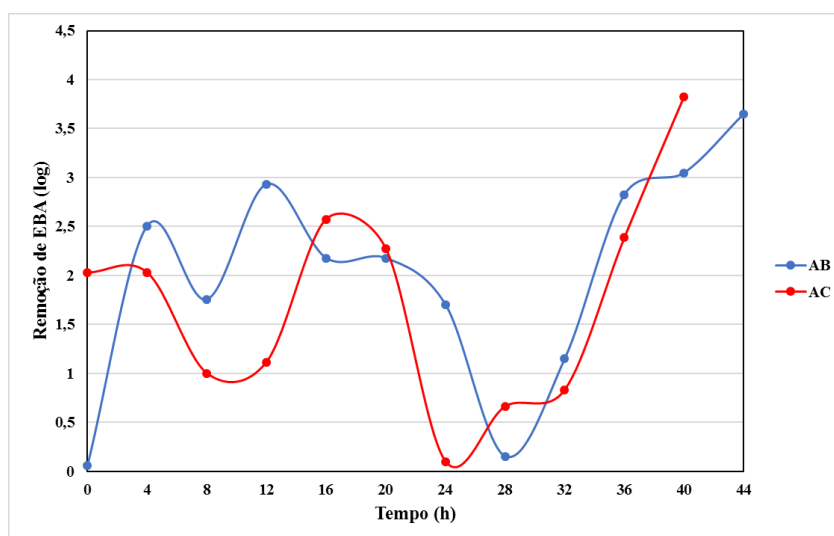


Figura A92 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 6,1) – carreira 16

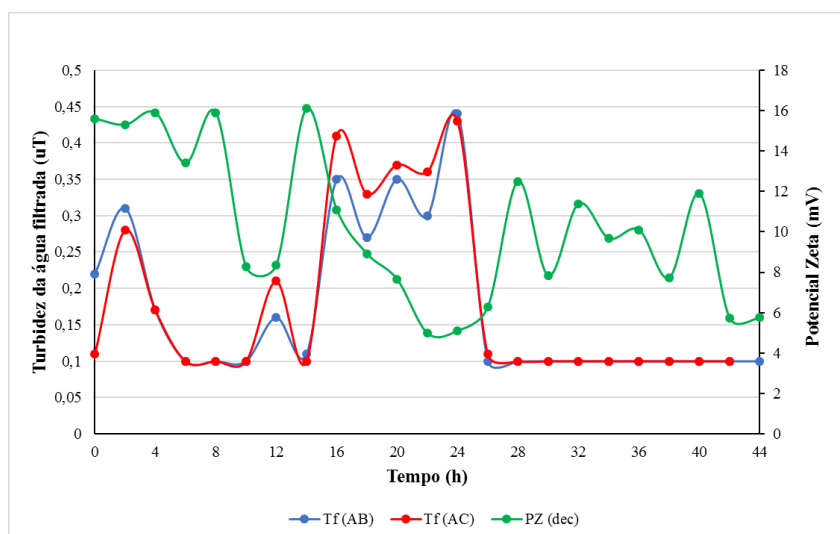
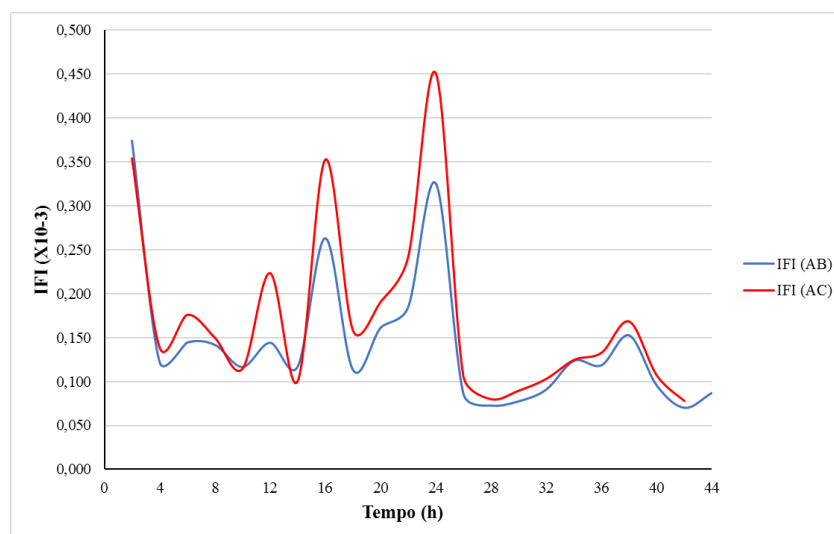
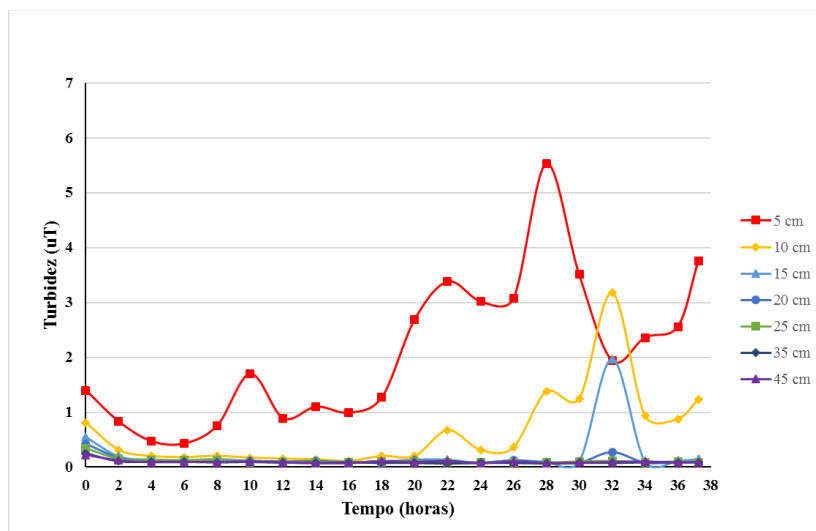


Figura A93 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 16

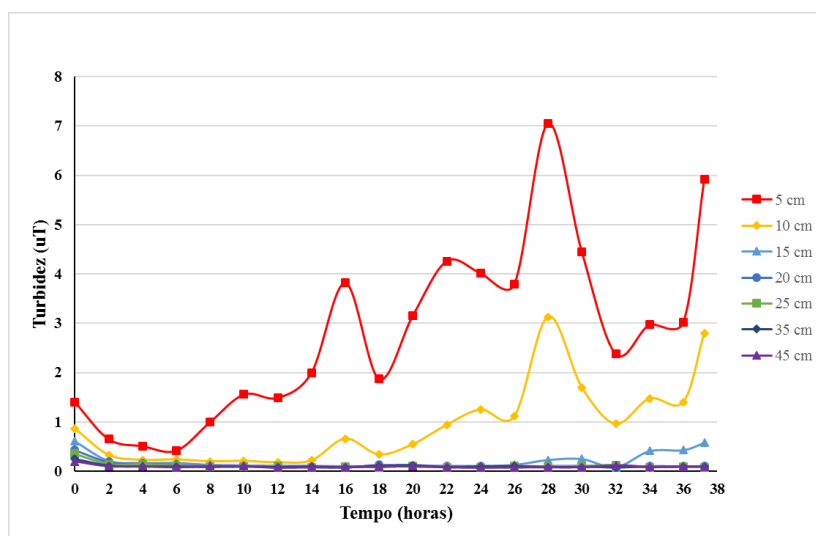


Carreira 21

Figura A94 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 21

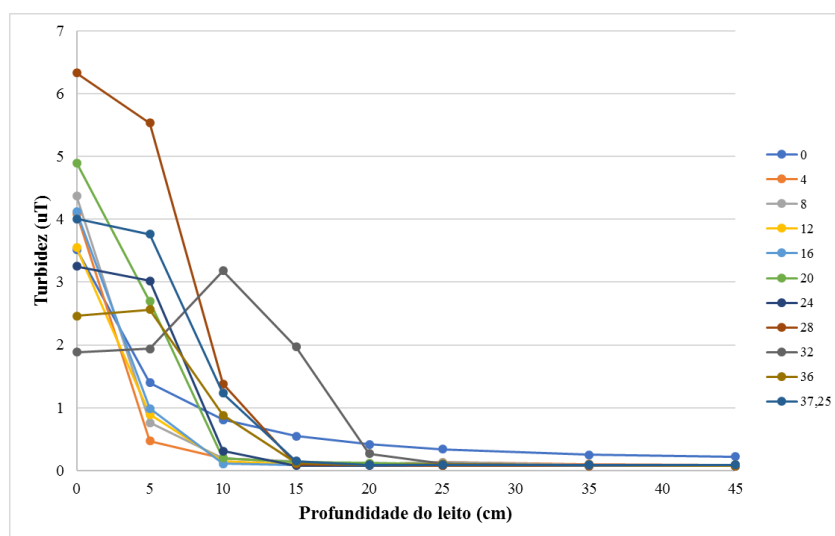


(a)

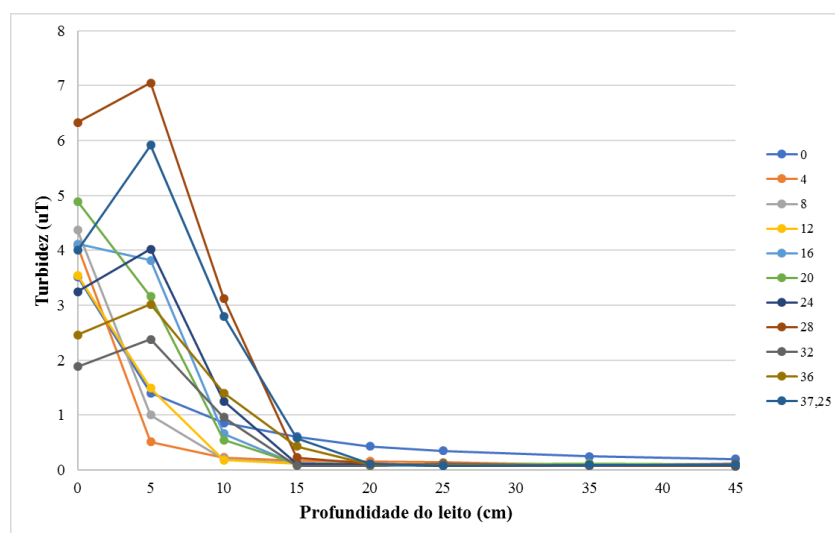


(b)

Figura A95 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 21

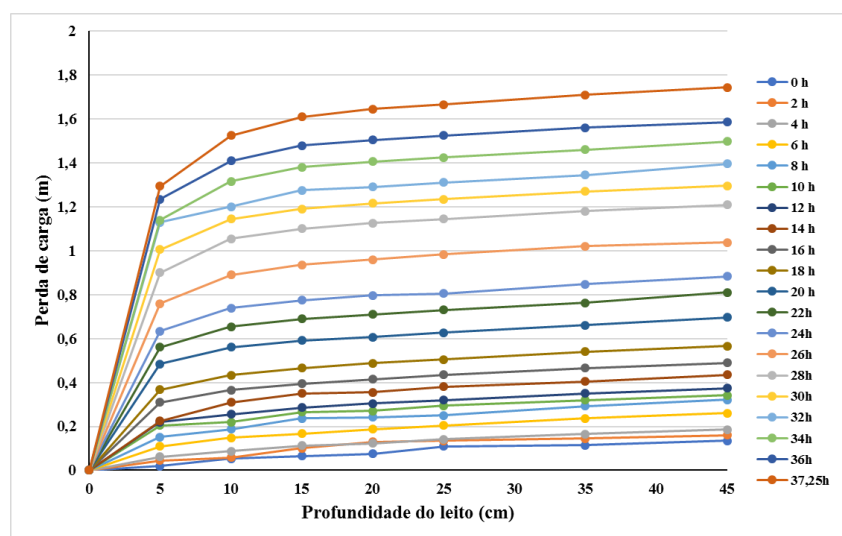


(a)

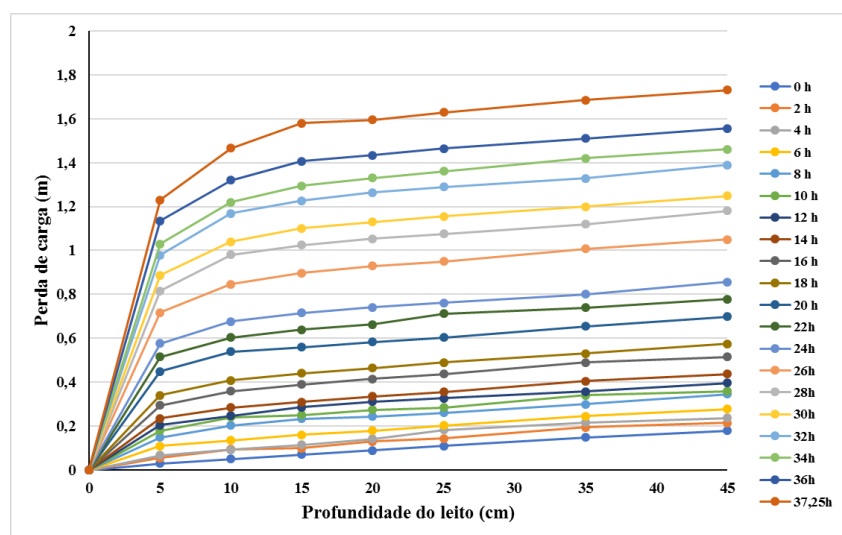


(b)

Figura A96 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 21

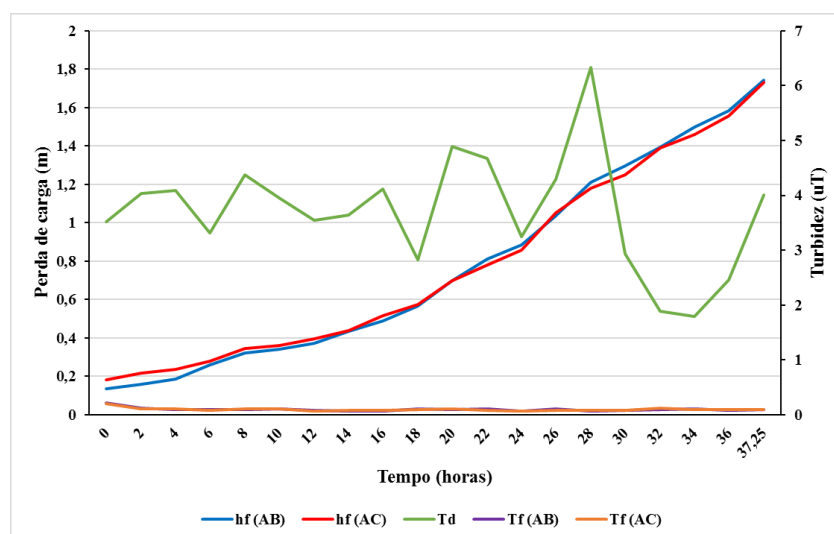


(a)



(b)

Figura A97 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 21



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional)

Figura A98 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 21. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

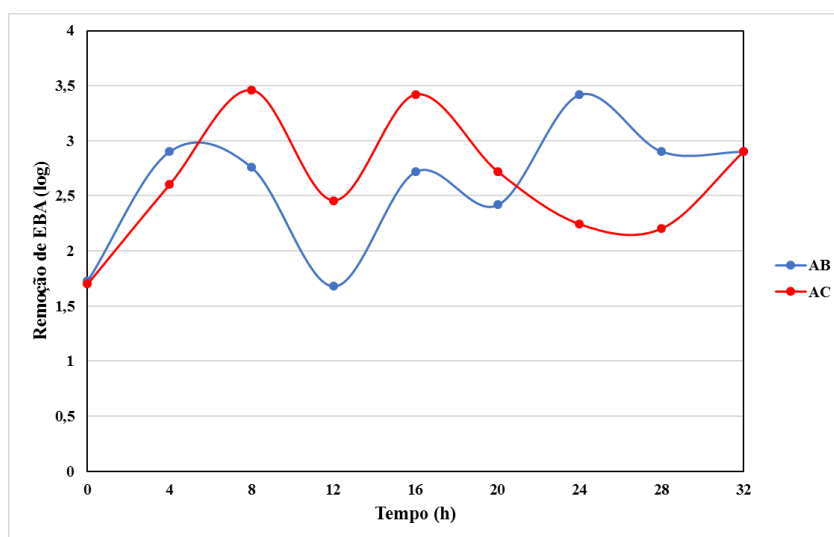


Figura A99 – Remoção de coliformes totais (em log) ao longo da carreira de filtração 21. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

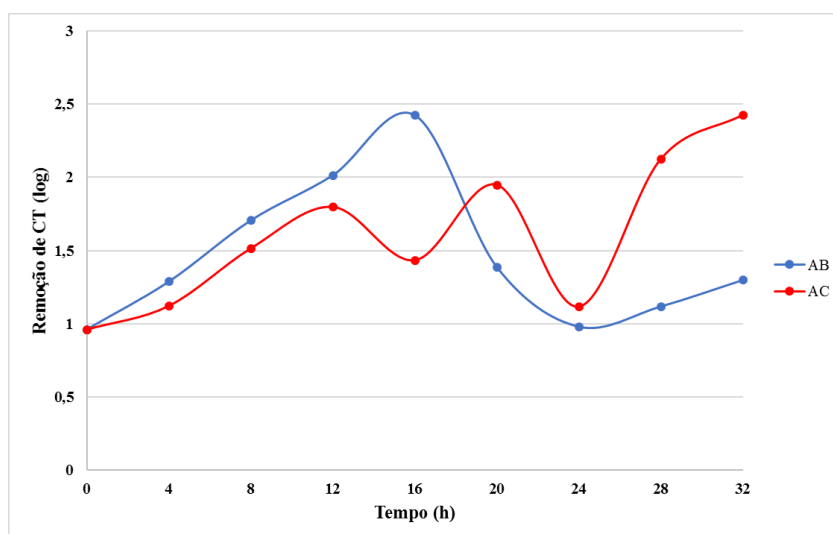


Figura A100 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 6,6) – carreira 21

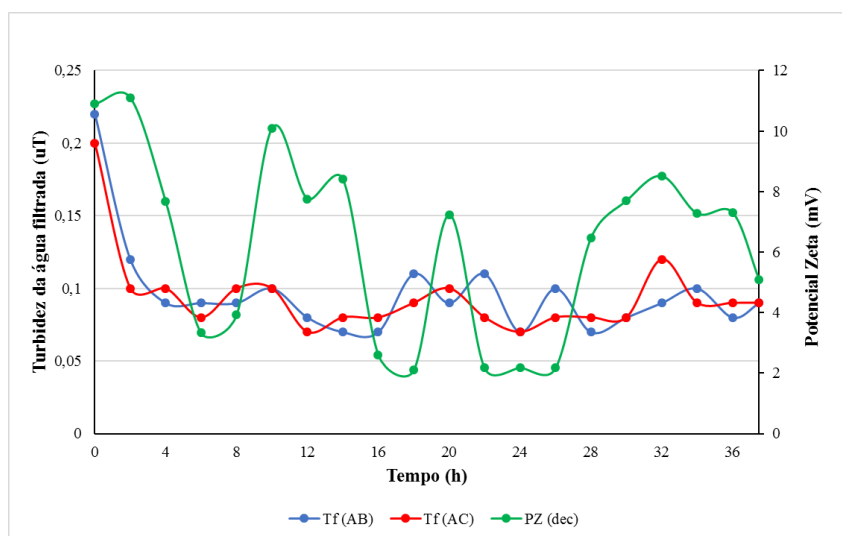
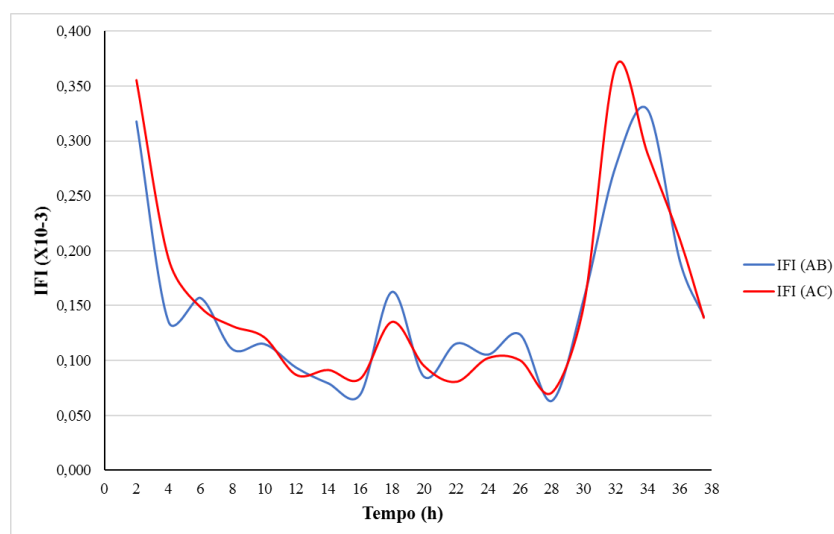
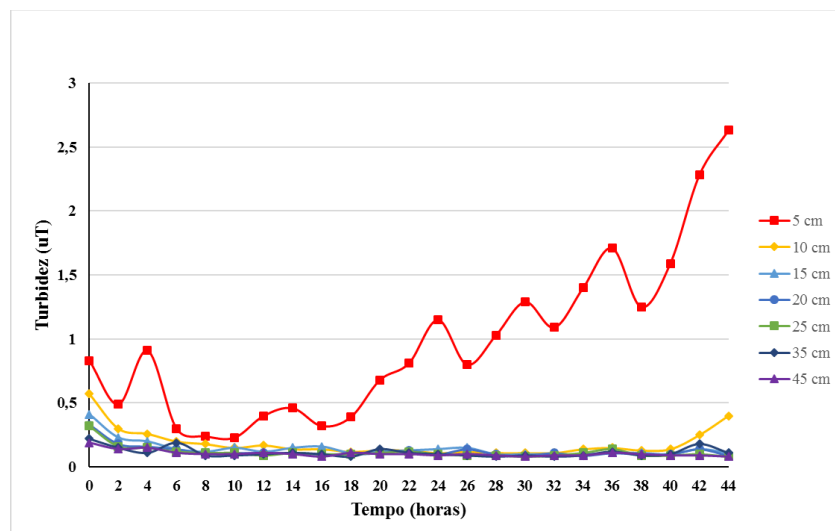


Figura A101 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 21

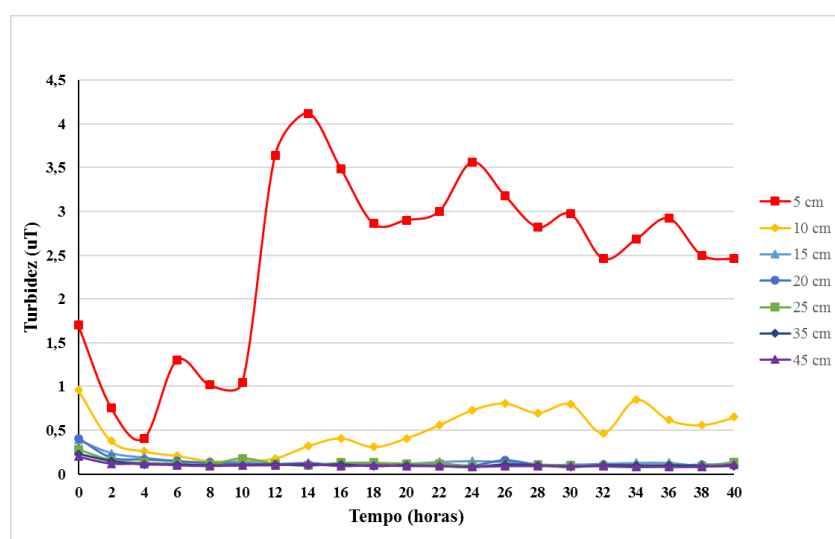


Carreira 23

Figura A102 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 23

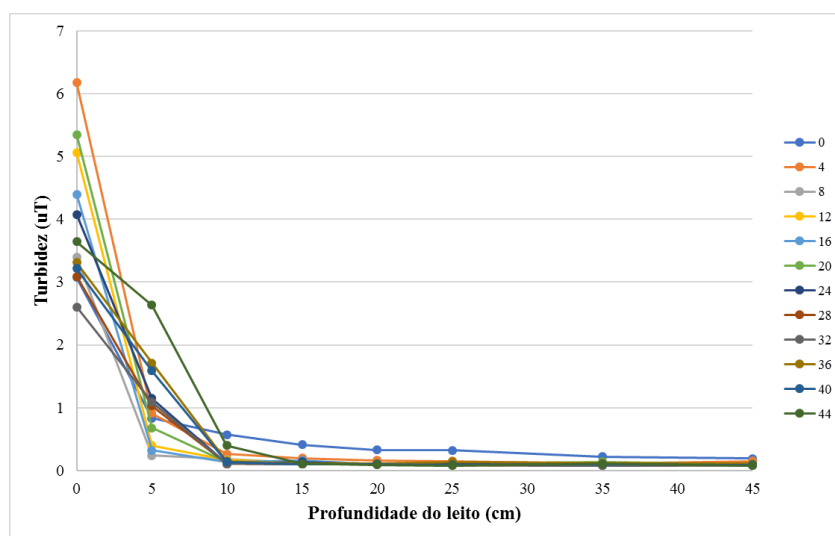


(a)

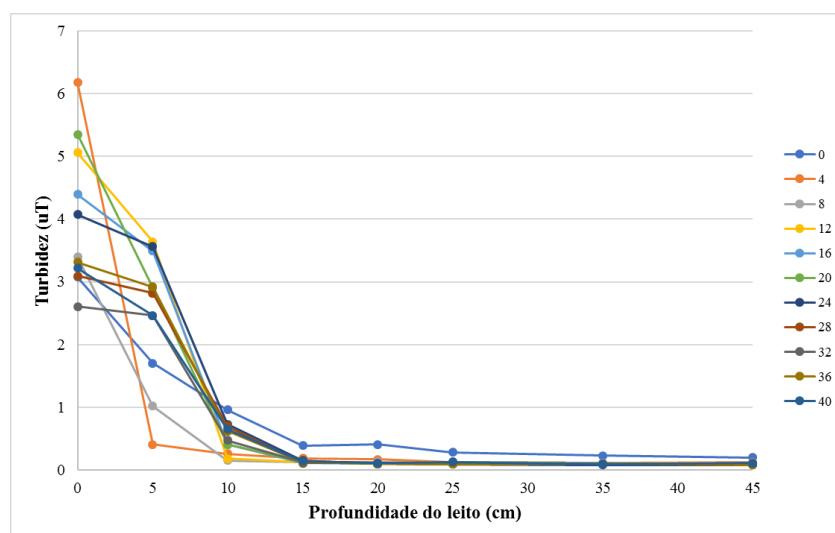


(b)

Figura A103 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 23

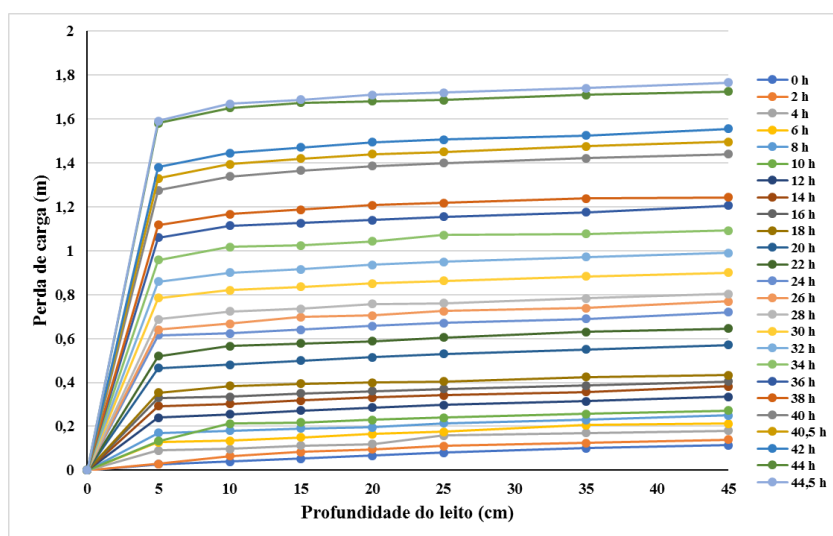


(a)

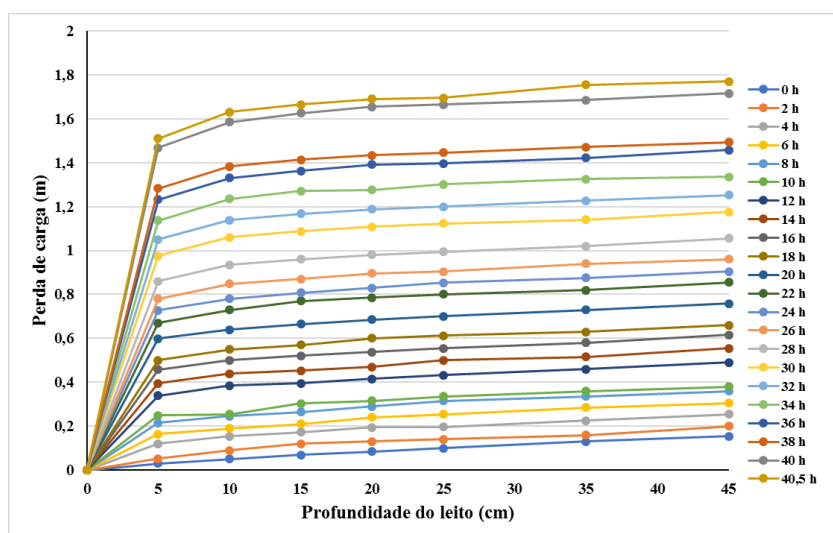


(b)

Figura A104 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 23

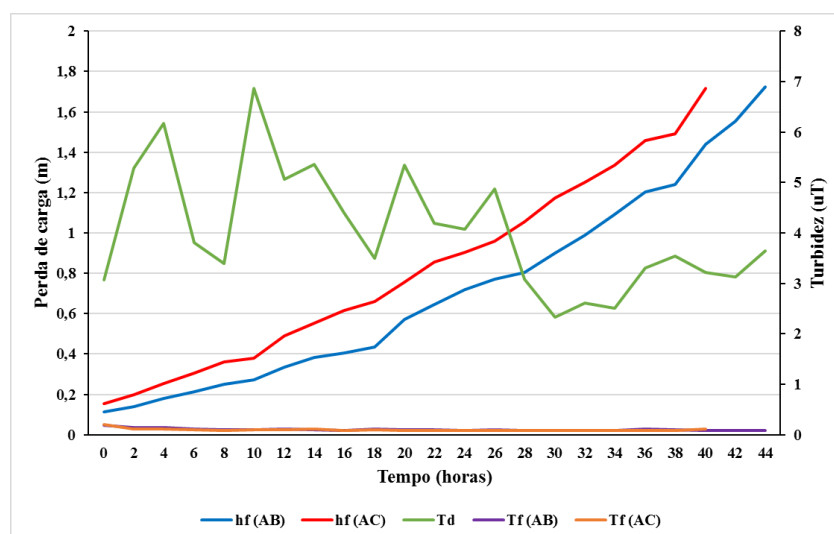


(a)



(b)

Figura A105 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 23



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A106 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 23. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

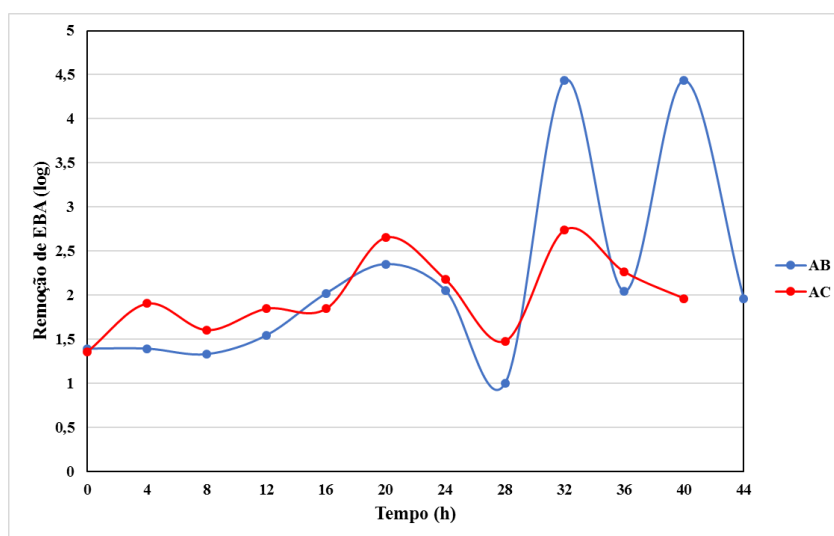


Figura A107 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 6,6) – carreira 23

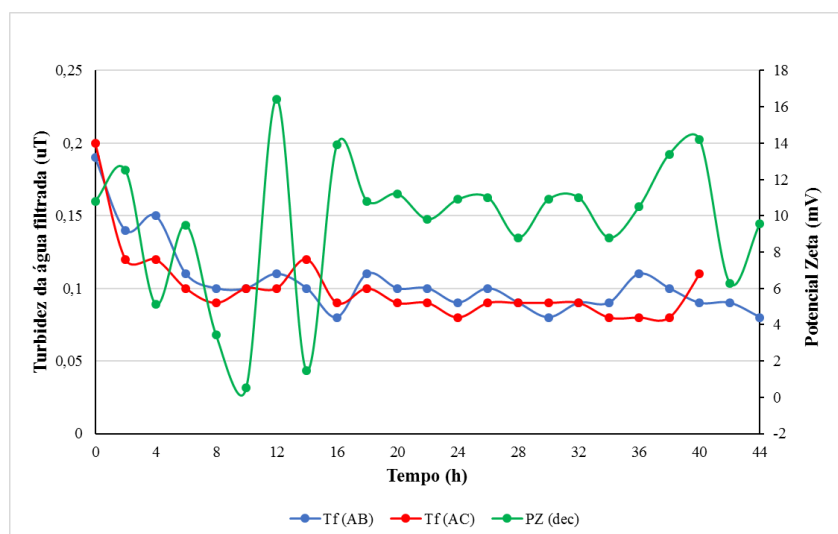
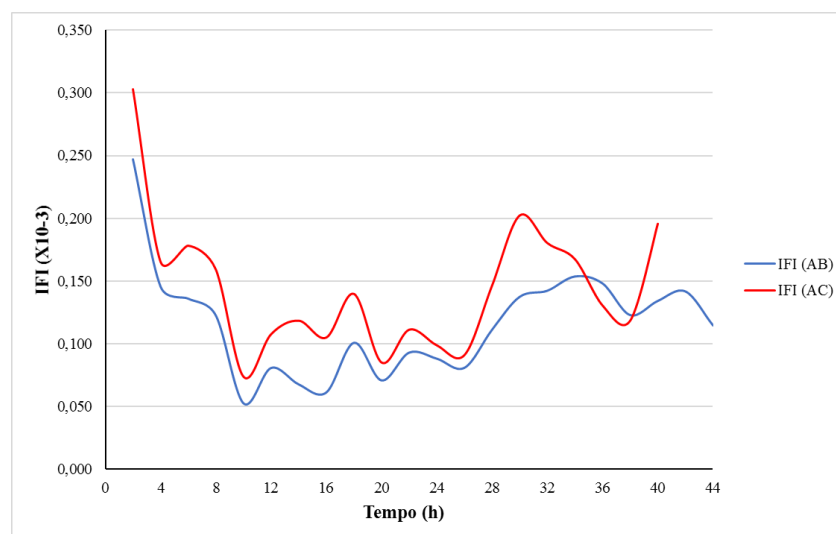


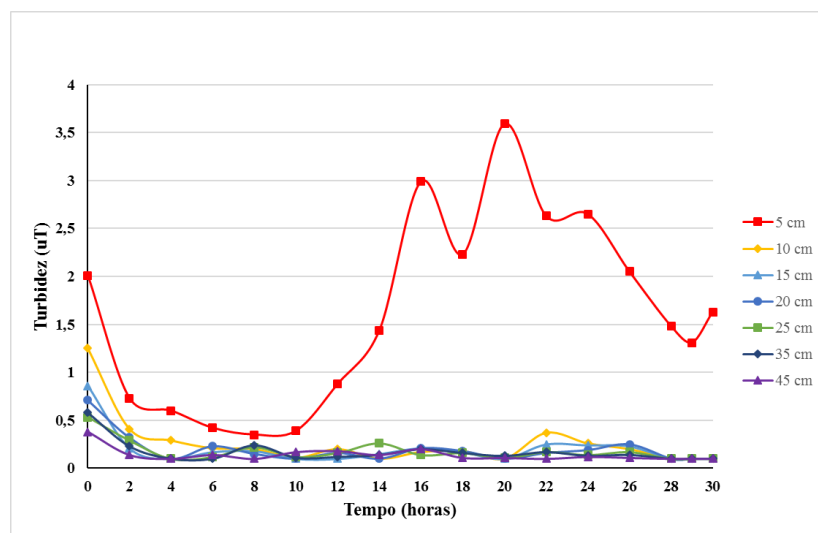
Figura A108 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 23



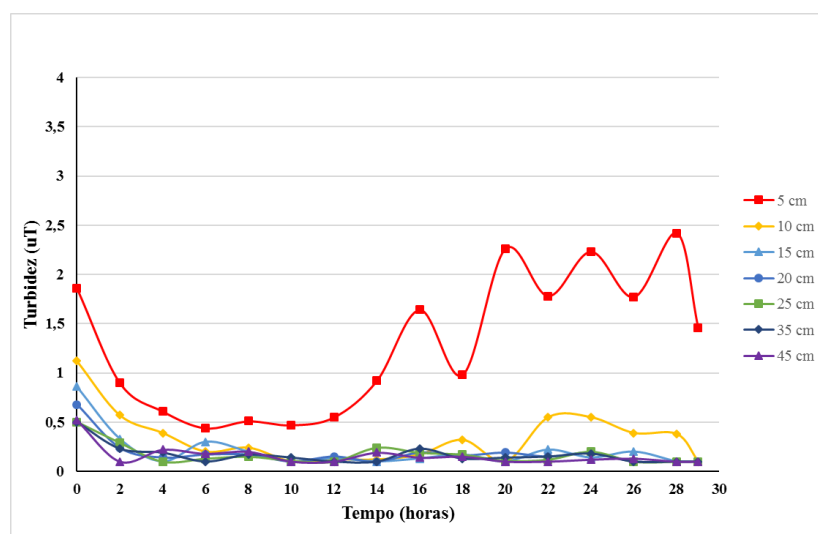
Taxa de Filtração: $270 \text{ m}^3\text{m}^{-1}\text{d}^{-1}$

Carreira 15

Figura A109 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 15

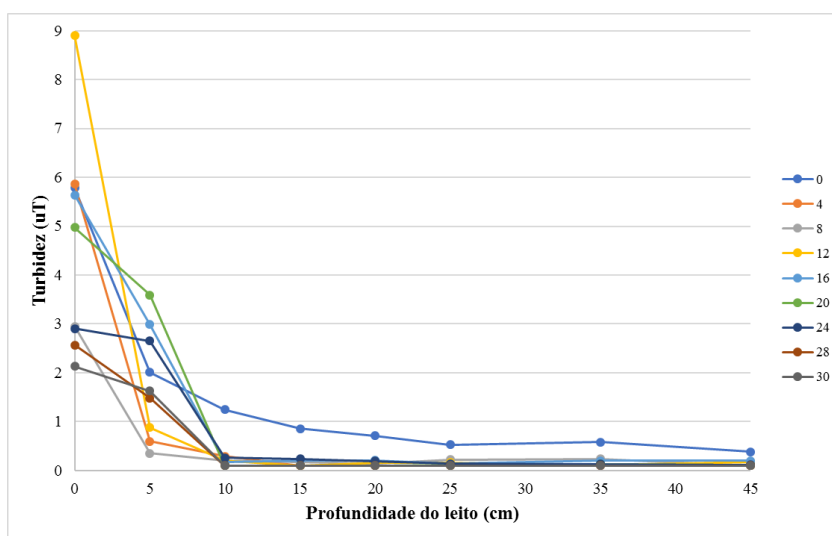


(a)

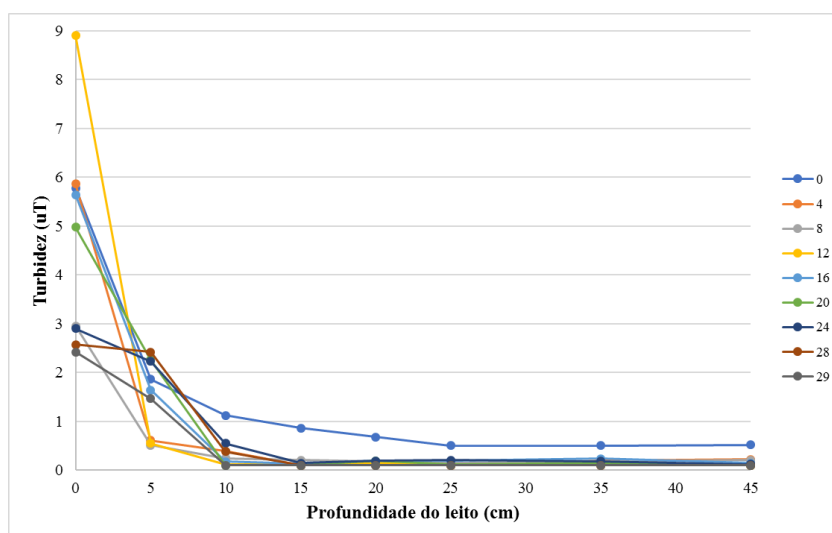


(b)

Figura A110 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
 (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 15

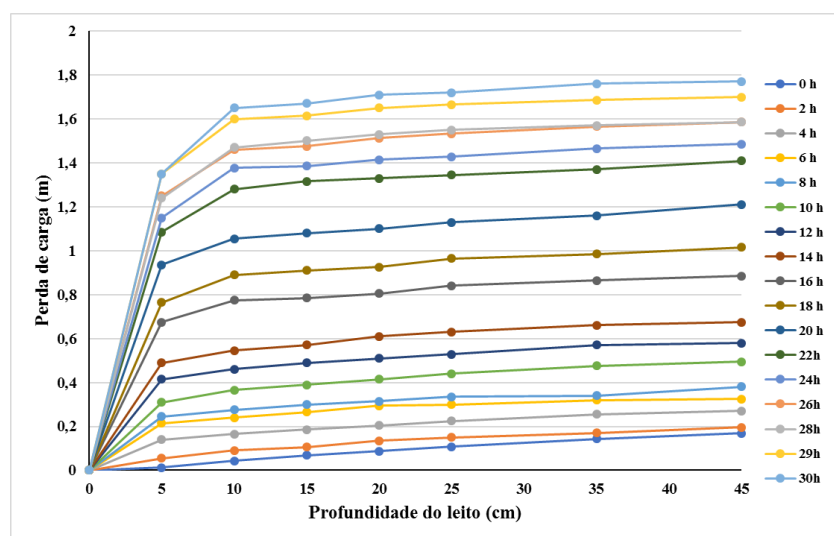


(a)

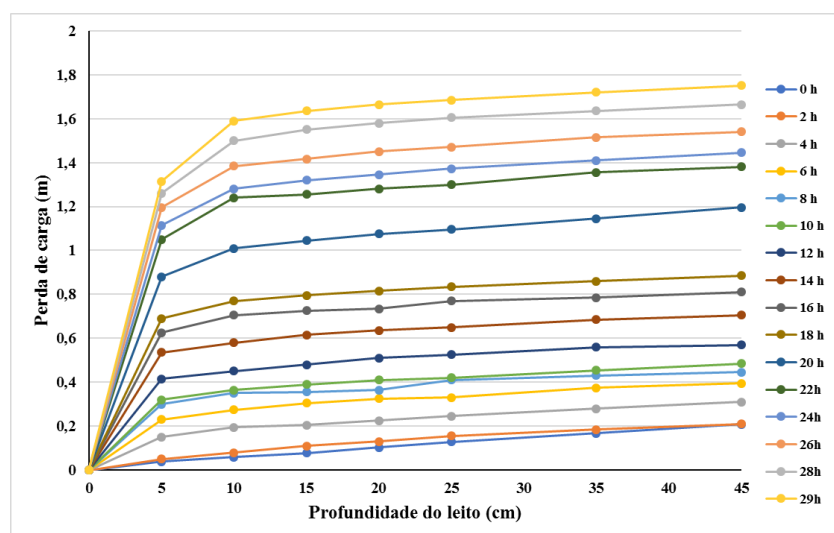


(b)

Figura A111 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 15

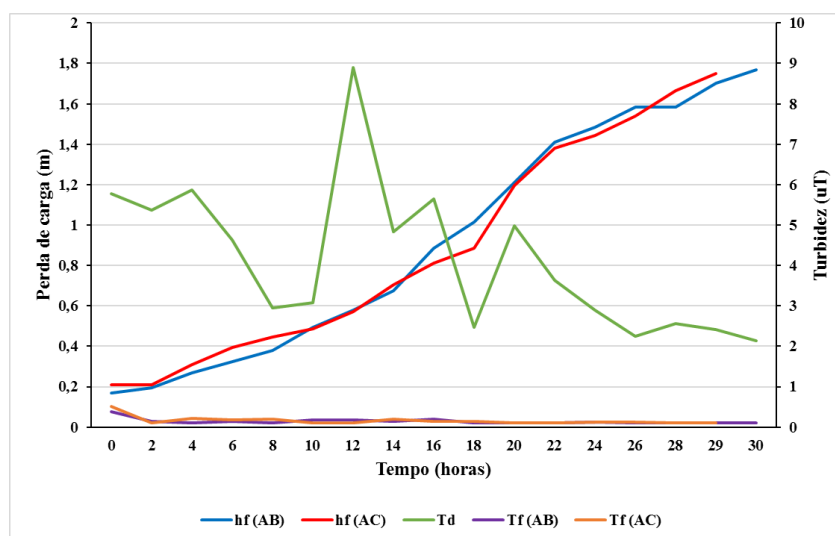


(a)



(b)

Figura A112 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 15



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A113 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 15. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

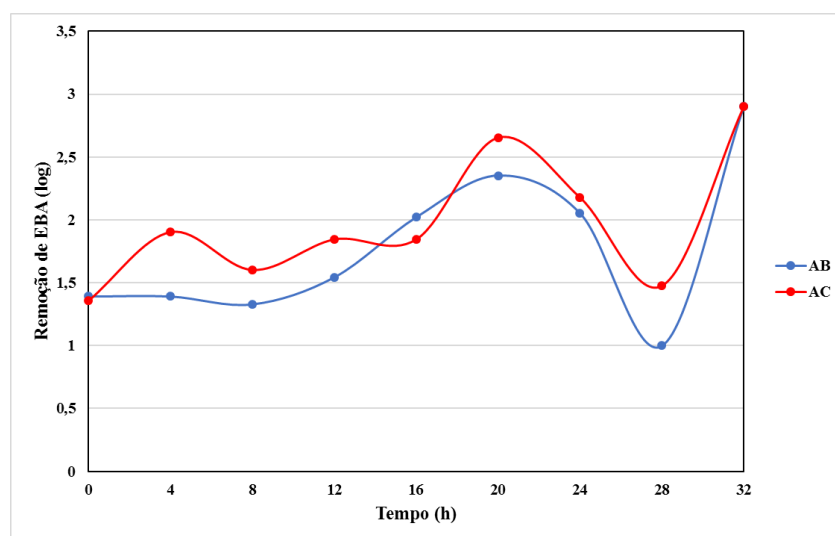


Figura A114 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 6,4) – carreira 15

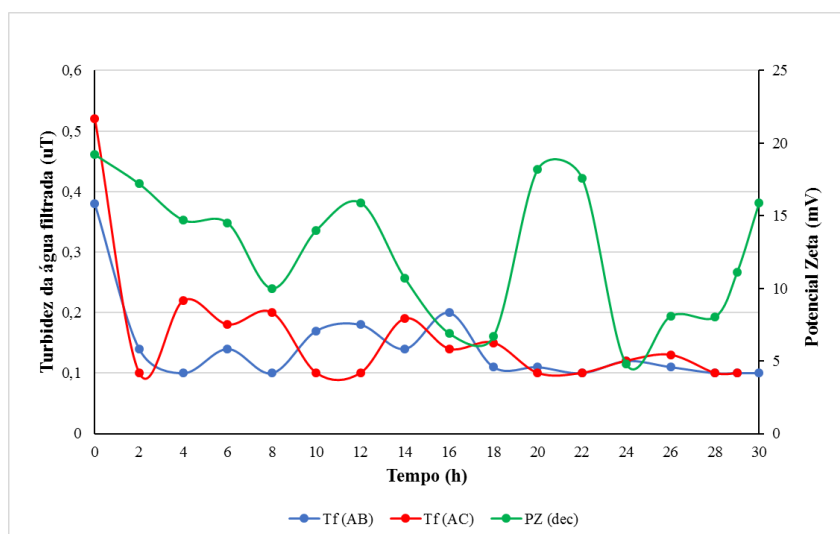
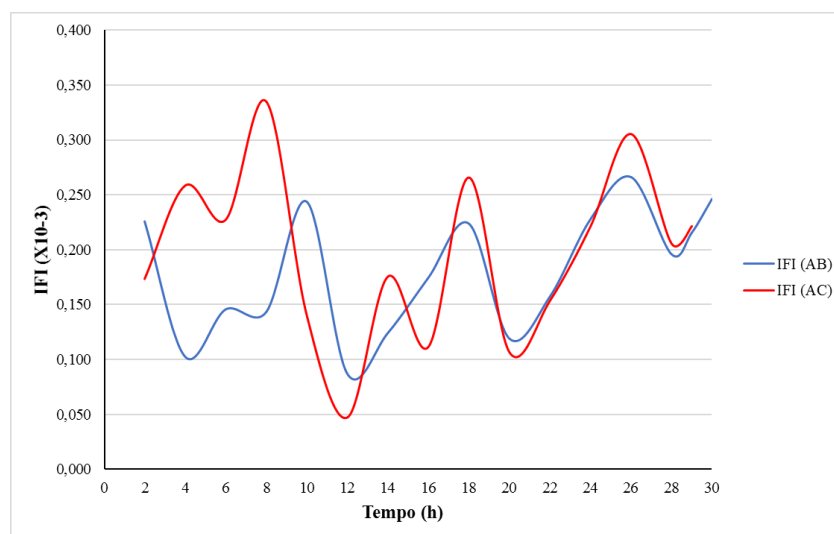
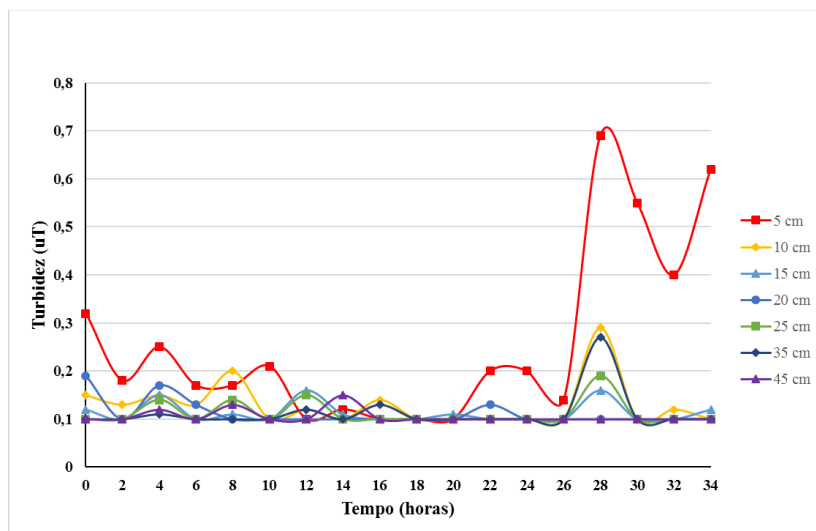


Figura A115 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 15

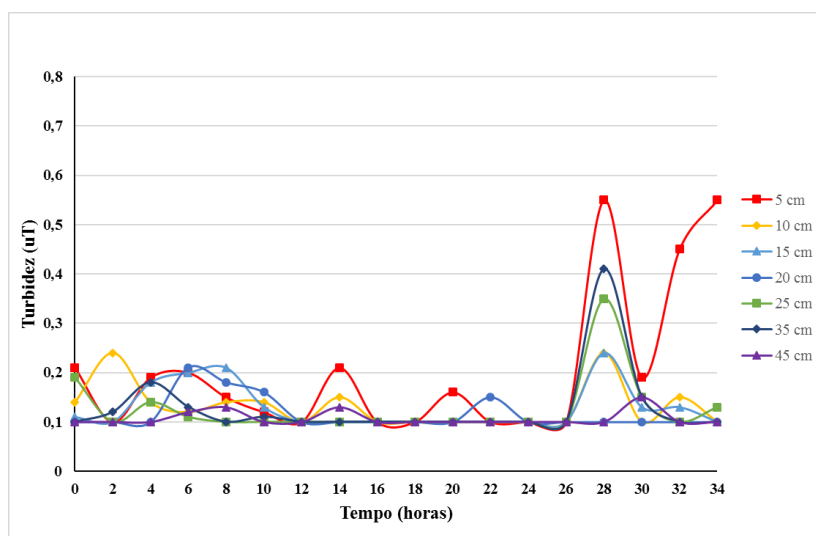


Carreira 19

Figura A116 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 19

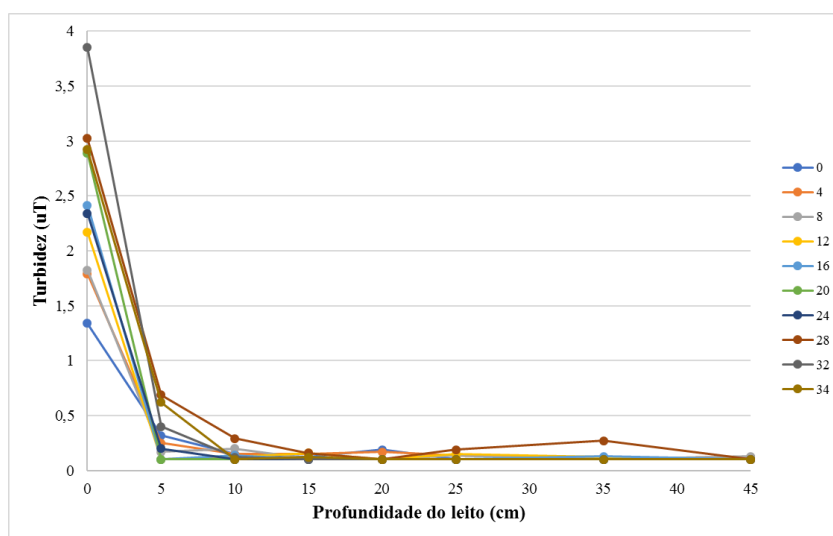


(a)

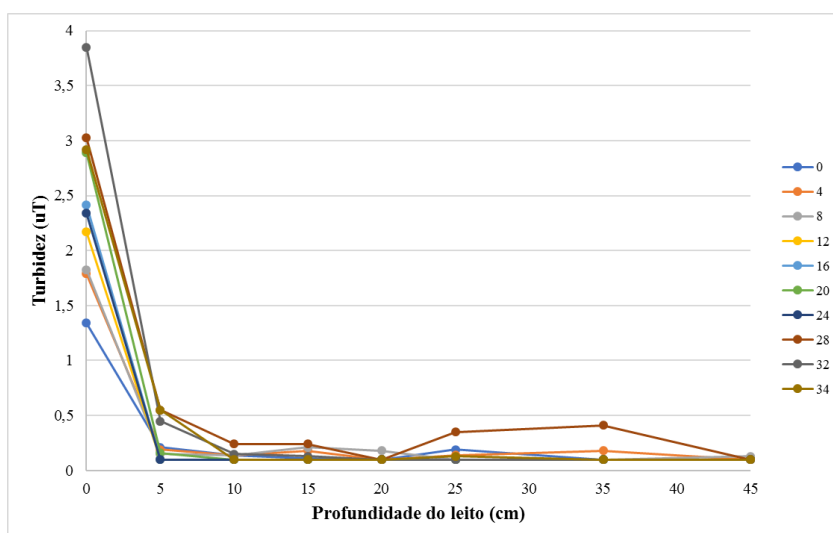


(b)

Figura A117 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 19

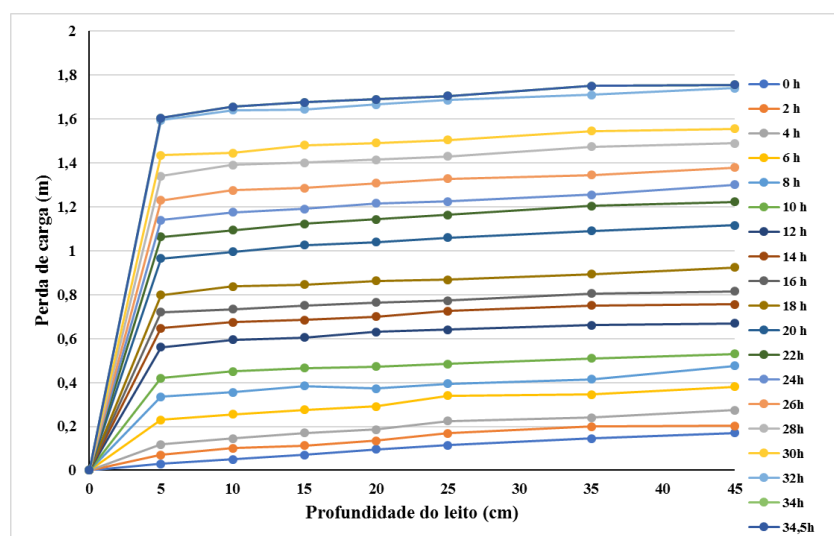


(a)

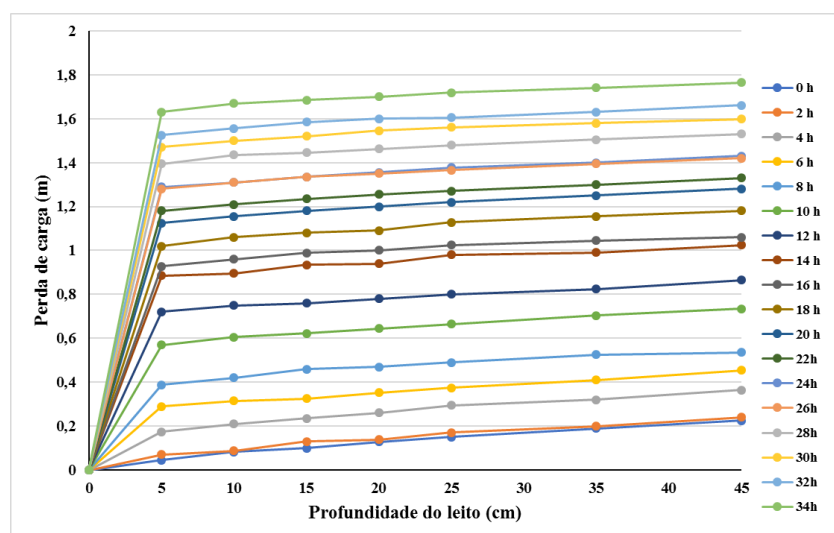


(b)

Figura A118 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 19

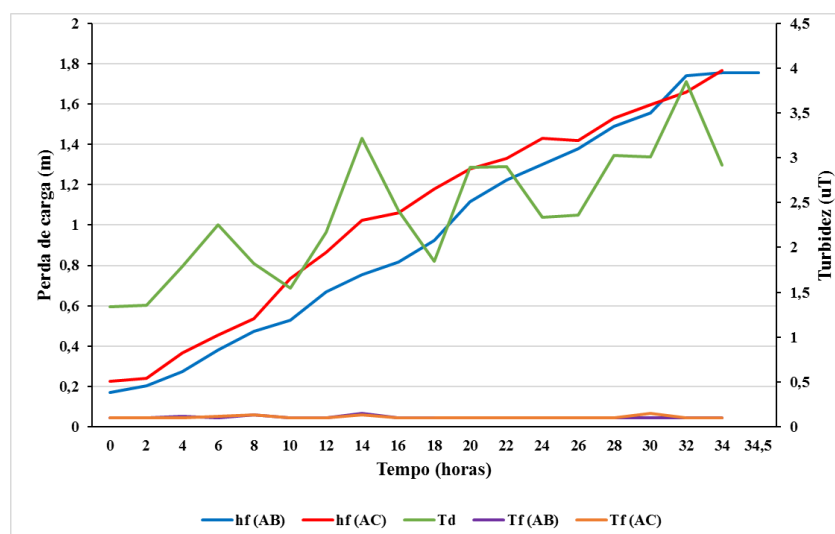


(a)



(b)

Figura A119 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 19



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A120 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 19. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

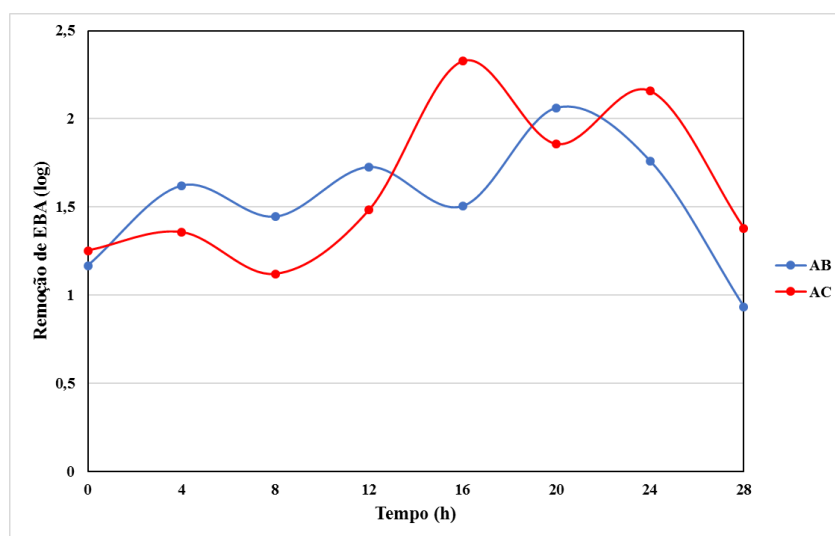


Figura A121 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 6,5) – carreira 19

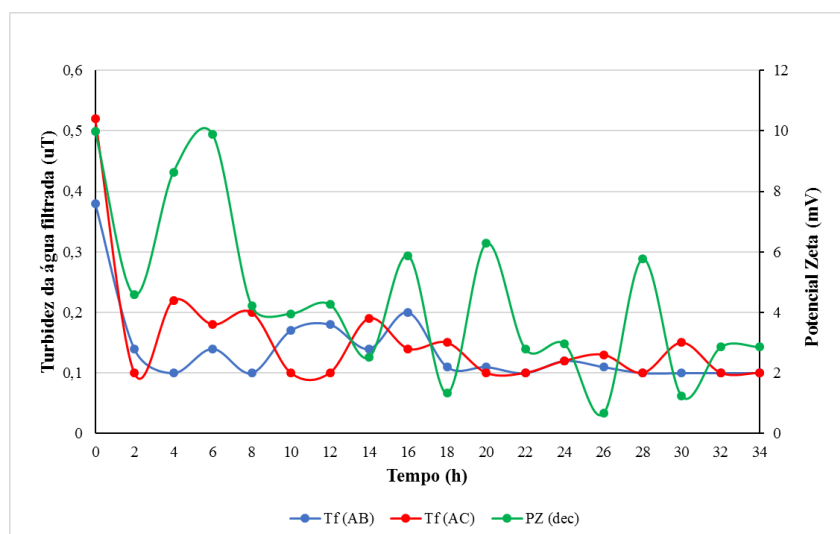
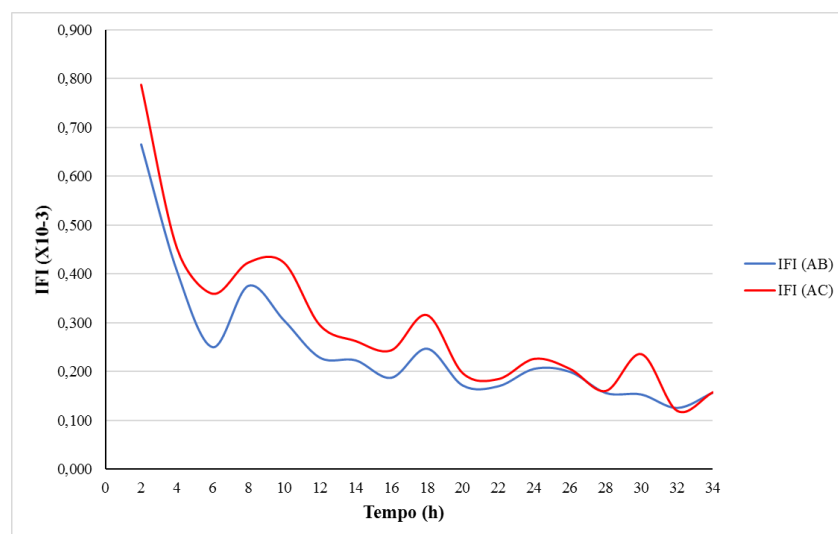
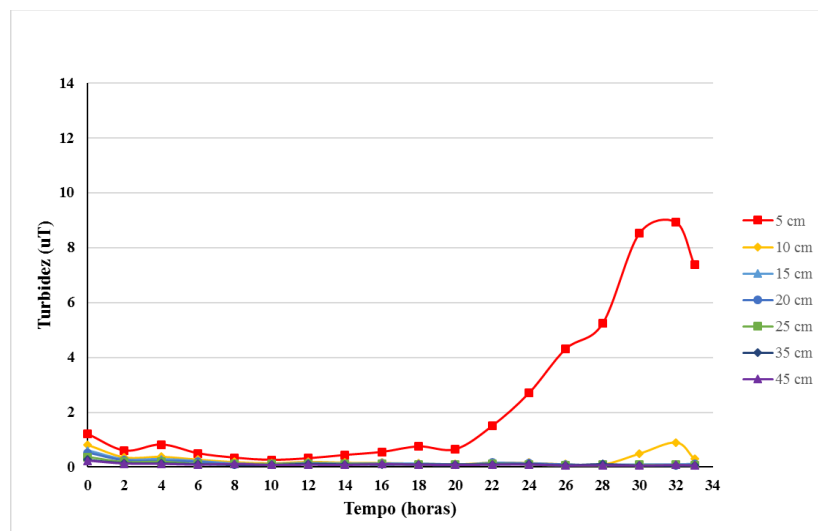


Figura A122 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 19

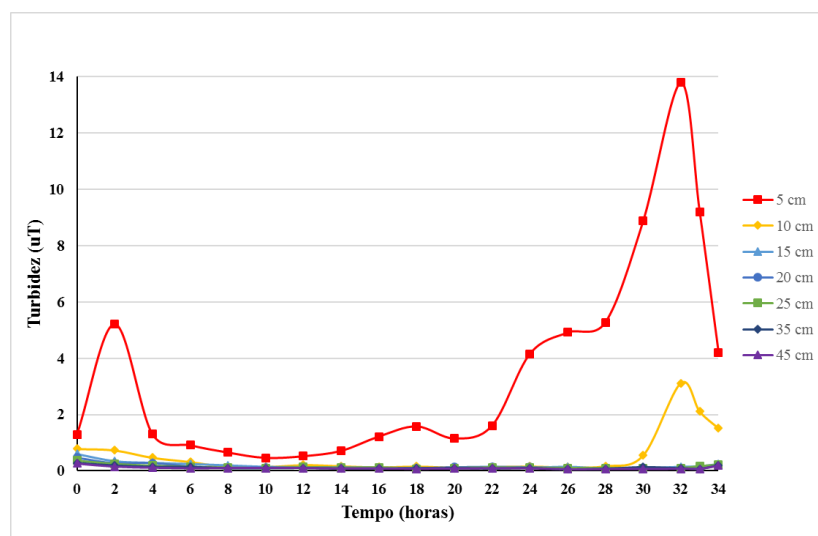


Carreira 22

Figura A123 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 22

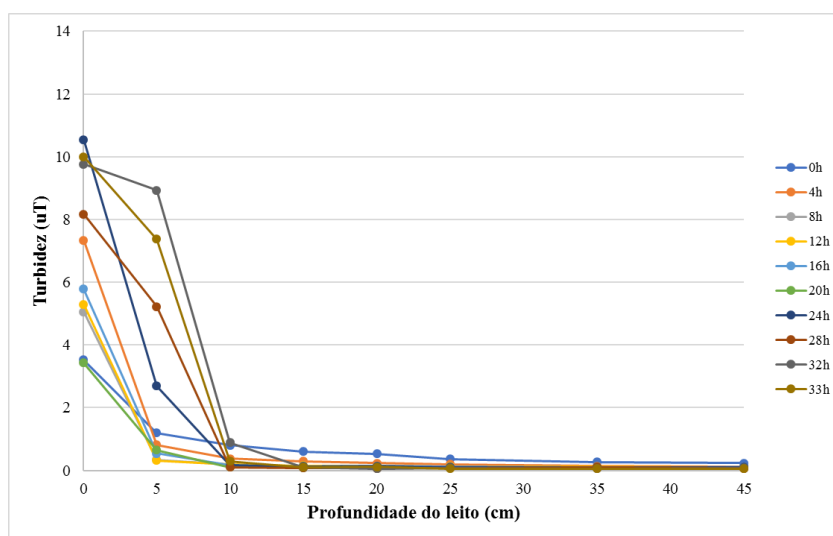


(a)

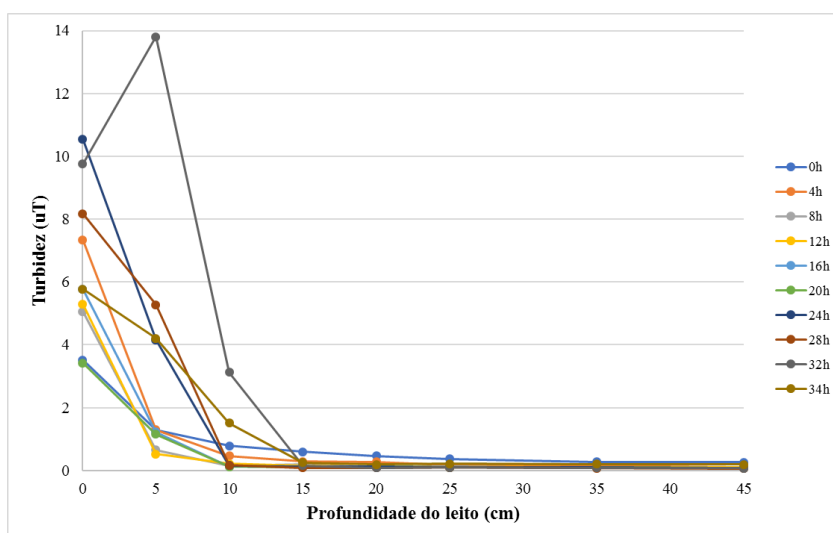


(b)

Figura A124 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
 (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 22

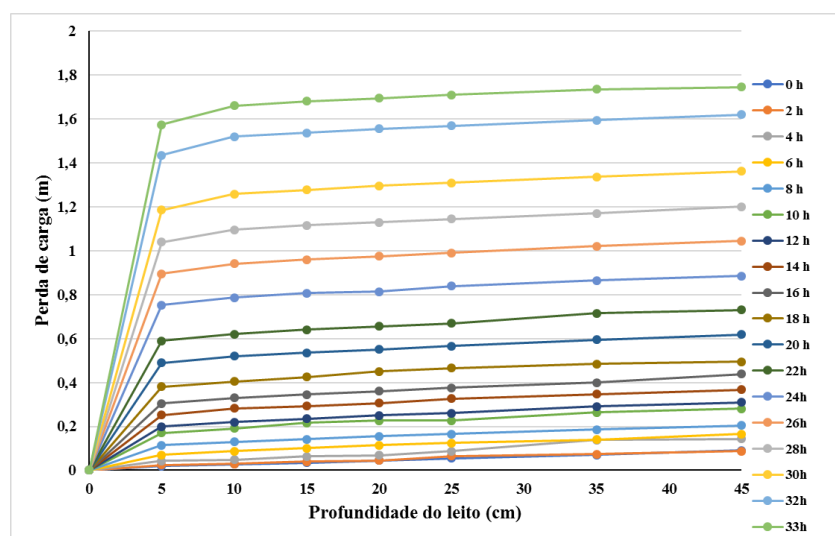


(a)

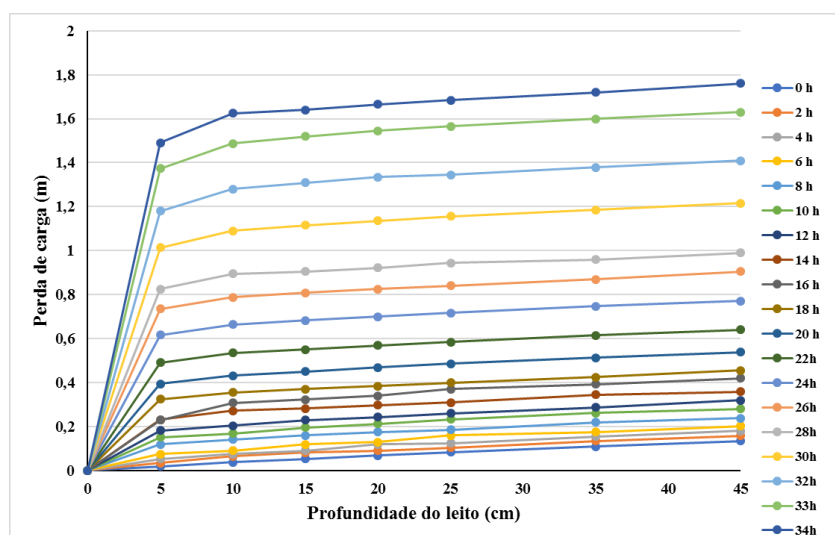


(b)

Figura A125 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 22

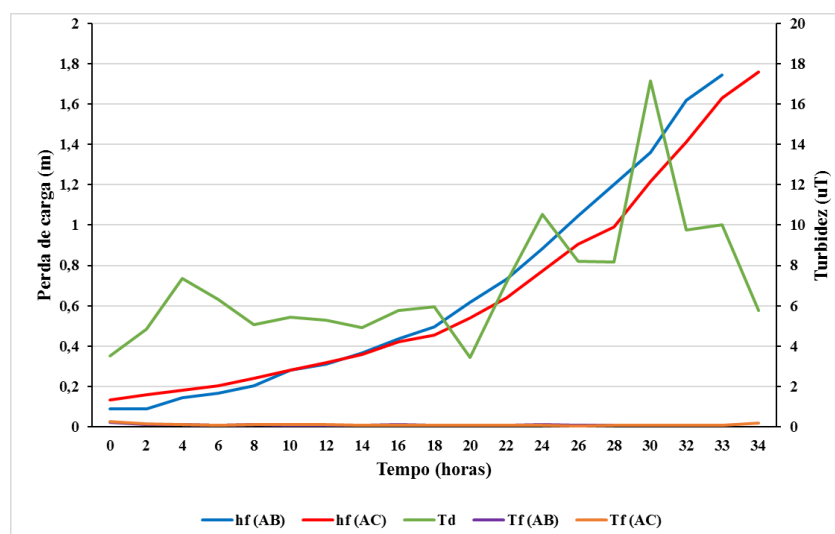


(a)



(b)

Figura A126 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 22



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A127 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 22. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional



Figura A128 – Remoção em log de Coliformes Totais (em CT) ao longo da carreira de filtração 22. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

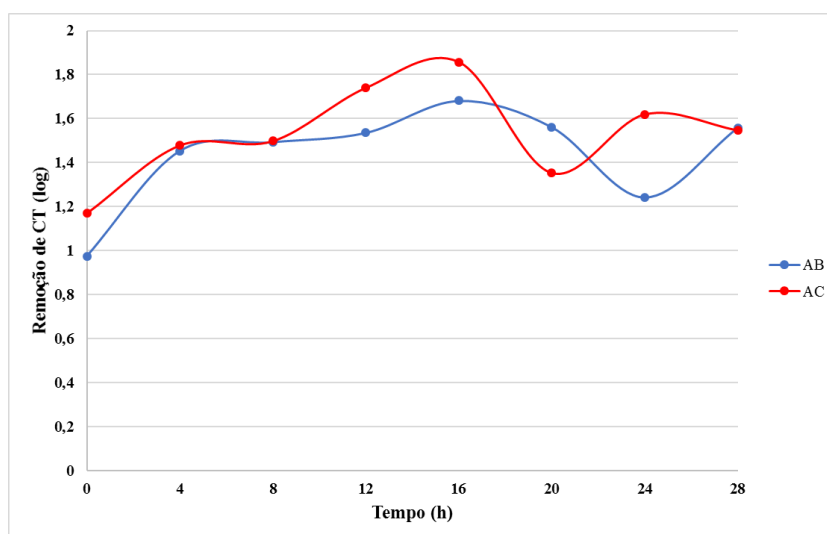


Figura A129 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 6,7) – carreira 22

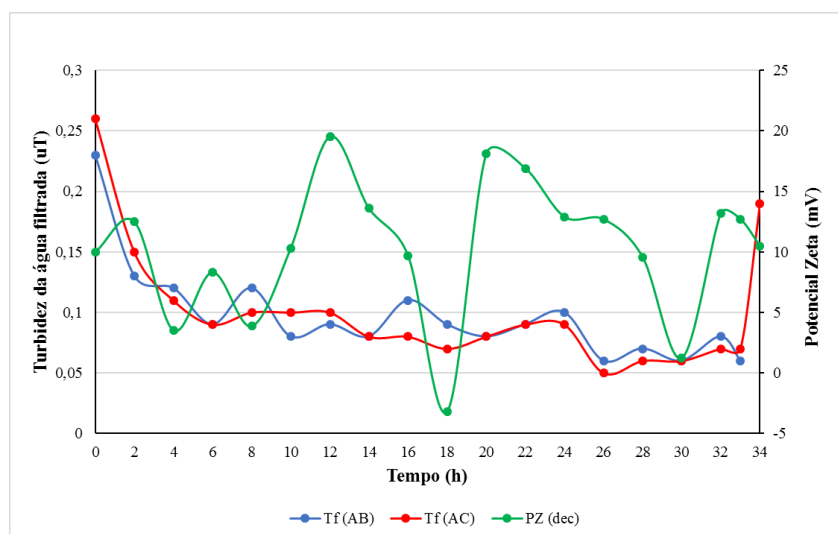
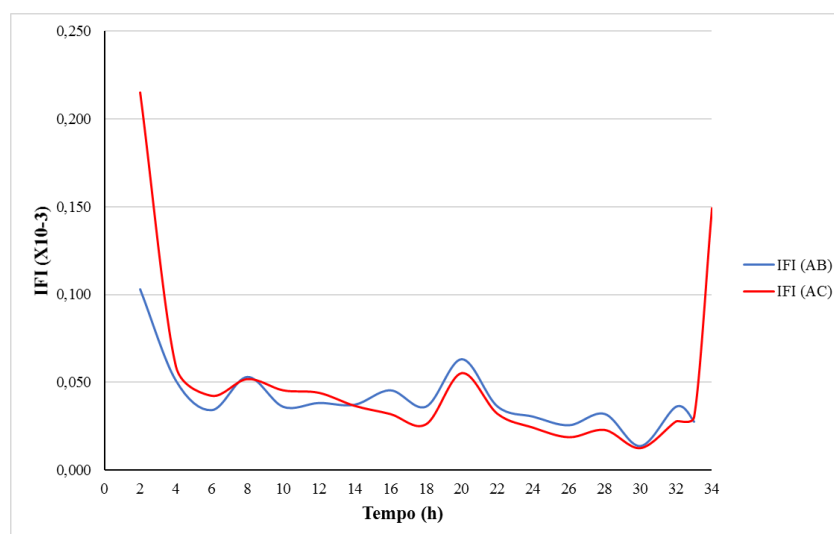


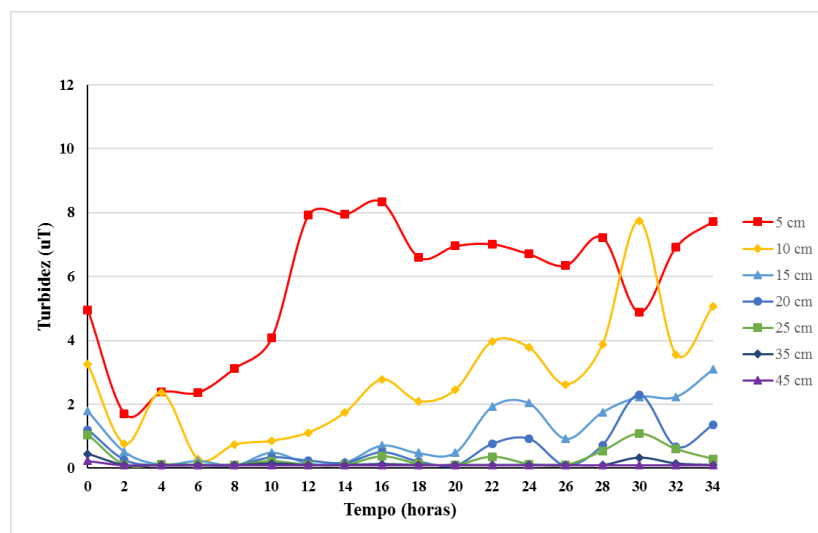
Figura A130 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 22



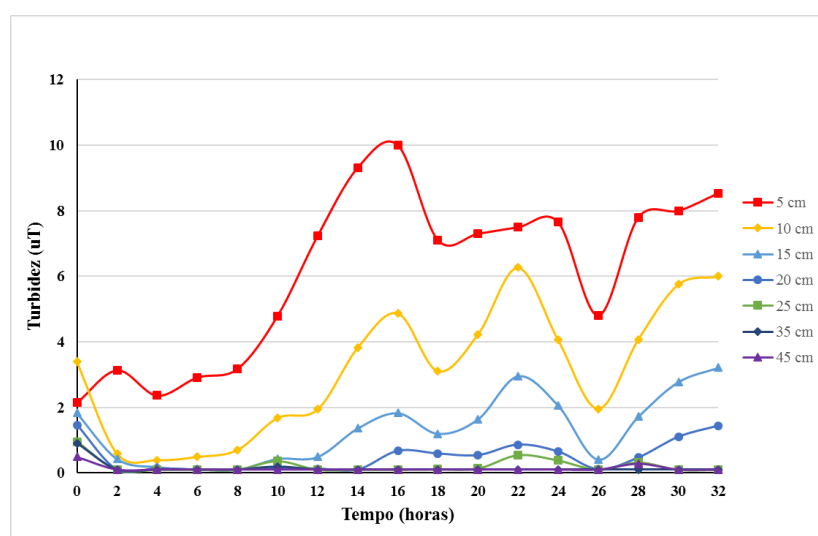
Taxa de Filtração: $360 \text{ m}^3\text{m}^{-1}\text{d}^{-1}$

Carreira 17

Figura A131 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 17

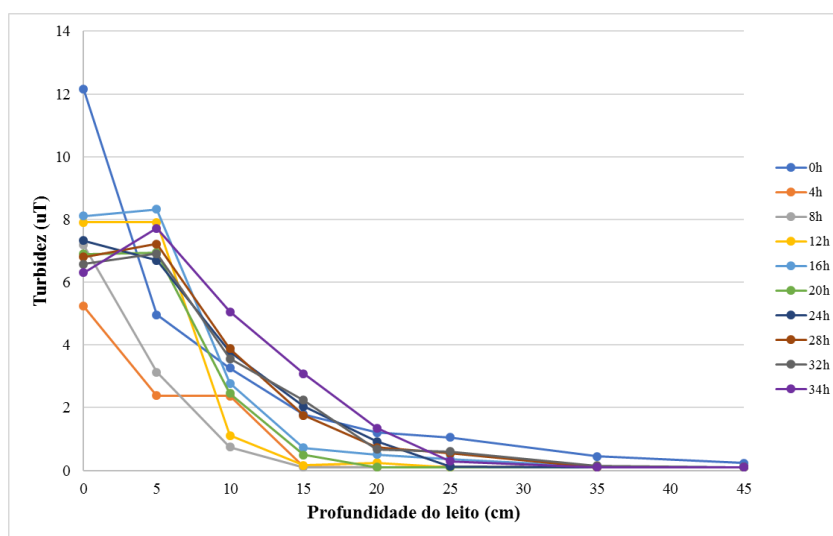


(a)

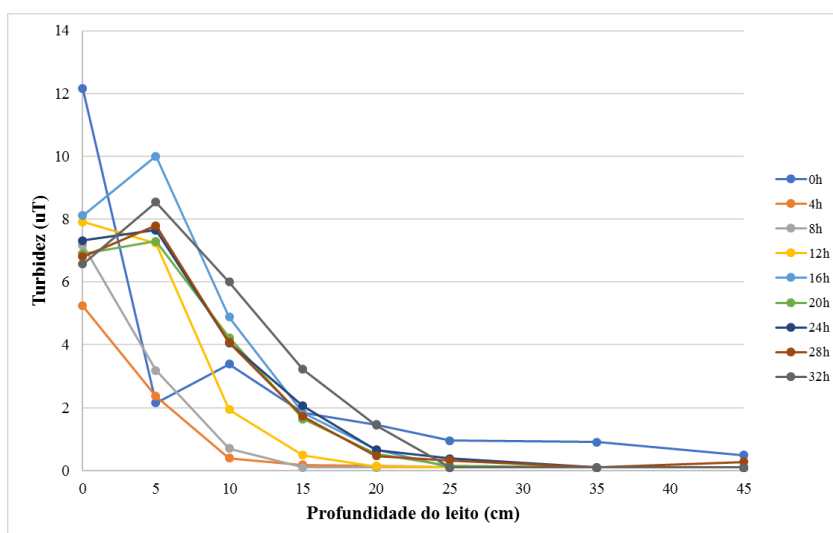


(b)

Figura A132 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
 (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 17

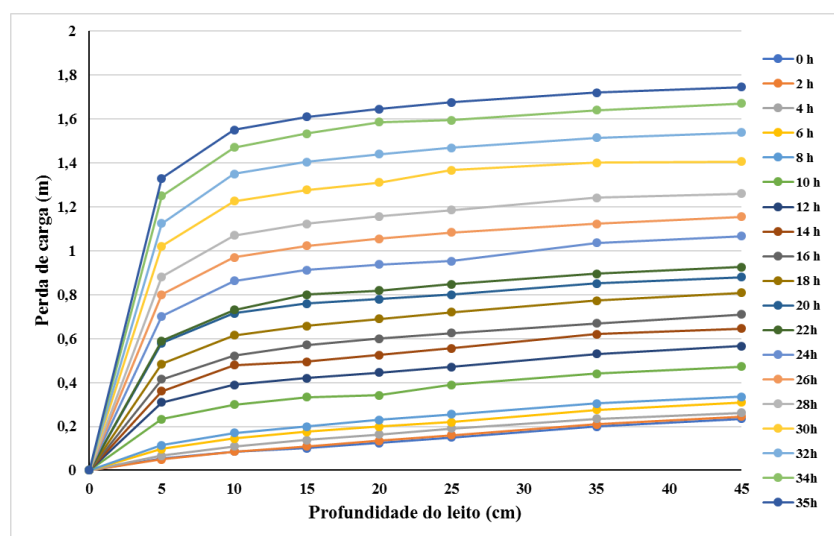


(a)

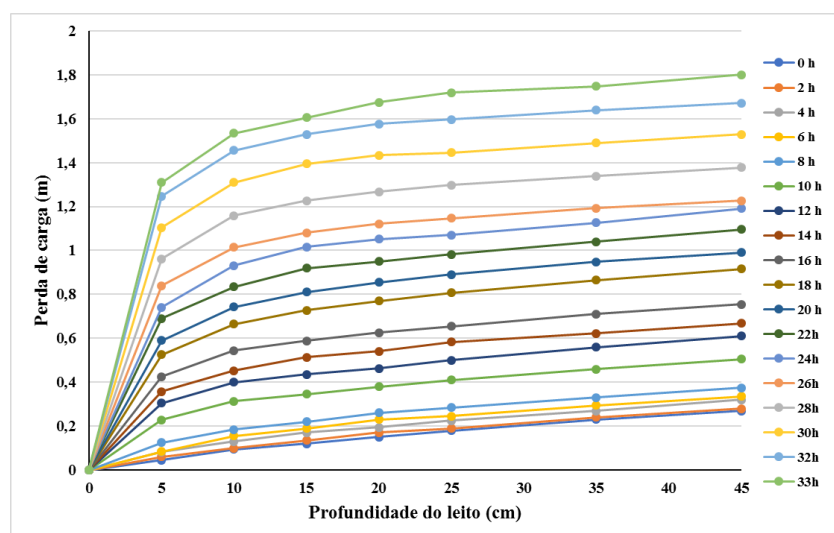


(b)

Figura A133 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 17

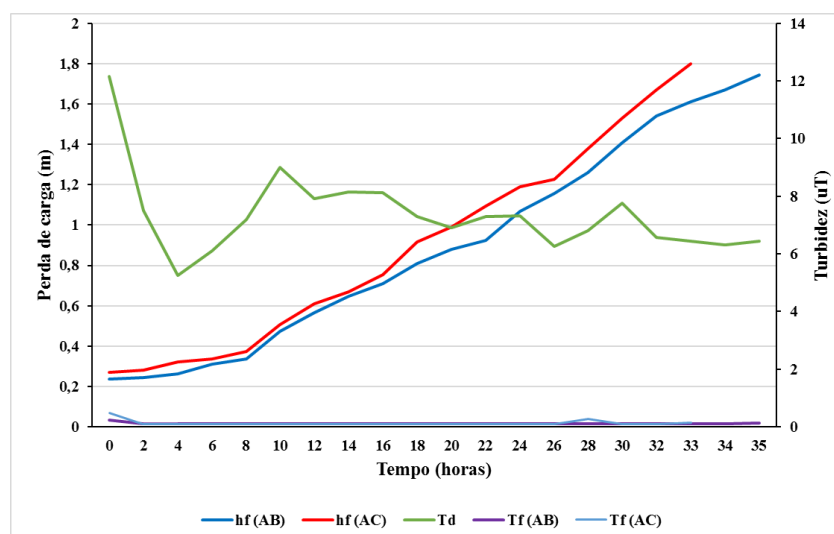


(a)



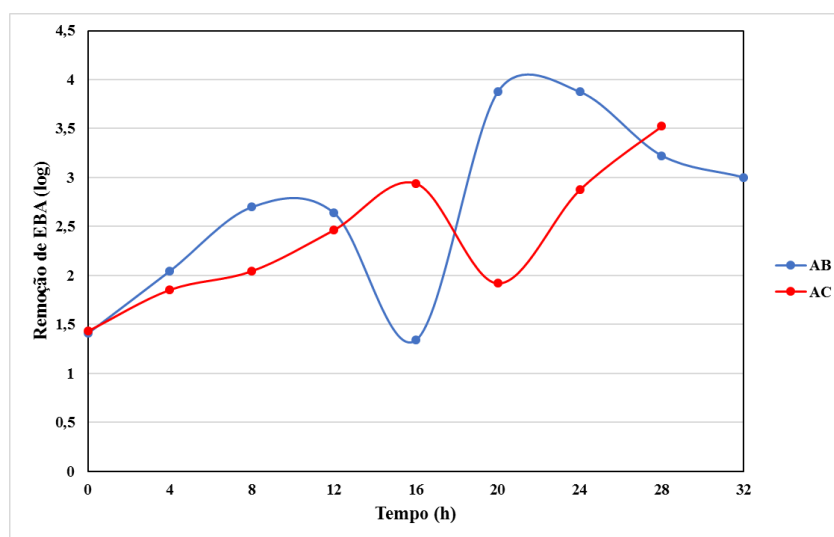
(b)

Figura A134 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 17



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A135 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 17. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional



Obs.: AC 32 extrapolou o limite de mensuração

Figura A136 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 5,5) – carreira 17

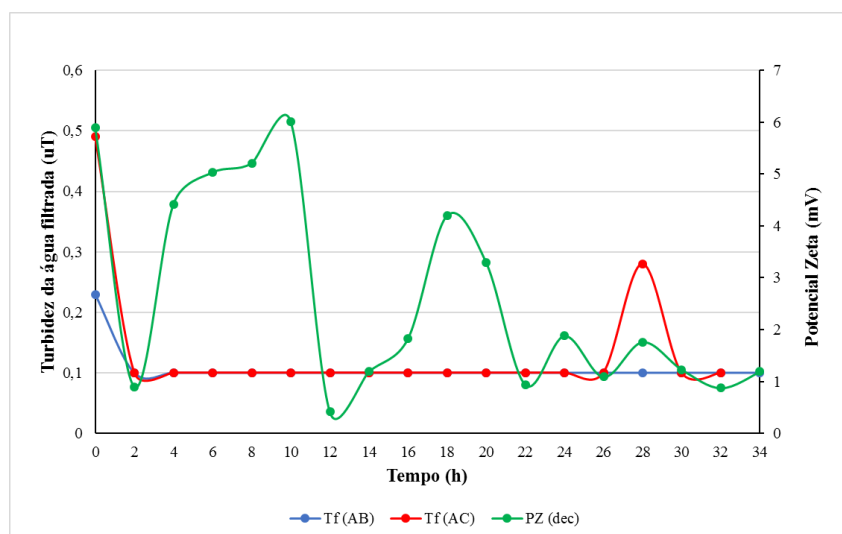
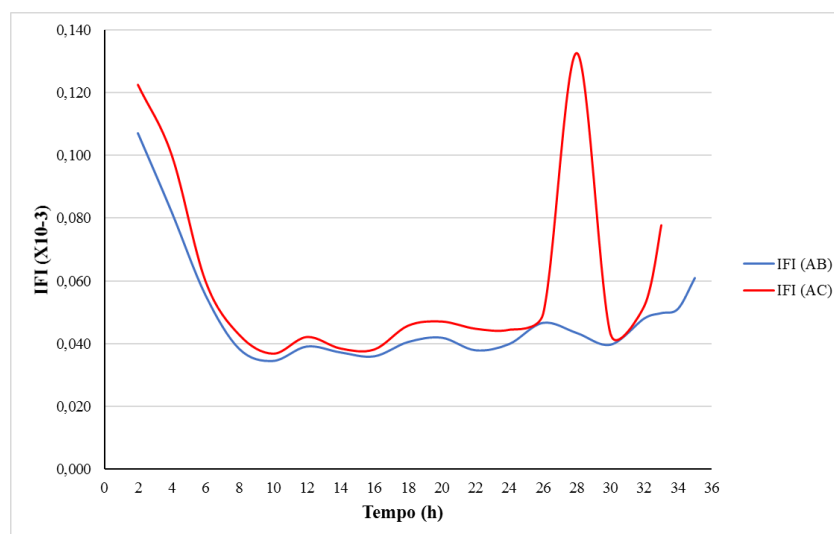
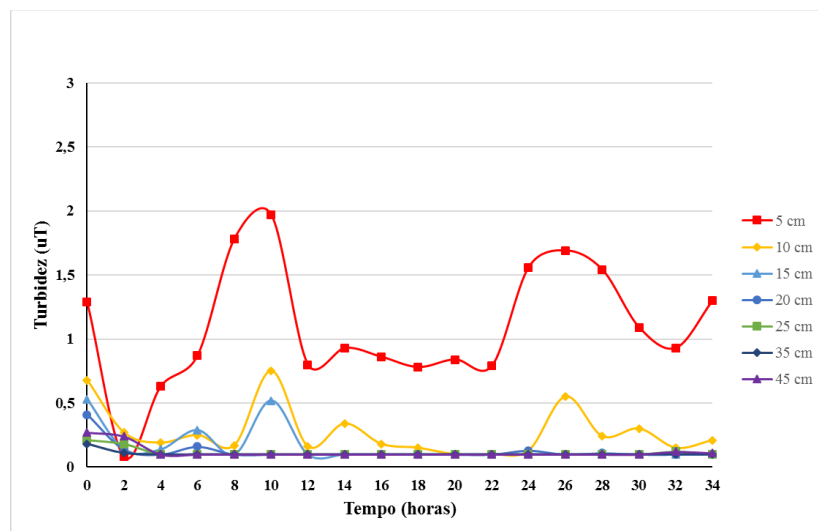


Figura A137 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 17

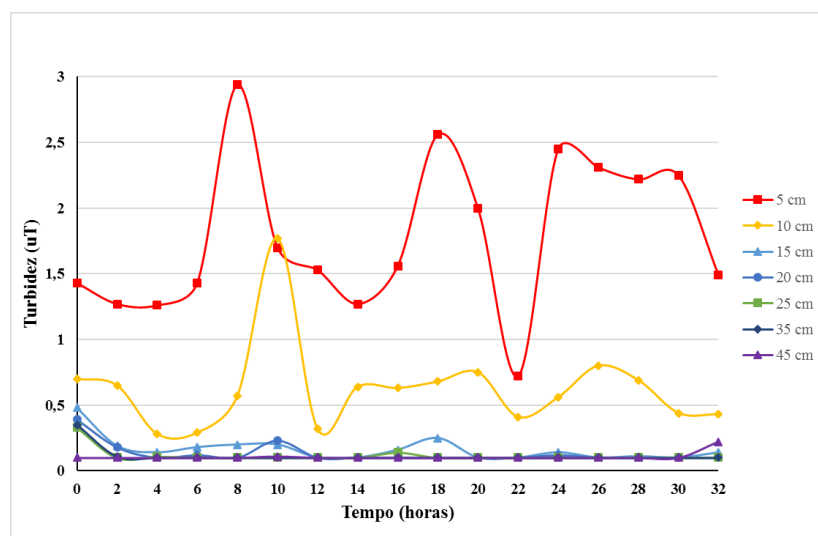


Carreira 18

Figura A138 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 18

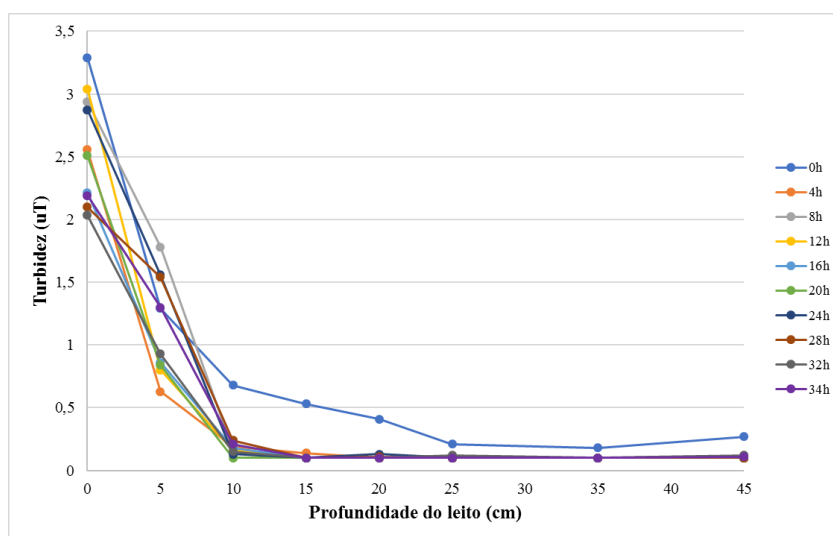


(a)

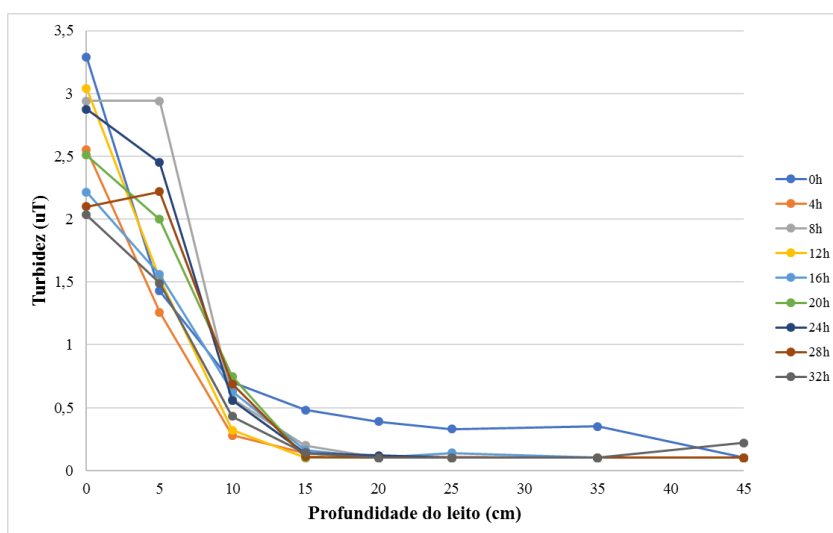


(b)

Figura A139 – Turbidez da água filtrada ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 18

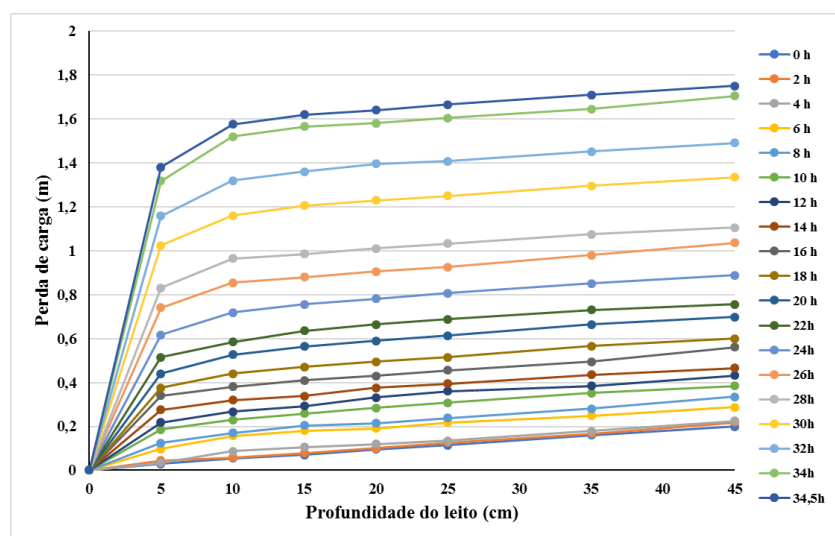


(a)

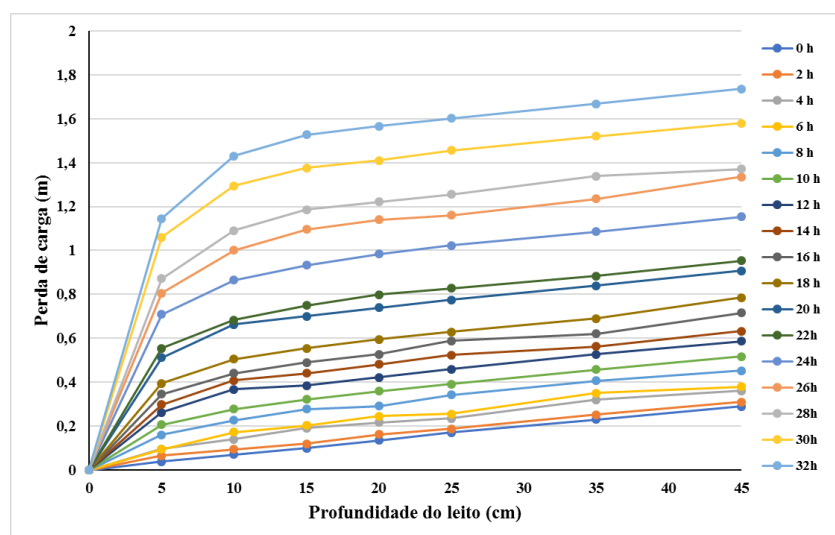


(b)

Figura A140 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 18

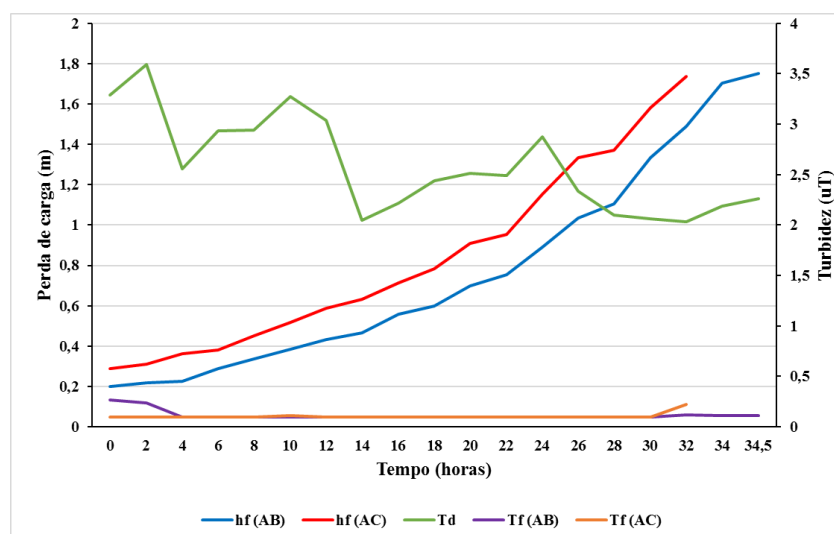


(a)



(b)

Figura A141 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 18



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A142 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 18. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

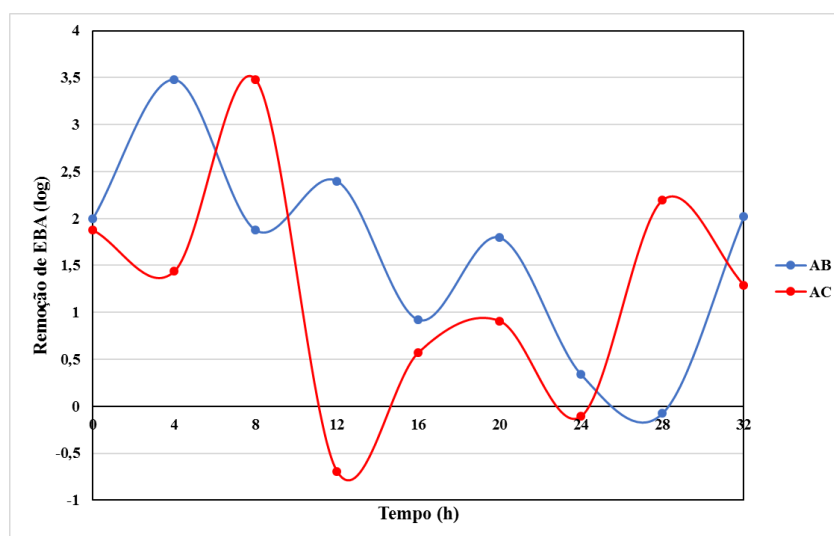


Figura A143 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 6,6) – carreira 18

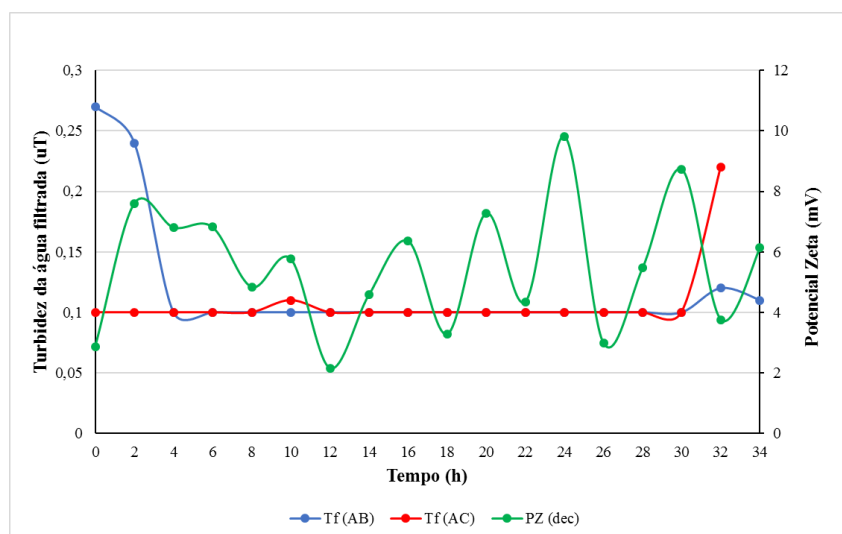
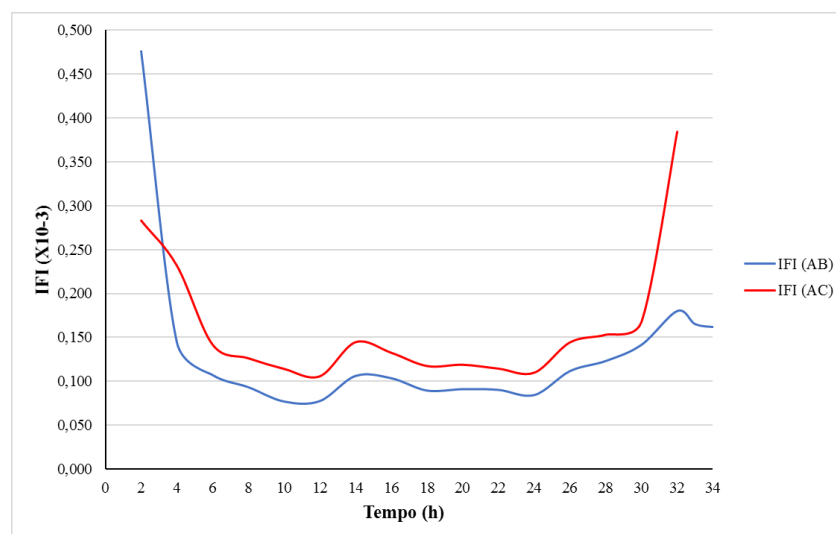
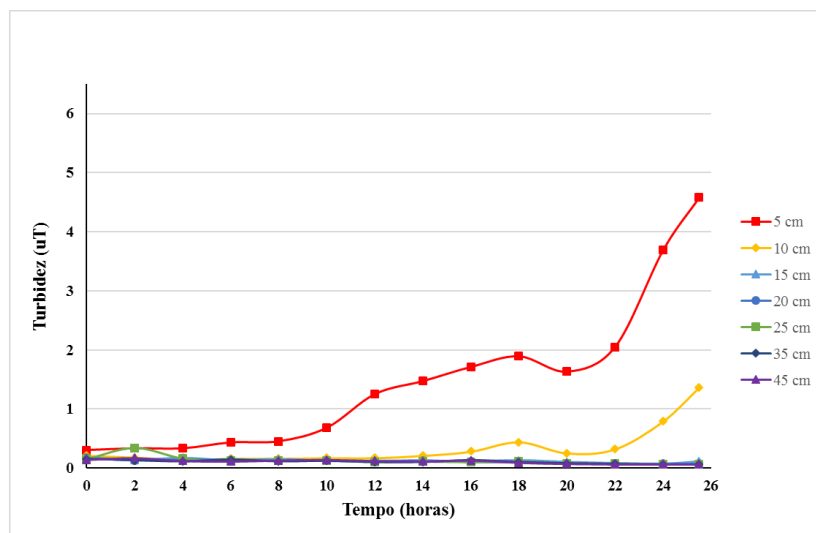


Figura A144 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 18

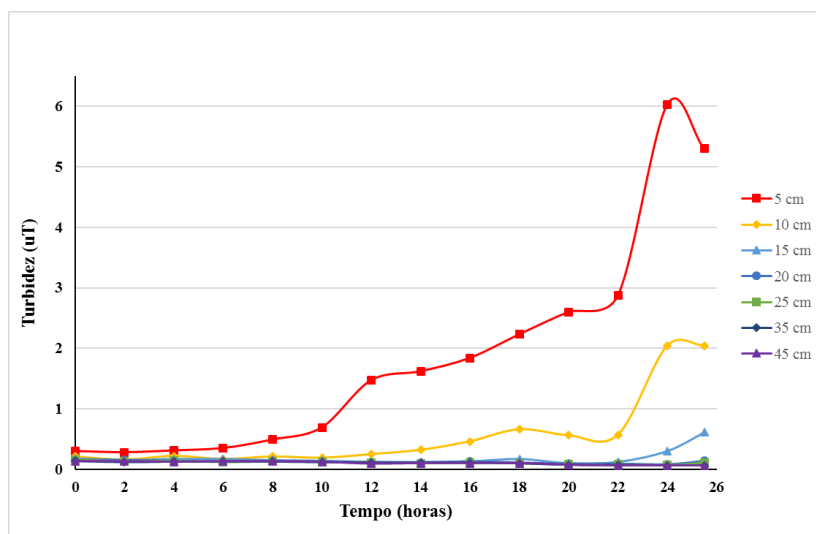


Carreira 20

Figura A145 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da carreira de filtração: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 20

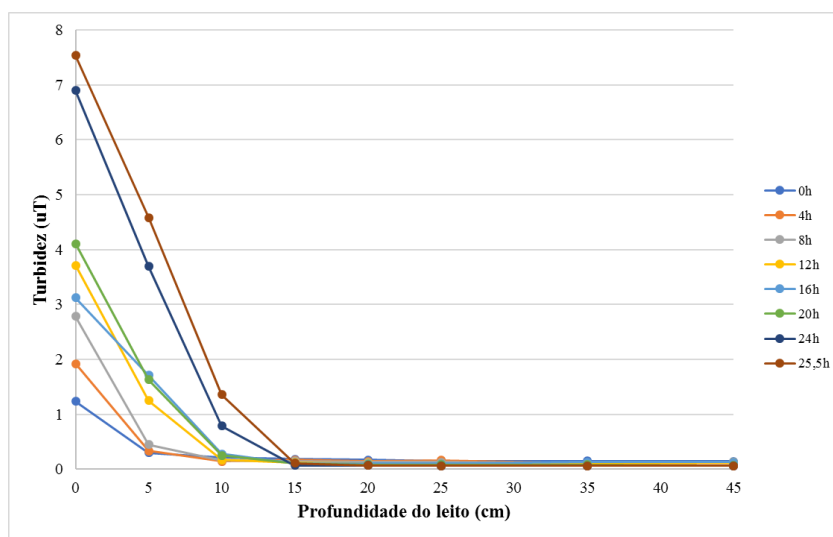


(a)

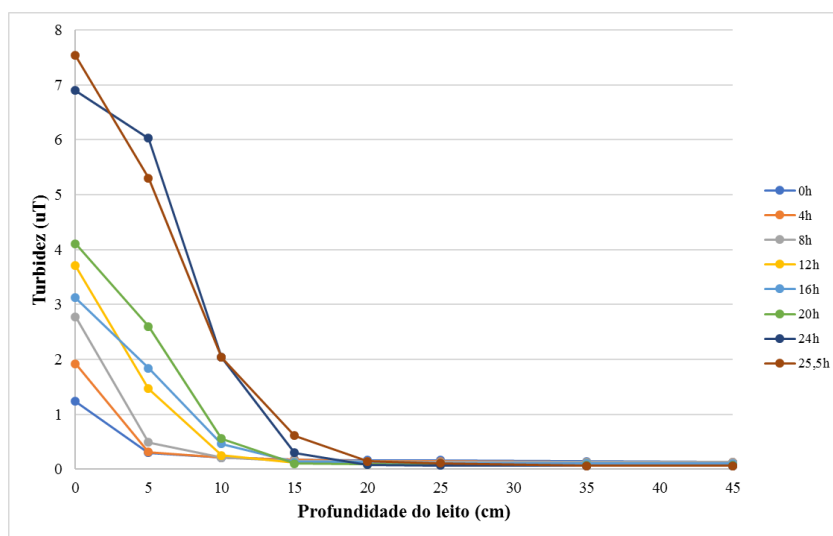


(b)

Figura A146 – Turbidez da água filtrada ao longo ao longo da profundidade dos leitos filtrantes:
(a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 20

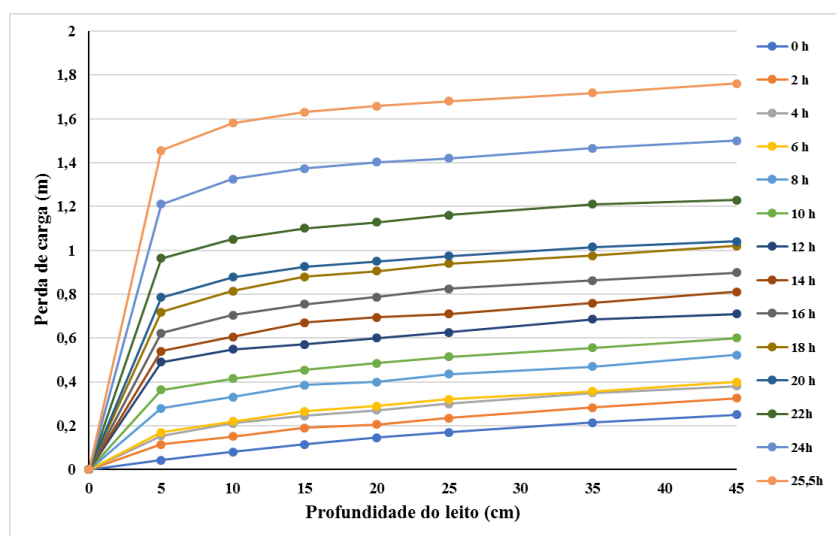


(a)

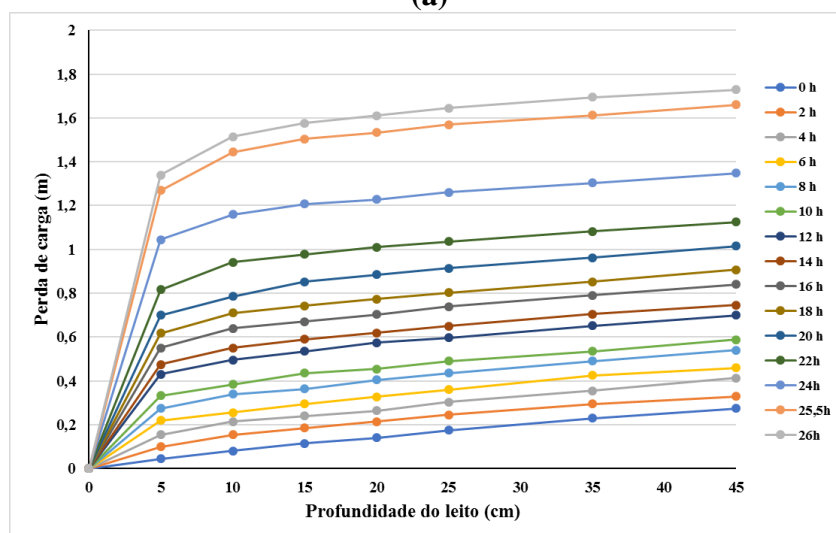


(b)

Figura A147 – Perda de carga ao longo da profundidade dos leitos filtrantes: (a) areia de britagem (b) areia convencional – Carreira 20

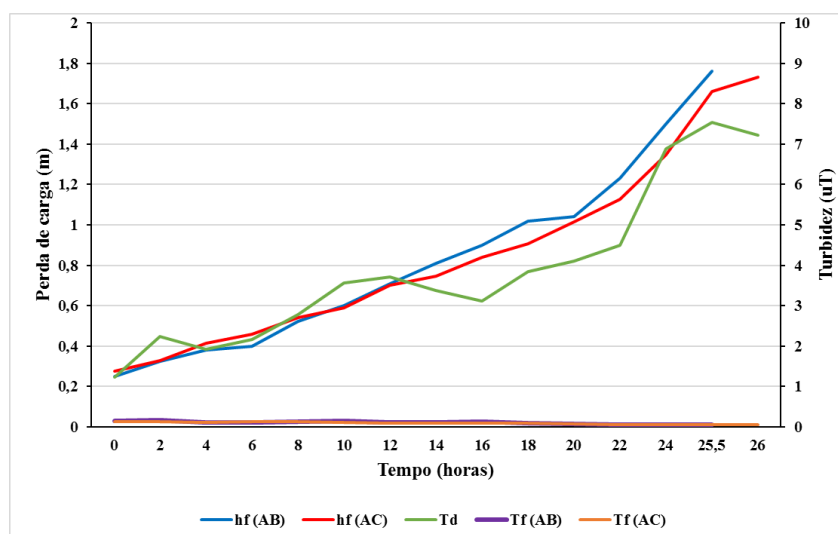


(a)



(b)

Figura A148 – Perda de carga e turbidez da água decantada e da água filtrada ao longo da carreira de filtração 20



Td = turbidez da água decantada; Tf (AB) = turbidez da água filtrada (areia de britagem); Tf (AC) = turbidez da água filtrada (areia convencional); hf (AB) = perda de carga (areia de britagem); hf (AC) = perda de carga (areia convencional).

Figura A149 – Remoção de EBA (em log) ao longo da carreira de filtração 20. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

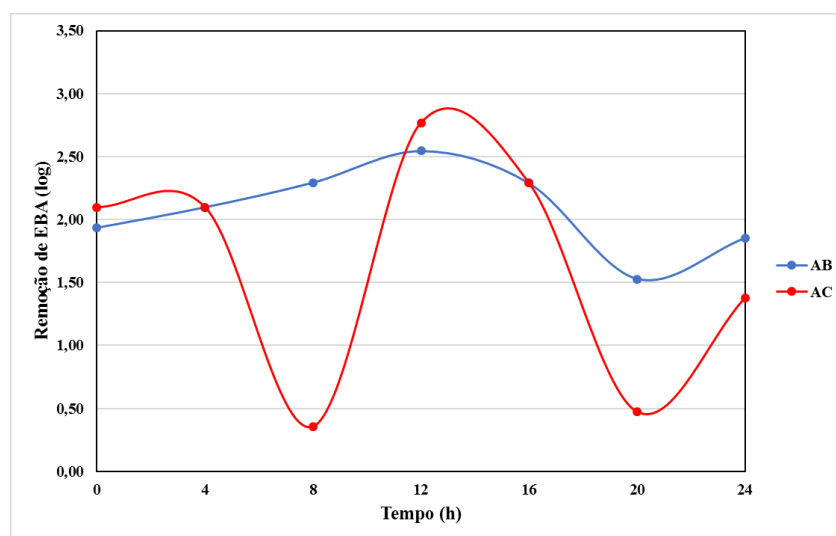


Figura A150 – Remoção de coliformes totais (em log) ao longo da carreira de filtração 20. AB = Areia de britagem e AC = Areia convencional

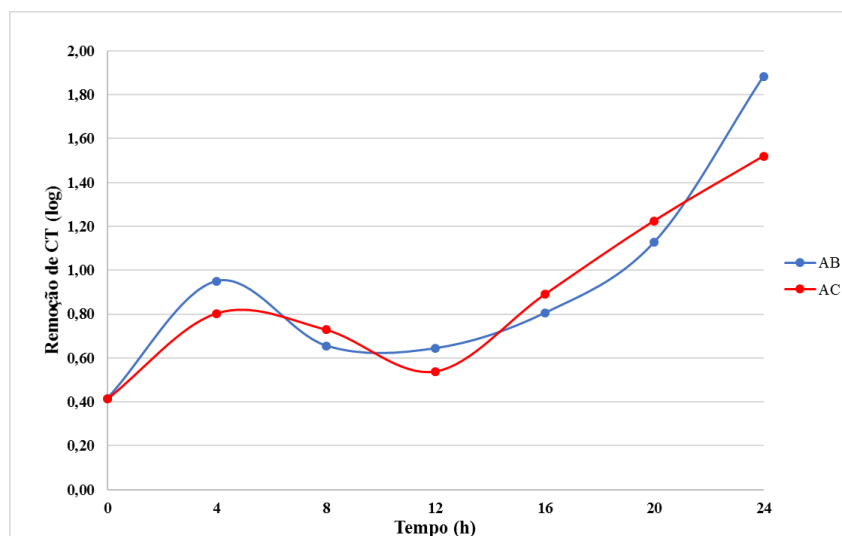


Figura A151 – Módulo do Potencial Zeta versus turbidez (pH médio = 6,9) – carreira 20

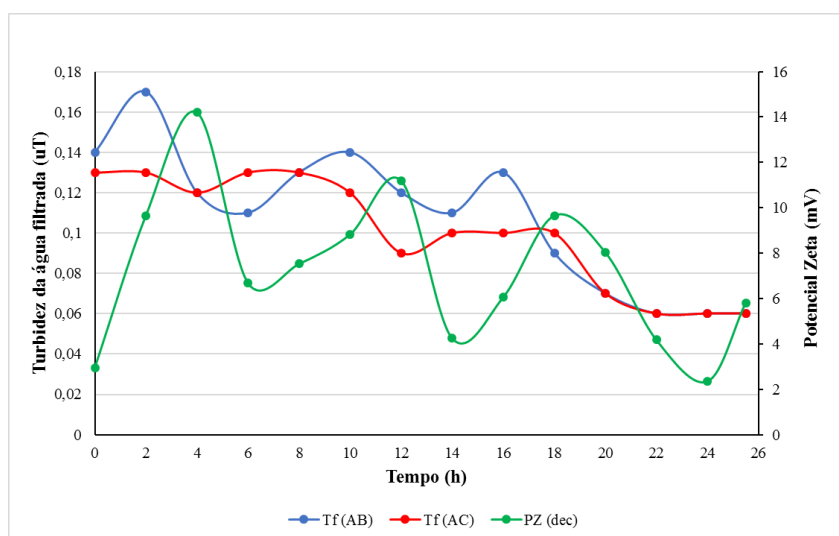


Figura A152 – Índice de filtrabilidade de Ives ao longo da carreira de filtração. AB = areia de britagem; AC = areia convencional – carreira 20

