

## I-140 - ANÁLISE DE PERDAS DE CARGA LAMINARES E TURBULENTAS EM FILTROS RÁPIDOS DE FLUXO ASCENDENTE E DESCENDENTE EM INSTALAÇÃO PILOTO DE FLUXO CONTÍNUO

### **Juliana Delgado Tinôco<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade Potiguar. Mestre em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPgES/UFRN). Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Professora do Departamento de Engenharia Civil da UFRN.

### **Ygo Magno de Araújo<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Mestrando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPgESA/UFRN).

### **Marco Antônio Calazans Duarte<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN).

### **André Luís Calado Araújo<sup>(4)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Pará. Mestre em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Doutor em Engenharia Civil pela Universidade de Leeds (Inglaterra). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN).

### **Gustavo Marques Calazans Duarte<sup>(5)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Mestre em Engenharia Sanitária pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPgES/UFRN). Professor da Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Bernardo Vieira, 4355, ap. 202 - Tirol - Natal - RN - CEP: 59015-450 - Brasil - Tel: (84) 99960-9700 - e-mail: [judeltinoco@gmail.com](mailto:judgetinoco@gmail.com)

## **RESUMO**

O estudo da perda de carga em filtros, sejam eles de fluxos ascendente ou descendente, tem fundamental importância na projeção e, principalmente, no controle operacional de tais unidades em uma estação de tratamento de água (ETA). Entretanto, sua modelação matemática de previsão ainda é, relativamente, insatisfatória devido as diversas variáveis intrínsecas no processo de eficiência da filtração, como os mecanismos de filtração, os processos de tratamento anteriores, a taxa de filtração e, sobretudo, a composição e granulometria do meio filtrante. Diante disso, este artigo traz o estudo das perdas de carga em ensaios de tratabilidade de dupla filtração realizados em uma instalação piloto de dupla filtração (IPDF), com o objetivo de avaliar a influência das granulometrias das camadas filtrantes nos filtros de escoamentos ascendente e descendente e taxas aplicadas na variação da perda de carga laminar e turbulenta com a retenção de impurezas que se interpreta na turbidez. Foram realizados quatro ensaios de 24 h de duração, onde foram testados um filtro de fluxo ascendente de pedregulho (FAP) e, em seguida, três filtros rápidos de fluxo descendente de areia (FDA) com granulometrias variadas entre si, antecedidos de pré-oxidação e coagulação, com variação das taxas de filtração de 230 e 255 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia e 310 e 340 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.dia, respectivamente. Os resultados das amostras da IPDF apresentam que o FAP teve grande eficiência na remoção de turbidez com perda de carga influenciada pelo fundo falso, já os FDA evidenciam que quanto menor a granulometria dos filtros, maiores são a eficiência de remoção de impurezas e perda de carga e menor a carreira de filtração. O FDA 3 foi escolhido devido questões operacionais, visto que as turbidezes remanescentes dos FDA eram próximas. Por fim, o aumento das taxas de filtração aplicadas conferiu crescimento da perda de carga e diminuição da remoção de impurezas e carreira de filtração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tratamento de água, Filtração rápida, Taxa de filtração, Dupla filtração.

## **INTRODUÇÃO**

A filtração é um processo de separação líquido-sólido, no qual as partículas suspensas e coloidais, responsáveis pela cor e turbidez da água, além de microrganismos, são retidos em um meio granular. A retenção dessas partículas dar-se-á por meio de mecanismos físicos e químicos, como os de transporte e aderência (DI BERNARDO, 2003; LIBÂNIO, 2010).

Na medida em que aumenta o volume de sólidos retidos, a velocidade intersticial se eleva pela diminuição da porosidade do meio, com conseqüente acréscimo da perda de carga e das forças hidrodinâmicas de cisalhamento, causando o transpasse e piora da qualidade da água tratada (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; RICHTER, 2009).

A combinação de muitos fatores torna a compreensão do fenômeno mais complexa e de difícil modelação (FERREIRA FILHO, 2017; MESQUITA et al., 2012). Segundo Di Bernardo (2003), a eficiência da filtração está relacionada às características da suspensão (tipo, tamanho, concentração e massa específica das partículas, resistência das partículas retidas pelas forças de cisalhamento, temperatura da água, potencial zeta, pH da água, etc.), do meio filtrante (tipo de material, tamanho efetivo, tamanho do maior e menor grão, coeficiente de desuniformidade, massa específica do material granular e espessura) e hidráulicas (taxa de filtração, carga hidráulica disponível e método de controle da taxa e do nível de água nos filtros).

Portanto, compreender e mensurar todos os mecanismos relacionados à perda de carga e a remoção de partículas na filtração é imperativo para seu efetivo dimensionamento e operação adequada. As equações de previsão de perdas de cargas limitam-se a aplicações em filtros limpos, sendo essencial o estudo de sua evolução. Nesse sentido, o presente estudo teve o objetivo principal de verificar o comportamento das perdas de carga laminares em um sistema piloto de dupla filtração e, paralelamente, avaliar a eficiência na retenção de sólidos.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Caracterização da água de estudo**

A parte experimental do estudo foi realizado na Instalação Piloto de Dupla Filtração (IPDF) instalada nas dependências da estação de tratamento de água (ETA) Extremoz (5°42'54"S, 35°18'26"W), zona norte da cidade do Natal-RN. A IPDF é alimentada com água bruta da lagoa de Extremoz, a qual está situada numa área de ocupação residencial e industrial com conseqüentes impactos sobre o manancial. De acordo com dados de 48 amostras coletados no período da presente pesquisa, novembro de 2017, os valores de turbidez e cor aparente, oscilaram entre valores mínimos, médios e máximos de 10,2 uT/32 uH; 14,7 uT/41 uH e 89,9 uT/105 uH, respectivamente, com desvio padrão de 6,6 para turbidez e de 7,2 para cor aparente.

### **Instalação piloto**

A IPDF é composta de reservatório de água bruta (RAB), quatro câmaras de pré-oxidação (CPOX), duas caixas de distribuição de vazão (CDV), uma câmara de mistura rápida, quatro filtros ascendentes de pedregulho (FAP), três câmaras de interoxidação (CIOX), três filtros rápidos descendentes de areia (FDA), três colunas de adsorção com carvão ativado granular (FCAG) e reservatório de água tratada (RAT). Ela dispõe ainda de seis bombas dosadoras para aplicação de coagulante, polímero, oxidante e carvão ativado pulverizado.

A IPDF permite diferentes configurações de processos de tratamento de água, tais como filtração direta, filtração direta em linha e dupla filtração, além das diferentes opções granulométricas dos filtros. Na presente pesquisa, foram avaliadas as configurações operacionais da pré-oxidação, mistura rápida, filtração ascendente em pedregulho (FAP 3) e filtração descendente em areia (FDA 1, FDA 2 e FDA 3).

### **Unidade de pré-oxidação**

As CPOX foram confeccionadas em policloreto de vinila (PVC) com diâmetro interno, altura útil e total de 300 mm, 0,85 e 0,80 m, respectivamente, para cada unidade.

### Unidade de mistura rápida

A unidade de mistura rápida foi produzida em acrílico com agitador mecânico controlado por inversor de frequência em aproximadamente 430 rpm, com comprimento, largura e altura de 0,3; 0,3 e 0,4 m, respectivamente, dispondo de volume útil de 20,00 L.

### Filtro ascendente de pedregulho (FAP) e filtros descendentes de areia (FDA)

Os filtros foram fabricados em fibra de vidro revestido com resina poliéster e, em sua superfície interna, foi adicionado uma camada de areia com grãos entre 0,60 mm e 1,00 mm, conferindo-lhes rugosidade (DUARTE, M., 2011). Eles são dotados de piezômetros - derivações em latão  $\phi 1/4"$  roscadas em buchas de PVC fixadas na parede do filtro por laminação em fibra de vidro e resina, ligadas a mangueiras em polipropileno cristal (DUARTE, G. 2018). O FAP tem seção circular, diâmetro de 200 mm, alturas útil e total de 1,85 m e 1,95 m, respectivamente, além de 6 piezômetros (P0, P1, P2, P3, P4 e P5) e possuem camadas filtrantes com espessuras de 120 cm, dividindo-se em 4 camadas com diferentes granulometrias: o fundo com 15 cm (15,9 – 25,4 mm), a segunda camada com 15 cm (9,6 – 15,9 mm), a terceira camada com 30 cm (4,8 – 9,6 mm) e o topo com 60 cm (2,4 – 4,8 mm). Os FDA possuem seção circular, diâmetro de 100 mm, alturas útil e total de 3,85 m, além de 3 piezômetros (P0, P1 e P2) e possuem camada suporte com espessuras de 35 cm (7 camadas de 5 cm) e filtrante de 70 cm dividida em 6 camadas, com diferentes granulometrias. A Tabela 1 apresenta as características das camadas filtrantes dos FDA.

**Tabela 1 – Características das camadas filtrantes dos FDA.**

Filtro	Areia	D <sub>0</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (mm)	D <sub>100</sub> (mm)	CD
FDA 1		0,3	0,50	0,81	1,0	1,62
FDA 2	Quartzoza	0,3	0,57	1,05	1,2	1,84
FDA 3		0,4	0,87	1,45	1,7	1,67

LEGENDA: D<sub>0</sub>: diâmetro do menor grão; D<sub>10</sub>: diâmetro efetivo; D<sub>60</sub>: diâmetro tal que 60% do solo, em massa, têm diâmetros menores que ele (mm); D<sub>100</sub>= diâmetro do maior grão; CD: coeficiente de desuniformidade.

Fonte: Adaptado de Duarte, G. (2018).

### Protocolo do ensaio das perdas de carga

A medição da perda de carga foi realizada mediante leitura da pressão estática nos piezômetros instalados nos filtros. Para tanto, foram realizados quatro ensaios com duração de vinte e quatro horas, sendo verificadas as pressões em intervalos de duas horas, totalizando quarenta e oito leituras.

A IPDF era alimentada com água bruta da lagoa de Extremoz que abastece o RAB de 2.500 L. Do RAB a água era recalçada, por meio de uma bomba centrífuga de eixo horizontal, para a CDV 1 e adiante para as duas CPOX em utilização. Após isso, a água era recalçada da câmara de sucção intermediária por meio de um conjunto motor-bomba para a CDV 2 (mistura rápida). Foram utilizadas tubulações independentes em PVC de 32 mm para permitir a distribuição uniforme de vazão para cada unidade de tratamento a partir da mistura rápida, com isso dava-se autonomia para escolher o processo de tratamento a ser testado devido ao paralelismo dos filtros, sendo, neste caso, a dupla filtração, a qual após passar pela CDV 2 chegava por gravidade ao FAP 3 e, em seguida, também por gravidade, aos FDA 1, 2 e 3.

A vazão e a pressão de recalque dos conjuntos motor-bomba utilizados eram controladas por inversor de frequência, os quais mostravam a rotação da operação do tratamento utilizado. Já os volumes bombeados e as vazões instantâneas de água bruta eram vistoriados por hidrômetro turbina multijato, assim como as vazões em cada processo de tratamento da IPDF eram acompanhadas por rotômetros em acrílico, com faixa de medição de 60 a 500 L.h<sup>-1</sup>.

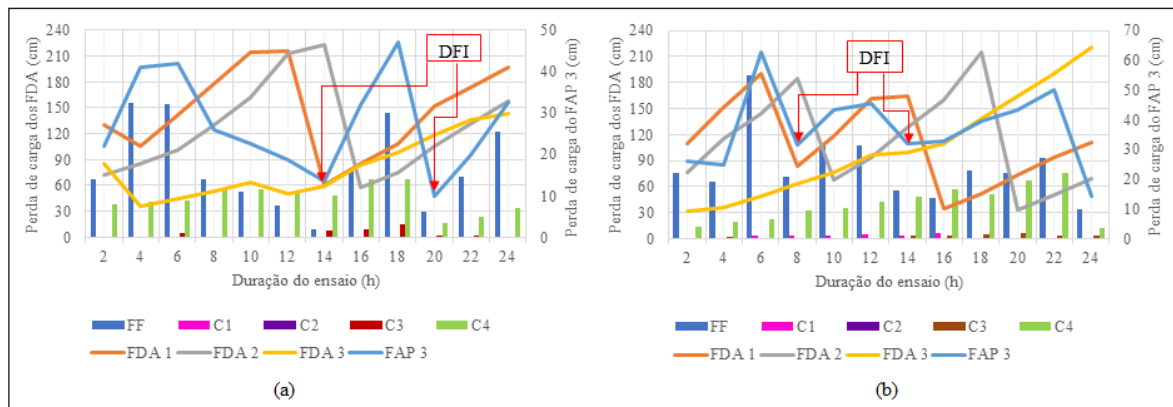
O coagulante utilizado foi o hidroxicloreto de alumínio com dose de 8 mg.L<sup>-1</sup> e a mistura rápida ocorria com gradiente de velocidade de 1.000 m.s<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>. O dicloro isocianurato de sódio foi empregado como oxidante para a pré-oxidação com dose de 3 mg.L<sup>-1</sup>. O sistema de dupla filtração foi operado com taxas constantes de filtração, sendo analisada uma taxa para o FAP de 230 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> e para os FDA de 310 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, valores obtidos previamente em pesquisa realizada por Duarte, G (2018).

A carreira de filtração era interrompida quando as perdas de carga nos filtros FAP e FDA coincidiam com as perdas de carga disponíveis de 2,32 e 2,40 m, respectivamente. A limpeza do FAP era feita através de DFI, deixando-o esvaziar, e, com água tratada em sentido ascendente, nos FDA.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Perdas de carga laminares e turbulentas no FAP 3 e suas camadas constituintes e nos FDA com taxas de filtração de $230/310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$

Na figura 1 (a e b) são apresentadas a evolução das perdas de carga laminares e turbulentas nas camadas do FAP 3, fundo falso (FF), – flange com 9 orifícios concêntricos de 4,8 mm - e camadas subsequentes com granulometrias distintas (C1, C2, C3 e C4), e dos FDA com dois ensaios (E1 e E2) para taxas de aplicação de 230 e  $310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ , respectivamente. As DFI são indicadas pelas setas.



Legenda: FF: Fundo falso; C1: Camada 1 do FAP 3; C2: Camada 2 do FAP 3; C3: Camada 3 do FAP 3; C4: Camada 4 do FAP 3; DFI: Descarga de fundo intermediária.

**Figura 1 – Variação das perdas de carga nas camadas dos filtros de fluxos ascendente de pedregulho e descendentes de areia, com taxas de filtração de  $230/310 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ . (a) Ensaio 1 (E1); (b) Ensaio 2 (E2).**

A perda de carga no FAP 3 é notoriamente inferior às proporcionadas nos FDA, fato que pode ser corroborado pela maior porosidade do meio filtrante de fluxo ascendente, em conformidade com o que foi verificado por Alcantara (2010). Em E1 e E2, respectivamente, este mesmo filtro obteve taxas médias de  $2,0$  e  $2,8 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ , com perdas de carga finais de  $47,0$  e  $62,5 \text{ cm}$  (Figura 1a e 1b). Para os mesmos ensaios, mostram que o FF com orifícios de  $0,1 \text{ mm}$  e tela de aço inox foi responsável por  $59\%$  e  $65\%$  da perda de carga do FAP 3, a qual se caracteriza como localizada, tendo valores iniciais de  $14,0$  e  $22,0 \text{ cm}$ , respectivamente. Verifica-se ainda que a perda de carga remanescente é produzida, sobretudo, na última camada, onde há os grãos de menor granulometria devido a estratificação do meio filtrante em virtude do fluxo ascendente, com valores máximos de  $14,0$  e  $22,0 \text{ cm}$ .

No E1, o FDA 1 apresentou perda de carga máxima de  $216,0 \text{ cm}$ , ocasionando o maior incremento de perda de carga entre os FDA ( $13,7 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ). O FDA 2 exprimiu comportamento parecido ao FDA 1 com aumento de  $12,5 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ , com perda de carga máxima de  $222,5 \text{ cm}$  no final da carreira de filtração. Em contrapartida, o FDA 3 exibiu o menor incremento da perda de carga ( $6,7 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ), com perda de carga máxima de  $144,0 \text{ cm}$  no final da carreira de filtração.

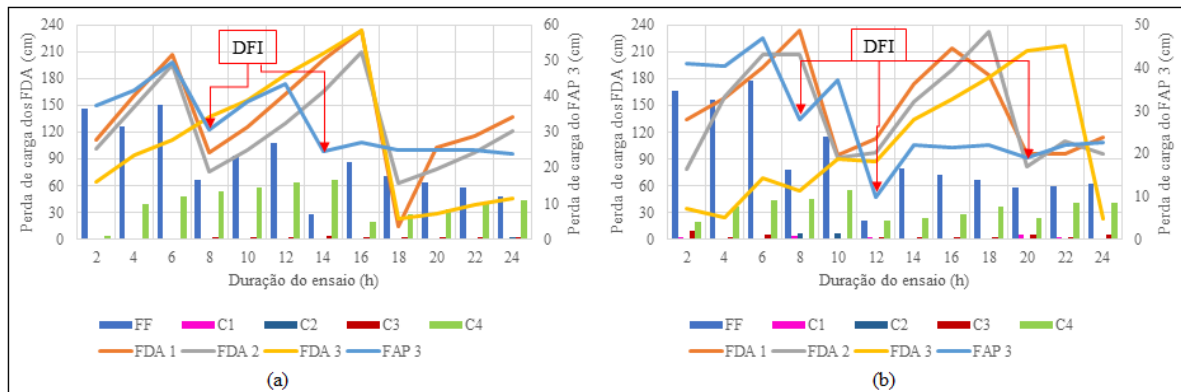
No E2, o incremento de perda de carga do FDA 1 foi de  $13,2 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ , com perda de carga máxima de  $190,0 \text{ cm}$ . Já o FDA 2 teve a maior taxa de aumento de perda de carga ( $16,2 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de  $215,0 \text{ cm}$ . Por fim, o FDA 3 apresentou menor incremento de perda de carga ( $8,6 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ), sendo sua perda de carga máxima de  $220,0 \text{ cm}$ .

As perdas de carga teóricas calculadas pela equação de Fair *et al.* (1968 apud DI BERNARDO; DANTAS, 2005) para o FDA 1, FDA 2 e FDA 3 são, respectivamente,  $43$ ,  $36$  e  $16 \text{ cm}$ , já as médias observadas para os mesmos parâmetros e filtros, em E1 e E2 são  $50$ ,  $41$  e  $29 \text{ cm}$ . Com isso, apura-se que tal equação não prevê satisfatoriamente as perdas de carga nos FDA limpos, visto que as diferenças são de  $16\%$ ;  $14\%$  e  $81\%$ , respectivamente, diferentemente de Dantas (2004), pois as diferenças são  $>10\%$ .



## Perdas de carga laminares e turbulentas no FAP 3 e suas camadas constituintes e nos FDA com taxas de filtração de 255/340 $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$

Na Figura 2 (a e b) são apresentadas a evolução das perdas de carga laminares e turbulentas nas camadas do FAP 3, FF e camadas subsequentes com granulometrias distintas (C1, C2, C3 e C4), e dos FDA com dois ensaios (E3 e E4) para taxas de aplicação de 255 e 340  $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$ , respectivamente. As DFI são indicadas pelas setas.



Legenda: FF: Fundo falso; C1: Camada 1 do FAP 3; C2: Camada 2 do FAP 3; C3: Camada 3 do FAP 3; C4: Camada 4 do FAP 3; DFI: descarga de fundo intermediária.

**Figura 2 – Variação das perdas de carga nas camadas dos filtros de fluxos ascendente de pedregulho e descendentes de areia, com taxas de filtração de 255/340  $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$ . (a) Ensaio 3 (E3); (b) Ensaio 4 (E4).**

Como constatado para taxas de filtração menores, a perda de carga no FAP 3 é notoriamente inferior à proporcionada nos FDA. Em E3 e E4, respectivamente, este mesmo filtro obteve taxas médias de 2,8 e 2,6  $cm.h^{-1}$ , com perdas de carga finais de 49,5 e 47,0 cm (Figura 2a e 2b). Para os mesmos ensaios, mostram que o FF foi responsável por 65% e 66% da perda de carga do FAP 3, a qual se caracteriza como localizada, tendo valores iniciais de 36,5 e 34,5 cm, respectivamente. Verifica-se ainda que a da perda de carga remanescente é produzida, sobretudo, na última camada, onde há os grãos de menor granulometria devido a estratificação do meio filtrante em virtude do fluxo ascendente, com valores máximos de 16,5 e 11,5 cm.

No E3, o FDA 1 apresentou perda de carga máxima de 233,5 cm, ocasionando o maior incremento de perda de carga entre os FDA (19,7  $cm.h^{-1}$ ). O FDA 2 teve aumento de perda de carga de 16,7  $cm.h^{-1}$ , com perda de carga máxima de 209,0 cm no final da carreira de filtração. Em contrapartida, o FDA 3 exibiu o menor incremento da perda de carga (9,6  $cm.h^{-1}$ ), com perda de carga máxima de 233,5 cm no final da carreira de filtração.

No E4, o incremento de perda de carga do FDA 1 foi de 18,3  $cm.h^{-1}$ , lhe conferindo maior taxa entre os FDA, com perda de carga máxima de 234,0 cm. Já o FDA 2 teve a maior taxa de aumento de perda de carga (21,3  $cm.h^{-1}$ ), finalizando a carreira de filtração com perda máxima de 232,5 cm. Por fim, o FDA 3 apresentou menor incremento de perda de carga (15,1  $cm.h^{-1}$ ), sendo sua perda de carga máxima de 217,0 cm.

As perdas de carga teóricas calculadas pela equação de Fair *et al.* (1968 apud DI BERNARDO; DANTAS, 2005) para o FDA 1, FDA 2 e FDA 3 são, respectivamente, 47, 39 e 17 cm, já as médias observadas para os mesmos, parâmetro e filtros, em E1 e E2 são 79, 58 e 19 cm. Com isso, apura-se que essa equação não prevê satisfatoriamente as perdas de carga nos FDA limpos, visto que as diferenças são de 68%; 49% e 12%, respectivamente, diferentemente de Dantas (2004), pois as diferenças são >10%.

### Turbidez da água bruta e remanescentes

A Figura 3 (a e b) exibe a turbidez da água bruta e remanescente dos filtros ascendente e descendentes durante a realização dos dois ensaios (E1 e E2) com taxas de aplicação de 230 e 310  $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$ , respectivamente.

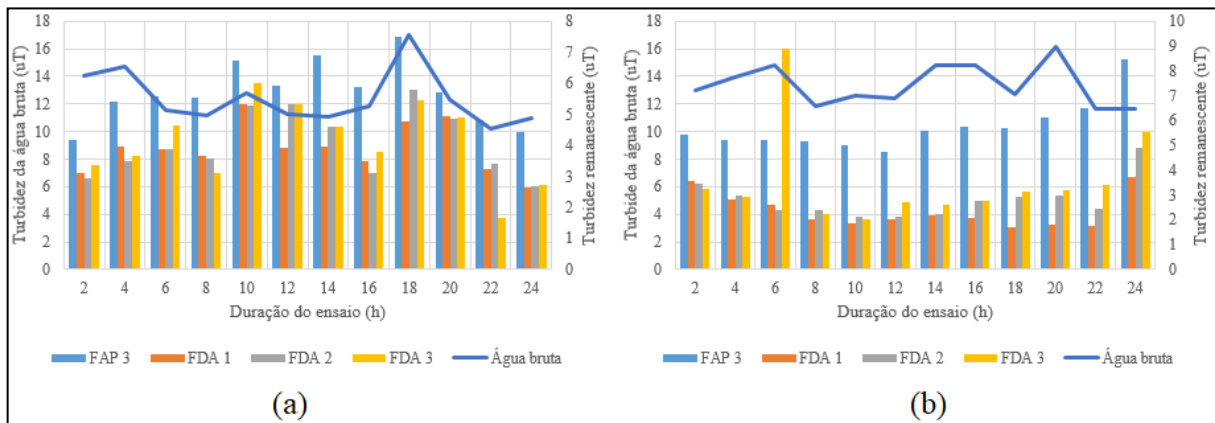


Figura 3 – Turbidez da água bruta e remanescentes dos filtros de fluxos ascendente de pedregulho e descendentes de areia, com taxas de filtração de 230/310  $m^3/m^2.dia$ . (a) Ensaio 1 (E1); (b) Ensaio 2 (E2).

No E2 (Figura 3b) percebe-se um aumento significativo na turbidez remanescente do FDA 3 na sexta hora de ensaio. Tal resultado pode ser justificado pela sobrecarga hidráulica momentaneamente antes da coleta do efluente.

A Figura 4 (a e b) exibe as turbidezes da água bruta e remanescentes dos filtros ascendente e descendentes durante a realização dos dois ensaios (E3 e E4) com taxas de aplicação de 255 e 340  $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$ , respectivamente.

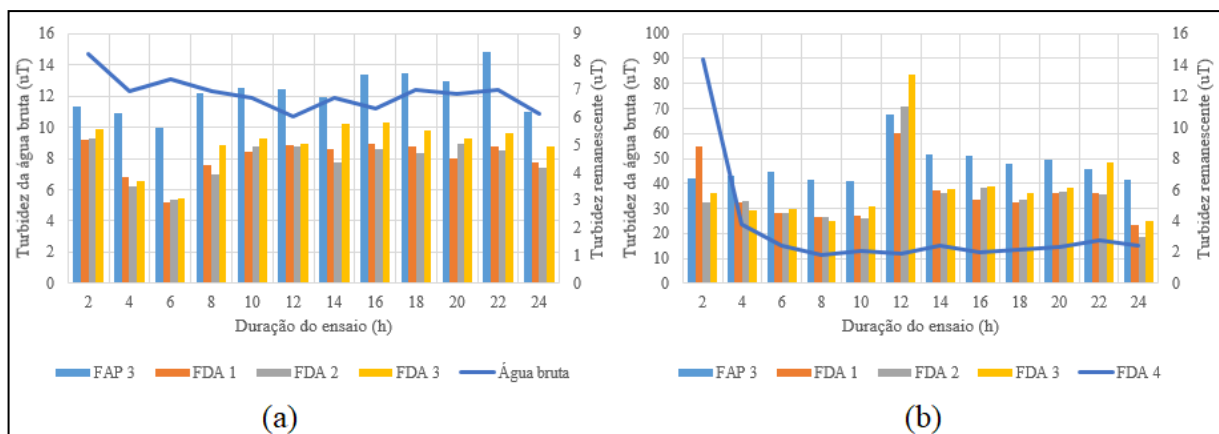


Figura 4 – Turbidez da água bruta e remanescentes dos filtros de fluxos ascendente de pedregulho e descendentes de areia, com taxas de filtração de 255/340  $m^3.m^{-2}.dia^{-1}$ . (a) Ensaio 3 (E3); (b) Ensaio 4 (E4).

No E4 (Figura 4b), nas duas primeiras horas iniciais do ensaio, a água bruta apresenta a maior turbidez registrada de todo o estudo, 89,90 uT. Esse valor deve-se a formação de algas na câmara de sucção do conjunto motor-bomba advindas do afluente e, conseqüentemente, a adução de partículas coloidais. As Tabelas 2, 3 e 4 resumem os valores obtidos durante todos os ensaios.

**Tabela 2 – Valores mínimos, médios e máximos da turbidez remanescente nos efluentes do FAP 3 e dos FDA para as taxas de filtração de 230/310 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E1 e E2) e 255/340 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E3 e E4).**

		Turbidez remanescente (uT)			
Ensaio	Filtro	Mínimo	Média	Máximo	Desvio padrão
1	FAP 3	4,18	5,71	7,50	0,99
	FDA 1	2,65	3,91	5,31	0,78
	FDA 2	2,67	4,07	5,80	1,05
	FDA 3	1,67	4,10	6,02	1,27
2	FAP 3	4,75	5,74	8,49	0,99
	FDA 1	1,68	2,35	3,72	0,69
	FDA 2	2,14	3,81	4,87	0,76
	FDA 3	2,00	3,55	8,87	1,89
3	FAP 3	5,62	6,88	8,33	0,75
	FDA 1	2,91	4,54	5,17	0,64
	FDA 2	3,02	4,45	5,20	0,67
	FDA 3	3,05	5,02	5,80	0,83
4	FAP 3	6,56	7,56	10,80	1,19
	FDA 1	3,78	5,71	9,60	1,76
	FDA 2	2,98	5,54	11,30	2,02
	FDA 3	4,01	6,13	13,40	2,52

**Tabela 3 – Turbidez da água bruta nos ensaios de 24 h.**

Turbidez da água bruta (uT)				
Ensaio	Mínimo	Média	Máximo	Desvio padrão
1	10,20	12,41	17,00	1,94
2	11,60	13,34	16,10	1,50
3	10,70	12,16	14,70	1,06
4	11,15	21,08	89,90	21,92

**Tabela 4 – Desempenho do FAP 3 e dos FDA para as taxas de filtração de 230/310 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> (E1 e E2) e 255/340 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>.**

Remoção média (%)				
Ensaio	FAP 3	FDA 1	FDA 2	FDA 3
1	53	15	14	13
2	56	26	22	21
3	43	19	20	15
4	50	14	14	13

A Tabela 2 mostra que a turbidez remanescente nos filtros esteve quase sempre acima de 2,00 uT, sendo superiores aos estabelecidos para os padrões de potabilidade (BRASIL, 2017). O FAP 3 obteve o melhor desempenho de remoção, 53%, e o aumento da taxa de filtração afeta seu desempenho, diminuindo-o. Na Tabela 4 verifica-se que o FDA 1 tem uma melhor eficiência na remoção das impurezas, resultando, geralmente, nas menores turbidez remanescentes. O FDA 2 (E3) e o FDA 1 (E4), têm as melhores eficiências na remoção das impurezas, o que resulta nas menores turbidez remanescentes. Entretanto, tais eficiências são relativamente equivalentes.

A analogia da evolução das perdas de carga de cada filtro nos quatro ensaios faz perceber que as DFI no FAP 3 tem pouca relação com a turbidez remanescente, pois, ao contrário do que é esperado, a perda de carga diminui e os valores de turbidez remanescente logo após a sua execução aumenta, sendo destaque os valores em 14 h no E2 e em 12 h no E4, ocorrendo o maior valor para este parâmetro e o menor para a perda de carga, 10,80 uT e 10,0 cm, respectivamente. O aumento da taxa de filtração de 230 para 255  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  afeta o desempenho de remoção das partículas, resultando na diminuição da eficiência do FAP 3.

No FDA 1, para todos os ensaios, é observada a diminuição da carreira de filtração com o aumento da velocidade de aproximação e, também, o aumento da perda de carga, resultando no acréscimo de turbidez remanescente. Vale salientar que mesmo com a queda abrupta da perda de carga no E3 após a lavagem em 18 h a turbidez não sofre, praticamente, interferência. Nota-se que no fim dos ensaios, a partir das 20 h, a perda de carga se torna paralela nos quatro ensaios. A mudança da taxa de filtração de 310 para 340  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  ocasiona a diminuição da remoção das partículas.

A redução da carreira de filtração, incremento da perda de carga e aumento da turbidez remanescente no FDA 2 é ocasionada pela elevação da velocidade de aproximação, ou seja, sua eficiência diminuiu. Para a amostra em 12 h do E4, observou-se que ocorre a menor eficiência de remoção deste filtro. Outra notoriedade é o paralelismo da evolução das perdas de carga desse filtro nos ensaios.

Para o FDA 3 constata-se que só houveram lavagens do meio filtrante nos ensaios com taxa de filtração de 340  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ , o que aponta aumentos da perda de carga e turbidez remanescente e diminuição da carreira de filtração.

Os dados das amostras de 12 h (turbidez remanescente) em todos os FDA sofreram picos após o máximo observado no FAP 3, o que indica a interferência e sensibilidade nos valores dos parâmetros analisados.

As carreiras de filtração média para o FDA1, FDA 2 e FDA 3 foram de 10 h, 10 h e 24 h, respectivamente, para a taxa de filtração de 310  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  e houve redução para 8 h, 8 h e 22 h, respectivamente, para a taxa de filtração de 340  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ .

## CONCLUSÕES

A partir dos resultados expostos, foi possível observar que a variação da granulometria do meio filtrante interferiu no acréscimo da perda de carga, isto é, quanto menor os grãos do leito filtrante, o incremento da perda de carga foi maior e, conseqüentemente, houve a redução da carreira de filtração, já o aumento da granulometria implicou em um menor crescimento da perda de carga e, portanto, a carreira de filtração foi maior.

A mudança das taxas de filtração afetou diretamente a perda de carga, remoção de impurezas e carreira de filtração. Foi constatado que o aumento das taxas de filtração no filtro ascendente de pedregulho e nos filtros descendentes de areia de 230/310  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  para 255/340  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ , respectivamente, acresceu a perda de carga e diminuiu a eficiência da remoção de partículas analisadas na turbidez e carreira de filtração.

O filtro ascendente de pedregulho teve fundamental importância na remoção de partículas, pois o mesmo foi responsável pela maior eficiência da diminuição da turbidez, além disso, foi o filtro com granulometria mais adequada levando-se em conta aspectos operacionais, como a perda de carga e carreira de filtração.

A descarga de fundo intermediária foi pouco efetiva no que tange à diminuição da turbidez remanescente, visto que foi constatado o aumento deste parâmetro logo após sua execução, provavelmente pelo desprendimento de flocos devido à turbulência ocorridas durante a operação.

A análise da turbidez remanescente, tanto no filtro ascendente de pedregulho quanto nos filtros descendentes de areia, revela que a técnica de dupla filtração empregada nos quatro ensaios efetuados em novembro de 2017 para a água da lagoa de Extremoz não se mostrou eficiente, pois nenhuma amostra obteve turbidez remanescente <0,5 uT, como preconiza a Portaria de Consolidação nº 5 (BRASIL, 2017).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALCANTARA, F. J. V. Estudo comparativo de dois leitos filtrantes com porosidade distintas em sistemas de dupla filtração para tratamento de água. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, 2010.
2. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5/2017, de 28 de setembro de 2017. Dispõe sobre a consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília, 2017.
3. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2 ed. São Carlos: Rima, 2005.
4. DI BERNARDO, L. Tratamento de água para abastecimento por filtração direta. 1 ed. Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2003.
5. DUARTE, G. M. C. Simulação em instalação piloto da adequação de ETA convencional para dupla filtração. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2018.
6. DUARTE, M. A. C. Tratamento de água para consumo humano de reservatório eutrofizado através de pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.
7. FERREIRA FILHO, S. S. Tratamento de água: Concepção, projeto e operação de estações de tratamento. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
8. LIBÂNIO, M., Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3 ed. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010.
9. MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; RAMIREZ, J.C.S.; DE DEUS, F.P.; BIZARI, D.R. Simulação matemática da perda de carga em camadas porosas de filtros de areia. In: Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação, 4., 2012, Fortaleza. Anais... Fortaleza: CENTEC, 2012, p. 2.
10. RICHTER, C.A. Água: Métodos e tecnologia de tratamento. São Paulo: Blucher, 2009.