

artigos técnicos

Avaliação da Filtração Direta Ascendente em Pedregulho para Tratamento das Águas da Barragem "Duas Unas", na Região Metropolitana do Recife

Assessment of the Upflow Direct Gravel Filtration on "Duas Unas" dam waters, in the metropolitan region of the city of Recife

Paulo Tadeu Ribeiro de Gusmão

*Engenheiro Civil. Diploma Delft em Engenharia Sanitária/ IHE-Delft.
Doutor em Hidráulica e Saneamento / EESC-USP.
Professor Adjunto da UFPE.*

Adriana Pereira Pinto

*Engenheira Civil. Mestre em Engenharia Civil / UFPE.
Endereço: Rua Abel de Sá Bezerra Cavalcanti, 85/702, Casa Amarela,
CEP 52051-570, Recife-PE; ptgusmao@ufpe.br
Recebido: 20/01/2010 - Aceito: 01/04/2010*

RESUMO

A filtração direta ascendente em pedregulho (FDAP) foi avaliada para tratamento das águas da barragem Duas Unas (Região Metropolitana do Recife). Na investigação experimental a turbidez da água bruta variou entre 13 e 51 uT e a cor aparente entre 70 e 260 uH, as taxas de filtração variaram entre 38 e 195 m³/m².dia, sendo realizados ensaios com e sem descargas de fundo intermediárias (DFI); nessas condições operacionais o efluente da FDAP não apresentou continuamente efluente com turbidez ≤ 1 uT e cor aparente ≤ 15 uH. Os resultados obtidos sugerem sua utilização apenas como unidade de filtração preliminar, operando sob taxas de filtração inferiores a 86 m³/m².dia, em sistema de dupla filtração. A dosagem do coagulante (sulfato de alumínio) foi determinada com auxílio de filtro de laboratório de areia. As DFI foram eficazes na redução da perda de carga no meio granular do filtro.

Palavras-chave: Tratamento de água; Filtração direta ascendente em pedregulho

ABSTRACT

This work was carried out in order to evaluate the performance of the upflow direct gravel filter in drinking water treatment systems, using raw water from Duas Unas dam (northeast of Brazil). Turbidity and apparent color in raw water varied from 13 to 51 NTU and from 70 to 260 UH. Filter runs were performed under filtration rates varying from 38 to 195 m³/m².day. In some of them, intermediate down flushes were performed in the upflow filter. In these filter runs water with turbidity ≤ 1 NTU and apparent color ≤ 15 UH was not continuously produced on the upflow filter. The use of upflow direct gravel filtration is recommended as a pretreatment in double filtration systems, when filtration rates were lower than 86 m³/m².day. Coagulant (aluminium sulphate) doses were determined by using a bench-scale sand filter. Intermediate down flushes have reduced headloss in the gravel layers significantly.

Key words: Drinking water treatment; Upflow direct gravel filtration

1. INTRODUÇÃO

A barragem Duas Unas, situada na Região Metropolitana do Recife (RMR), em Pernambuco, no Nordeste do Brasil, é um dos mananciais que abastecem a ETA Castello Branco (do tipo ciclo completo), uma das principais estações de tratamento de água do sistema de abastecimento de água da RMR. A filtração direta é a tecnologia de tratamento não-convencional de águas de abastecimento constituída, apenas, pelas unidades de coagulação, floculação (eventualmente)

e filtração; não contando, portanto, com unidade de sedimentação. Na Região Nordeste do Brasil, onde ocorrem diversas captações em açudes, que funcionam como decantadores naturais, a qualidade da água bruta parece favorecer o emprego da tecnologia de filtração direta. Pernambuco é um dos estados nordestinos em que essa tecnologia é muito utilizada pela companhia estadual de saneamento para produção de águas para abastecimento público. Nas estações de tratamento em que a tecnologia da filtração direta é utilizada para produção de água potável, a filtração ascendente em pedregulho pode ser utilizada como única unidade de filtração, ou como unidade de filtração preliminar antecedendo uma unidade de filtração rápida descendente, constituindo uma das variantes da dupla filtração (PROSAB, 2003). A investigação experimental que embasa este trabalho foi realizada com o objetivo de avaliar o desempenho da filtração direta ascendente em pedregulho para tratamento das águas da barragem Duas Unas. A investigação experimental, realizada no período novembro/2002 a julho/2004, foi coordenada pelo Grupo de Saneamento Ambiental do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

2. METODOLOGIA

2.1. A Instalação Piloto

A instalação piloto na qual foi realizada a investigação experimental foi montada na ETA Pres. Castello Branco, sendo constituída por: sistema de alimentação com água bruta, sistema de coagulação e unidade de filtração direta ascendente em pedregulho (filtro FDAP), conforme esquema apresentado na Figura 1.

O sistema de alimentação com água bruta

Ao trecho final da adutora que interliga a barragem Duas Unas à ETA Pres. Castello Branco, foi conectada tubulação em PVC, com 15 m de extensão e 50 mm de diâmetro. Por meio dessa tubulação a água bruta atingia uma caixa de distribuição (CD) instalada acima da unidade de filtração (filtro FDAP), havendo desnível de 1,68 m entre o nível de água máximo nessa caixa e o nível de água máximo no interior do filtro. Acopladas à caixa CD havia a caixa A e a caixa B. Durante os ensaios de filtração a água bruta afluente à caixa CD vertia para a caixa A através de orifícios perfurados na parede divisória entre ambas. Da caixa A, a água bruta escoava, por gravidade, através de tubulação de PVC com 75 mm de diâmetro, até o filtro FDAP. O excesso de água bruta afluente à caixa CD extravasava para a caixa B por meio de vertedor retangular existente no topo da parede divisória entre as caixas CD e B e dali, através de tubulação extravasora, alcançava a rede de drenagem de águas pluviais da ETA. Por meio desse vertedor retangular era mantido aproximadamente constante o nível de água na caixa CD e, conseqüentemente, a carga hidráulica sobre os orifícios da parede divisória entre as caixas CD e A.

O sistema de coagulação

Como coagulante foi utilizada solução comercial denominada Sulfato de Alumínio Líquido Ferroso, fabricada por Aluminal Química do Nordeste Ltda., cujas características, fornecidas pelo fabricante, são as seguintes: alumínio total solúvel em água: 7,70 % (em massa, como Al₂O₃); ferro total solúvel em água: 0,90 % (em massa, como Fe₂O₃); resíduo insolúvel em água: 0,0 % (em massa); basicidade livre: 0,06

% (em massa, como Al_2O_3). Essa solução comercial apresentou massa específica entre 1.323 e 1.333 g/L ao que, de acordo com informações do fabricante, correspondem concentrações de 658,5 g e 666,5 g de sulfato de alumínio comercial sólido/L da solução comercial, respectivamente. A solução estoque do coagulante foi preparada com água filtrada fornecida pela ETA e armazenada no tanque T1 (200 L de capacidade). Foram utilizados de 1,125 a 1,131 L da solução comercial de sulfato de alumínio (SOC) para cada 100 L da solução estoque (SE), do que resultou concentração de aproximadamente 14.980 mg SOC/LSE, à qual corresponde pAl_1 igual a 1,9; valor em que há predominância (72 %) de alumínio na forma $Al(H_2O)_6^{3+}$ ou Al^{3+} (DI BERNARDO, 1993). Com relação à mistura rápida, procurou-se fazer com que a solução do coagulante e a água bruta fossem misturadas sob gradiente de velocidade bastante elevado e tempo de mistura muito curto, condições desejáveis para o mecanismo de adsorção e neutralização de carga, o qual é considerado ideal quando a água coagulada será posteriormente submetida a filtração direta (AMIRTHARAJAH & MILLS, 1982, AMIRTHARAJAH, 1989). Para aplicação da solução coagulante foram utilizadas uma bomba dosadora (BD) e um injetor do tipo reator tubular, constituído por um tubo metálico com diâmetro interno de 3 mm, através do qual a solução coagulante era injetada no interior da tubulação de água bruta, na forma de um único jato central, intermitente e paralelo ao eixo da canalização, no sentido contrário ao do escoamento da água. Com o objetivo de intensificar a mistura rápida, foi intercalada uma bomba centrífuga (B1) na tubulação de água bruta (Figura 1). Nos cinco primeiros ensaios de filtração (E01 a E05) a solução do coagulante foi injetada na tubulação de sucção e nos demais ensaios (E06 a E13) na tubulação de recalque da bomba B1. Na tubulação de recalque da bomba B1, logo após o local onde o injetor foi inserido, foi instalada uma derivação, para retorno até a tubulação de sucção, de parte da vazão recalçada, de modo a promover, não só maior mistura do coagulante com a água bruta, como também, possibilitar funcionamento mais adequado para o conjunto elevatório. Para determinação da dosagem inicial do coagulante e para definição de ajustes de dosagem durante os ensaios de filtração foi utilizado filtro de laboratório de areia (FLA). Esse dispositivo permite rápidos ajustes e indicação precisa da dosagem apropriada, sempre que ocorrerem variações significativas na turbidez da água bruta durante cada ensaio de filtração (GUSMÃO, 2001; DI BERNARDO et al., 2002 e PINTO, 2006).

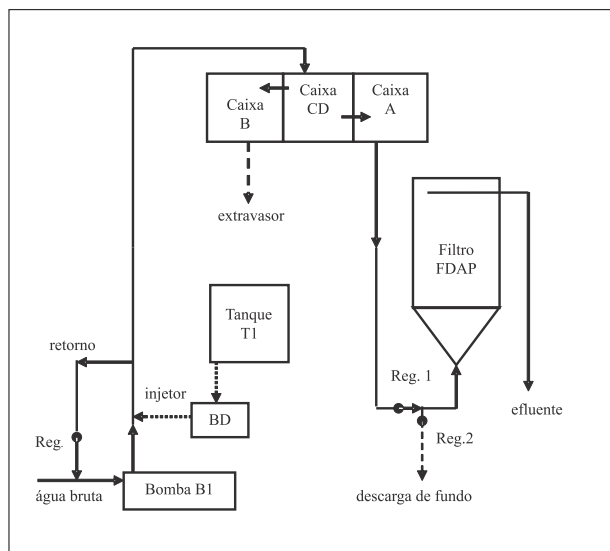


Figura 1 – Esquema da Instalação Piloto

O FLA era constituído por tubo de PVC com diâmetro interno de 21 mm e altura de 25 cm, sendo seu meio filtrante de areia fina (tamanhos dos grãos de 0,28 a 0,32 mm) com espessura de 15 cm. Para determinação da dosagem do coagulante, a água coagulada era extraída da tubulação de alimentação do filtro FDAP e conduzida até o FLA por meio de

tubo flexível de silicone, em cuja extremidade de jusante foi instalada torneira metálica cirúrgica, para ajustes na vazão afluyente e, portanto, na taxa de filtração no FLA. Eram consideradas apropriadas as dosagens que resultavam na produção de efluente filtrado com turbidez ≤ 1 uT, após 30 min de filtração (DI BERNARDO, 1993; DI BERNARDO et al., 2000), sob taxa de filtração de 50 a 70 m^3/m^2 .dia (GUSMÃO, 2001).

A unidade de filtração direta ascendente em pedregulho (filtro FDAP)

O filtro FDAP foi construído em fibra de vidro, com altura de 2,55 m e diâmetro de 0,55 m. Seu meio granular era constituído por cinco camadas de pedregulho, conforme a Tabela 1.

camada	espessura (cm)	tamanho dos grãos (mm)
superior	30	4,8 a 2,4
intermediária	33	9,6 a 4,8
intermediária	39	15,9 a 9,6
inferior	24	31,7 a 19,1
suporte	38	50,0 a 38,1

Tabela 1 - Características do meio granular do filtro FDAP

A tubulação de alimentação do filtro foi conectada à base do mesmo, imediatamente abaixo da camada suporte. A essa tubulação foi conectada outra (de PVC, com 75 mm de diâmetro), por meio da qual eram executadas as descargas de fundo no filtro para lavagem de seu meio granular, durante ou após os ensaios de filtração. Para realização de tais descargas eram operados os registros R1 e R2, instalados, respectivamente, nas tubulações de entrada e de descarga de fundo (Figura 1). Para coleta do efluente filtrado, foi instalada, horizontalmente, no interior do filtro, uma calha semicircular de PVC com diâmetro de 50 mm. Essa calha foi instalada 0,47 m acima do topo do meio granular, estabelecendo-se, assim, carga hidráulica total disponível de 0,91m para funcionamento do filtro. A tubulação de saída do FDAP (em PVC, com 50 mm de diâmetro) foi conectada a essa calha. Para medição dos níveis piezométricos durante as carreiras de filtração foram instalados seis piezômetros (tubos flexíveis transparentes com diâmetro interno de 5 mm) no filtro FDAP: um na tubulação de entrada do filtro; quatro nas interfaces entre as camadas do meio granular e o último acima do topo do meio filtrante.

2.2. A Investigação Experimental

A investigação experimental consistiu de 13 ensaios de filtração (E01 a E13) realizados sob diferentes condições operacionais, consistindo, cada um deles, de uma carreira de filtração no filtro FDAP, com duração variável em função da qualidade do efluente produzido no filtro. Foram investigadas taxas de filtração de 38, 46; 75; 86; 111; 156 e 195 m^3/m^2 .dia, realizando-se, para cada taxa investigada, ensaios com e sem a execução de descargas de fundo intermediárias (DFI) durante a operação do filtro. As DFI eram executadas com o objetivo de remover as partículas retidas nos vazios intergranulares e, com isso, reduzir a perda de carga no meio granular e a turbidez no efluente do filtro FDAP. Dessa maneira, as DFI prolongariam, no caso de um sistema de dupla filtração, a duração da carreira de filtração do filtro rápido de areia instalado em seguida ao filtro de pedregulho (GUSMÃO, 2001). Descargas de fundo foram também executadas ao final de cada ensaio de filtração para lavagem do meio granular (AHSAN, 1995; WEGELIN, 1996 e GUSMÃO, 2001). Nessas ocasiões eram realizadas várias descargas sucessivas utilizando-se água bruta, até que a turbidez do efluente da lavagem atingisse valor próximo ao da turbidez da água bruta. De acordo com WEGELIN (1996), para que a limpeza hidráulica de filtros de pedregulho seja eficiente, a velocidade de drenagem, nas descargas de fundo, deve ser, no mínimo, de 720 m/dia e, preferivelmente, de 1.440 a 2.160 m/

artigos técnicos

dia. As descargas de fundo foram executadas com velocidades de drenagem entre 1.600 e 1.900 m/dia. Durante a investigação experimental foram medidos e avaliados os seguintes parâmetros: (i) na água bruta: turbidez, cor aparente, pH e alcalinidade; (ii) na água coagulada: pH e alcalinidade; (iii) na água filtrada: vazão, temperatura, turbidez e cor aparente; (iv) no meio granular do filtro: níveis piezométricos. As amostras de água bruta eram extraídas da tubulação de água bruta que alimentava a caixa CD, as amostras de água coagulada da tubulação de alimentação do filtro FDAP e as amostras de água filtrada eram coletadas junto à calha coletora instalada no interior desse filtro. Na determinação dos parâmetros físicos e químicos foram adotados os métodos indicados em APHA, AWWA, WEF (1998). Durante os experimentos foram utilizados os seguintes equipamentos: (a) balança Sartorius, modelo BL 210 S, com fundo de escala de 210 g e legibilidade de 0,0001 g (pesagem do coagulante); (b) bomba dosadora ProMinent Concept, tipo CONb 0223, com vazão máxima de 23,0 L/h com contrapressão máxima de 1,5 bar (dosagem do coagulante); (c) turbidímetro Hach, modelo 2100P Portable Turbidimeter (medição de turbidez); (d) comparador visual Policontrol, modelo Nessler Quanti 200, com faixa de leitura dos discos até 70 mg/L Pt-Co (medição de cor aparente); (e) termômetro de mercúrio Incoterm 198219/0, com faixa de medição de -10°C a $+112^{\circ}\text{C}$ (medição de temperatura); e (f) potenciômetro Inatec (medição de pH).

3. RESULTADOS

A água bruta utilizada na investigação experimental apresentou turbidez entre 13,4 e 50,4 uT, cor aparente entre 70 e 260 uH, alcalinidade entre 8,9 e 22,2 mg CaCO_3/L e pH entre 5,6 e 7,4. As dosagens do coagulante variaram entre 19,1 e 41,7 mg $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}]/\text{L}$, resultando, na água coagulada, valores de pH entre 4,7 e 6,8 e de alcalinidade entre 2,0 e 20,2 mg CaCO_3/L . Nas Tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 estão resumidas as principais características de cada um dos treze ensaios de filtração realizados: turbidez e cor aparente da água bruta, taxa de filtração, dosagem do coagulante, duração do ensaio, turbidez e cor aparente do efluente do FDAP (água filtrada) e execução de DFI. Nas Figuras 2, 3, 4 e 5 são apresentados gráficos que representam as evoluções da turbidez e da perda de carga no meio filtrante do FDAP ao longo das carreiras de filtração nos ensaios E02, E09, E12 e E13.

Tabela 2 - Ensaios com taxas de filtração de 195 a 111 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Turbidez, cor aparente, taxa de filtração e dosagem de sulfato de alumínio (D_{SA})

ensaio	turbidez (uT)	cor aparente (uH)	(m ³ /m ² .dia)	D _{SA} (mg/L)
	(m ³ /m ² .dia)	(m ³ /m ² .dia)		
E01	18,3 a 28,5	160 a 200	195	30,3 e 33,3
E02*	15,2 a 17,6	90 a 200	195	27,7 e 25,3
E03	16,5 a 19,5	80 a 100	156	25,8
E04*	13,4 a 16,3	70 a 160	156	25,8
E05*	22,6 a 23,4	---	156	29,5
E06*	49,1 a 50,4	140 a 260	111	41,7
E07	47,1 a 48,7	220 a 250	111	29,2

(*) = com execução de DFI;

D_{SA} = dosagem de sulfato de alumínio (mg $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}]/\text{L}$)

Tabela 3 - Ensaios com taxas de filtração de 195 a 111 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Duração do ensaio, turbidez e cor aparente no efluente do FDAP

ensaio	duração (horas)	efluente do FDAP	
		turbidez (uT)	cor aparente (uH)
E01	21,3	9,8 a 32,7	80 a 200
E02*	14,3	3,5 a 18,5	20 a 100
E03	21,3	2,4 a 16,6	20 a 100
E04*	14,8	1,8 a 9,9	15 a 50
E05*	9,8	5,1 a 12,8	---
E06*	9,2	6,0 a 28,4	25 a 80
E07	2,6	6,7 a 45,6	20 a 160

(*) = com execução de DFI;

Tabela 4 - Ensaios com taxas de filtração de 86 e 75 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$
Turbidez, cor aparente, taxa de filtração e dosagem de sulfato de alumínio (D_{SA})

ensaio	água bruta		taxa de filtração (m ³ /m ² .dia)	D _{SA} (mg/L)
	turbidez (uT)	cor aparente (uH)		
E10	15,3 a 16,7	80 a 120	86	23,3
E11*	15,3 a 18,6	80 a 100	86	23,3
E08	28,0 a 28,6	80 a 180	75	21,8
E09*	19,3 a 20,1	100 a 160	75	23,0

(*) = com execução de DFI;

D_{SA} = dosagem de sulfato de alumínio (mg $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}]/\text{L}$)

Tabela 5 - Ensaios com taxas de filtração de 86 e 75 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$
Duração do ensaio, turbidez e cor aparente no efluente do FDAP

ensaio	duração (horas)	efluente do FDAP	
		turbidez**(uT)	cor aparente (uH)
E10	5,0	0,64 a 5,3	15 a 25
E11*	26,5	0,87 a 5,1	15 a 50
E08	19,0	0,96 a 19,8	10 a 100
E09*	32,6	1,2 a 5,3	15 a 30

(*) = com execução de DFI; (**) desconsiderados os períodos iniciais das carreiras de filtração.

Tabela 6 - Ensaios com taxas de filtração de 46 e 38 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Turbidez, cor aparente, taxa de filtração e dosagem de sulfato de alumínio (D_{SA})

ensaio	água bruta		taxa de filtração (m ³ /m ² .dia)	D _{SA} (mg/L)
	turbidez (uT)	cor aparente (uH)		
E12	22,9 a 24,9	80 a 130	46	19,7
E13	19,6 a 20,2	90 a 110	38	19,1

D_{SA} = dosagem de sulfato de alumínio (mg $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14,3\text{H}_2\text{O}]/\text{L}$)

Tabela 7 - Ensaios com taxas de filtração de 46 e 38 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Duração do ensaio, turbidez e cor aparente no efluente do FDAP

ensaio	duração (horas)	efluente do FDAP	
		turbidez**(uT)	cor aparente (uH)
E12	7,0	1,04 a 4,1	12 a 20
E13	13,0	0,62 a 2,4	10 a 35

(**) desconsiderados os períodos iniciais das carreiras de filtração.

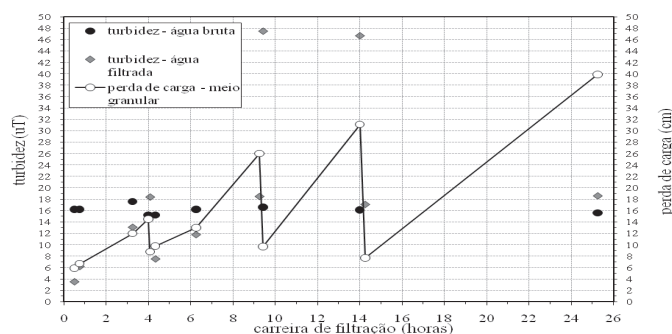


Figura 2 - Ensaio E02: Gráficos relativos a turbidez e perda de carga (taxa de filtração de 195 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)

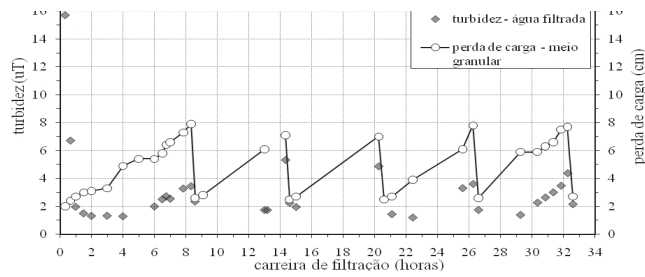


Figura 3 – Ensaio E09: Gráficos relativos a turbidez e perda de carga (taxa de filtração de $75 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)

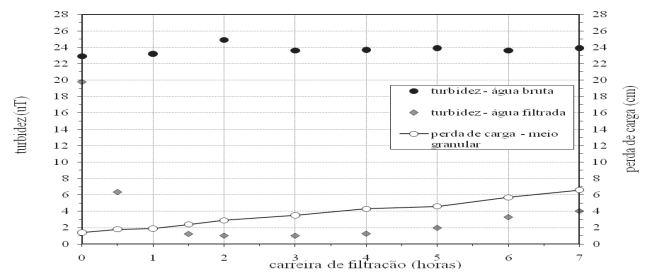


Figura 4 – Ensaio E12: Gráficos relativos a turbidez e perda de carga (taxa de filtração de $46 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)

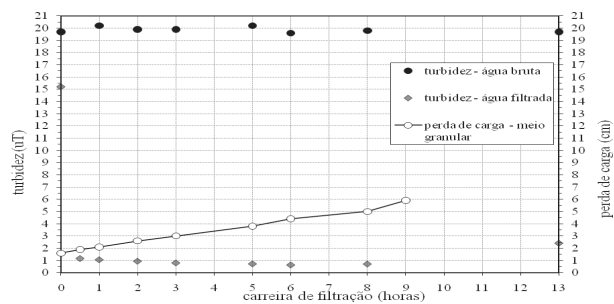


Figura 5 – Ensaio E13: Gráficos relativos a turbidez e perda de carga (taxa de filtração de $38 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$)

4. DISCUSSÃO

Avaliação dos ensaios de filtração com taxas de filtração de 195 a $111 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Os ensaios E01, E03 e E07, realizados sem DFI, não apresentaram resultados satisfatórios, vez que foram observados valores elevados de turbidez e de cor aparente no efluente do filtro FDAP durante todas as carreiras de filtração (Tabela 3). Durante esses ensaios a perda de carga no meio granular (a 20°C) evoluiu de valores iniciais entre 4,2 e 9,7 cm até valores entre 14,1 e 42,8 cm, ao final dos ensaios. Nos ensaios de filtração E02, E04, E05 e E06 foram realizadas DFI. Nos ensaios E02, E04 e E06 as DFI ocorreram a cada 4,6 horas, em média, e, no ensaio E05, a cada 2 horas. Mesmo com a execução dessas DFI, a turbidez e a cor aparente no efluente do filtro FDAP mantiveram-se também sempre elevadas (Tabela 3). Nos ensaios E02, E04, E05 e E06 ocorreram, imediatamente após a execução de algumas DFI, intensos desprendimentos de flocos a partir do topo do meio granular do FDAP, durante curtos períodos de tempo, provocando “picos” de turbidez, variando de 11,8 a 49,0 uT, no efluente do filtro, o que pode ser observado no gráfico da Figura 2, relativo ao ensaio E02. Tais fenômenos decorreram, provavelmente, das diferentes velocidades de escoamento da água nas camadas de pedregulho durante a execução das descargas de fundo, dando origem a bolhas de ar na região da

interface meio filtrante/camada suporte. O movimento ascendente dessas bolhas de ar, logo após o reinício da operação do filtro, pode ter carregado impurezas retidas no meio granular, provocando tais “picos” de turbidez no efluente do filtro. Nos ensaios de filtração E02, E04, E05 e E06 foram observadas grandes reduções da perda de carga no meio granular, após cada DFI. Nos ensaios E04, E05 e E06 as DFI reduziram as perdas de carga no meio granular a valores próximos à perda de carga inicial (com o meio granular limpo), mantendo a perda de carga no meio granular entre 3,9 e 16,4 cm. No ensaio E02 as DFI não foram capazes de remover eficientemente a grande quantidade de impurezas acumulada nos interstícios granulares em decorrência do relativamente alto valor da taxa de filtração adotada nesse ensaio ($195 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$); desse modo, a perda de carga no meio granular (a 20°C) manteve-se mais elevada, variando entre 5,9 e 39,9 cm (Figura 2).

Avaliação dos ensaios de filtração com taxas de filtração de 86 e $75 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$

Foram realizados quatro ensaios (E10, E11, E08 e E09) com taxas de filtração de 86 e $75 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ (Tabela 4). Nos ensaios E10 e E08 (realizados sem DFI), a turbidez e a cor aparente atingiram valores elevados no efluente do filtro (Tabela 5). No caso do ensaio E10, após as primeiras 5 horas de operação, já se registravam 5,3 uT no efluente do filtro; e no ensaio E08, após as primeiras 7,6 h de operação, a turbidez da água filtrada já atingia valores próximos a 5 uT. Durante os ensaios E10 e E08 a perda de carga no meio granular (a 20°C) evoluiu de valores iniciais de 1,8 e 3,5 cm até valores de 8,7 e 17,8 cm, ao final das carreiras de filtração. Nos ensaios realizados com taxas de filtração de 86 e $75 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ só foram observados resultados satisfatórios nos ensaios E09 e E11, em que foram executadas DFI. Nesses ensaios, devido à execução das DFI (a intervalos médios de 6,5 e 3,7 horas, respectivamente), desconsiderando os períodos iniciais das carreiras de filtração, a turbidez e a cor aparente foram mantidas, no efluente do filtro FDAP, entre 0,87 e 5,3 uT e entre 15 e 50 uH, durante períodos longos (26 a 33 horas). Gusmão (2001), em investigação experimental, avaliou sistema de dupla filtração constituído por uma unidade de filtração direta ascendente em pedregulho seguida por uma unidade de filtração rápida descendente. Nessa investigação, a unidade de filtração direta ascendente em pedregulho produziu efluentes com turbidez e cor aparente variando entre 1,66 e 6,41 uT e entre 15 e 40 uH. Foi observado que a unidade de filtração rápida descendente, operando com taxas de filtração entre 237 e $258 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, em carreiras de filtração com duração de 16 a 28 horas, foi capaz de reduzir esses valores de turbidez e cor aparente a valores $\leq 0,60 \text{ uT}$ e $\leq 1 \text{ uH}$, atendendo, portanto, à Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano do Ministério da Saúde (GUSMÃO, 2001). Resultados semelhantes foram obtidos por Kuroda (2002) em investigação experimental para avaliação de sistema de dupla filtração também constituído por unidade de filtração direta ascendente em pedregulho seguida por unidade de filtração rápida descendente. Nos ensaios de filtração, a unidade de filtração direta ascendente em pedregulho produziu efluentes com valores de turbidez (inferiores a 5 uT) e cor aparente (entre 3 e 54 uH) compatíveis com a filtração rápida descendente, para taxas de filtração até $180 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, em carreiras de filtração com duração de 38 a 83 horas (DI BERNARDO & SABOGAL PAZ, 2008). Os resultados dos trabalhos de Gusmão e Kuroda sugerem que, nas condições operacionais dos ensaios E09 e E11, o filtro FDAP pode ser utilizado como unidade de filtração preliminar em sistema de dupla filtração. Nos ensaios E09 e E11, após cada DFI, a perda de carga no meio granular (a 20°C) sofreu grande redução, atingindo valores próximos à perda de carga com o meio granular limpo (Figura 3). Dessa maneira, a perda de carga no meio granular foi mantida entre 2,0 e 13,3 cm. Nesses ensaios não ocorreram “picos” elevados de turbidez e cor aparente após a execução das DFI, fato decorrente, provavelmente, dos baixos valores das taxas de filtração adotadas, quando comparadas com aquelas adotadas nos ensaios E02, E04, E05 e E06.

Avaliação dos ensaios de filtração com taxas de filtração de 46 e 38 m³/m².dia

Nos ensaios E12 e E13, durante os quais não foram realizadas DFI, foram adotadas taxas de filtração de 46 e 38 m³/m².dia, respectivamente. Nesses ensaios a perda de carga no meio granular (a 20°C) manteve-se inferior a 9 cm. No ensaio E12, foram observados no efluente do filtro FDAP valores de turbidez entre 1,04 e 4,1 uT (Figura 4) e de cor aparente entre 12 e 20 uH, durante apenas 7 horas de operação. Por outro lado, no ensaio E13, a turbidez do efluente do filtro FDAP permaneceu entre 0,62 e 2,4 uT (Figura 5) e a cor aparente entre 10 e 35 uH, durante pelo menos 13 horas de operação. Conforme os resultados dos trabalhos de Gusmão e Kuroda, acima citados, esses valores sugerem a possibilidade de utilização do filtro FDAP, nas condições operacionais do ensaio E13, como unidade de filtração preliminar em sistema de dupla filtração, mesmo sem a execução de descargas de fundo intermediárias.

5. CONCLUSÕES

Considerando-se os resultados obtidos relativos à remoção de turbidez e cor aparente, podem ser destacadas as seguintes conclusões referentes à utilização do processo de filtração direta ascendente em pedregulho para tratamento das águas da barragem Duas Unas. Essas conclusões são válidas apenas para as condições em que a investigação experimental foi realizada:

- A unidade de filtração direta ascendente em pedregulho, quando operando sob taxas de filtração iguais ou superiores a 38 m³/m².dia, mesmo com a execução de descargas de fundo intermediárias, rapidamente produziu efluentes com valores de turbidez e de cor aparente superiores aos limites máximos impostos pela Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano do Ministério da Saúde. Esses resultados mostram que, nessas condições operacionais, não é recomendável a utilização da filtração direta ascendente em pedregulho como único processo de tratamento.
- A unidade de filtração direta ascendente em pedregulho, quando operando sob taxas de filtração de 75 e 86 m³/m².dia (com execução de descargas de fundo intermediárias), e quando operando sob taxa de filtração de 38 m³/m².dia (sem execução de descargas de fundo intermediárias), desconsiderando os períodos iniciais das carreiras de filtração, produziu efluente com valores de turbidez e cor aparente inferiores a 5,3 uT e a 50 uH, durante períodos de 13 a 33 horas. Esses resultados sugerem que, nessas condições operacionais, há possibilidade de utilização da unidade de filtração direta ascendente em pedregulho como unidade de filtração preliminar em sistema de dupla filtração.
- Com relação ao uso do filtro de laboratório de areia e à execução de descargas de fundo intermediárias, os resultados obtidos permitem concluir que:
- As dosagens do coagulante, determinadas com emprego do filtro de laboratório de areia, mostraram-se, nos diversos ensaios de filtração, adequadas à qualidade da água bruta e às características da unidade de filtração estudada;

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Pernambucana de Saneamento por permitir a montagem da instalação piloto na ETA Pres. Castello Branco, assim como pelo apoio de sua equipe técnica durante os trabalhos; e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AHSAN, T. **Process analysis and optimization of direct horizontal-flow roughing filtration**. Delft, Holland, 1995. Tese de Doutorado, Delft University of Technology e International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering. 193 p.
- AMIRTHARAJAH, A. The mechanisms of coagulation. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE COAGULAÇÃO E FILTRAÇÃO DIRETA, 1989, São Carlos, Brasil. **Anais...** São Carlos: EESC-USP, 1989.v.1, p.1-19.
- AMIRTHARAJAH, A.; MILLS, K. M. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. **Journal American Water Works Association**, v.74, n.4, p. 210-6, 1982.
- APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20. ed. Washington. D.C. 1998.
- DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ed. ABES, 1993.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. **Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. 1. ed. São Carlos: Ed.RiMa, 2002. DI BERNARDO, L.; PÁDUA, V. L.; DI BERNARDO, A. S.
- Desenvolvimento de instalação de laboratório para determinação da dosagem de coagulante na filtração direta. In: IX SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2000, Porto Seguro.
- DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de Tecnologias de Tratamento de Água**. v. 1, 1. ed. São Carlos: Editora LDiBe, 2008.
- GUSMÃO, P. T. R. **Utilização de filtração direta ascendente como pré-tratamento à filtração rápida descendente para tratamento de água para abastecimento**. São Carlos, 2001. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 335 p.
- PINTO, A. P. **Desempenho da Filtração Direta Ascendente em Pedregulho como Alternativa de Pré-filtração em Sistema de Dupla Filtração**. Recife, 2006. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. 138 p.
- PROSAB. **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. Rio de Janeiro: Ed. RiMa. 2003. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, Coordenador Luiz Di Bernardo. 498 p.
- WEGELIN, M. **Surface water treatment by roughing filters: a design, construction and operation manual**. Duebendorf: EAWAG / SANDEC, 1996.