



I-084 - AVALIAÇÃO DO TIPO DE MATERIAL FILTRANTE NO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE FILTROS RÁPIDOS DE CAMADA PROFUNDA NO TRATAMENTO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO

Sergio Brasil Abreu⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola Politécnica de São Paulo (Poli/USP). Analista de Infraestrutura de Saneamento da Fundação Nacional de Saúde (Funasa).

Nádia Cristina Pires Brinck

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola Politécnica de São Paulo (Poli/USP). Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Poli/USP.

Sidney Seckler Ferreira Filho

Engenheiro Civil pela Escola Politécnica de São Paulo (Poli/USP). Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Poli/USP. Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Poli/USP. Professor Livre Docente em Hidráulica e Saneamento pela Poli/USP.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Professor Almeida Prado, 271 - Cidade Universitária - São Paulo - SP - CEP: 05508-900 - Brasil - Tel: +55 (11) 3091-5220 - Fax: +55 (11) 3091-5529 - e-mail: sergiobrasil@gmail.com

RESUMO

A maior parte dos mananciais utilizados pelas estações de tratamento de água localizadas nos principais centros urbanos encontra-se com sérios problemas de eutrofização, o que leva a problemas para produção de água potável. Sendo a filtração a etapa final para barrar as impurezas, este trabalho avaliou de forma comparativa o comportamento dos diferentes materiais filtrantes e estudou os aspectos hidráulicos dos filtros dos mesmos, referente a qualidade da água filtrada em termos de turbidez, contagem de partículas e perda de carga. O sistema de filtros piloto (quatro filtros rápidos por gravidade de camada profunda) foi montado na Estação de Tratamento de Água Rio Grande (ETA Rio Grande), localizada na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e operada pela Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (SABESP). Os filtros F1 (areia/antracito com 1,3 e 0,41 mm de diâmetro, respectivamente, e 1,05 m de altura do leito), F2 (antracito com 1,3 mm de diâmetro e 1,2 m de altura do leito), F3 (antracito com 0,76 mm de diâmetro e 1,2 m de altura do leito) e F4 (areia com 0,74 mm de diâmetro e 1,2 m de altura do leito) foram alimentados com água decantada da ETA Rio Grande a uma taxa de filtração de 500 m³/m²/dia. O antracito apresenta como vantagens o fato de permitir uma menor velocidade de água de lavagem, casos dos filtros F2 e F3. O filtro piloto que apresentou melhores resultados com respeito a menor evolução de perda de carga e conseqüente maior duração da carreira foi o filtro F2. Em contra partida, o filtro F4 pode ser considerado o de pior comportamento quando comparado com os demais.

PALAVRAS-CHAVE: Material Filtrante, Comportamento Hidráulico, Filtros Rápidos, Camada Profunda, Águas de Abastecimento.

INTRODUÇÃO

Os filtros podem ser classificados segundo o material filtrante utilizado e quanto ao número de camadas dos mesmos. Podem ser de uma, duas ou até três camadas, dependendo de sua concepção. Os filtros de camada única são compostos de areia ou antracito, enquanto os de dupla camada costumam utilizar esses dois materiais filtrantes em série. Os filtros de tripla camada não são tão difundidos quanto os anteriores e usam um terceiro material filtrante, além dos dois já citados.

O conhecimento das características granulométricas dos materiais filtrantes é imprescindível para se projetar um sistema de filtração. O tamanho dos grãos e sua distribuição de tamanhos são definidos através de ensaios granulométricos. A partir da curva de distribuição granulométrica são definidos os parâmetros que caracterizam o meio filtrante (DI BERNARDO, 1993).

CUNHA Jr (1992) comparou filtros rápidos, variando de 200 a 600 m³/m²/dia, de camada única, composta por areia, com um filtro de dupla camada, areia e antracito. O autor chegou à conclusão que os filtros de camada



única podem perfeitamente substituir os filtros de dupla camada, podendo inclusive apresentar melhores desempenhos. De qualquer forma, todos os filtros, após a fase inicial de estabilização da carreira, mantiveram um efluente com turbidez inferior a 1 uT.

A areia deve ser constituída de grãos essencialmente de quartzo, resultado da decomposição de rochas que contêm aproximadamente 99% de sílica. Costuma-se usar sacos de 40 a 50 kg para manuseio, transporte e armazenamento da areia. A solubilidade em ácido clorídrico concentrado ($1,18 \text{ g/cm}^3$) não deve ultrapassar 5% e sua massa específica deve estar compreendida entre 2,5 e $2,7 \text{ ton/m}^3$ (DI BERNARDO, 1993).

Tradicionalmente, até a década de 50, os filtros empregados no tratamento de águas de abastecimento eram constituídos unicamente de areia como material filtrante e limitados a taxas de filtração de, no máximo, $120 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$. No entanto, a partir do uso incidental do CAG como meio filtrante e adsorvedor para controle de gosto e odor em águas de abastecimento, observou-se uma significativa melhora da qualidade da água filtrada, associada a uma diminuição da evolução da perda de carga, o que possibilitou o emprego do antracito como material filtrante.

A utilização do antracito como material filtrante, combinado com a areia, permitiu que fossem concebidos os chamados filtros de dupla camada areia-antracito que, quando submetidos a condições ótimas de pré-tratamento, possibilitaram a sua operação com taxas de filtração de 240 a $360 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$.

No final da década de 60 e início da década de 70, alguns pesquisadores passaram a considerar a utilização de filtros rápidos por gravidade operando com taxas de filtração variando de $480 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ a $600 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$, empregando tanto a areia como o antracito como material filtrante.

Em face das elevadas taxas de filtração empregadas e, conseqüentemente aumento da perda de carga, a granulometria do material filtrante teve de ser alterada para maiores valores de diâmetro efetivo. Com objetivo de compensar e eventual perda de eficiência na captura de partículas coloidais, a sua altura passou dos tradicionais 0,6 a 0,8 m em filtros de dupla camada para 1,2 a 1,5 m em filtros rápidos de camada profunda. Embora existam vantagens significativas na adoção de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento, ainda persistem algumas dúvidas no tocante a seleção do material filtrante (areia ou antracito) e nas condições de pré-tratamento.

O objetivo deste trabalho é estudar, avaliar e otimizar o processo de filtração de águas de abastecimento, mediante a utilização de filtros rápidos por gravidade de camada profunda, com vistas a possibilitar a otimização da remoção de material particulado (turbidez e contagem de partículas) e minimização da evolução da perda de carga.

Deste modo, pretende-se mais especificamente avaliar de forma comparativa o comportamento dos diferentes materiais filtrantes e estudar os aspectos hidráulicos dos filtros rápidos de camada profunda nas suas condições de operação em fluxo descendente, fluidificação e expansão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os filtros piloto utilizados para o desenvolvimento desse trabalho foram instalados na Estação de Tratamento de Água do Rio Grande, que capta água do braço Rio Grande, integrante do Reservatório Billings.

Os principais problemas de qualidade da água existentes no braço do Rio Grande são devidos a grande carga de esgotos sanitários que são lançados sem tratamento na represa. Esse problema tem aumentado o grau de eutrofização do corpo d'água, dificultando a operação da ETA, pois o aumento da concentração de algas na água bruta exige maior aplicação de coagulante, aumento nas dosagens de agente oxidante, diminuição das carreiras de filtração e dificuldade nas operações de lavagem.

O aparato experimental foi composto, principalmente, por 4 filtros por gravidade, de alta taxa do tipo camada profunda e fluxo descendente em escala piloto operados em paralelo, conforme mostra a Figura 1. Os filtros piloto possuem 5 m de altura, diâmetro externo de 156 mm e interno de 150 mm. O material utilizado em sua construção foi PVC na parte superior e acrílico na inferior, de modo a permitir a visualização da camada suporte e da expansão do leito durante a lavagem dos filtros.



Figura 1: Detalhe dos 4 filtros de alta taxa e fluxo descendente em escala piloto operados em paralelo.

A água decantada que abasteceu os filtros piloto era a mesma dos filtros que operavam em escala real na ETA, de modo a tornar a pesquisa a mais próxima possível da realidade. Essa água decantada chegava a uma caixa de armazenamento que tinha como objetivo abastecer os filtros piloto por gravidade e, ao mesmo tempo, trabalhar como um sistema pulmão por pelo menos uma hora. Da caixa de armazenamento, a água decantada seguia para os filtros piloto através de uma bomba com vazão suficiente para os 4 filtros operando simultaneamente.

Foram montadas 4 diferentes concepções, de modo a permitir a comparação entre os materiais filtrantes utilizados. O Filtro F1 era de dupla camada, sendo 80 cm de antracito e 25 cm de areia, totalizando 1,05 m, e diâmetro de 1,3 e 0,42 mm para areia e antracito, respectivamente. Os filtros piloto F2 e F3 foram montados unicamente com antracito, com diâmetro de 1,3 e 0,76 mm, respectivamente, e com altura do material filtrante igual a 1,2 m para ambos. Por fim, o filtro F4 era composto por areia, com diâmetro efetivo igual a 0,74 mm e altura do leito também de 1,2 m. A Tabela 1 resume a concepção dos 4 filtros empregados no trabalho.

Tabela 1: Concepções de filtros utilizados nos ensaios de filtração.

Filtro	Material filtrante	Altura cm	Coefficiente de uniformidade	Diâmetro efetivo mm
F1	Antracito	80	1,30	1,30
	Areia	25	1,76	0,42
F2	Antracito	120	1,30	1,30
F3	Antracito	120	1,96	0,76
F4	Areia	120	1,97	0,74

As camadas suporte de todos os filtros piloto foram montadas tendo por concepção serem do tipo “camada reversa”, ou seja, granulometria decrescente no sentido de escoamento da água de lavagem, tendo por objetivo principal permitir que os mesmos pudessem ser lavados com ar e água, sem que houvesse perturbação das camadas suporte e filtrante.

O trabalho foi dividido em duas etapas, ensaios de fluidificação e expansão do leito dos filtros e execução das carreiras de filtração, ambas descritas a seguir:



PRIMEIRA ETAPA: ENSAIOS DE FLUIDIFICAÇÃO E EXPANSÃO DO LEITO DOS FILTROS

Nessa primeira etapa foram executados ensaios de fluidificação e expansão do leito dos filtros. Essa fase teve como objetivo definir parâmetros de dimensionamento do sistema de lavagem em contra-corrente com ar e água. Foram avaliadas as vazões de água de lavagem necessárias para atingir determinados valores de expansão nos meios filtrantes, assim como também se determinou a mínima velocidade de fluidificação do leito e foram obtidas curvas de evolução da perda de carga com diferentes velocidades ascensionais de água.

Para a realização dos ensaios de fluidificação e expansão dos meios filtrantes, inicialmente foram feitas marcações nos tubos de acrílico de cada um dos filtros piloto que correspondessem à expansão dos meios filtrantes em 5%, 10%, 20%, 25% e 30%. A identificação e posicionamento das marcas foram feitos com o auxílio de uma régua milimetrada e caneta especial para retroprojektor.

A seguir foi introduzida no filtro uma vazão de água de lavagem em contra-corrente de forma a não causar a expansão do seu meio filtrante. A vazão foi medida volumetricamente com o auxílio de uma proveta de 2 L e um cronômetro digital tendo esta sido efetuada em triplicata. O valor da vazão registrada para uso posterior, foi à média aritmética destas três leituras. As diferenças percentuais entre estas foram todas menores que 2%. Determinada a vazão de água, a seguir era efetuada a leitura dos piezômetros para a determinação da perda de carga no meio filtrante. Após a leitura do nível d'água em todos os piezômetros, o registro de água era aberto, vagarosamente, de forma a permitir uma nova veiculação de água em contra-corrente.

De posse desta vazão, todos os procedimentos descritos anteriormente de determinação da vazão e leitura dos piezômetros foram efetuados novamente.

Procedeu-se o aumento da vazão em pequenos incrementos até que, visualmente, fosse atingido o ponto de fluidificação incipiente. Após isso a introdução de água foi efetuada de modo a causar uma expansão pré-determinada, sendo que para cada uma delas foi determinada a vazão necessária e efetuou-se a leitura do nível d'água nos piezômetros.

RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

A primeira etapa do trabalho consistiu nos ensaios de fluidificação e expansão dos materiais filtrantes. A Figura 2 apresenta as curvas de perda de carga em função da velocidade ascensional de água de lavagem para os filtros piloto empregados na investigação experimental. Com base nos resultados experimentais obtidos, foi observada sua velocidade de mínima fluidificação.

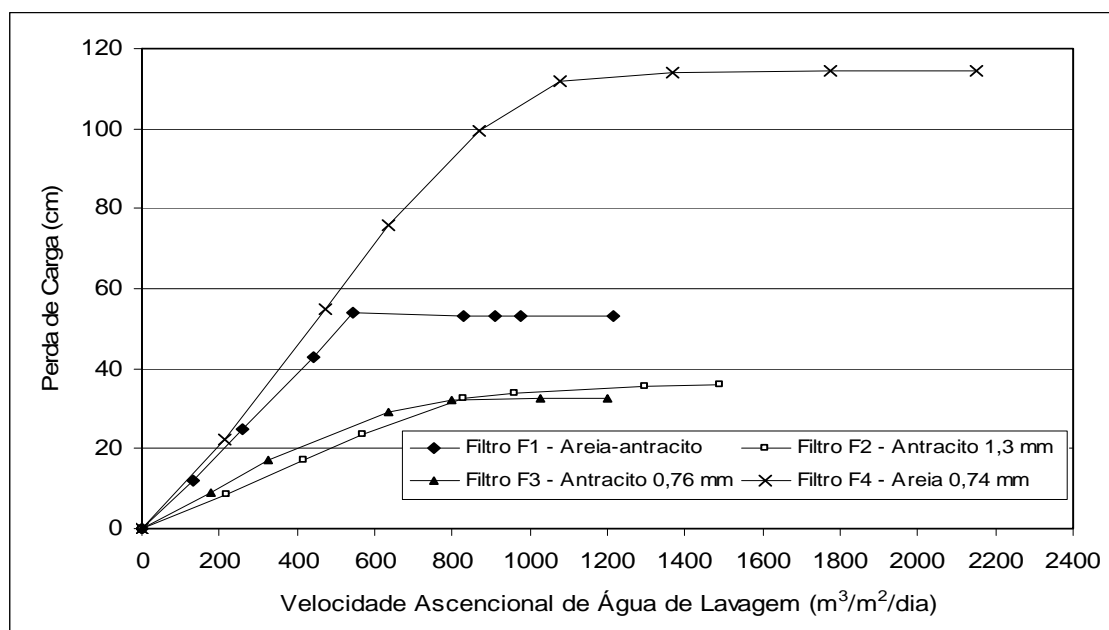


Figura 2: Perda de carga em função da velocidade ascensional de água de lavagem para os filtros F1, F2, F3 e F4.

A Tabela 2 apresenta os valores de velocidade mínima de fluidificação observados e calculados para os filtros piloto empregados na investigação experimental. A velocidade mínima de fluidificação calculada foi efetuada empregando-se metodologia proposta por FERREIRA FILHO (1995), de acordo com as Equações 1, 2, 3 e 4.

$$Ga = \frac{\rho \cdot d_i^3 \cdot (\rho_p - \rho) \cdot g}{\mu^2} \quad \text{equação (1)}$$

$$Re_{MF_i} = \left[(33,7)^2 + 0,0408 \cdot Ga \right]^{0,5} - 33,7 \quad \text{equação (2)}$$

$$Re_{MF_i} = \frac{V_{MF_i} \cdot d_i}{\nu} \quad \text{equação (3)}$$

$$V_{MF} = \sum_{i=1}^n V_{MF_i} \cdot x_i \quad \text{equação (4)}$$

V_{MF} = velocidade mínima de fluidificação (LT^{-1}).

GA = número de Galileu.

Tabela 2: Perda de carga em função da velocidade ascensional de água de lavagem para os filtros F1, F2, F3 e F4.

Filtro Piloto	VMF observada	VMF calculada	Erro percentual
	m/dia	m/dia	
F1	548,7	685,1	24,8%
F2	843,2	772,1	-8,4
F3	675,9	581,8	-13,9
F4	970,8	1.152,2	18,7

Conforme se pode observar pelos resultados experimentais apresentados na Figura 2 e Tabela 2, o filtro piloto F4 composto unicamente por areia como material filtrante foi o que apresentou o maior valor de velocidade mínima de fluidificação quando comparado com os demais. Ainda que sua granulometria tenha sido menor



quando comparado com os filtros piloto F2 e F3 compostos unicamente por antracito como material filtrante, em função do maior valor da massa específica da areia quando comparado com o antracito, este maior valor se justifica.

A importância na determinação do valor da velocidade mínima de fluidificação justifica-se pois, dado que uma das tecnologias de lavagem de materiais filtrantes que têm sido mais empregadas em meios filtrantes do tipo camada profunda é do tipo lavagem com ar e água simultaneamente em condições de sub-fluidificação, quanto menor for esta, menores tenderão a ser os volumes de água de lavagem gasto no processo, assumindo-se que os tempos de lavagem sejam os mesmos.

Deste modo, os filtros do tipo camada profunda sendo constituídos por antracito unicamente como material filtrante tende a ser mais vantajoso do que a areia no que diz respeito a um menor consumo de água de lavagem, com conseqüente vantagem também na concepção e projeto do seu sistema de tratamento de resíduos líquidos e sólidos.

Comparando-se as velocidades mínimas de fluidificação observadas e calculadas apresentadas na Tabela 4.1, pode-se observar que as mesmas estão muito próximas entre si, com erros percentuais da ordem de -15% a 25%, o que pode ser considerado bastante razoável do ponto de vista de engenharia.

A Figura 3 apresenta os valores de expansão dos materiais filtrantes em função da velocidade ascensional de água de lavagem para os filtros piloto F1 e F2.

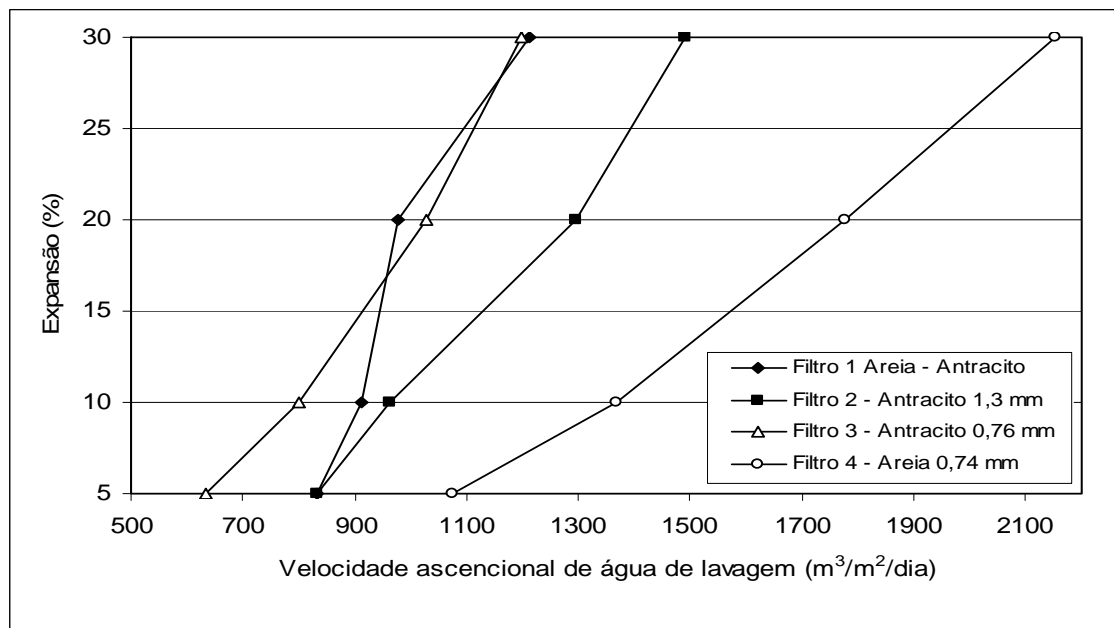


Figura 3: Expansão dos materiais filtrantes dos filtros piloto em função da velocidade ascensional de água de lavagem.

Dado que, durante a sua lavagem com ar unicamente, existe um potencial acúmulo de ar nos interstícios do material filtrante e camada suporte, a sua remoção deverá acontecer quando da aplicação de uma velocidade de água de lavagem que permita a sua expansão em valores que situem-se entre 10% a 20%. Portanto, haja vista a necessidade de garantir a sua expansão para que não haja o acúmulo de ar nos interstícios do material filtrante e que este não venha a causar prejuízos nas carreiras de filtração subseqüentes, especialmente no tocante a piora na qualidade da água filtrada e evolução de perda de carga, faz-se imperativo que o sistema de lavagem projetado e em operação permita que a sua expansão ocorra quando de sua lavagem quando da aplicação de água em contra-corrente.

Observando a Figura 3, pode-se notar que o filtro piloto F4 é aquele que, para uma determinada expansão do



material filtrante, requer a maior velocidade de água de lavagem. Para que seja possível garantir a sua expansão em 20%, sua velocidade ascensional de água de lavagem deve ser da ordem de $1.700 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$.

Para os filtros piloto F2 e F3 compostos por antracito como material filtrante, as suas velocidades ascensionais de água de lavagem para a mesma expansão de 20% devem situar-se em torno de $1.300 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ e $1.030 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$, respectivamente. Ainda que o filtro piloto F2, composto por antracito como material filtrante (Diâmetro efetivo 1,3 mm), tenha uma granulometria maior do que quando comparado com o filtro piloto F4 (Areia – Diâmetro efetivo 0,74 mm), aquele ainda necessita de uma menor velocidade ascensional de água de lavagem para uma mesma expansão. Tal comportamento justifica-se pelo fato do antracito apresentar menor valor de massa específica quando comparado com a areia.

O filtro piloto F3 (Antracito – Diâmetro efetivo 0,76 mm), pelas razões expostas, possuindo granulometria similar ao filtro piloto F4 (Areia – Diâmetro efetivo 0,74 mm), para uma mesma velocidade ascensional de água de lavagem, apresentou maiores valores de expansão.

Do ponto de vista prático, ressalta-se que os filtros compostos unicamente por antracito como material filtrante (Filtros Piloto F2 e F3), por apresentarem menores valores de velocidade de água de lavagem para uma mesma expansão quando comparados com o filtro piloto F4, tendem a ser mais vantajosos com respeito a um menor consumo de água de lavagem.

Para o filtro F1, a expansão em 20% do material filtrante, sua velocidade ascensional de água de lavagem deve ser da ordem de quase $980 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$. Apesar da presença de areia – além do antracito – nesse filtro, essa menor necessidade de água para igual expansão do leito pode ser explicada pelo menor comprimento do leito quando comparado aos demais filtros (105 e 120 cm, respectivamente).

SEGUNDA ETAPA: EXECUÇÃO DAS CARREIRAS DE FILTRAÇÃO

Na segunda etapa foram realizados os ensaios de filtração. Os estudos foram conduzidos em escala piloto e tiveram como principal objetivo avaliar o comportamento dos filtros com relação à remoção de turbidez, partículas e evolução de perda de carga. Optou-se pela utilização de uma taxa de filtração, de $500 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$, pois esse é considerado um valor típico de alta taxa.

Inicialmente ligava-se a bomba de recalque de água decantada para o tanque pulmão localizado na casa de química. Verificava-se o extravasamento da caixa, significando que a mesma já está cheia. Os filtros, antes de entrarem em operação, precisavam estar lavados e com o nível d'água sempre acima do material filtrante. Verificava-se se os registros de saída de água de lavagem estavam fechados e se algum deles estivesse aberto era efetuado seu fechamento.

A seguir, eram abertos os registros dos piezômetros e fazia-se a verificação se as cotas dos mesmos se igualavam para a condição estática (vazão de alimentação igual a zero). Do mesmo modo, era verificado eventual acúmulo de ar das mangueiras dos piezômetros. Uma vez abertos os registros dos piezômetros e verificado seus níveis, eram abertos os registros de alimentação de água decantada individualmente para cada filtro e, do mesmo modo, também o registro de saída de água filtrada. Esperava-se a estabilização do nível d'água em cada filtro que acontecia após, aproximadamente, 10 minutos.

Uma vez tendo-se estabilizado o nível d'água nos filtros, zerava-se o cronômetro e iniciava-se uma nova carreira de filtração. Imediatamente após o início, efetuava-se a primeira coleta de amostras de água filtrada. Durante a primeira hora, as coletas de amostra de água filtrada eram efetuadas de 15 em 15 minutos. Do mesmo modo, efetuava-se a primeira leitura do nível d'água em todos os piezômetros dos filtros F1 a F4. A partir daí essas passavam a ser efetuadas de quatro em quatro horas.

A seguir, verificava-se a vazão de alimentação. Esta devia estar situada entre mais ou menos 5% do valor nominal citado de 6,1 L/min, ou seja, entre 5,8 e 6,4 L/min. Caso fora deste intervalo, efetuava-se seu ajuste pelo rotâmetro e reconfirmava-se sua vazão por medição volumetricamente. A vazão dos filtros era verificada a cada quatro horas, aproximadamente, a fim de se assegurar que a vazão de alimentação estivesse garantindo a taxa de filtração desejada.



O encerramento da carreira de filtração era determinado caso ocorresse alguma das condições abaixo:

- Turbidez da água filtrada maior ou igual a 0,5 UNT em três medidas consecutivas;
- Carreira de filtração com máximo de 40 horas; e/ou
- Perda de carga superior ao limite estabelecido pelo sistema, nesse caso quando o nível d'água alcançava 5 m, de maneira que não houvesse extravasamento nos filtros.

Uma vez encerrada a carreira de um filtro, eram fechados os registros dos piezômetros e o registro de entrada de água decantada de alimentação deste. Em seguida procedia-se sua lavagem de acordo com os procedimentos descritos a seguir.

Deixava-se o nível d'água baixar na coluna de filtração até um ponto visível no acrílico. Uma vez atingido um determinado nível requerido, fechava-se a saída de água filtrada. A seguir, abria-se o registro de alimentação de ar do filtro a ser lavado. Efetuava-se a aplicação de ar por 4 minutos à uma taxa de aproximadamente 22 L/minuto.

Era feita a abertura do registro de saída de água de lavagem e aplicada água em contra-corrente de modo a permitir uma expansão do material em aproximadamente 30%. Para tanto, procedia-se a abertura da válvula de aplicação de água de forma lenta e gradual de forma a evitar a separação do leito filtrante. Essa aplicação de água era efetuada por, pelo menos, 10 minutos.

A seguir, abriam-se os registros dos piezômetros e verificava-se se suas cotas se igualam para a condição estática citada anteriormente. Do mesmo modo, verificava-se se não havia o acúmulo de ar das mangueiras dos piezômetros. Para uma nova carreira de filtração adotavam-se os mesmos passos e procedimentos descritos anteriormente, de maneira que os quatro filtros iniciassem sempre ao mesmo tempo.

RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

Conforme já dito anteriormente, nessa primeira etapa dos ensaios de filtração foi feita a escolha do material suporte que seria utilizado na fase seguinte do experimento. Foram realizadas ao todo 15 carreiras de filtração com essas condições. Para facilitar a discussão, utilizou-se uma carreira típica que reflete a média observada para todo o experimento.

A Figura 4 apresenta os valores de qualidade do efluente, medidos na forma de turbidez (UNT), da água bruta, água decantada e dos filtros piloto F1, F2, F3 e F4, respectivamente.

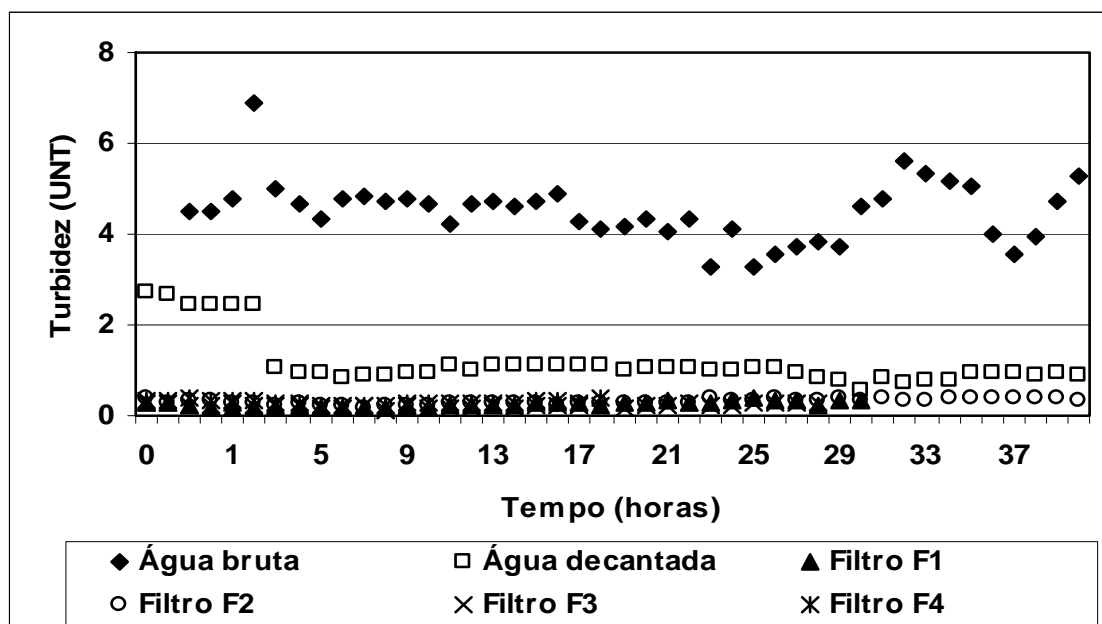


Figura 4: Qualidade da água bruta, decantada e filtrada dos filtros piloto F1, F2, F3 e F4.



Os valores médios de turbidez foram, para água bruta e decantada, de $4,50 \pm 0,66$ e $1,17 \pm 0,56$ UNT, respectivamente. O valor de água decantada esteve quase sempre acima de 1 UNT, atingindo pico de 1,7 UNT. Praticamente não houve diferença na qualidade do efluente produzido pelos quatro filtros. A média dos valores de turbidez foi de $0,24 \pm 0,06$, $0,30 \pm 0,06$, $0,22 \pm 0,04$ e $0,30 \pm 0,05$ UNT para os filtros F1 F2, F3 e F4, respectivamente.

A Figura 5 apresenta os valores de contagem de partículas para água bruta, água decantada e filtros piloto F1, F2, F3 e F4, respectivamente

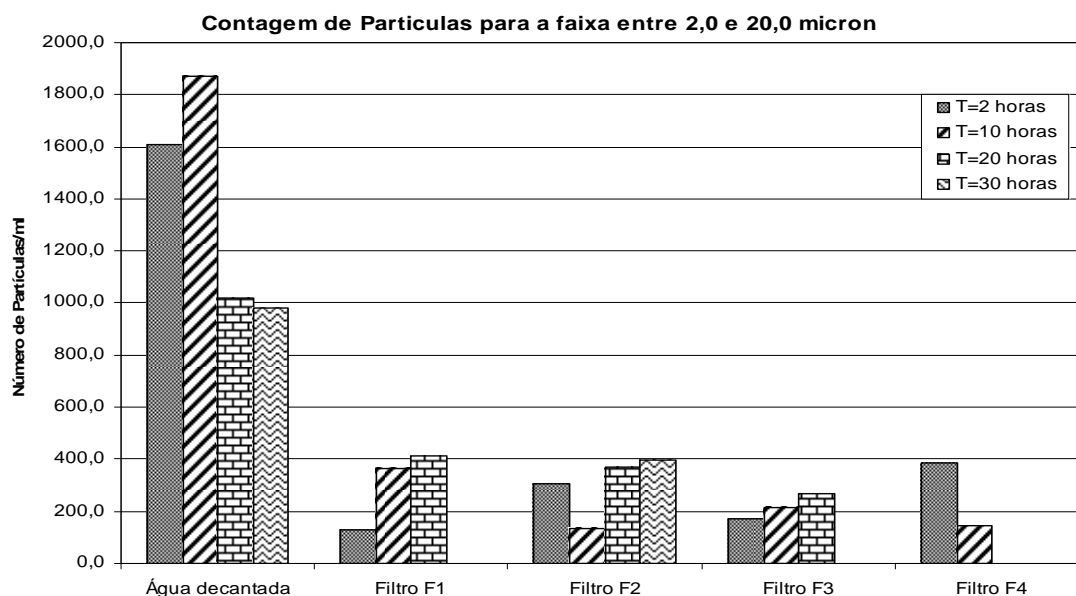


Figura 5: Contagem de partículas para a água decantada e filtrada dos filtros piloto F1, F2, F3 e F4.

Pode-se ver que, independente da hora, o número de partículas para os filtros F1, F2, F3 e F4 foram sempre muito próximos. Esse resultado confere com o observado na Figura 4, relativa a turbidez, pois em ambas os filtros apresentam comportamento muito parecido.

A Figura 6 apresenta os valores de contagem de partículas, medidos em metros, dos filtros piloto F1, F2, F3 e F4, respectivamente, ao longo do tempo.

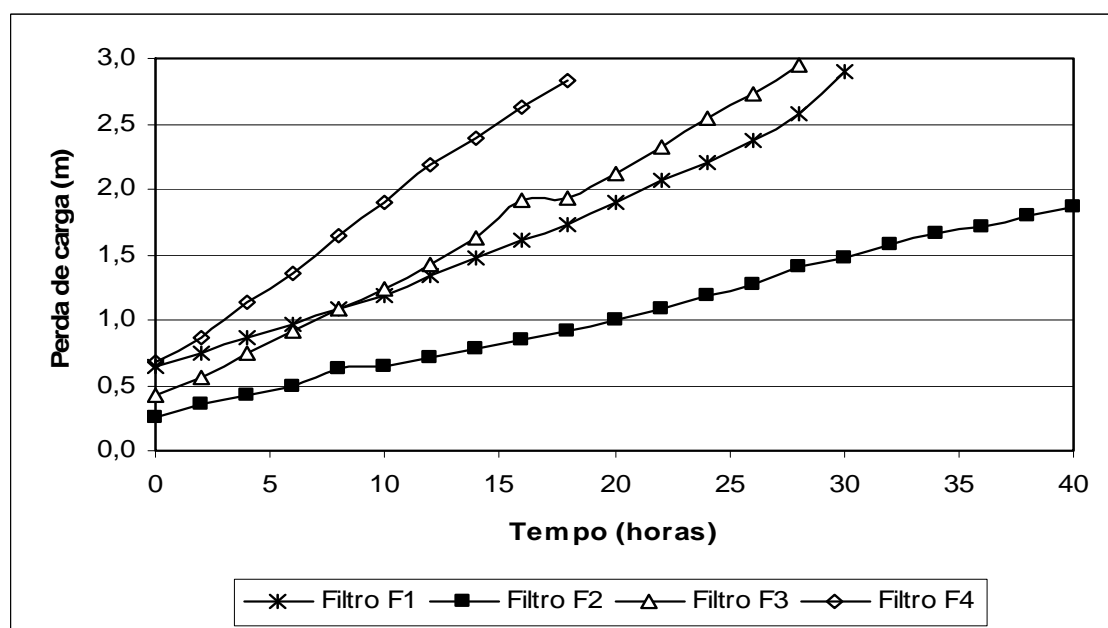


Figura 6: Evolução de perda de carga dos filtros piloto F1, F2, F3 e F4.

Com relação à perda de carga, pode-se observar uma diferença razoável entre os filtros piloto operados. A perda de carga alcançou valores limites, considerados para encerramento da carreira, iguais a 2,89, 2,95 e 2,83 m, para os filtros F1, F3 e F4, respectivamente. O tempo de duração das carreiras desses três filtros foi de 30, 28 e 18 horas, respectivamente, de maneira que esse último apresentou duração bem menor que os anteriores. Já o filtro F2, que apresentou os melhores resultados, chegou à perda de carga igual a 1,87 m, com duração de 40 horas, período limite estabelecido para o sistema.

As Figuras 7, 8, 9 e 10 mostram, respectivamente, a evolução da perda de carga pela altura do leito para os filtros F1, F2, F3 e F4.

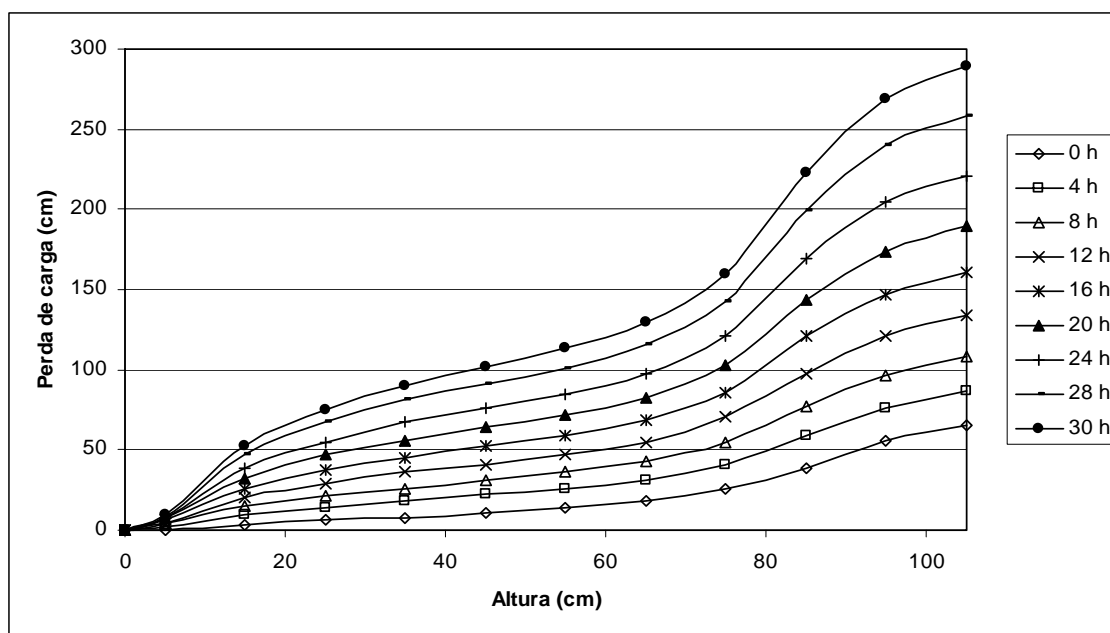


Figura 7: Evolução da perda de carga pela altura do leito (cm) para o filtro F1.

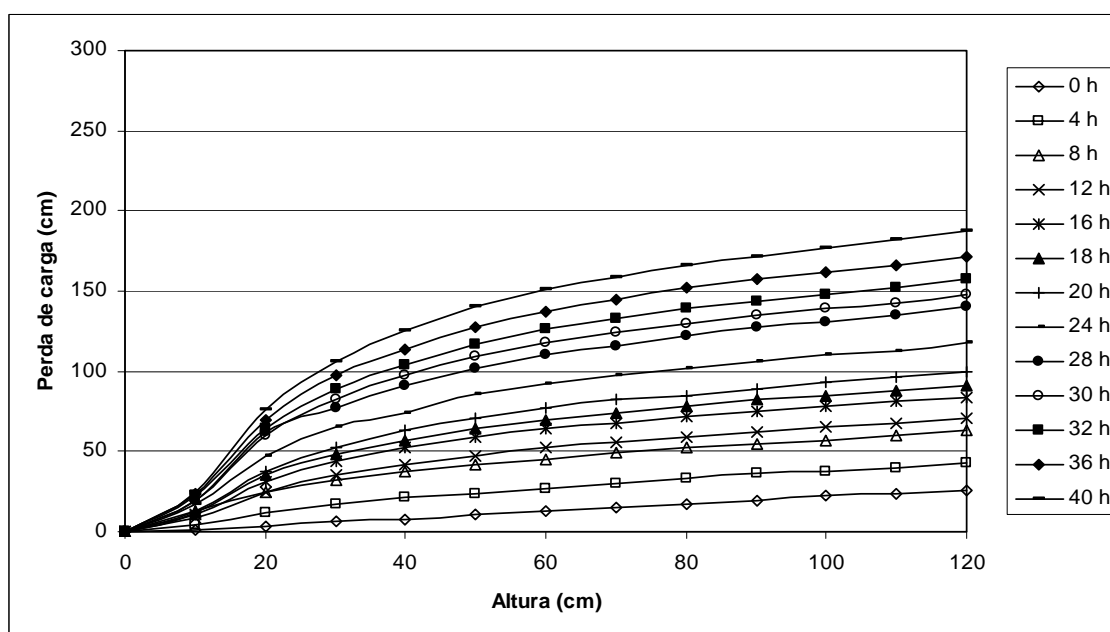


Figura 8: Evolução da perda de carga pela altura do leito (cm) para o filtro F2.

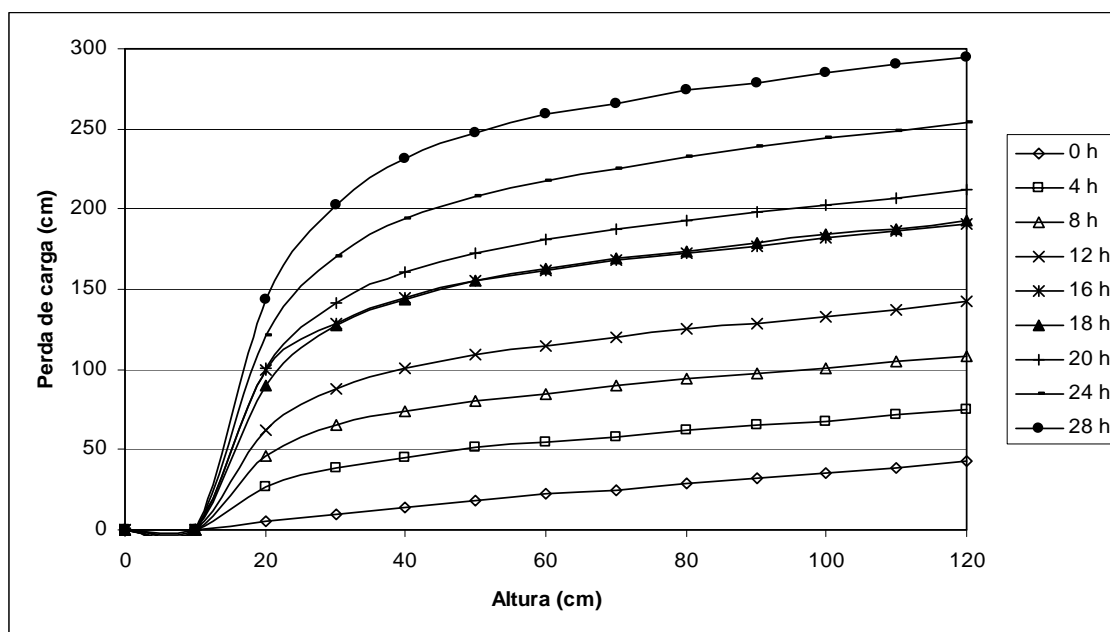


Figura 9: Evolução da perda de carga pela altura do leito (cm) para o filtro F3.

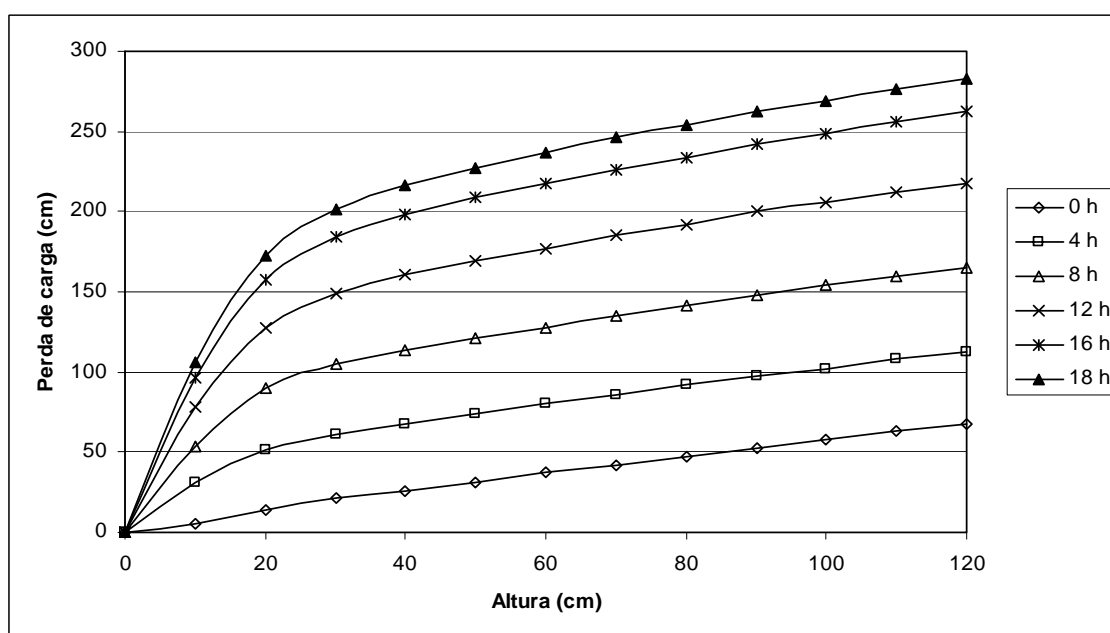


Figura 10: Evolução da perda de carga pela altura do leito (cm) para o filtro F4.

Essas figuras confirmam que o filtro piloto F2, com valor pouco inferior a 2 m, apresentou um valor de perda de carga – na sua distribuição ao longo do comprimento do leito – mais reduzido quando comparado com os filtros piloto F1, F3 e F4, que foram bem próximos a 3 m. É interessante observar o valor de perda de carga na sua distribuição ao longo do comprimento do leito para o filtro piloto F1. Por ter dois materiais filtrantes diferentes, fica nítida a mudança brusca nessa curva exatamente na altura de 80 cm, ponto da interseção entre areia e antracito.

A Tabela 3 apresenta um quadro resumo das quinze carreiras de filtração realizadas no tocante a qualidade da água em termos de turbidez. Foram realizados ao todo quinze ensaios de filtração.

**Tabela 3: Quadro resumo de valores de turbidez (UNT) média e desvio padrão para ensaios de filtração.**

Carreira	Água Bruta	Água Decantada	F1	F2	F3	F4
01	3,40 ± 0,46	1,04 ± 0,14		0,36 ± 0,10	0,28 ± 0,09	
02	3,62 ± 0,60	1,35 ± 0,24		0,47 ± 0,25	0,34 ± 0,17	
03	3,59 ± 0,87	0,37 ± 0,21		0,42 ± 0,38	0,34 ± 0,33	
04	2,71 ± 0,34	0,62 ± 0,42		0,24 ± 0,07	0,22 ± 0,05	0,26 ± 0,07
05	2,31 ± 0,43	1,74 ± 0,89		0,42 ± 0,12	0,34 ± 0,13	0,44 ± 0,13
06	1,88 ± 0,23	1,45 ± 0,47		0,33 ± 0,08	0,27 ± 0,10	0,32 ± 0,10
07	2,83 ± 0,61	1,21 ± 0,17	0,34 ± 0,11	0,40 ± 0,09	0,26 ± 0,07	0,33 ± 0,08
08	2,91 ± 0,48	1,29 ± 0,17	0,29 ± 0,09	0,37 ± 0,09	0,24 ± 0,05	0,28 ± 0,06
09	2,62 ± 0,30	1,16 ± 0,35	0,25 ± 0,05	0,33 ± 0,10	0,22 ± 0,04	0,38 ± 0,13
10	2,74 ± 0,34	1,04 ± 0,14	0,21 ± 0,05	0,27 ± 0,07	0,18 ± 0,03	0,24 ± 0,05
11	3,39 ± 0,48	1,08 ± 0,17	0,21 ± 0,05	0,31 ± 0,10	0,20 ± 0,05	0,23 ± 0,04
12	4,26 ± 0,71	1,42 ± 0,26	0,31 ± 0,13	0,33 ± 0,10	0,25 ± 0,06	0,27 ± 0,04
13	5,02 ± 1,21	1,82 ± 0,74	0,34 ± 0,15	0,43 ± 0,11	0,30 ± 0,10	0,40 ± 0,11
14	5,30 ± 1,21	1,79 ± 0,25	0,32 ± 0,16	0,33 ± 0,15	0,27 ± 0,12	0,31 ± 0,15
15	4,50 ± 0,66	1,17 ± 0,56	0,24 ± 0,06	0,30 ± 0,06	0,22 ± 0,04	0,30 ± 0,05
Média Total	3,41 ± 0,30	1,24 ± 0,23	0,28 ± 0,04	0,35 ± 0,09	0,26 ± 0,08	0,31 ± 0,04

Analisando-se a Tabela 3, pode-se notar que não há grande diferença entre os valores médios de turbidez, principalmente entre os filtros F1, F3 e F4. O que pode explicar o fato do filtro F2 ter apresentado uma média um pouco superior aos demais são as carreiras mais longas que esse filtro conseguiu alcançar. Diferentemente dos demais filtros, F2 quase sempre chegou muito próximo a 40 horas, sendo que nessas horas finais podia se observar uma natural piora na qualidade do efluente produzido.

CONCLUSÕES

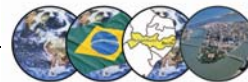
Com base nos resultados experimentais obtidos com o trabalho, pôde-se concluir que:

A adoção do antracito como material filtrante do tipo camada única e profunda apresenta como vantagens o fato de permitir uma menor velocidade ascensional de água de lavagem para uma determinada expansão quando comparado com um filtro de areia de idêntica granulometria, o que pode apresentar uma grande economia no tocante aos custos do sistema de lavagem, recuperação da água de lavagem e seu posterior tratamento;

O filtro piloto que apresentou melhores resultados com respeito a menor evolução de perda de carga, maior duração da carreira de filtração e qualidade de água filtrada satisfatória foi o F2 (Antracito 1,3 mm). Em contra partida, o filtro F4 pode ser considerado o de pior comportamento quando comparado com os demais;

Durante o período em que os filtros piloto F1, F2, F3 e F4 operaram em paralelo, não foi observada nenhuma diferença significativa entre a qualidade da água filtrada em cada um destes em termos de turbidez, tendo sido a taxa de evolução de perda de carga o parâmetro de maior distinção;

Os resultados experimentais apresentados indicam de forma bastante clara que, quando melhor for a qualidade da água decantada, melhores tenderão a ser o comportamento do sistema de filtração com respeito à qualidade da água filtrada, evolução de perda de carga e tempo de duração da carreira. Assim sendo, todos os esforços que forem efetuados tendo por propósito garantir uma melhora da qualidade da água decantada serão extremamente benéficos ao sistema de filtração, tanto com respeito à qualidade da água filtrada e evolução da perda de carga. Portanto, um controle efetivo do processo de coagulação e floculação que possibilite a produção de uma água decantada com valores de turbidez inferior a 1,0 UNT deve ser considerado como uma excelente estratégia operacional de melhoria do sistema de filtração atualmente implantado na ETA Rio Grande;



Com respeito aos valores de contagem de partículas, suspeita-se que, em determinados períodos de tempo, a ETA Rio Grande esteja trabalhando em condições de coagulação críticas ou sub-críticas, isto é, operando com uma dosagem de coagulante em condições inferiores às normais. Assim sendo, um grande número de partículas coloidais presentes na água decantada, ao não terem sido devidamente coaguladas, podem ainda estar presente na água decantada e, não tendo sido desestabilizadas quimicamente, não apresentariam condições de serem removidas no processo de filtração, o que tende a se refletir na qualidade da água filtrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CUNHA Jr, N. P. Estudo comparativo de filtros rápidos de camada simples de areia e de camada dupla. Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), 217p, 1992.
2. DI BERNARDO, L. Métodos e técnicas de tratamento de água. Volume II, 503p. Rio de Janeiro, ABES, 1993.
3. FERREIRA FILHO, S. S. Fluidificação e Expansão de Meios Filtrantes Duplos Constituídos de Areia-Antracito e Areia-Carvão Ativado Granular. In: 18º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1995.