

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INFLUENCIA DO DIAMETRO EFETIVO DO MEIO FILTRANTE EM FILTROS LENTOS RETROLAVAVEIS

Fernando Hymnô de Souza

Orientador: Bruno Segalla Pizzolatti

2012.2



Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

FERNANDO HYMNO DE SOUZA

**INFLUENCIA DO DIAMETRO EFETIVO DO MEIO FILTRANTE EM
FILTROS LENTOS RETROLAVAVEIS**

FLORIANÓPOLIS, (SC)
FEVEREIRO/2013

FERNANDO HYMNO DE SOUZA

**INFLUENCIA DO DIAMETRO EFETIVO DO MEIO FILTRANTE EM
FILTROS LENTOS RETROLAVAVEIS**

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental- TCC II

Orientador: Bruno Segalla Pizzolatti

FLORIANÓPOLIS, (SC)
FEVEREIRO/2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

INFLUENCIA DO DIAMETRO EFETIVO DO MEIO FILTRANTE EM FIL-
TROS LENTOS RETROLAVAVEIS

FERNANDO HYMNO DE SOUZA

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte
dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação
em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II

BANCA EXAMINADORA :



Bruno Segalla Pizzolatti, Msc.
(Orientador)



Juliana Schöntag, Msc.
(Membro da Banca)



Prof. Dr. Mauricio Luiz Sens
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
FEVEREIRO/2013

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, pelo total apoio e incentivo aos meus estudos e sem a qual não seria quem sou hoje.

Aos meus avós e minha tia avó por sempre terem sido um exemplo de força na vida, ao meu pai Pedro, pelo exemplo de dedicação e comprometimento com o trabalho, à minha mãe Vera por me ensinar a amar e respeitar as pessoas, e à minha irmã Karina por ter me ensinado a ter coragem de enfrentar o desconhecido.

Aos meus queridos amigos do LAPOA, Aloísio, Carolina, Caroline, Estela, Fernanda e Renata pelo companheirismo durante tantos anos como bolsista e em especial à Fernanda Poerch, pelos inúmeros dias de Lagoa do Peri, em que realizamos os ensaios de expansão para esse trabalho.

Aos técnicos, mestrandos e doutorandos do ENS com quem tive contato nesses anos de laboratório, e que sempre se dispuseram a me ajudar e ensinar: Arlete, Dna. Eliane e Victor do LIMA; e Bianca, Denise, Juliana, Márcio, Marcus, Marina, Renata e Rívea do LAPOA.

Ao Dr. Luis Romero Esquivel, por ter sido um grande mestre durante nosso tempo de trabalho juntos.

Aos meus professores da graduação, cujos bons exemplos seguirei em minha profissão.

Ao Professor Dr. Maurício Luis Sens, responsável pelo LAPOA, onde tive oportunidade de realizar este trabalho.

Aos meus “velhos” amigos de faculdade, por sempre estarem ao meu lado, Nathália, Priscila, Raul, Renata e Tânia; e aos meus “novos”

amigos, que me receberam de braços abertos em meu retorno à UFSC, Camila, Chélsa, Cybelle, Karina e Paulo.

À CASAN e técnicos da ETA da Lagoa do Peri, pelo espaço onde foi construído o piloto.

À CAPES e aos responsáveis pelo Brafitec, que proporcionou uma grandiosa, enriquecedora e inesquecível experiência durante minha graduação. Em especial aos professores Henrique de Melo Lisboa e Claire LeHenaff, e aos meus amigos de intercâmbio: Fran, Ju, Luis, Rodrigo e Tany.

Aos meus irmãos escoteiros, minha segunda família.

E por fim ao Bruno Segalla Pizzollati, orientador deste trabalho, pela orientação, amizade e companheirismo durante toda a minha estada no LAPOA.

Sumário

Agradecimentos	i
Resumo	v
Abstract	v
Índice de Figuras	vi
1 Introdução	1
2 Objetivos	2
2.1 Objetivo geral:	2
2.2 Objetivos específicos:	2
3 Revisão bibliográfica	2
3.1 Filtração lenta	2
3.2 Princípios da filtração lenta	3
3.3 Aplicações e técnicas	4
3.4 Limpeza dos filtros	5
3.4.1 Raspagem	5
3.4.2 Retrolavagem	6
4 Metodologia	7
4.1 O Laboratório de Potabilização de Águas (LAPOA)	7
4.2 A Lagoa do Peri (LP)	7
4.3 Ensaio preliminares	8
4.3.1 Ensaio granulométricos	8
4.3.2 Ensaio de expansão	8
4.4 Dimensionamento do sistema piloto	11
4.4.1 Dimensionamento dos filtros lentos convencionais	11

4.4.1	Dimensionamento dos filtros lentos retrolaváveis	12
4.5	Construção do sistema piloto	15
4.6	Operação do sistema piloto	16
4.7	Monitoramento	17
5	Resultados e Discussão	18
5.1	Resultados dos ensaios preliminares	18
5.1.1	Características da Areia I	19
5.1.2	Características da Areia II	20
5.1.3	Características da Areia III	22
5.2	Qualidade da água bruta e água filtrada	23
5.3	Limpeza dos filtros	26
5.4	Recuperação dos filtros	28
5.5	Operação do sistema	30
5.5.1	Carreira de filtração	30
5.5.2	Consumo de água para retrolavagem	32
5.5.3	Operação de limpeza dos filtros	33
5.5.4	Produção efetiva	35
6	Conclusões e Recomendações	37
7	Bibliografia	39
8	Anexo 1	42
8.1	Planilha de calculo do ensaio granulométrico da Areia I	42
8.2	Planilha de calculo do ensaio granulométrico da Areia II	43
8.3	Planilha de calculo do ensaio granulométrico da Areia III	44

Resumo

Filtros lentos são considerados por diversos autores uma excelente alternativa para o fornecimento de água potável em comunidades rurais e/ou isoladas, quando se dispõe de um manancial passível de tratamento com esta técnica. Esta tecnologia opera com taxa de filtração de 3 a 12 m³/m².dia, 20 a 50 vezes menores que os filtros rápidos. Alguns trabalhos utilizam a retrolavagem como forma alternativa de limpeza de filtro lento com área superficial reduzida com o objetivo de aplicar a tecnologia em pequenas comunidades, uma vez que cada filtro abastece um número pequeno de pessoas. Neste trabalho foi avaliada a influência do diâmetro efetivo na qualidade de água nos filtros avaliados. A maioria dos filtros apresentaram em média turbidez menor que 1,0 uT, exigido na saída dos filtros pela portaria nº2914/11 do Ministério da Saúde. No estudo, os filtros de menor diâmetro efetivo apresentaram a melhor qualidade na água filtrada, assim como maior produção efetiva.

Palavras chave: Filtração lenta, retrolavagem, limpeza, meio filtrante, tratamento de água.

Abstract

Slow sand filters are considered by many authors a great alternative to the drinking water supply in rural and / or isolated areas where raw water that is treatable with this technique is available. Those filters operate at filtration rates of 3-12 m³(m²day)⁻¹, 20 to 50 times smaller than the rapid sand filters. Some studies use backwashing as an alternative for cleaning the slow sand filter with the goal of applying the technology in small communities, since filters that supply water to a small number of people don't require much space. In this study it was evaluated the influence of the effective diameter in water quality in the filters. Most filters had an average turbidity of less than 1.0 NTU, turbidity required at the output of the filters by decree No. 2914/11 of the Brazilian Ministry of Health. In the study, smaller diameter filter beds had effectively filtered water of better quality, and effective production.

Keywords: Slow sand filtration, backwashing, filter cleaning, filter bed, water treatment.

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema do sistema piloto para o ensaio de expansão.....	10
Figura 2 – Filtro lento convencional (FLC)	12
Figura 3 – Filtro lento retrolavável (FLR)	14
Figura 4 – Foto dos pilotos montados.....	16
Figura 5 - Limpeza por raspagem no FLC.....	17
Figura 6 – Perdas de carga na Areia I durante a retrolavagem.....	19
Figura 7 – Expansão em função da velocidade de aproximação da Areia I.....	20
Figura 8 – Perdas de carga na Areia II durante a retrolavagem.....	21
Figura 9 – Expansão em função da velocidade de aproximação da Areia II.....	21
Figura 10 – Perdas de carga na Areia III durante a retrolavagem.....	22
Figura 11 – Expansão em função da velocidade de aproximação da Areia III.....	23
Figura 12 – Turbidez média da água filtrada.....	25
Figura 13 – Cor média da água filtrada.....	25
Figura 14 – Turbidez durante a retrolavagem dos FLR.....	27
Figura 15 – Turbidez durante a recuperação dos FLC.....	28
Figura 16 – Turbidez durante a recuperação dos FLR.....	29
Figura 17 – Carreira de filtração dos FLCs e FLRs.....	31
Figura 18 – Consumo médio de água para a limpeza dos FLRs.....	33
Figura 19 – Produção efetiva dos filtros.....	36

1 Introdução

Muito se discute sobre a água nos dias atuais. Que é essencial à vida e está cada vez mais escassa. Cerca de 70,8 % da superfície terrestre está coberta por água, mas apenas 2,7 % é doce e dessa, menos de um terço está disponível para o consumo humano. Nesse consumo inclui-se a utilização nas indústrias, a produção de alimentos e o consumo doméstico para a higiene e, principalmente, ingestão e preparação alimentos.

Mais de um terço da população mundial vive com escassez de água, um déficit que chega a 24,1 % no Brasil (CLARKE; KING, 2005). Déficit relacionado não apenas com a inexistência desse recurso, mas da falta de acessibilidade, seja por sua má qualidade ou pela distância em que se encontra. Por servir como vetor de doenças que ocasionam, por exemplo, a diarreia, é essencial que haja o acesso à água potável (CLASEN *et al.*, 2006).

Estima-se pela Organização mundial da Saúde que 200 pessoas morrem a cada hora devido a condições precárias de saneamento e higiene (CLARKE; KING, 2005).

Várias são as tecnologias que podem ser empregados para o tratamento de água, algumas muito simples e outras mais complexas e modernas, dependendo da qualidade da água bruta a ser tratada e a qualidade desejada. Entretanto, a população nem sempre tem acesso à água tratada pelos sistemas de abastecimento, sendo a população rural a mais afetada no Brasil onde apenas 33% da população tem cobertura (IBGE, 2010).

Há mais de dez anos, o Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) estuda sistemas descentralizados de tratamento, ou seja, sistemas de pequeno porte que podem ser empregados pontualmente onde há sua necessidade, atendendo um número pequeno de pessoas.

Um desses sistemas é o filtro lento retrolavável, baseado num dos sistemas mais antigos e simples de tratamento, a filtração lenta, e que teve seu sistema de limpeza aprimorado. No entanto, parâmetros de operação ainda precisam de aperfeiçoamento para uma melhor aplicação da tecnologia, justificando a realização de mais estu-

dos, como esse trabalho de conclusão de curso que tem como objetivo avaliar a influência do diâmetro efetivo (d_{10}) do meio filtrante na qualidade da água filtrada em filtros lentos retrolaváveis.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral:

Avaliar a influência do diâmetro efetivo do meio filtrante em filtros lentos retrolaváveis em relação à qualidade de água produzida.

2.2 Objetivos específicos:

- Avaliar e comparar a qualidade da água produzida em termos de cor aparente e turbidez;
- Avaliar e comparar os métodos de limpeza: retrolavagem e raspagem;
- Avaliar a recuperação dos filtros após a operação de limpeza e produção efetiva de água;

3 Revisão bibliográfica

3.1 Filtração lenta

A filtração lenta (FL) é uma tecnologia para a purificação de água utilizada há séculos e ainda considerada eficiente. Em sistemas desse tipo a água é introduzida no filtro com baixas taxas de filtração (entre 3 e 12 m³/m².dia), o que permite o tratamento principalmente por meio das atividades biológicas.

Esses sistemas também são reconhecidos por sua simplicidade na construção e operação, por poderem ser utilizados recursos locais e de não precisarem de dosagem de produtos químicos durante a operação. (GIMBEL *et al.*, 2006; LANGENBACH *et al.*, 2010; SÁ *et al.*, 2004)

Estima-se que essa técnica é a mais antiga para o tratamento de água e que perdeu espaço devido ao aparecimento de tecnologias

mais avançadas e a necessidade de menores áreas para implementação. No entanto, atualmente é utilizada principalmente para a potabilização de água em comunidades que não têm acesso a sistema público de abastecimento, onde a instalação e operação de Estações de Tratamento de Água (ETA) é algo inviável.

Deste modo, a filtração lenta torna-se interessante para essa situação por ser de fácil operação, pois necessita apenas de cloração final para desinfecção da água. (BRASIL, 2011; LOGSDON, G. *et al.*, 2002)

Pesquisas apontam que, apenas com a utilização de tratamentos de água a nível familiar, comunidades que não possuem acesso ao sistema público de abastecimento podem reduzir significativamente o risco da incidência de diarreia. (CLASEN *et al.*, 2006; FEWTRELL *et al.*, 2005).

Estima-se que aproximadamente 1,8 milhões de pessoas anualmente em todo o mundo tem sua morte relacionada à diarreia, sendo crianças as mais vulneráveis (WHO, 2004), justificando-se então a aplicados dos filtros lentos, por se tratar de uma técnica que melhora significativamente a qualidade da água em termos bacteriológicos, relacionando-se então com a mitigação de ocorrência das doenças infecciosas. (STAUBER *et al.*, 2012)

3.2 Princípios da filtração lenta

Devido às baixas taxas de filtração, essa técnica atua principalmente com três mecanismos: mecanismos de transporte, aderência e, principalmente, as atividades biológicas. (HUISMAN; WOOD, 1974)

Dentre os mecanismos de transporte destacam-se a ação física de coar e a sedimentação, que removem as partículas em suspensão que não conseguem passar pelos poros devido ao seu tamanho e densidade relativa respectivamente. Esta ação ocorre principalmente na superfície dos filtros onde essas partículas ficam retidas e fazem parte do chamado *schmutzdecke* (HUISMAN; WOOD, 1974).

O *schmutzdecke*, também conhecido como camada biológica superficial, é uma camada de algas, bactérias e outros organismos presentes na água bruta que se deposita principalmente na camada superficial do meio filtrante e está relacionado com a redução de

matéria orgânica e patógenos na água tratada (LUIS *et al.*, 1999; MCNAIR *et al.*, 1987; MELO, 2006).

No mecanismo de adsorção, as partículas em contato com superfície dos grãos podem ficar presas devido a forças eletrostáticas, de Van der Waals e de aderência, a mais importante entre elas. Durante o amadurecimento do filtro partículas orgânicas são arrastadas e depositam-se na superfície dos grãos da parte mais superior na camada filtrante. Isso propicia a sobrevivência de microrganismos que formam um material viscoso conhecido como zoogleia, que consiste nesses organismos, suas excretas e células mortas. (HUISMAN; WOOD, 1974)

Por fim as atividades biológicas é o mecanismo mais importante de purificação durante a filtração lenta. Como citado anteriormente os microrganismos estão presentes no meio filtrante, aderidos à superfície dos grãos ou no *schmutzdecke*, onde podem existir organismos predadores que se alimentam de bactérias, já no meio filtrante a oxidação bioquímica diminui a concentração de matéria orgânica. (HUISMAN; WOOD, 1974)

3.3 Aplicações e técnicas

O principal uso da FL é para remoção de matéria orgânica e organismos patogênicos, aplicando-se apropriadamente a águas superficiais de baixa turbidez, apesar de águas com altos valores de turbidez serem suportadas em curtos períodos de tempo. Aplica-se ainda à remoção de matéria particulada em suspensão e ainda à remoção de sólidos em suspensão de águas subterrâneas. (HUISMAN; WOOD, 1974).

As limitações desse processo é a demanda de maiores áreas em relação aos filtros rápidos para a produção da mesma quantidade de água tratada (fator que pode ser limitante quando a área é restrita), mão de obra para a limpeza, grandes variações de qualidade da água como aumento de turbidez e presença de certos tipos de algas (HUISMAN; WOOD, 1974; MANZ, 2004).

Dentre suas vantagens destacam-se a qualidade da água tratada, baixos custos e fácil construção, operação fácil e barata, economia de água por necessitar de menos limpeza do que filtros rápidos, menor geração e possibilidade do aproveitamento de lodos (HUISMAN; WOOD, 1974).

3.4 Limpeza dos filtros

Existem diferentes técnicas para a limpeza de filtros lentos, dentre elas a raspagem é a mais utilizada. Estudos recentes apresentaram a retrolavagem como uma técnica eficiente para a limpeza desses filtros, no entanto ainda restam questões ainda a serem respondidas sobre essa técnica que se apresenta promissora por sua facilidade em relação à raspagem. (EMMENDOERFER, 2006; MICHELAN, D. C. G. DOS S., 2010; PIZZOLATTI, B.S. *et al.*, 2010; SOARES *et al.*, 2010)

3.4.1 Raspagem

Para que a raspagem seja feita, primeiramente o filtro é drenado até que a superfície do meio filtrante esteja aparente para ser raspada. Esse processo de drenagem pode ser demorado, portanto é aconselhável que haja outros filtros para suportar a demanda de água, por exemplo, funcionando com maior taxa de filtração. Desde que o *schmutzdecke* esteja seco o bastante para poder ser removido a raspagem pode ser efetuada. Não é aconselhável que fique muito tempo exposto, pois pode atrair pássaros que podem contaminar os filtros. (HUISMAN; WOOD, 1974)

Após a secagem o *schmutzdecke* é retirado juntamente com a areia na superfície. Esse processo pode ser feito manualmente por operários ou mecanicamente. O tipo de organismos presentes no *schmutzdecke* pode tornar a limpeza mais fácil ou mais difícil de ser efetuada. É importante que não seja muito demorado para que não haja distúrbios na biota presente na areia remanescente. Desde que o filtro não tenha sido inteiramente drenado, rapidamente os microrganismos se reestabelecem. (HUISMAN; WOOD, 1974)

Após a raspagem a areia é limpa e reposta no filtro. Costuma-se raspar o filtro até que seja atingido o nível mínimo de areia dos filtros para assim ser reposta a areia. Uma técnica também adotada é a de se colocar uma parte de areia limpa após a raspagem sobre essa uma parte de areia que foi retirada, diminuindo-se o tempo de amadurecimento do filtro.

3.4.2 Retrolavagem

A retrolavagem com água é o processo utilizado para a limpeza de filtros rápidos em estações de tratamento de água (BERNARDO, DI; DANTAS, 2005). Esse processo é também apresentado por estudos do LAPOA como uma alternativa para a limpeza de filtros lentos, normalmente limpos por raspagem manual. Para esses sistemas a retrolavagem apresenta-se como promissora pela facilidade de limpeza apresentada em relação aos sistemas convencionais (PIZZOLATTI, B S, 2010; SOARES *et al.*, 2010).

Na retrolavagem um fluxo de água ascendente é utilizado para a fluidificação do meio filtrante. Para haver a limpeza do filtro o meio filtrante deve estar parcialmente ou totalmente fluidificado e para isso necessita de uma velocidade mínima de fluidificação (HENDRICKS, 2011).

Num meio estático saturado as pressões entre os grãos são devidas à resultante das forças peso e empuxo. Essa resultante é reduzida durante a retrolavagem devido às forças de arraste que agem sobre os grãos. Em determinado ponto, ao atingir-se uma velocidade, essas pressões entre os grãos tornam-se zero, ponto a partir de onde a fluidificação é iminente. Qualquer velocidade acima dessa vai fluidificar o meio filtrante e a perda de carga torna-se constante (HENDRICKS, 2011).

Os sistemas de filtros lentos retrolaváveis são sistemas de filtração lenta onde a água filtrada é armazenada em um reservatório elevado. No momento em que há colmatação do meio filtrante (o fim da carreira) é feita a limpeza do filtro. Nesse sistema, a limpeza, ao invés de ser por raspagem como nos sistemas convencionais, é feita pela inversão do fluxo da água filtrada, que retorna do reservatório elevado com carga hidráulica suficiente para expandir e limpar o meio filtrante. Esse sistema foi proposto inicialmente por Sens em 1992 em um curso ministrado na Universidade Federal de Santa Catarina (EMMENDOERFER, 2006) e é desenvolvido e aprimorado por estudos do Laboratório de Potabilização das Águas no departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental desta mesma universidade.

4 Metodologia

Para a avaliação da influência dos diâmetros efetivos nos FLs foram construídos seis sistemas piloto de filtração. Três com limpeza convencional por raspagem (FLC) e três retrolaváveis (FLR) que foram operados aos pares, cada qual com um diâmetro efetivo diferente. Os sistemas foram operados nas instalações do Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOA) junto à Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri. Os FLRs foram operados primeiramente com 25% de expansão da areia na retrolavagem.

4.1 O Laboratório de Potabilização de Águas (LAPOA)

O LAPOA desenvolve pesquisas focando a potabilização de águas, inclusive no aprimoramento de tecnologias descentralizadas, que possam ser utilizadas em comunidades isoladas, onde se aplicam os FLs.

É sediado no Campus Universitário da UFSC em Florianópolis no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental onde possui um laboratório de manipulação equipado para realização de análises físico-químicas de água. Possui também um laboratório de apoio (LALP) na Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, operada pela Companhia Catarinense de Água e Esgoto (CASAN), onde se encontram diversos sistemas piloto instalados para realizações de pesquisas.

4.2 A Lagoa do Peri (LP)

A Lagoa do Peri está localizada na ilha de Florianópolis. Sua água é utilizada para o abastecimento de parte da população do sul e do leste desta ilha, após tratamento por meio de filtração direta. (PIZZOLATTI, B.S. *et al.*, 2010)

Uma característica peculiar da água dessa lagoa é a presença de altas concentrações de cianobactérias, predominantemente *Cylindrospermopsis raciborskii* e *Pseudanabaena galeata*, ambas filamentosas, produtoras de hepatoxinas e neurotoxinas que causam intoxi-

cações agudas e crônicas, atingindo as células do fígado e o Sistema Neuromuscular, podendo levar à morte de animais em minutos, horas ou dias. (MONDARDO *et al.*, 2006)

A presença de altas concentrações de algas, principalmente as filamentosas, é desfavorável à operação dos filtros, havendo transpasse de células em meios filtrantes de diâmetros efetivos maiores, reduzindo significativamente a carreira de filtração (SÁ *et al.*, 2004), o que pode não interessante para a filtração.

4.3 Ensaios preliminares

Para o dimensionamento do sistema ensaios preliminares tiveram que ser realizados. De tal modo determinaram-se parâmetros de projeto dependentes das características do meio filtrante, sendo: o diâmetro efetivo, as perdas de carga no sistema durante a retrolavagem e enfim a velocidade de aproximação da água durante a retrolavagem, garantindo a expansão desejada para o meio filtrante nesse momento.

Para obtenção desses parâmetros, dois tipos de ensaios foram realizados: ensaios de expansão e granulométricos, cada qual com todos os tipos de areia a serem utilizadas.

4.3.1 Ensaios granulométricos

Os ensaios granulométricos foram efetuados para a determinação do diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade da areia utilizada nos pilotos segundo a norma ABNT NBR 7181:1984. Os ensaios foram realizados com areias lavadas e posteriormente secas para eliminação de sujeiras e fração mais fina que geralmente é carregada em limpezas.

4.3.2 Ensaios de expansão

A velocidade mínima de fluidificação (v_{mf}) e a perda de carga no meio filtrante (h_f) foram determinadas experimentalmente. Para isso utilizam-se filtros largos o bastante a permitir que o meio filtrante fluidifique em consequência do aumento do fluxo de água.

Antes da realização destes testes uma retrolavagem deve ser efetuada para que seja observado o comportamento do material do

leito filtrante. Qualquer coluna em que o meio filtrante expanda como um pistão, sendo impulsionado pela água abaixo deste, é considerada muito pequena para a sua utilização na a determinação da velocidade de fluidificação. Se o meio fluidifica naturalmente sem esse comportamento de pistão a coluna é apropriada para a determinação da velocidade de fluidificação (LOGSDON, G. S., 2008).

Em seguida aumenta-se gradualmente o fluxo de água para a realização do ensaio, assim obtêm-se os dados de perda de carga e expansão em função das velocidades aplicadas.

Os ensaios foram realizados em um sistema já existente no Laboratório de Águas da Lagoa do Peri (LALP) e que já foi anteriormente utilizado para o mesmo propósito. Foram três ensaios com areias de diâmetros efetivos previstos de 0,20 mm, 0,30 mm e 0,55 mm.

O esquema do filtro piloto está apresentado na Figura 1. Este filtro é preenchido por uma camada suporte de 15 cm e 40 cm de meio filtrante

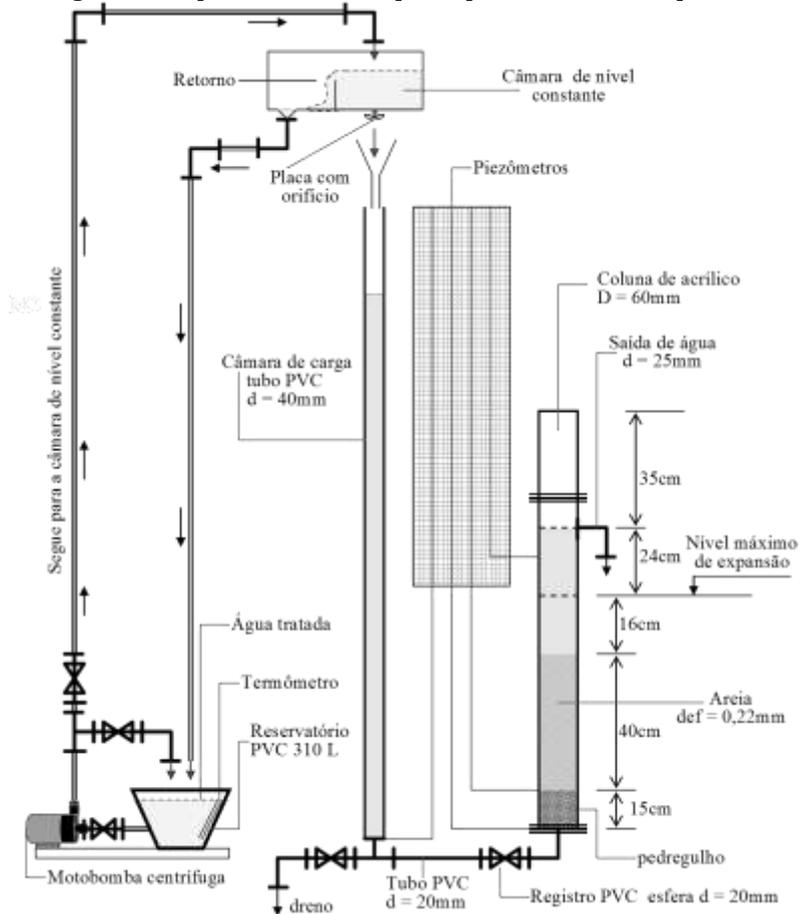
Os ensaios realizaram-se com água tratada utilizada na estação de tratamento de água (ETA) da lagoa do Peri, que é bombeada para uma câmara de nível constante, de onde por gravidade, alimenta a câmara de carga do sistema piloto. Os parâmetros avaliados no ensaio foram: vazão, velocidade de aproximação (calculada pela vazão medida), perdas de carga, expansão e temperatura.

A vazão é controlada por câmara de nível constante com escoamento por orifício. Para a obtenção de vazões diferentes trocam-se placas com orifícios diferentes. Essa vazão é aferida volumetricamente com o auxílio de uma proveta graduada e cronômetro.

As perdas de carga são medidas em piezômetros que indicam a carga hidráulica abaixo da camada suporte (P1), entre essa camada e o meio filtrante (P2) e acima do meio filtrante (P3). A perda de carga pode-se então ser calculada, na camada suporte pela diferença entre P2 e P1, e no meio filtrante, pela diferença entre P3 e P2.

Para a medição da expansão o sistema possui marcações ao longo da coluna, que é transparente, acima do meio filtrante onde a expansão pode ser visualizada (Figura 1).

Figura 1 – Esquema do sistema piloto para o ensaio de expansão.



(EMMENDOERFER, 2006)

Assim para cada orifício utilizado, aplica-se uma vazão e ao estabilizar-se o sistema medem-se P1, P2, P3, vazão e expansão (E%) e repete-se a cada orifício. A partir da vazão e da área interna da coluna calcula-se a velocidade de aproximação (v_a).

4.4 Dimensionamento do sistema piloto

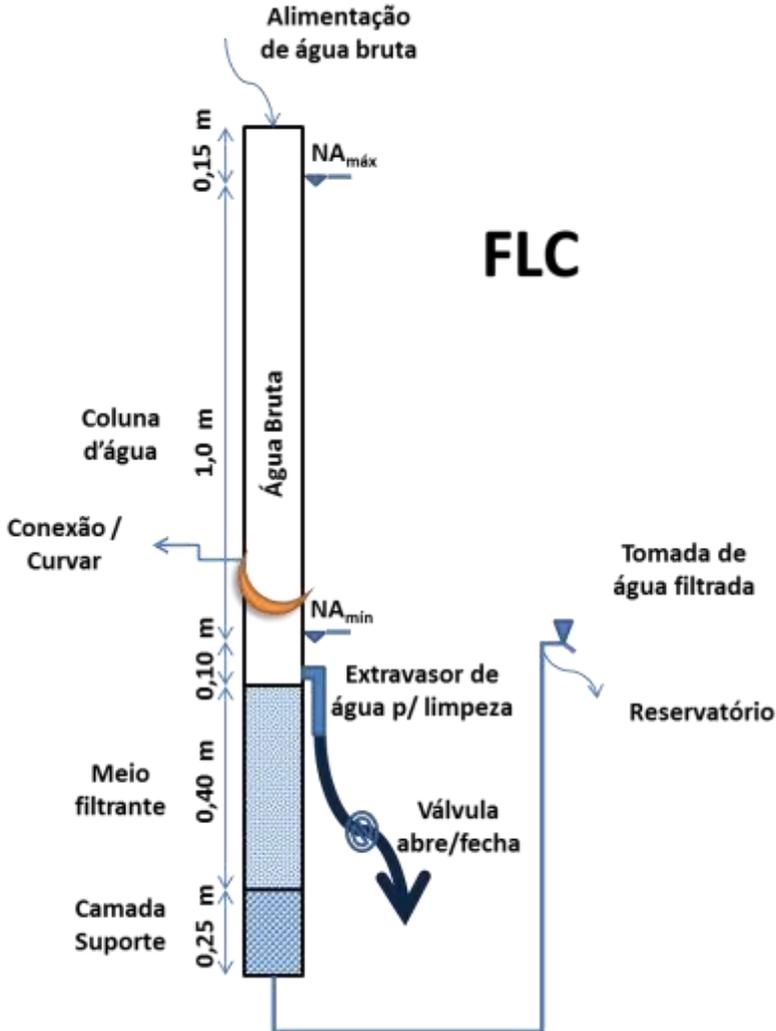
4.4.1 Dimensionamento dos filtros lentos convencionais

Os sistemas de FLC (Figura 2) foram dimensionados todos iguais, pois o diâmetro efetivo do meio filtrante não tem influência no dimensionamento nesse caso. Assim os parâmetros construtivos (Tabela 1) foram adotados igualmente para todos eles.

Tabela 1 - Parâmetros construtivos dos FLCs.

Parâmetro construtivo	Alturas (m)
Camada suporte	0,25
Leito filtrante	0,40
Altura mínima de lâmina d'água (NA_{min})	0,10
Carga hidráulica máxima	1,00
Segurança acima do ladrão	0,15
Total	1,90

Figura 2 – Filtro lento convencional (FLC)



4.4.1 Dimensionamento dos filtros lentos retrolaváveis

Diferentemente dos sistemas de FLC, os FLR (Figura 3) possuem diferenças construtivas devido aos diferentes diâmetros efetivos de seus meios filtrantes. Essa diferença é observada no dimen-

sionamento do reservatório que deve garantir o volume suficiente de água para a retrolavagem e carga hidráulica disponível, isso depende da velocidade de aproximação necessária que é diferente em cada caso.

Os parâmetros construtivos adotados nos FLRs (Tabela 2) foram similares aos dos FLC. No entanto, devido à necessidade de retrolavagem os filtros precisam de espaço para a expansão e de mais altura para fornecer a carga hidráulica para que a água do reservatório elevado vença a perda de carga no meio filtrante e efetue a retrolavagem.

Tabela 2 - Parâmetros construtivos dos FLRs.

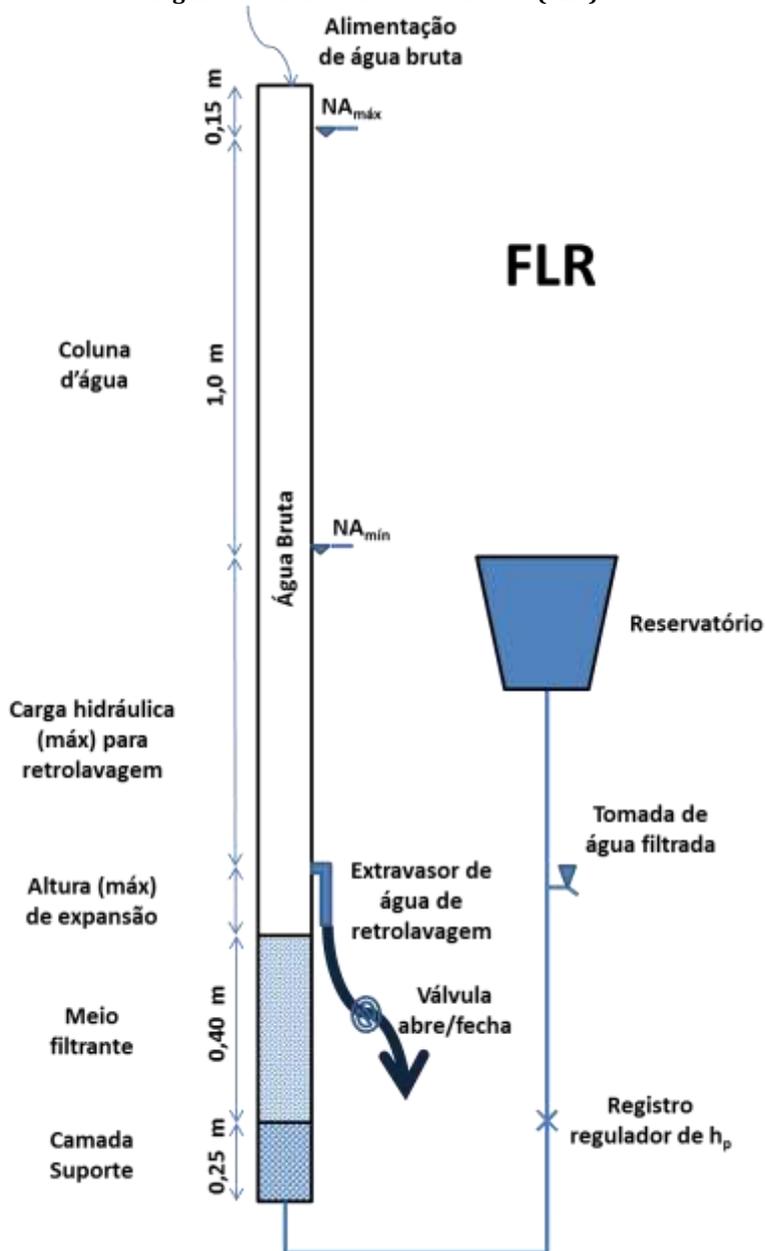
Parâmetro construtivo	Alturas (m)
Camada suporte	0,25
Meio filtrante	0,40
Expansão máxima	0,25
Carga hidráulica máxima para a retrolavagem	0,65
Carga hidráulica máxima para filtração	1,00
Segurança	0,15
Total	2,70

Nota-se então a diferença de alturas entre os FLC e os FLR devido à carga hidráulica fornecida para a retrolavagem. Altura essa necessária devido ao reservatório ser alimentado pela carga de filtração. A carga foi baseada nos ensaios de expansão pela h_p no meio fluidificado.

Para a padronização dos filtros e a possibilidade na variação de expansões, os reservatórios foram colocados todos à mesma altura com carga hidráulica oferecida acima do necessário. Ressalta-se que como o reservatório se esvazia, sua cota de fundo deve compensar a perda de carga no meio fluidificado e na tubulação.

Assim para regular-se o contra fluxo da retrolavagem foram instalados registros de gaveta, possibilitando o aumento ou diminuição da h_p .

Figura 3 - Filtro lento retrolavável (FLR)



Por fim foi calculado o volume do reservatório. Para isso foram consideradas as v_a na expansão desejada (apresentadas na seção 5.1) e o tempo de retrolavagem adotado (4 min), assim pela (Equação 1) obtiveram-se os volumes dos reservatórios para o FLR1, FLR2 e FLR3.

(Equação 1)

$$V = A_s \times v_a \times t \times 1000$$

Onde:

- ❖ **V - Volume do reservatório (L)**
- ❖ **A_s - Area da seção do filtro (m^2)**
- ❖ **v_a - Velocidade de aproximação (m/min)**
- ❖ **t - tempo de retrolavagem (min)**

4.5 Construção do sistema piloto

Os sistemas piloto foram construídos com tubos de PVC utilizando-se diâmetros comerciais, tanto as instalações hidráulicas (PVC soldável para água fria, 20 mm), quanto o próprio filtro (PVC para esgoto, 100 mm). Os reservatórios foram concebidos a partir de recipientes plásticos.

O suporte, tanto dos filtros quanto dos reservatórios, foram construídas estruturas de madeira que puderam ser apoiadas na estrutura metálica de apoio dos pilotos no LALP.

Para a raspagem dos FLC foram colocados, logo acima do meio filtrante, um esgotador de esvaziamento no filtro e logo acima uma peça “curvar”, utilizada como união com rosca, possibilitando uma fácil desconexão e acesso à superfície de areia. A Figura 4 mostra, da esquerda para a direita, os FLC1 a 3 seguidos dos FLR1 a 3.

Figura 4 – Foto dos pilotos montados.

(Foto do autor)

4.6 Operação do sistema piloto

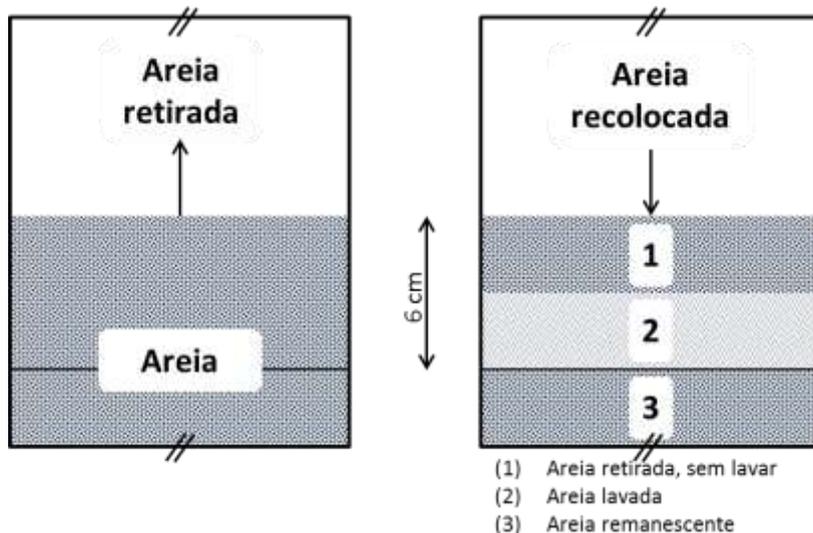
Os filtros foram operados em paralelo e podem ter perda de carga hidráulica máxima de 1 m, no entanto serão operados com perda de carga hidráulica máxima de 0,80 cm, dentro do recomendado para FLs. Assim esperou-se que as carreiras tivessem durações diferentes e para efeitos de comparação os filtros seriam limpos quando ambos (FLC e FLR) tivessem atingido esta carga hidráulica. Posteriormente, pela diferença na carreira dos filtros os filtros foram limpos imediatamente após o término da operação.

A taxa de filtração em cada filtro foi adotada em $4 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, dentro da faixa geralmente adotada para filtros lentos. Portanto a

vazão necessária para cada filtro foi de 31,4 L/dia num total de 188,5 L/dia para os seis filtros.

Os FLC eram limpos retirando-se os 6 cm de areia da superfície, sendo os 3 cm mais à superfície lavados com água bruta e re-colocados primeiramente no filtro, seguidos pelos 3 cm inferiores, recolocados sem limpeza. Ver esquema (Figura 5):

Figura 5 - Limpeza por raspagem no FLC



Os FLR foram retrolavados com as velocidades de aproximação apresentadas na seção 5.1 durante 4 min.

4.7 Monitoramento

Os filtros foram monitorados diariamente para o acompanhamento da qualidade da água produzida para que os diferentes sistemas pudessem ser comparados nesse aspecto. Durante a limpeza dos FLR era monitorada a água de retrolavagem e por fim logo após cada limpeza, ambos os filtros tiveram a qualidade de água monitorada em maior frequência para determinar-se o tempo médio de recuperação de cada filtro. Os parâmetros analisados foram:

- Cor aparente (uH)
- Turbidez (uT)

Sendo que no caso da retrolavagem foi analisada somente a turbidez em função do tempo nos 4 min de limpeza. Também em cada filtro foi monitorada a perda de carga no meio filtrante.

5 Resultados e Discussão

Nesta seção primeiramente são apresentados os resultados dos ensaios preliminares realizados para a caracterização do meio filtrante fluidificado e que foram levados em consideração no dimensionamento do reservatório dos sistemas. Em seguida os resultados do acompanhamento dos pilotos durante sua operação.

Os resultados apresentados são resultado do monitoramento dos pilotos operando entre agosto e outubro de 2012. Para se cumprirem os objetivos, além da água filtrada, a água bruta da Lagoa do Peri que abastecia os sistemas foi igualmente monitorada.

5.1 Resultados dos ensaios preliminares

Os resultados dos ensaios preliminares estão apresentados na Tabela 3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.:**

Tabela 3 – Resumo das características dos meios filtrantes.

Areia	Diâmetro efetivo (mm)	Perda de carga no meio fluidificado (cm)	Velocidade mínima de aproximação para fluidificação (m/min)	Velocidade de aproximação para expansão de 25% (m/min)
Areia I	0,17	32	0,15	0,19
Areia II	0,30	33	0,19	0,26
Areia III	0,53	33	0,60	0,92

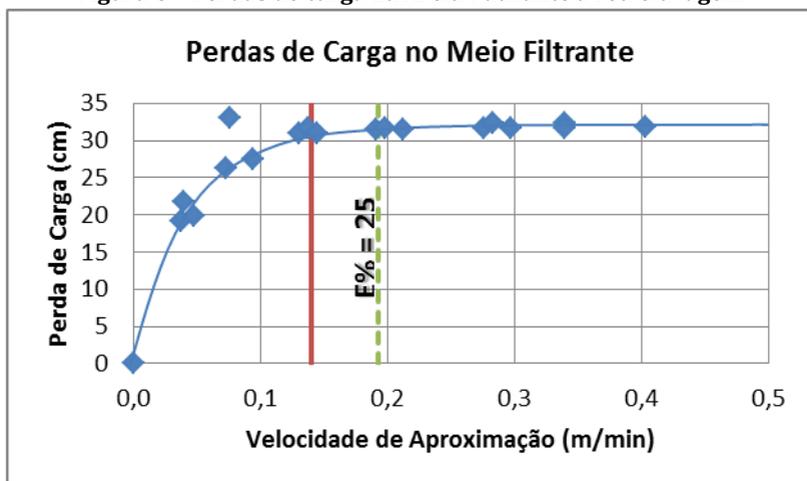
Os valores foram estimados a partir de gráficos, exceto a velocidade de aproximação para expansão a 25% que foi calculada pela

equação da reta obtida pela regressão linear dos dados de expansão em função da velocidade. Os detalhes são discutidos nas seções seguintes.

5.1.1 Características da Areia I

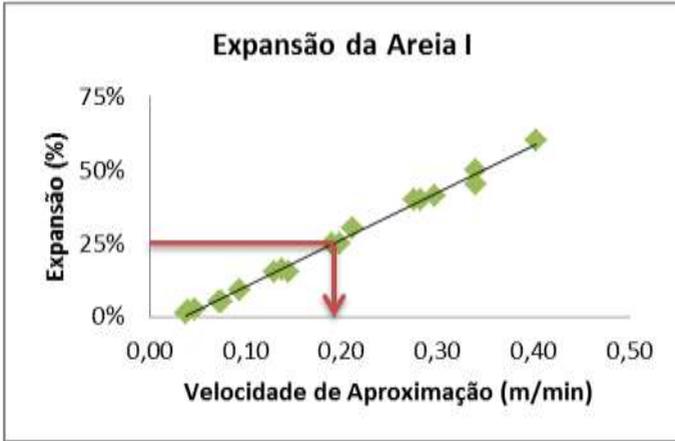
A Areia I é o meio filtrante utilizado nos FLC1 e FLR1, seu diâmetro efetivo é de 0,17 mm e coeficiente de uniformidade (c_u) 1,5 cuja planilha com os dados e gráfico do ensaio encontra-se no Anexo 1 (pág. 42). Em seguida (Figura 6) pode ser observado o gráfico com as perdas de carga durante a retrolavagem dessa areia.

Figura 6 - Perdas de carga na Areia I durante a retrolavagem.



A linha vertical cheia indica o momento da fluidificação da Areia I na velocidade de fluidificação estimada em 0,14 m/min. A linha pontilhada a velocidade de aproximação estabelecida para expansão de 25% do meio filtrante.

Figura 7 – Expansão em função da velocidade de aproximação da Areia I.



Acima (Figura 7) temos o gráfico de expansão da Areia I em função da velocidade de aproximação aplicada. A partir da regressão linear dos dados obteve-se, com coeficiente de correlação de 0,99, a equação a seguir (Equação 2):

(Equação 2)

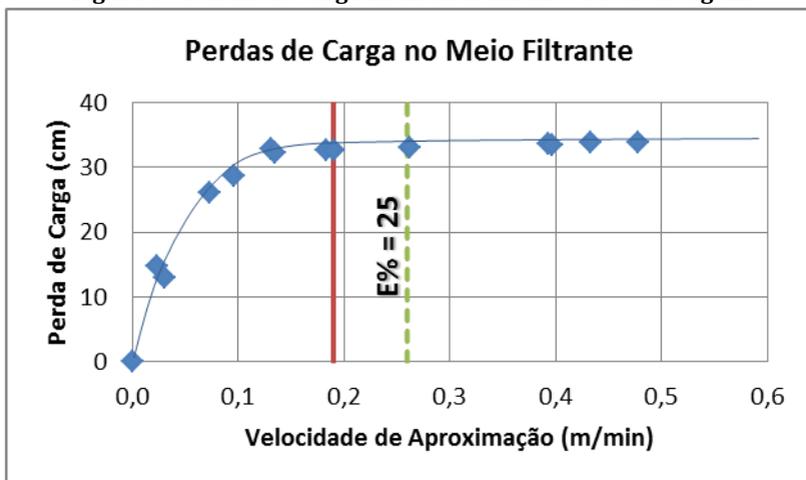
$$E\% = (1,60v_a - 0,06) \times 100$$

A partir da equação acima obteve-se a velocidade de aproximação de 0,19 m/min para uma expansão de 25% do meio filtrante. Verificando essa velocidade no gráfico de perdas de carga (Figura 6, linha pontilhada) constata-se que o meio está fluidificado, pois $v_a > v_f$ onde a perda de carga é constante.

5.1.2 Características da Areia II

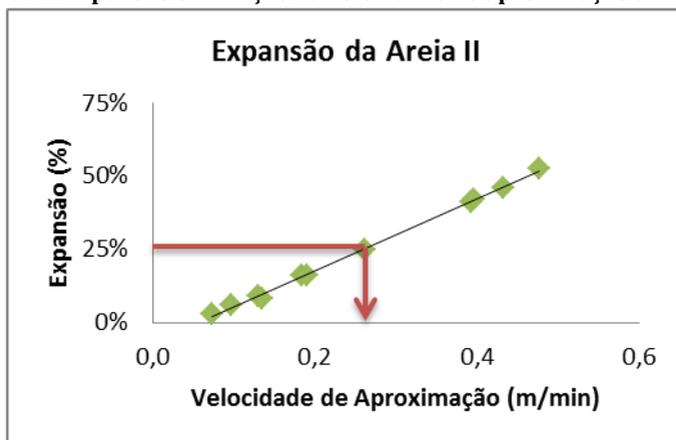
A Areia II é o meio filtrante utilizado nos FLC2 e FLR2, seu diâmetro efetivo é de 0,30 mm e c_u 1,57, cuja planilha com os dados e gráfico do ensaio encontra-se no Anexo 1 (pág. 43). Para os ensaios de expansão foram obtidos os gráficos de perda de carga e expansão em função da velocidade de aproximação.

Figura 8 - Perdas de carga na Areia II durante a retrolavagem.



Aqui novamente (Figura 8) a linha vertical cheia indica o momento da fluidificação da areia, no caso a Areia II, na velocidade de fluidificação estimada em 0,14 m/min.

Figura 9 - Expansão em função da velocidade de aproximação da Areia II.



A partir da regressão linear dos dados de expansão (Figura 9) obteve-se, com coeficiente de correlação de 0,99, a (Equação 3):

(Equação 3)

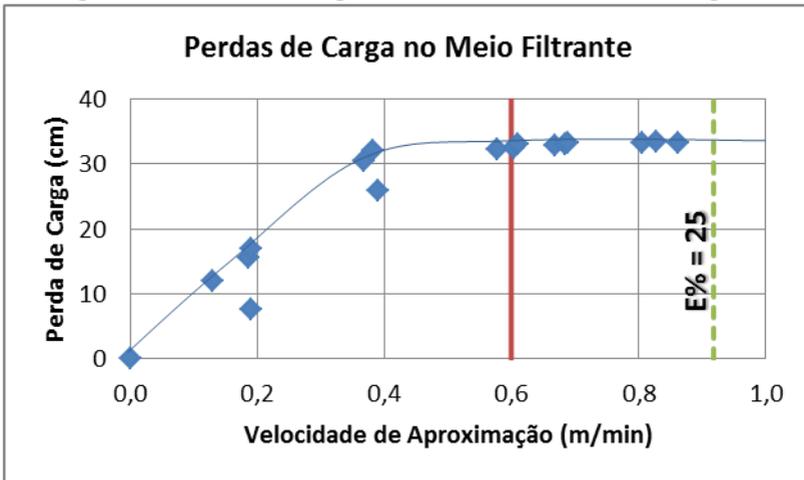
$$E\% = (1,23v_a - 0,07) \times 100$$

A partir dessa equação obteve-se a velocidade de aproximação de 0,26 m/min para uma expansão de 25% do meio filtrante. Verificando essa velocidade no gráfico de perdas de carga (Figura 8, linha pontilhada) constata-se que o meio está fluidificado, pois $v_a > v_f$ (perda de carga no meio filtrante é constante).

5.1.3 Características da Areia III

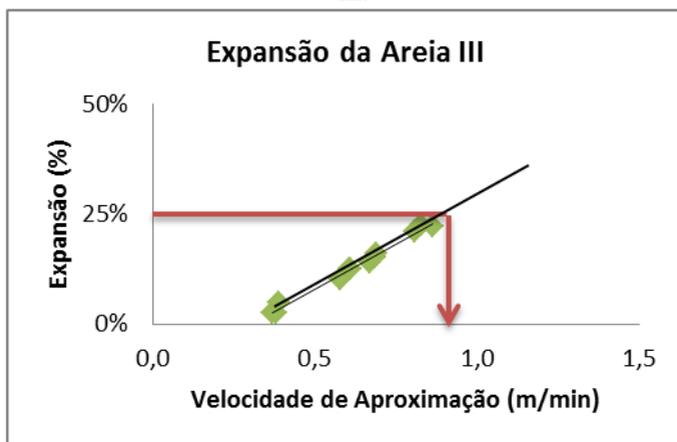
Nos FLC3 e FLR3 é utilizada a Areia III, seu diâmetro efetivo é de 0,30 mm e c_u 1,6 (planilha no Anexo 1, pág. 44).

Figura 10 - Perdas de carga na Areia III durante a retrolavagem.



No caso da Areia III, na velocidade de fluidificação estimada em 0,60 m/min (Figura 10). Observa-se nesse caso que é necessária uma velocidade significativamente maior que as outras, isso se deve ao diâmetro efetivo também ser maior.

Figura 11 – Expansão em função da velocidade de aproximação da Areia III.



A partir da regressão linear dos dados de expansão (Figura 11) obteve-se, com coeficiente de correlação de 0,98, a (Equação 4):

(Equação 4)

$$E\% = (0,41v_a - 0,12) \times 100$$

A partir dessa equação obteve-se a velocidade de aproximação de 0,92 m/min para uma expansão de 25% do meio filtrante. Verificando essa velocidade no gráfico de perdas de carga (Figura 10, linha pontilhada) constata-se que o meio está fluidificado ($v_a > v_f$, ou seja, perda de carga no meio filtrante é constante).

5.2 Qualidade da água bruta e água filtrada

Os resultados do monitoramento da água bruta, assim como da água filtrada pelos sistemas piloto podem ser observados na Tabela 4 que apresenta os valores médios de turbidez e cor aparente assim como o número de carreiras avaliadas. As variações no número de carreiras é devido ao tempo ser diferente e problemas ocorridos em alguns casos.

Tabela 4 – Valores médios de Turbidez e Cor Aparente (a – desvio padrão; b – valor mínimo; c – valor máximo).

Piloto	Turbidez (uT)	Cor (uH)	Número de carreiras
AB	5,85±0,85 ^a (4,19 ^b – 8,90 ^c)	80±11 (60 – 124)	-
FLC1	0,70±0,18 (0,50 – 0,96)	20±15 (8 – 56)	9
FLC2	0,68±0,16 (0,41 – 1,07)	18±13 (8 – 75)	10
FLC3	0,89±0,29 (0,52 – 1,65)	19±4 (15 – 29)	6
FLR1	0,89±0,36 (0,60 – 1,76)	25±17 (7 – 83)	6
FLR2	0,84±0,46 (0,55 – 2,30)	23±8 (2 – 31)	5
FLR3	1,29±0,46 (0,56 – 2,31)	24±7 (11 – 43)	4

A exceção do FLR3, todos os filtros apresentaram em média turbidez menor que 1,0 uT, que é exigido na saída dos filtros pela portaria nº2914/11 do Ministério da Saúde. Quanto à cor, a exigência é de que a soma de cor e turbidez não exceda 15 após a cloração (BRASIL, 2011). No caso, as amostras ainda não foram cloradas e considerando-se que esse processo ainda remove cor admitem-se os resultados obtidos como aceitáveis.

Acredita-se que a maior turbidez no FLC3 e FLR3 deve-se à maior granulometria do meio filtrante e no caso do ultimo um maior valor devido à uma menor eficácia na filtração, pois deixa mais material suspenso, o que poderia ser consequência de uma menor retenção de partículas em suspensão.

Figura 12 - Turbidez média da água filtrada.

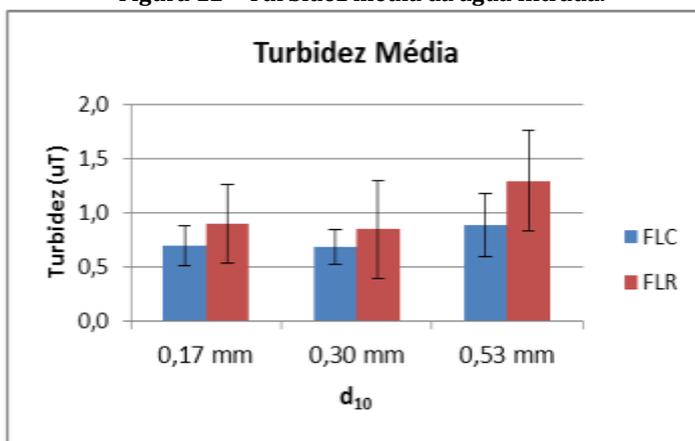
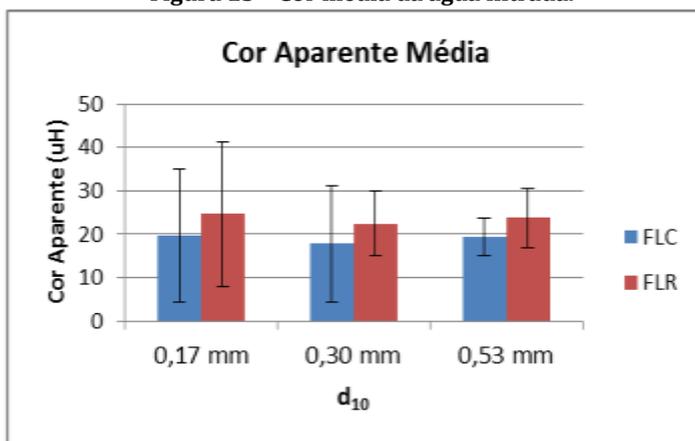


Figura 13 - Cor média da água filtrada.



Como se pode observar na Figura 12, a turbidez nos filtros FLC3 e FLR3 foram relativamente maiores, enquanto os outros dois filtros não apresentaram grande diferença entre si. Se comparados quanto ao sistema de limpeza, percebe-se uma menor tratabilidade no caso dos FLRs.

Partindo-se de que os processos físicos na filtração dos filtros de mesmo diâmetro efetivo são semelhantes, atribui-se ao sistema

de limpeza dos filtros a primeira influência na diferença entre a turbidez e cor aparente obtida entre os FLCs e FLRs.

Houve um padrão dos FLR serem menos eficazes, isso pode ser devido à limpeza por retrolavagem modificar as características do meio filtrante como a eliminação de partículas mais finas que ajudariam na retenção de sólidos. Segundo (HUISMAN; WOOD, 1974) a degradação biológica tem o papel mais importante na purificação na filtração lenta, essa tecnologia é geralmente utilizada para água com turbidez e concentração de algas menor do que a apresentada na LP.

Isso pode indicar que nesse caso a biodegradação não tenha a mesma importância que em águas onde geralmente é aplicada a FL. Como não se sabe a influência deste mecanismo na filtração, não se descarta a hipótese que a maior turbidez da água filtrada nos FLR também é devida à influência da retrolavagem na degradação biológica.

Essa influência seria devido ao atrito entre as partículas durante a retrolavagem que removeria o biofilme. Para isso estudos de porosidade e tempo de detenção da água nos filtros poderiam ajudar a caracterizar e explicar essas diferenças.

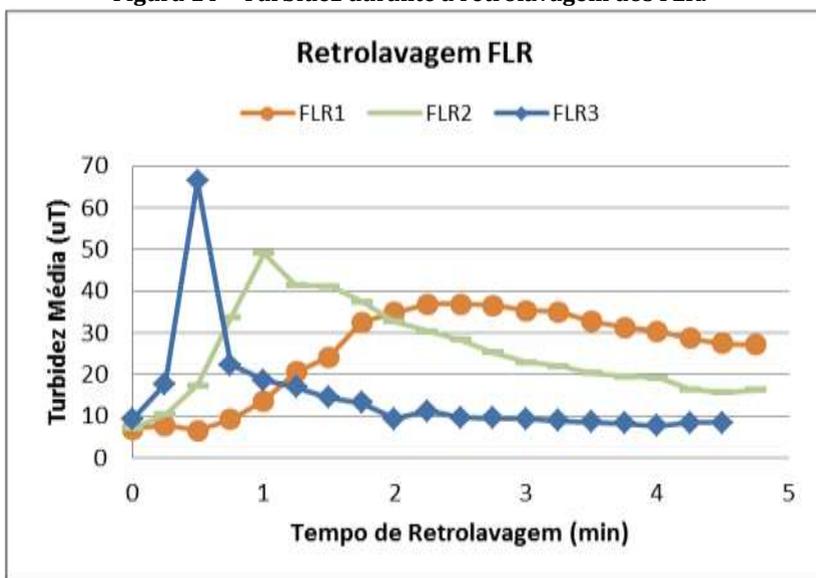
5.3 Limpeza dos filtros

Os filtros foram limpos ao final de cada carreira, como já foi descrito anteriormente. Nos processos de retrolavagem amostras foram coletadas a cada 15 s para análise de turbidez.

É apresentado o gráfico (Figura 14) com as médias de medições de turbidez durante uma retrolavagem dos filtros lentos retrolaváveis (FLRs). O aumento da turbidez indica que a matéria que estava no filtro está saindo com a retrolavagem. Em certo momento essa turbidez começa a decair indicando a diminuição de matéria em suspensão na água de retrolavagem.

Nota-se que o pico da turbidez ocorre em menor tempo e em maior intensidade no sistema em que é aplicada a maior velocidade de aproximação da água na retrolavagem (FLR3).

Figura 14 – Turbidez durante a retrolavagem dos FLR.



No momento em que o procedimento termina nota-se ainda uma turbidez mais elevada no caso do FLR1 e FLR2, evidencia de que ainda resta material em suspensão ao final da limpeza e que esse provavelmente sedimenta ao início da filtração, pois entre o extravasor de água de retrolavagem e o meio filtrante restam ainda 25 cm de coluna d'água.

Diferentemente o FLR3 ao final da retrolavagem apresenta uma turbidez menor, já próxima àquela da água no reservatório, indicando que praticamente toda a matéria em suspensão que poderia sair durante a retrolavagem foi removida.

Esse é um resultado interessante, pois essa matéria que ainda fica em suspensão pode ser uma promissora do schmutzdecke, camada biológica que se deposita acima do leito filtrante e que tem um papel importante na biofiltração. O que não ocorreria em mesma intensidade no caso do FLR3.

5.4 Recuperação dos filtros

Os filtros tiveram um acompanhamento mais frequente durante suas primeiras horas de operação, ou seja, durante aproximadamente sete horas após a limpeza foram analisadas a cor aparente e turbidez da água filtrada pelos sistemas. O tempo entre a limpeza e o momento em que é possível o consumo da água filtrada de acordo com a Portaria nº2914/MS é dito tempo de recuperação do filtro, também conhecido como tempo de maturação.

O tempo de sete horas foi escolhido por estar de acordo com a disponibilidade técnica para o acompanhamento, sendo esse realizado semanalmente.

Figura 15 - Turbidez durante a recuperação dos FLC.

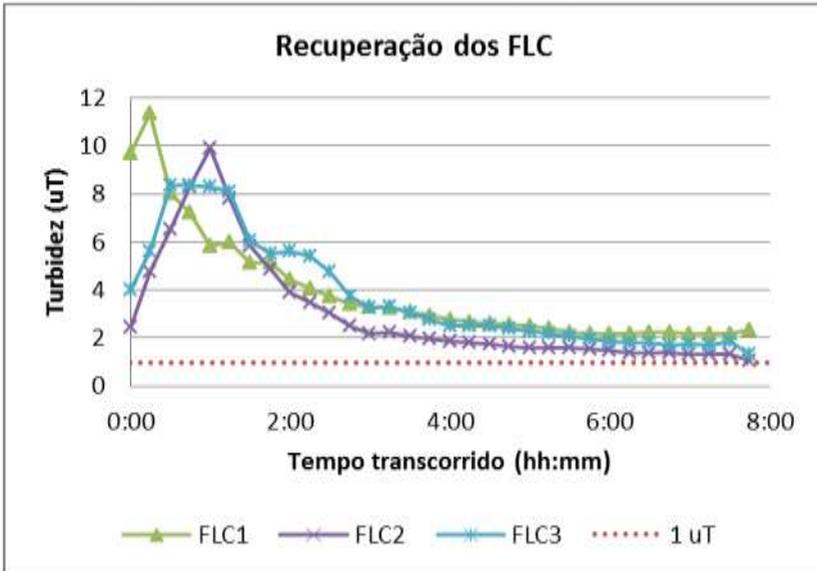
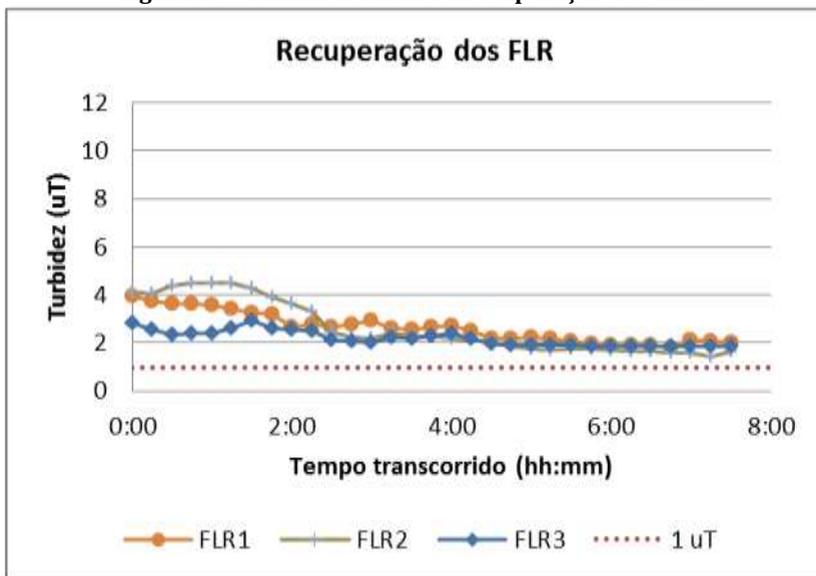


Figura 16 - Turbidez durante a recuperação dos FLR.



Comparando-se as figuras (Figura 15 e Figura 16), com as médias dos resultados obtidos em diferentes carreiras, nota-se a diferença no perfil da variação da turbidez nas primeiras horas de filtração entre os FLCs e os FLRs. No início, a turbidez nos FLCs aumenta, para em seguida começar a decair. No caso dos FLRs, nota-se apenas um decaimento. Isso se deve à diferença de limpeza entre os dois.

No caso dos FLC apenas os primeiros centímetros de areia são retirados e em seguida recolocados. A existência de um pico de turbidez existe pela necessidade de renovação da água entre o meio filtrante, ainda remanescente da carreira anterior. Isso não acontece nos FLRs, pois durante a retrolavagem todo o meio filtrante é revolvido.

Outra diferença está no decaimento da turbidez, nos FLC esse começa acentuado para em seguida estabilizar-se. Nos FLR esse comportamento é diferenciado, sendo o decaimento menos acentuado. Acredita-se também que isso é devido ao revolvimento do meio filtrante durante a retrolavagem que está relacionado à recompactação do material filtrante, que aos poucos vai diminuindo a porosi-

dade ate alcançar a porosidade final e, conseqüentemente, maior eficiência da remoção dos sólidos.

Em todos os casos acima, as sete horas de observação do filtro, em média, não foram suficientes para a determinação do tempo de recuperação do filtro. Para isso foram levados em consideração todos os dados obtidos durante as carreiras. Os tempos estimados são apresentados abaixo (Tabela 5):

Tabela 5 - Tempo de recuperação estimado para os FLCs e FLRs.

Tempo de Recuperação	
FLC1	1 dia
FLC2	1 dia
FLC3	2 dias
FLR1	2 dias
FLR2	2 dias
FLR3	4 dias

Esses tempos são estimados e não são considerados exatos, tendo em vista que os filtros eram monitorados diariamente, então entenda-se que amostras dentro dos padrões de potabilidade eram colhidos ao n-ésimo dia da carreira, sendo os valores de n apresentados na tabela acima.

No caso do FLR3, 4 dias foi estimado por ser o tempo de recuperação nas únicas carreiras em que esse conseguiu atingir valores aceitáveis.

5.5 Operação do sistema

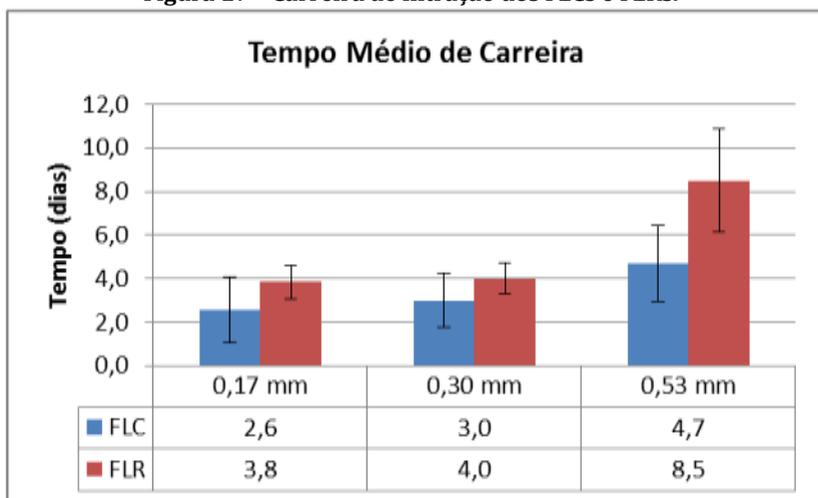
A operação deste sistema piloto foi descrita na seção 4.6 deste trabalho. Durante o tempo de operação foram observadas características da operação do filtro, como carreira de filtração, consumo de água durante a limpeza, a limpeza em si e por fim a produção efetiva dos filtros.

5.5.1 Carreira de filtração

As carreiras de filtração foram acompanhadas pela medição da perda de carga no meio filtrante. Aos 80 cm de perda de carga o sistema, seja convencional ou retrolavável, era limpo.

Como se pode observar na Figura 17 os sistemas com meio de menor granulometria apresentaram menores carreiras. Ainda é evidente o maior tempo de operação no caso dos FLRs quando comparados aos semelhantes FLCs. Nota-se também que as carreiras são curtas, isso era de se esperar pela influência da presença de algas na água bruta, isso já havia sido constatado em pesquisas anteriores onde se recomendava um pré-tratamento para a aplicação da FL no local (PIZZOLATTI, B S, 2010). Como o objetivo desse trabalho era uma comparação entre os meios filtrantes, a recomendação não foi levada em consideração.

Figura 17 – Carreira de filtração dos FLCs e FLRs.



Acredita-se que a diferença entre FLCs e FLRs está associada ao fato da limpeza dos FLRs ser mais eficaz, abrangendo todo o meio filtrante, diferentemente da raspagem, onde a limpeza é efetuada apenas nos seis primeiros centímetros de areia. Ressalta-se que a princípio a limpeza desses filtros estava prevista para ser realizada apenas para os três primeiros centímetros, no entanto, elevadas perdas de carga iniciais incentivaram a retirada dos três centímetros subsequentes para igual limpeza, esse tema ainda será discutido na seção 5.5.3.

A maior discrepância está no caso dos filtros com d_{10} igual a 0,53 mm. Nesse caso uma velocidade de aproximação de

0,92 m/min era aplicada, velocidade três vezes superior à do FLR2, provocando maior atrito entre as partículas do meio filtrante e renovação da água, resultando numa limpeza ainda mais eficaz.

5.5.2 Consumo de água para retrolavagem

Nesse caso não foram considerados os FLC por apresentarem variação no volume utilizado para a limpeza e levando-se em consideração de que o volume varia de um sistema piloto para um sistema em escala real, que pode levar horas, cerca de 5 h/100 m² (CULLEN; LETTERMAN, 1985).

No caso da retrolavagem isso não se aplica pelo fato da tecnologia ser a mesma no piloto e em escala real, utilizando-se ainda de um volume de água fixo. Portanto o índice abaixo tem apenas como objetivo a comparação do consumo de água durante a retrolavagem.

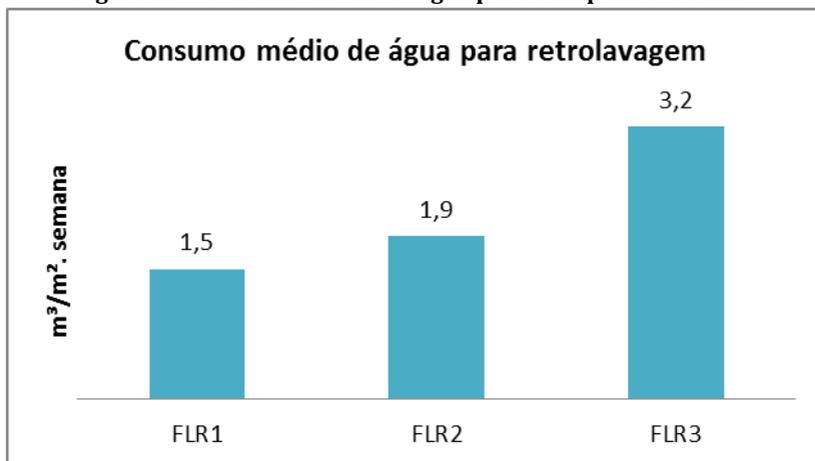
Portanto, foi calculado o consumo médio de água utilizada para a limpeza de cada filtro durante uma semana. O índice foi calculado pela razão entre o volume utilizado a cada retrolavagem de um filtro e carreira deste filtro (Equação 5).

(Equação 5)

$$V_s = \frac{7 \text{ dias}}{\text{semana}} \times \frac{V}{t_{car}} / A_s$$

Onde:

- ❖ V_s - Gasto semanal com retrolavagens (L/semana)
- ❖ V - Volume do reservatório do FLR (L)
- ❖ t_{car} - Carreira de filtração (dias)
- ❖ A_s - Area da seção do filtro (m²)

Figura 18 - Consumo médio de água para a limpeza dos FLRs.

Os resultados obtidos podem ser observados Figura 18, onde claramente conclui-se que o FLR1 é o que consome menos água para a retrolavagem durante a semana, isso se deve à necessidade de menor velocidade de aproximação para expandir o meio filtrante. Tratando-se do FLR3, esse gasta em média o dobro dos outros dois filtros, pouco menos no caso do FLR2, mesmo gastando bem mais água a cada retrolavagem (28,8 L o FLR3, contra 6,1 L e 8,2 L os FLR1 e 2, respectivamente). Isso mostra que a carreira maior do FLR3 compensou em parte o consumo maior de água durante a retrolavagem.

5.5.3 Operação de limpeza dos filtros

A diferença entre a operação de limpeza dos filtros foi descrita na seção 3.4, que discute a raspagem e a retrolavagem. Nessa seção é apresentada a experiência obtida com esse trabalho no que diz respeito à aplicação das duas diferentes técnicas aos três diferentes meios filtrantes estudados.

5.5.3.1 Aplicação da raspagem

A raspagem, como se pode concluir apenas pela descrição da operação, é a mais trabalhosa de ser efetuada. Pela experiência com os pilotos pôde-se observar que a lavagem é mais fácil de ser realizada com as areias de maior granulometria.

Durante os três meses de operação dos filtros, o que se observou e que não era esperado é que com o passar do tempo a perda de carga inicial no meio filtrante foi crescente, chegando a um momento em que foi necessária uma raspagem mais profunda para a limpeza do filtro.

Esse fenômeno ocorreu primeiramente no FLC3, o de maior granulometria. A princípio acreditava-se que a raspagem de 3 cm de areia não estava sendo suficiente para a limpeza, por isso aumentou-se para 6 cm a profundidade de raspagem. No entanto, isso não foi o suficiente e todo o meio filtrante foi retirado para limpeza, notando-se a presença de sujidades em considerável profundidade no meio filtrante. Posteriormente o fenômeno repetiu-se nos outros filtros convencionais.

Uma das hipóteses para explicar o ocorrido foi o tempo que se demorava em limpar os filtros, uma vez que a perda de carga máxima era atingida, onde no filtro, à espera da limpeza, proliferavam-se microrganismos que obstruíam os vazios e impediam a filtração. Ainda houve problemas durante as carreiras devido a problemas de falta de energia elétrica na ETA, refletindo-se no funcionamento das bombas de adução aos sistemas.

Houve recorrência do fenômeno, mesmo após a correção do tempo de operação quando os filtros passaram a ser limpos imediatamente ao atingir a perda de carga máxima. Crê-se que isso está relacionado à profundidade da filtração, que naturalmente aumenta com o aumento da porosidade do meio e que por essa profundidade ser maior, com o tempo, o meio abaixo daquele limpo na raspagem encontra-se sujo. O fenômeno não ocorreu nos FLR, pois a retrolavagem abrange todo o meio, que é limpo igualmente.

5.5.3.2 Aplicação da retrolavagem

Quanto à retrolavagem a operação foi mais simples e rápida que a raspagem, exigindo apenas a abertura e fechamento de uma

válvula. No entanto nos FLR1 e FLR2, em determinados momentos, houve perda de areia durante a retrolavagem.

Acredita-se que isso ocorreu devido à presença de algas filamentosas no schmutzdecke, fazendo com que esse não fosse rompido facilmente com a retrolavagem, sendo empurrado inteiramente ao extravasador de água de lavagem, levando consigo areia do meio filtrante. No entanto esse fenômeno ocorreu apenas uma vez com cada filtro, não acontecendo no FLR3, onde a velocidade aplicada é superior.

Supõe-se que esse fenômeno ocorra somente no piloto por esse ter uma área superficial reduzida, garantindo maior estabilidade à camada superior do meio filtrante, dificultando a sua fluidificação. Ressalta-se que o diâmetro do filtro é suficientemente maior do que os grãos, garantindo a fluidificação, uma vez que essa foi atingida nos ensaios de expansão, onde a coluna tinha um diâmetro ainda menor.

5.5.4 Produção efetiva

A produção efetiva dos filtros é o quanto o filtro produziu de água filtrada e que realmente poderá ser consumida, o produto final. Para isso foram desconsiderados da produção os gastos com a retrolavagem, no caso dos FLR e o descartado durante a recuperação do filtro. No caso dos FLC não foi considerado o gasto com a lavagem do meio filtrante pelo fato dessa poder ser realizada com água bruta, igualmente os 4 min de lavagem dos FLR também foram desconsiderados. Assim:

(Equação 6)

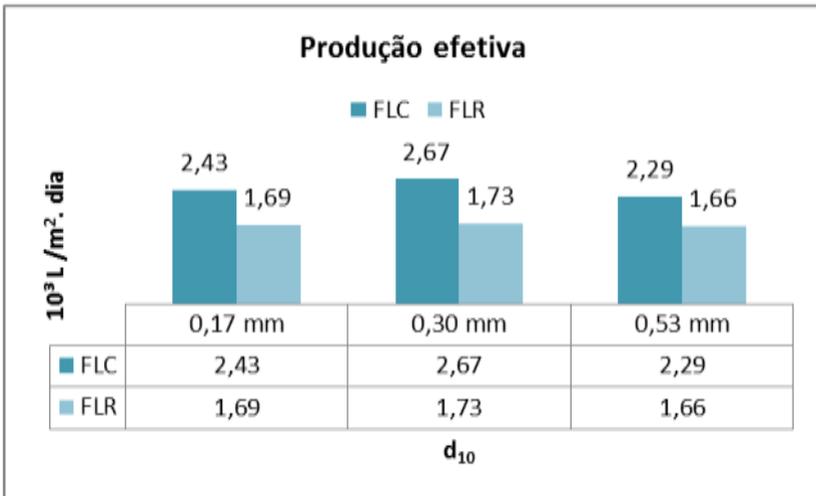
$$T_e = \frac{T \times (t_{car} - t_{rec} - V/Q)}{t_{car}}$$

Onde:

- ❖ **Te** - Produção efetiva (L/m².dia)
- ❖ **T** - Taxa de aplicação de água bruta no filtro (L/m².dia)
- ❖ **tcar** - Carreira de filtração (dias)
- ❖ **trec** - Tempo de recuperação (dias)
- ❖ **V** - Volume do reservatório (L)
- ❖ **Q** - Vazão aplicada no filtro (L/dia)

Na (Equação 6, para os FLC, o volume do reservatório (V) foi considerado zero.

Figura 19 - Produção efetiva dos filtros.



Na figura acima (Figura 19) é apresentada a produção efetiva de cada filtro baseando-se nos dados obtidos nos pilotos. Como se pode observar, os FLCs obtiveram maior produção efetiva que os FLR, evidentemente por não utilizar de água para a retrolavagem. No entanto, não foi considerado nesse caso o tempo em que o filtro

fica fora de operação para a raspagem, tempo muito superior aos 4 min da retrolavagem e que variam de acordo com o tamanho dos filtros, pois a quantidade de areia a raspar torna-se maior, diferentemente da proposta da retrolavagem, que manteria constante o tempo de retrolavagem, mesmo aumentando-se o tamanho dos filtros.

Comparando-se apenas os FLCs, o FLC2 apresentou um melhor desempenho devido à sua rápida recuperação e maior carreira de filtração.

Quando observados os FLRs, temos relativamente uma menor diferença entre os desempenhos. O FLR2 foi o que se saiu melhor, no entanto as diferenças foram muito pequenas, pois nesse caso a carreira do FLR3 foi bem superior à dos demais (8,5 dias em média, contra 3,8 e 4 dias a dos FLR1 e 2 respectivamente) o que conseguiu compensar o maior gasto com retrolavagens e tempo de recuperação.

Contudo, deve ser levado em consideração ainda a qualidade da água, carreira e a facilidade de operação durante a limpeza.

6 Conclusões e Recomendações

Com a pesquisa realizada nesse trabalho de conclusão de curso pôde-se concluir que:

- O diâmetro efetivo do meio filtrante dos filtros lentos influenciou na qualidade de água produzida, tanto nos filtros convencionais, quanto nos retrolaváveis, sendo os filtros com meio filtrante de menor d_{10} os de melhor desempenho;
- Essa diferença entre filtros de meio filtrante diferentes também foi remarçada quanto à operação dos filtros, sendo os filtros de meio com maior diâmetro efetivo os de mais fácil operação;
- Quanto aos sistemas de limpeza, no que se refere à qualidade de água, os FLC apresentaram melhores resultados que seus semelhantes FLR. Deve ser levado em consideração que as condições da água bruta não

são as recomendáveis para a utilização da FL e mesmo assim o FLR3 foi o único que apresentou-se fora dos padrões de potabilidade em termos de turbidez da água filtrada;

- Em termos de operação os FLR foram eficientes, levando-se em consideração a mão de obra para a limpeza, qualidade da água produzida e carreira dos filtros;
- A expansão não é o fator determinante da eficácia da retrolavagem, pois em granulometrias diferentes houve comportamentos diferentes na limpeza.

Recomenda-se, com base nas experiências obtidas nesse trabalho, para o auxílio e encaminhamento de futuras pesquisas:

- Um estudo da relação da recuperação dos filtros com essa turbidez final e verificação da possível atividade biológica desses sólidos restantes no filtro após a retrolavagem;
- Os FLR foram menos eficientes em relação aos FLC, isso pode ser devido à limpeza por retrolavagem influir na degradação biológica. Para isso recomendam-se estudos mais aprofundados sobre esse aspecto;
- A realização de estudos da influência da atividade biológica na filtração, assim como suas condições em termos de consumo de oxigênio e profundidade no meio filtrante;
- Recomenda-se também um estudo mais conclusivo sobre a recuperação dos filtros, assim como quais são os fatores mais influentes para sua redução;
- O tempo de recuperação e o volume do reservatório tiveram grande influência na produção efetiva do filtro. Recomendam-se estudos para definir se é possível a sua redução sem diminuição da carreira do filtro como tempo de lavagem e renovação do leito.
- O estudo da influência da velocidade de aproximação no perfil de turbidez da água de retrolavagem e sua influência na recuperação e carreira do filtro.

7 Bibliografia

BERNARDO, L. DI; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de Tratamento de Água**. 2nd. ed. São Carlos: RiMa, 2005. p. 792

BRASIL. Portaria MS Nº 2914. 2011.

CLARKE, R.; KING, J. **O Atlas da Água - O mampeamento completo da recurso mais precioso do planeta**. 1ª. ed. São Paulo: PubliFolha, 2005. p. 128

CLASEN, T.; ROBERTS, I.; RABIE, T. Interventions to improve water quality for preventing diarrhoea. **Database Syst Rev**, n. 1, 2006.

CULLEN, T. R.; LETTERMAN, D. The Effect of Slow Sand Filter Maintenance on Water Quality. **Water**, n. C, 1985.

EMMENDOERFER, M. L. **Filtração Lenta Com Retrolavagem Para Propriedades Rurais De Uso Familiar**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Trabalho de Conclusão de Curso. , 2006

FEWTRELL, L.; KAUFMANN, R. B.; KAY, D. *et al*. Water, sanitation, and hygiene interventions to reduce diarrhoea in less developed countries: a systematic review and meta-analysis. **The Lancet infectious diseases**, v. 5, n. 1, p. 42-52, jan 2005.

GIMBEL, RR. P. IN S. S. AND A. B. P.; GRAHAN, N. J. D.; COLLINS, M. R. **Recent Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes**. 1st. ed. Padstow: International Water Organization, 2006. p. 581

HENDRICKS, D. **Fundamentals of Water Treatment Unit Processes : Physical, Chemical, and Biological**. 1st. ed. Broken Sound Parkway: International Water Organization, 2011.

HUISMAN, L.; WOOD, W. **Slow sand filtration**. Geneva: World Health Organization, 1974. p. 120

IBGE. **Censo agropecuário**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=sc&tema=censoagro>>. Acesso em: 15 set. 2011.

LANGENBACH, K.; KUSCHK, P.; HORN, H.; KÄSTNER, M. Modeling of slow sand filtration for disinfection of secondary clarifier effluent. **Water research**, v. 44, n. 1, p. 159-66, jan 2010.

LOGSDON, G.; KOHNE, R.; ABEL, S. Slow sand filtration for small water systems. **Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 348, p. 339-348, 2002.

LOGSDON, G. S. **Water Filtration Practices**. 1st. ed. Denver: American Water Works Association, 2008.

LUIS, I.; SÁNCHEZ, D.; LATORRE, I. J.; GALVIS, I. G. COMPORTAMIENTO DE LA POBLACION DE ALGAS Y EN UN FILTRO LENTO EN ARENA. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, n. 1974, p. 4251-4263, 1999.

MANZ, D. H. New Horizons for Slow Sand Filtration Dr. David H. Manz, P. Eng. **Public Health**, n. 403, p. 1-11, 2004.

MCNAIR, D.; SIMS, R.; SORENSEN, D.; HULBERT, M. Schmutzdecke characterization of clinoptilolite-amended slow sand filtration. **Journal (American Water ...)**, n. C, 1987.

MELO, A. E. S. DE. **AVALIAÇÃO DA FILTRAÇÃO LENTA NA REMOÇÃO DE CÉLULAS DE *Cylindrospermopsis raciborskii* E SAXITOXINAS**. Brasília: Universidade de Brasília, 2006.

MICHELAN, D. C. G. DOS S. **Filtração Em Margem De Rio Precedendo A Filtração Lenta, Para Remoção De Carbofurano, Em Tratamento De Água Para Consumo Humano**. [S.l.]: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

MONDARDO, R. I.; SENS, MAURÍCIO LUIZ; FILHO, L. C. DE M. Pré-tratamento com cloro e ozônio para remoção de cianobactérias. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 4, p. 337-342, 2006.

PIZZOLATTI, B S. **Estudos de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem.** . Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Dissertação de Mestrado. , 2010

PIZZOLATTI, B.S.; SOARES, M. B. D.; MICHELAN, D. C. G. S.; ESQUIVEL, L. R.; SENS, M.L. Water treatment for rural areas by slow sand filtration. **asae.frymulti.com**, v. 2010, n. 701, p. 21-24, 2010.

SOARES, M.; PIZZOLATTI, B.; ROMERO, L.; MICHELAN, D.; SENS, M. Backwashed Slow Sand Filtration for Water Supply during Droughts Periods in Animal Production. **asae.frymulti.com**, v. 2010, n. 701, p. 21-24, 2010.

STAUBER, C. E.; PRINTY, E. R.; MCCARTY, F. A.; LIANG, K. R.; SOBSEY, M. D. Cluster randomized controlled trial of the plastic BioSand Water filter in Cambodia. **Environmental science & technology**, v. 46, n. 2, p. 722-8, 17 jan 2012.

SÁ, J. C.; CELIA, C.; BRANDÃO, S. Influência do diâmetro efetivo da areia na eficiência da filtração lenta no tratamento de águas contendo *Microcystis aeruginosa*. **Lloydia (Cincinnati)**, v. 518, 2004.

WHO. **Guidelines for drinking-water quality**. 4th. ed. Geneva: World Health Organization, 2004. p. 564

8.2 Planilha de calculo do ensaio granulométrico da Areia II

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA								
CENTRO TECNOLÓGICO								
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental								
LABORATÓRIO DE POTABILIZAÇÃO DAS ÁGUAS								
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA (PENNERAMENTO SIMPLES)								
Amostra: Areia II - Lavada								
Execução: Bruno Segalla Pizolatti Fernando Hymnó de Souza								
Data: 07/10/2011								
Determinação da Amostra Total Seca								
Peso da Amostra Úmida (g): 570,60								
Peso da Amostra Reída na # 10 (g): 0								
Peso da Amostra Passante na # 10, Úmida (g): 570,6								
Peso da Amostra Passante na # 10, Seca (g): 570,13								
Peso da Amostra Total Seca (g): 570,60								
Mh (Penneramento Fino) (g): 570,60								
Teor de Umidade da Amostra								
Cápsula Nº	69							
Peso da Cápsula (g)	14,70							
Cápsula + Solo Úmido (g)	17,00							
Cápsula + Solo Seco (g)	130,80							
T teor de Umidade	130,70							
Teor de Umidade Médio	0,09%							
	0,08%							
Dados de Ensaio								
PENNERAMENTO	Peneira		Peso da Peneira (g)	Material Retido (g)	RETIDA		PORCENTAGEM	
	Nº	# (mm)			Fração Fina	Fração Grossa	Fração Fina	Fração Grossa
FRAÇÃO GROSSA					0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
FRAÇÃO FINA					0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
Fundo					0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
16	1,19	385,66	385,66	0,00	0,00%	0,00%	100,00%	
30	0,59	348,91	429,09	80,18	14,06%	14,06%	85,94%	
40	0,42	281,49	523,56	242,07	42,46%	56,52%	43,48%	
50	0,3	360,70	554,72	194,02	34,03%	90,55%	9,45%	
70	0,21	347,86	391,34	43,48	7,63%	98,18%	1,82%	
100	0,15	330,00	339,00	9,00	1,58%	99,76%	0,24%	
200	0,074	320,50	321,96	1,46	0,26%	100,01%	-0,01%	
		317,71	318,1	0,39	0,07%	100,08%	-0,08%	

Curva Granulométrica

Diâmetro dos Grãos (mm)

Argila + Silte = -0,01%	Areia Média = 84,12%	Pedregulho Médio = 0,00%
Areia Fina = 1,8%	Areia Grossa = 14,06%	Pedregulho Grosso = 0,00%
	Pedregulho Fino = 0,00%	Pedra Mão = 0,00%

Diâmetro efetivo (D10)	0,30 mm
D60	0,47 mm
Coeficiente de uniformidade (C _u)	1,57

8.3 Planilha de calculo do ensaio granulométrico da Areia III

Teor de Umidade da Amostra		Determinação da Amostra Total Seca	
Cápsula N°	69	38	
Peso da Cápsula (g)	14,70	17,00	Peso da Amostra Úmida (g) : 682,01
Cápsula + Solo Úmido (g)	130,80	146,10	Peso da Amostra Retida na # 10 (g) : 0
Cápsula + Solo Seco (g)	130,70	146,00	Peso da Amostra Passante na # 10, Úmida (g) : 682,01
Teor de Umidade	0,09%	0,08%	Peso da Amostra Passante na # 10, Seca (g) : 681,45
Teor de Umidade Médio	0,08%		Peso da Amostra Total Seca (g) : 682,01
			Mh (Peneiramento Fino) (g) : 682,01

Amostra: Areia III - Lavada		Execução: Bruno Segalla Pizolatti Fernando Hymô de Souza	
		Data: 07/10/2011	

Dados de Ensaio									
PENEIRAMENTO					PORCENTAGEM				
Peneira	N°	# (mm)	Peso da Peneira (g)	Peneira + Material (g)	Material Retido (g)	RETIDA		PASSANTE	
						Fração Fina	Fração Grossa	Fração Fina	Fração Grossa
	3"	76,2			0,00	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	2"	50,8			0,00	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	1,5	38,1			0,00	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	1"	25,4			0,00	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	3/4"	19,1			0,00	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	3/8"	9,5			0,00	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	1/4"	6,4			0,00	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	4	4,8			0,00	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	8	2,4			0,00	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	10	2			0,00	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	16	1,19	386,12	394,08	7,96	1,17%	1,17%	98,83%	98,83%
	30	0,59	349,03	910,50	561,47	82,39%	83,56%	16,44%	16,44%
	40	0,42	281,59	383,15	101,56	14,90%	98,46%	1,54%	1,54%
	50	0,3	360,78	369,54	8,76	1,29%	99,75%	0,25%	0,25%
	70	0,21	347,98	349,32	1,34	0,20%	99,95%	0,05%	0,05%
	100	0,15	330,14	330,31	0,17	0,02%	99,97%	0,03%	0,03%
	200	0,074	320,68	321,03	0,35	0,05%	100,02%	-0,02%	-0,02%
	Fundo		317,89	318,29	0,40	0,06%	100,08%	-0,08%	-0,08%

Argila + Silte = -0,02%
Areia Fina = 0,1%

Areia Média = 16,39%
Areia Grossa = 83,56%
Pedregulho Fino = 0,00%

Pedregulho Médio = 0,00%
Pedregulho Grosso = 0,00%
Pedra Mão = 0,00%

Diametro efetivo (D10) = 0,53 mm
D60 = 0,83 mm
Coefficiente de uniformidade (Cu) = 1,6

