

Sistema de Filtros Lentos Descendentes com Retrolavagem sem Reservatório Elevado

Fernanda Caldeira de Andrada Poersch

Orientador: Bruno Segalla Pizzolatti

2012/2



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

**SISTEMA DE FILTROS LENTOS DESCENDENTES COM
RETROLAVAGEM SEM RESERVATÓRIO ELEVADO**

**Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa
Catarina para a Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.**

FERNANDA CALDEIRA DE ANDRADA POERSCH

**Orientador
Bruno Segalla Pizzolatti**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2012**

Caldeira de Andrada Poersch, Fernanda

Sistema de Filtros Lentos Descendentes com Retrolavagem sem
Reservatório Elevado

Fernanda Caldeira de Andrada Poersch, 2012

X,90p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Universidade Federal
de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Título em Inglês: Slow Sand Down flow Filters System with
Backwash without Elevated Reservoir

1-Filtração lenta. 2-retrolavagem. 3-Lavagem

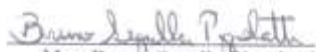
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

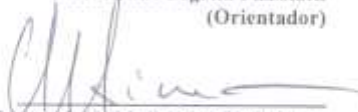
**SISTEMA DE FILTROS LENTOS DESCENDENTES COM
RETROLAVAGEM SEM RESERVATÓRIO ELEVADO**

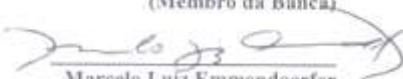
FERNANDA CALDEIRA DE ANDRADA POERSCH

**Trabalho apresentado à Universidade Federal de Santa
Catarina para a Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental.**

BANCA EXAMINADORA:


Msc. Bruno Segalla Pizzolatti
(Orientador)


Guilherme Júlio Muller de Abreu Lima
(Membro da Banca)


Marcelo Luiz Emmendoerfer
(Membro da Banca)

**FLORIANÓPOLIS
JULHO/2012**

*Dedico esta pesquisa ao meu avô Almiro Caldeira
exemplo de sabedoria.*

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus por iluminar sempre meu caminho.

Aos meus pais, Lorena e Dinarte que me repassaram toda educação e carinho fundamentas ao meu desenvolvimento pessoal e na conquista de meus objetivos.

Aos meus avós (*in memorial*) Almiro e Léia que sempre me apoiaram e me incentivaram a lutar pelos meus sonhos.

A minha prima Helenita por todo suporte e preocupação durante essa etapa de minha vida.

A minha prima irmã Vanessa um exemplo de determinação e dedicação, que sempre esteve presente em minha vida.

A toda minha família que sempre demonstraram amor e carinho.

A Amanda, Cristina, Júlia, Marta e Renata, amizades que conquistei durante a faculdade e que para sempre levarei em meu coração, pois estiveram presentes nos bons e difíceis momentos desta jornada.

Ao meu orientador Bruno Segalla Pizzolatti por toda orientação prestada, paciência, dedicação e amizade.

Ao Professor Mauricio Luis Sens pela oportunidade de trabalho e orientação.

Aos meu amigos e companheiros de trabalho do LAPOÁ, Aloísio, Carolina, Fernando, Juliana, Luis Paulo, Luis Romero e Marina.

A CASAN (Companhia Catarinense de Água e Saneamento), à ETA Lagoa do Peri e seus funcionários pelo apoio concedido.

Aos membros da banca Guilherme de Abreu Lima e Marcelo Emmendoerfer que se dispuseram a conhecer e avaliar este trabalho.

RESUMO

A filtração lenta é uma tecnologia de tratamento promissora para ser aplicada em pequenas comunidades que possuem mananciais protegidos. A adoção da retrolavagem na filtração lenta surge como um facilitador na operação do sistema. Este estudo pretendeu desenvolver um sistema de filtros lentos retrolaváveis sem reservatório elevado, para dessa forma proporcionar maior flexibilidade quanto a duração da lavagem. O sistema piloto foi composto por 6 filtros de escoamento descendente que operaram com taxa de filtração de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ e carga hidráulica variável. Durante o monitoramento foi avaliada a qualidade da água em termos de cor e turbidez. A lavagem de um dos filtros do sistema ocorria diariamente proporcionando uma carreira de filtração de 6 dias para cada filtro. Foram realizadas curvas de turbidez na lavagem para avaliar a eficiência e tempo de lavagem. A remoção de turbidez atingiu o percentual de 68% e a cor aparente foi reduzida em 57%, no entanto não atingiram o padrão de potabilidade da Portaria 2.914 de 2011. O sistema mostrou-se eficiente quanto a lavagem realizada em 25 minutos com expansão média de 2,13%. O experimento mostrou-se promissor sendo necessário mais tempo de operação para que o sistema atingisse uma maior estabilidade e conseqüentemente melhor qualidade de água.

Palavras-chave: filtração lento, retrolavagem, lavagem, qualidade da água.

ABSTRACT

Slow sand filtration is a promising treatment technology that can be applied in small communities which have protected springs. The adoption of a backwashing system in slow sand filtration can be a facilitator in the operation of the system. This study aimed to develop a system of back-washable slow sand filters without an elevated reservoir, and thereby, provide greater flexibility in the duration of washing. The pilot plant consisted of six down flow filters operated on a $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ filtration rate and variable hydraulic head. Water quality, in terms of color and turbidity, was assessed during each sampling campaign. One of the six filters of the system was washed daily providing a row of filtering of six days for each filter. Turbidity curves were performed to evaluate the removal efficiency and the washing time. The turbidity removal percentage reached 68% and the apparent color was reduced by 57%, however, they did not reach the potability standard of the Ordinance 2914 of 2011. The system was effective when the washing was carried out in 25 minutes with the medium's average expansion of 2.13%. The experiment showed promising results, however, it is necessary to operate the system a longer time to achieve a greater stability and therefore a better water quality.

Keywords: slow filtration, backwash, washing, water quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Arranjo de filtro lento com nível de água constante (Di Bernardo Dantas 2005).....	28
Figura 2-Arranjo filtro lento com nível variável (Di Bernardo e Dantas, 2005)	28
Figura 3 - Procedimento da raspagem da areia (Di Bernardo, 1997)	35
Figura 4 - Diagrama de pressão (Maldonato, 2004).....	38
Figura 5 - Variação da posição dos grãos do meio filtrante durante a lavagem (Maldonato, 2004)	39
Figura 6 - Variação da espessura do meio granular, porosidade e perda de carga em função da velocidade ascensional (Maldonado, 2004).....	40
Figura 7 - Laboratório de Águas da Lagoa do Peri (LALP), ETA.	45
Figura 8 -Sistema preliminar, a) sistema de aeração, b) filtro de limpeza contínua	46
Figura 9 - Curva granulométrica	47
Figura 10 - Esquema sistema piloto do ensaio de expansão (Emmendoerfer, 2006)	48
Figura 11 - Fotos vista parcial do sistema	49
Figura 12 - – Perfil alturas úteis disponíveis	51
Figura 13 - Sistema piloto	52
Figura 14 - Configuração interna de um filtro do sistema.....	53
Figura 15 - Desenho de descrição do sistema piloto	54
Figura 16 - Análises da água no LALP	56
Figura 17 - Fotos de aferição: a) água bruta de entrada; b) água filtrada	56
Figura 18 - Controle de turbidez na lavagem: a) coleta de água da retrolavagem; b) análise de turbidez	58
Figura 19 - Expansão (a) Perda de Carga (b) x velocidade de aproximação da água.....	59
Figura 20 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 3 ..	61
Figura 21 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 3 por 25 min	62
Figura 22 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 1 ..	63
Figura 23 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 2 ..	63

Figura 24 -Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 4	64
Figura 25 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 5 ...	64
Figura 26 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 6 ...	65
Figura 27 - Recuperação da qualidade da água (turbidez)	66
Figura 28 - Recuperação da qualidade da água (cor aparente).....	67
Figura 29 - Médias das medidas de cor aparente	68
Figura 30 - Médias das medidas de turbidez.....	69
Figura 31 -Boxplot cor da água bruta e água filtrada.....	70
Figura 32 - Boxplot turbidez da água bruta e água filtrada.....	71
Figura 33 -Evolução da perda de carga.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características da areia usada num filtro lento.....	30
Tabela 2 - Valores recomendados de água bruta para uso da filtração lenta.....	42
Tabela 3 - Velocidades de lavagem e expansão correspondentes	66
Tabela 4 - Resultado do monitoramento dos filtros	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	23
2.1 OBJETIVO GERAL.....	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1 HISTÓRICO DA FILTRAÇÃO LENTA.....	25
3.2 FILTROS LENTOS	27
3.2.1 <i>Leito filtrante</i>	29
3.2.2 <i>Água Sobrenadante ou Lâmina de Água sobre a Areia</i>	31
3.2.3 <i>Sistema de Drenagem</i>	31
3.3 PRINCÍPIOS FILTRAÇÃO LENTA.....	31
3.4 CAMADA BIOLÓGICA – SCHMUTZDECKE	31
3.5 PERÍODO DE AMADURECIMENTO	32
3.6 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS.....	33
3.7 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DOS FILTROS LENTOS	34
3.8 LAVAGEM CONVENCIONAL – RASPAGEM DO MEIO FILTRANTE ...	35
3.9 RETROLAVAGEM.....	36
3.10 PRINCÍPIOS DA RETROLAVAGEM.....	37
3.10.1 <i>Perda de carga ou carga hidráulica</i>	37
3.10.2 <i>Fluidificação e Expansão do Meio Filtrante</i>	39
3.11 SISTEMA DE RETROLAVAGEM SEM RESERVATÓRIO DE ÁGUA PARA LAVAGEM.....	41
3.12 VANTAGENS X LIMITAÇÕES.....	41
4. METODOLOGIA	45
4.1 LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA PILOTO	45
4.2 ENSAIOS PRELIMINARES	46
4.2.1 <i>Análise Granulométrica</i>	46
4.2.2 <i>Ensaio de Expansão</i>	47
4.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA PILOTO.....	49
4.3.1 <i>Número de filtros do sistema e taxa de retrolavagem</i>	49
4.3.2 <i>Vazão de entrada do sistema</i>	50

4.3.3 Alturas úteis disponíveis	50
4.3.4 Descrição e operação do sistema piloto	51
4.4 PARÂMETROS DE CONTROLE	55
4.4.1 Qualidade da água.....	55
4.4.2 Vazão.....	56
4.4.3 Perda de Carga.....	57
4.4.4 Recuperação da qualidade da água.....	57
4.4.5 Controle da turbidez da retrolavagem.....	57
4.4.6 Plano amostral.....	58
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1 TESTES PRELIMINARES DE EXPANSÃO	59
5.2 RESULTADOS DO CONTROLE DA TURBIDEZ NA RETROLAVAGEM.....	60
5.3 QUALIDADE DA ÁGUA APÓS A LIMPEZA.....	66
5.4 QUALIDADE DA ÁGUA.....	67
5.4.1 Análise estatística da qualidade da água.....	69
5.5 PERDA DE CARGA E CARREIRAS DE FILTRAÇÃO	71
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	73
REFERÊNCIAS.....	74
ANEXO 1 - TABELA DE DADOS OBTIDOS NO ENSAIO GRANULOMÉTRICO	81
ANEXO 2 - CURVAS DE TURBIDEZ X TEMPO DA RETROLAVAGEM.	82

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de grande extensão territorial isolando muitas vezes comunidades, o que dificulta o acesso à água de qualidade. Diante desta realidade a busca por tecnologias que garantam o fornecimento de água potável a esta população, que não demandem grandes investimentos e que tenham simples manutenção é de suma importância.

A filtração lenta é uma tecnologia de tratamento de água muito eficiente que não demanda equipamentos sofisticados. É constituída apenas por um leito filtrante, geralmente areia, sendo que nos primeiros centímetros se forma, no decorrer da carreira, uma camada chamada *Schmutzdecke* onde ocorrem os principais processos biológicos de remoção de impurezas. É uma forma de tratamento que requer água bruta com uma certa qualidade porém não demanda produtos químicos, e dependendo das condições geográficas nem eletricidade, reduzindo assim os custos de implementação e manutenção. Conforme a necessidade, os filtros lentos podem ser dimensionados para sistemas individuais ou coletivos. Sendo assim uma boa alternativa para comunidades isoladas no meio rural.

A limpeza dos filtros lentos é realizada de forma convencional com a raspagem da camada biológica superficial e um pouco de material filtrante, o que é trabalhoso e demanda tempo de quem está operando o sistema. A retrolavagem é uma alternativa eficiente e que facilita o processo de limpeza dos filtros.

Geralmente um reservatório de água elevado é construído para lavagem dos filtros. Este trabalho propõe um sistema de filtros lentos em que a água para lavagem de um filtro seja proveniente dos demais filtros, o que elimina a necessidade de um reservatório e seu conjunto de motor bomba para recalque. Com esse sistema não há limite de tempo para lavagem, o que flexibiliza a operação. Uma dificuldade encontrada na aplicação da filtração lenta é a possível mudança sazonal da qualidade da água do manancial. Por esse sistema é possível determinar o tempo de lavagem conforme a época do ano sem prejudicar assim a qualidade da água filtrada.

Esta pesquisa foi realizada na Estação Tratamento de Água da Lagoa do Peri, em Florianópolis, onde o sistema com seis filtros lentos foi instalado e alimentado com água proveniente da mistura de água do manancial com água filtrada em margem que passa por sistemas de aeração e filtro de limpeza contínua.

Foi avaliada a eficiência da limpeza e tempo de lavagem, além do monitoramento da qualidade da água com relação à cor aparente e turbidez.

Esta pesquisa pretende propor uma forma alternativa de lavagem dos filtros lentos através da retrolavagem sem reservatório elevado, utilizando água filtrada das demais unidades de filtração, buscando dessa forma uma tecnologia de tratamento de água menos onerosa e de fácil operação.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é estudar aspectos hidráulicos, construtivos e de produção de um sistema de filtros lentos de escoamento descendente retrolaváveis sem reservatório elevado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Construir um sistema piloto de filtros lentos com retrolavagem sem reservatório elevado;
- b) Avaliar aspectos hidráulicos como: volume de água gasto para lavagem, a altura total do filtro e a carga hidráulica necessária para lavagem;
- c) Avaliar a variação da perda de carga através de piezômetros instalados no início e no fim da camada de areia;
- d) Avaliar o desempenho do sistema de filtros lentos quanto ao tempo da carreira de filtração;
- e) Avaliar a qualidade da água bruta e filtrada em termos cor aparente e turbidez.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A água de abastecimento para ser distribuída deve estar de acordo com padrões de potabilidade estabelecidos por normas para garantir a saúde da população. A escolha da tecnologia de tratamento que atender a esse padrão considera não somente a qualidade da água a ser tratada como as características da comunidade que será beneficiada. Para muitas comunidades rurais, que não detêm recursos financeiros para construir estações de tratamento sofisticadas, o acesso a água de qualidade é praticamente inexistente. Em virtude disto, é necessário desenvolver tecnologias apropriadas a essa realidade e viáveis economicamente. A filtração lenta surge como um método simples de tratamento com baixo custo, apropriado para muitos países como o Brasil que possui regiões de acentuadas diferenças sócio – econômicas (Emmendoerfer,2006).

A filtração lenta atua na redução de parâmetros de qualidade como cor, turbidez, sólidos suspensos e coliformes. Com a utilização desta técnica, que dispensa produtos químicos para tratar a água, não há formação de resíduos, permitindo que a água de lavagem dos filtros seja empregada na irrigação ou simplesmente descartada no solo sem preocupações com possíveis contaminações do meio ambiente (Gearheart, 1999 *apud* Paterniani, 2004).

3.1 HISTÓRICO DA FILTRAÇÃO LENTA

O ser humano desde os primórdios, mesmo sem conhecimento, já sabia distinguir uma água limpa passível de consumo de uma água turva com gosto e odor, Paterniani (2004). Os primeiros registros escritos encontrados de técnicas de tratamento foram hindus datados de 4000 aC., no entanto os últimos dois séculos foram os que determinaram os principais avanços nessa área (Murtha e Heller, 2003). Por volta de 1700 d.C., a filtração é consagrada como forma eficiente para remoção das partículas suspensas na água, embora o grau de clarificação da água ainda não fosse discutido na época (USEPA, 2000).

John Gibbs foi o primeiro a construir filtros de areia em 1804 em Paisley (Escócia). Mas foi somente em 1828 que os filtros de areia foram usados pela primeira vez para abastecimento público, construídos por James Simpson para abastecer Londres (Costa,1980 e Hespagnol, 1969). Nesses filtros pretendia-se somente a redução da turbidez pelos mecanismos físicos de retenção de partículas. Neste mesmo século, cientistas percebem a relação entre a água de má qualidade com as

doenças causadas na população, sendo o tratamento da água realizado não somente por motivos estéticos e de qualidade mas também como forma de prevenir doenças (RIWRB, 2009).

A eficiência da filtração lenta na remoção de bactérias foi comprovada em 1892 nas cidades de Hamburgo e Altona na Alemanha, que captavam águas do rio Elba. Em Hamburgo o tratamento consistia apenas de sedimentação, enquanto que em Altona possuía filtros lentos de areia. Com a contaminação do rio Elba, houve uma epidemia de cólera causando a morte de 7582 pessoas em Hamburgo e, em Altona somente 328 pessoas morreram, sendo que a maioria dos casos se deu por contato com a água de Hamburgo (Huisman, 1982 *apud* Paterniani, 2004).

Por ser um processo de purificação extremamente simples e eficiente, difundiu-se muito rapidamente pela Europa e América. Segundo Mbwette & Graham (1987) em 1980 cerca de 27,6% do total de água tratada no Reino Unido utilizava como único processo de filtração a filtração lenta ou em combinação com filtros rápidos, porém em regiões específicas da Inglaterra mais de 70% da água tratada provem da filtração lenta como processo secundário de tratamento. Uma estação de tratamento que atendia a 295 consumidores foi construída em Richmond, Estados Unidos, no ano de 1832, e em Massachusetts por volta de 1870 os filtros lentos foram introduzidos como nova tecnologia de tratamento (RIWRB,2009).

Esse processo de tratamento de água apresenta vantagens comparado a outras tecnologias amplamente difundidas. É uma tecnologia simples que apresenta facilidade operacional, não requer produtos químicos, além de ter grande eficiência na remoção de sólidos e organismos patogênicos (Pizzolatti, 2010). Essas vantagens, aliadas ao uso de materiais alternativos e de mão de obra simples, podem reduzir os custos iniciais de implantação, operação e manutenção desse sistema, possibilitando um tratamento da água muito eficiente e acessível, bastante adequado às condições econômicas e sociais brasileiras, o que foi demonstrado em pesquisas realizadas na Escola de Engenharia de São Carlos-USP, por Di Bernardo (1993). Além de ser um dos processos de tratamento de água de abastecimento que produz menos quantidade de lodo, o mesmo tem a possibilidade de ser utilizado na agricultura e piscicultura (Paterniani & Roston, 2003).

3.2 FILTROS LENTOS

O processo de filtração consiste na passagem de água por um material poroso e através da remoção de matéria suspensa e coloidal, redução do número de bactérias e outros organismos e destruição da matéria orgânica através da oxidação, que a qualidade da água é melhorada (Staciarini, 1998).

Os filtros lentos utilizam taxas de filtração de 2 a 14 m³/m²dia, operando portanto com taxas de 20 a 50 vezes menores que os filtros rápidos (Huisman, 1974). Os filtros desenvolvem por conseguinte carreiras de filtração longas, utilizando taxas de filtração baixas, chegando até 60 dias, sem comprometer a qualidade da água filtrada (Medina, 2000). Estes podem ser de três tipos: filtro lento descendente, ascendente e filtro lento dinâmico (Costa, 1980).

Um filtro lento é composto por uma estrutura de entrada, geralmente de concreto, contendo medidor de vazão, câmara filtrante, tubulação de descarga do sobrenadante, dispositivo para permitir o enchimento da câmara com água filtrada no sentido ascendente, extravasor, meio filtrante, camada suporte, sistema de drenagem, tubulações, válvulas e acessórios de saída, de acordo com Di Bernardo (1999). Em geral, as saídas dos filtros lentos de uma instalação são conectados a um canal provido de vertedor para garantir o nível mínimo de água no interior da câmara filtrante, ou então têm-se caixas individuais, contendo vertedores com escoamento livre, interligadas por meio de tubulação que conduz o efluente global à câmara de desinfecção. Dependendo da carga hidráulica disponível para a retenção de impurezas, da espessura do meio filtrante e do sistema de drenagem, a altura total do filtro varia entre 2 e 3 m (Di Bernardo, Brandão e Heller 1999).

Os filtros lentos podem operar com coluna de água constante ou variável, conforme apresentado nas Figuras 1 e 2 respectivamente. Segundo Di Bernardo, Brandão e Heller (1999), os dois modos de operar são equivalentes quanto a eficiência, sendo o filtro que opera com coluna de água variável é preferível do ponto de vista econômico e operacional.

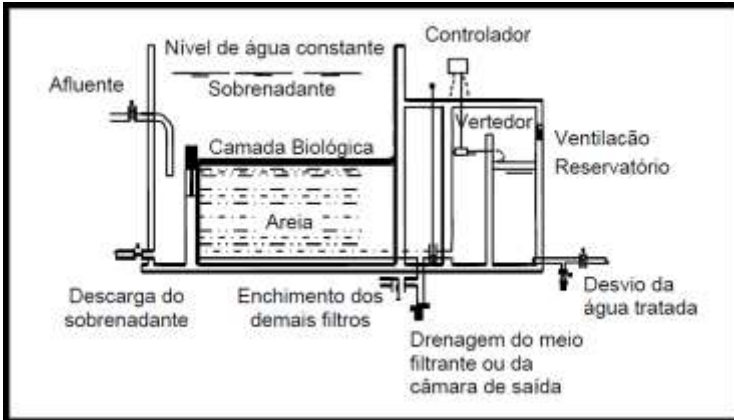


Figura 1-Arranjo de filtro lento com nível de água constante (Di Bernardo Dantas 2005)

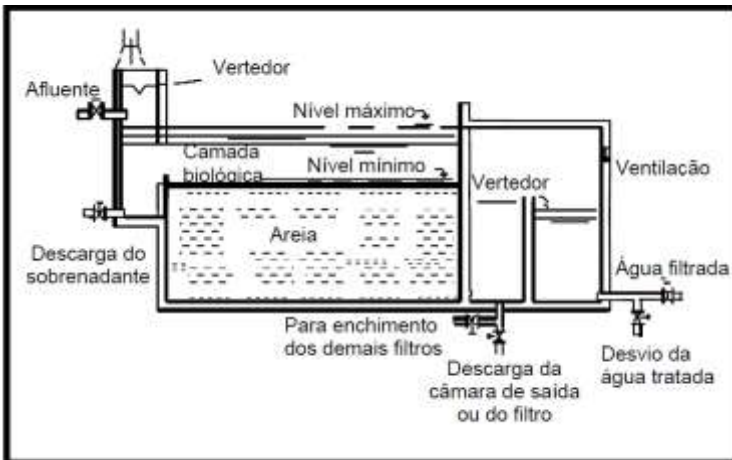


Figura 2-Arranjo filtro lento com nível variável (Di Bernardo e Dantas, 2005)

Segundo Di Bernardo (1999), a turbidez da água bruta afeta diretamente a eficiência da filtração lenta. Tal parâmetro de qualidade reflete a quantidade de partículas pequenas presentes na água, às quais muitos microrganismos se encontram aderidos. Segundo Marnoto (2008), muitos pesquisadores limitam a turbidez da água afluente aos filtros lentos em 10 uT para que a filtração lenta produza água filtrada com turbidez relativamente baixa e que não diminua a eficiência da

desinfecção final, apresentando carreiras de duração razoável (geralmente superiores a um mês).

Os filtros lentos podem ser cobertos ou descobertos, sendo normalmente descobertos. No entanto, em alguns casos, a cobertura é utilizada para minimizar a ação dos raios solares, para desta forma reduzir o crescimento das algas, em regiões quentes, e em regiões frias é uma proteção para minimizar problemas de congelamento da água (PÁDUA et al., 2006).

3.2.1 Leito filtrante

A filtração ocorre de fato no leito filtrante. O filtro lento é geralmente composto por uma camada única de areia e com a utilização da retrolavagem o material granular é disposto de forma estratificada, ou seja, o tamanho dos grãos da base para cima vai decrescendo no interior do leito filtrante.

O pedregulho usado no filtro lento, segundo Azevedo Netto (1979), cuja função é prevenir a obstrução do sistema drenante pela penetração de areia fina, não pode ser fragmentável ou deformável sob a ação de cargas. Normalmente, são usados granitos, gnaisse, ou eventualmente, arenito altamente silicificado. Já em relação à areia empregada como material filtrante, Azevedo Netto (1979), considera que deve ser composta quase que exclusivamente de quartzo ou silicatos de resistência elevada. Não deve conter carbonato de sódio ou de magnésio, exceto em quantidades muito pequenas. A presença de material calcário ou alumínio tende a aumentar a resistência de atrito da areia ao escoamento da água, e os sais de sódio ou magnésio tendem a torná-la dura. Além disso, a areia deve ser isenta de argila, poeira, raízes e outras impurezas. Para projetar um sistema de filtração é imprescindível o conhecimento das características granulométricas dos materiais que compõem o meio filtrante. Os principais parâmetros de caracterização de materiais filtrantes são:

1. Tamanho efetivo (de);
2. Coeficiente de desuniformidade (CD);
3. Coeficiente de esfericidade (\square);
4. Tamanhos mínimos e máximo dos grãos ($dmín$ e $dmáx$).

O meio filtrante caracteriza-se pelo seu tamanho efetivo e pelo coeficiente de desuniformidade, segundo Van Dijk et al. (1978).

Escolhe-se normalmente um tamanho efetivo entre 0,15 e 0,35mm. Em relação ao coeficiente de desuniformidade, o mesmo autor afirma que, deve ser de preferência menor que 2, ainda que se possam aceitar valores até 5. A tabela 1, resume algumas características, acima referidas, da areia usada para a construção de filtros lentos.

Tabela 1- Características da areia usada num filtro lento

Parâmetro	Valor Usual
Espessura da camada (m)	0,6 – 0,9
Tamanho do grão (mm)	0,104 – 1,0
Tamanho efetivo (mm)	0,15 – 0,3
Coeficiente de desuniformidade	1,5 – 3
Coeficiente de esfericidade	0,7 – 0,8
Porosidade inicial	0,38 – 0,4

Fonte: Di Bernardo, 1993

Di Bernardo e Rivera (1996) verificaram que com o aumento do coeficiente de desuniformidade a penetração de impurezas foi mais profunda e, como consequência, mais longas foram as carreiras de filtração para as taxas estudadas. A qualidade da água filtrada produzida não era significativamente alterada pela diferença entre os coeficientes de desuniformidade. Além disso, se a areia for uniforme existe a possibilidade de utilizá-la sem peneiramento.

A remoção de sólidos e bactérias, tanto nos filtros de fluxo descendente quanto no ascendente, ocorre predominantemente nos 30cm iniciais do leito filtrante, sendo que, para a extensão restante, são observadas apenas variações pouco significativas. Esta remoção foi verificada para coliformes totais, *Escherichia coli*, turbidez e cor aparente (Murtha e Heller (1999b)).

A grande eficiência demonstrada em filtros lentos retrolaváveis nos 30cm iniciais do leito filtrante, segundo Emmendoerfer (2006), pode indicar a possibilidade de redução da sua espessura útil (mínima) para faixas de 40 a 60cm, que, conforme demonstrado, assegura uma eficiente redução dos indicadores básicos de qualidade da água.

Em filtros lentos convencionais, nos quais a limpeza é realizada através da raspagem a camada filtrante pode variar sua espessura de 90 cm a 120cm, para propiciar a colocação em funcionamento do filtro sem a reposição do material retirado em cada limpeza, tendo em vista o tempo despendido para cada limpeza (Azevedo Neto, 1979).

3.2.2 Água Sobrenadante ou Lâmina de Água sobre a Areia

Contados a partir da superfície da areia com o filtro completo, a altura de água, cuja carga hidráulica permite a passagem através do leito filtrante até à saída do sistema de drenos, oscila normalmente ente 0,90m a 1,50m. O máximo recomendado é de 1,20m porque acima desse valor torna-se muito difícil o controle da vazão dos filtros (Azevedo Netto, 1979).

3.2.3 Sistema de Drenagem

Este sistema é construído com dois propósitos, permitir a coleta da água tratada e dar suporte ao leito filtrante, de modo a assegurar uma velocidade de filtração uniforme sobre toda a área do filtro (Van Dijk et al., 1978). No caso da retrolavagem também tem a função de distribuir uniformemente a vazão de lavagem.

3.3 PRINCÍPIOS FILTRAÇÃO LENTA

As impurezas presentes na água ficam aderidas a superfície das partículas do meio filtrante durante a filtração. As partículas retidas no filtro lento podem ser até 100 vezes menores que o espaço entre os grãos do meio filtrante, isto ocorre devido a diversas ações presentes na filtração (Costa, 1980).

Os principais mecanismos responsáveis pela remoção das partículas na filtração lenta segundo Costa (1980) e Sá (2006) são: transporte, aderência e processos microbiológicos. A remoção das partículas em suspensão através da filtração também sofre influência das características físicas e químicas das partículas, do meio filtrante, da taxa de filtração, das características químicas da água e da maneira de operação do filtro (Amirtharajah, 1988).

3.4 CAMADA BIOLÓGICA – SCHMUTZDECKE

A atividade biológica é a principal e mais importante ação que ocorre na filtração lenta, sendo mais pronunciada no topo e nos primeiros centímetros da camada filtrante, onde há a formação de uma camada biológica chamada *Schmutzdecke* (*Schumutz* = sujo e *decke* =

camada, manta), constituída por partículas inertes, matéria orgânica e de outros organismos (Di Bernardo e Dantas, 2005).

Os principais grupos responsáveis pela atividade biológica são as bactérias, algas e zooplâncton. As bactérias formam o biofilme na superfície dos grãos de areia que adsorvem as partículas de impurezas presentes na água bruta, enquanto que alguns microrganismos produzem polímeros extracelulares que permitem a aderência das partículas no meio filtrante e melhoram a remoção no filtro. Protozoários também podem contribuir na remoção de partículas se alimentando de bactérias, inclusive patogênicas (Jellison, 2000 *apud* Farias, 2011)

Segundo Neves (1987), a taxa de crescimento dos organismos no meio filtrante depende da quantidade de matéria suspensa carregada pela água, da taxa de filtração empregue e do tamanho efetivo da areia. Estudos realizados comprovam que nos filtros lentos de areia, tanto a biomembrana como o crescimento biológico sobre o leito do filtro, desempenham um importante papel sobre a eficácia do tratamento (Sánchez et al., 1999).

A flora bacteriana migra para regiões mais profundas do leito a medida que ocorre o amadurecimento do filtro (Varesche, 1989). Segundo Murtha *et al* (2003), a grande eficiência na remoção do níveis de coliformes totais, *Escheruchia coli*, turbidez e cor aparente ocorre nos primeiros 30 cm iniciais do leito filtrante. A remoção de bactérias por filtração lenta é uma função do crescimento e da população de organismos dentro do *Schmutzdecke* (Aguila *et al.* 2003).

Segundo Aguila *et al* (2003), devido ao escoamento da água através da areia ser laminar, sendo desviado somente pela colisão com os grãos, milhares de pequenas bacias de sedimentação são formadas, favorecendo a deposição de bactérias e outros microrganismos. A intensa atividade bacteriana, bem como a liberação do conteúdo celular, promove a formação de uma película gelatinosa entre essas pequenas bacias, facilitando a retenção de partículas suspensas e, ao mesmo tempo, dificultando o escoamento da água.

3.5 PERÍODO DE AMADURECIMENTO

No momento em que um filtro é colocado em operação pela primeira vez, os organismos responsáveis pela remoção de bactérias e turbidez ainda não estão presentes. É considerado período de amadurecimento as duas ou três primeiras semanas de operação do filtro, exatamente quando o *Schmutzdecke* está em desenvolvimento

juntamente com o crescimento biológico dentro do leito de areia e na camada suporte (Aguila *et al.*, 2003).

O grau de desenvolvimento microbiológico é reconhecido conforme a maturidade biológica do leito de areia. Esta condição não é medida, mas é função do número de semanas de operação do filtro para determinadas condições da água bruta. A disponibilidade de nutrientes e a temperatura são as condições que mais afetam o tempo necessário para a maturação do leito, havendo o decréscimo deste tempo com o aumento da temperatura (Bellamy *et al.*, 1985). De acordo com Aguila *et al.* (2003), o filtro lento apresenta uma variedade de microrganismos após a formação do *Schmutzdecke* e da maturação do leito de areia que, de acordo com suas características e função na cadeia biológica, participam dos mecanismos de purificação. Quando a água bruta apresenta baixas concentrações de carbono orgânico dissolvido biodegradável e de bactérias a maturação do meio filtrante pode não ser efetiva. Maturação físico-química está relacionada com a remoção prévia de partículas e é menos efetiva quando a concentração de partículas na água bruta é muito baixa.

3.6 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

Segundo, Azevedo Netto (1979), os filtros lentos de areia podem trabalhar com taxa de filtração constante ou declinante. A altura de água sobre a superfície da areia (nível de água) pode ser também constante ou variável. Como a perda de carga através do filtro aumenta gradativamente deve-se dispor de elementos que possam compensá-la, mantendo a vazão do efluente constante. As características hidráulicas que influenciam a eficiência da filtração são as seguintes:

a) Controle dos filtros - São exigidos dois controles para o funcionamento adequado dos filtros:

- Controle do nível de água;
- Controle da vazão.

O controle do nível de água pode ser feito por uma válvula instalada na canalização de saída de água filtrada e acionada por um dispositivo de flutuador ou de detector de nível, instalado na superfície do filtro. O controle da vazão pode ser realizado na saída da água filtrada ou na entrada da água dos filtros. No último caso são instalados

vertedores ou orifícios para a entrada de água. Esses dispositivos permitem que todos os filtros recebam praticamente a mesma vazão de água.

b) Taxa de filtração – o emprego de taxas de filtração baixas, não assegura necessariamente a produção de água filtrada de melhor qualidade. As variações da taxa de filtração durante uma carreira de filtração são muitas vezes inevitáveis e podem afetar substancialmente a qualidade do efluente.

c) Carga hidráulica ou perda de carga disponível para filtração – A perda de carga está ligada diretamente a duração da carreira de filtração, calculada empiricamente pelo projetista. Varia com o tempo de funcionamento devido à retenção de impurezas.

3.7 OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DOS FILTROS LENTOS

Quando uma unidade de filtração lenta estiver bem desenhada e construída, necessita apenas de operação e manutenção de rotina simples resumindo-se à limpeza periódica, ao controle da vazão e, antes de ser liberada para a distribuição, a cloração do efluente. Esta é uma forte razão para o incentivo ao seu emprego em localidades com baixa capacidade operacional (Marnoto, 2008).

No tratamento de águas de abastecimento a limpeza do filtro lento é uma das mais importantes etapas do processo. A limpeza é realizada quando a perda de carga ou carga hidráulica estipulada pelo projetista é atingida. Quando isso ocorre, a quantidade de água que entra no filtro não é a mesma quantidade de água filtrada e, conseqüentemente, a taxa de filtração é alterada e o filtro passa a operar com taxa de filtração declinante e carga hidráulica constante. Segundo Richter e Azevedo Neto (2003), um filtro é tão bom quanto a sua lavagem pois se não for bem realizada interfere diretamente na qualidade da água.

Costa (1980) ressalta que a eficiência do tratamento será afetada se a taxa de filtração diminuir rapidamente, uma vez que a pressão no leito filtrante aumenta, provocando bolhas de ar no mesmo, as quais tendem a sair do meio filtrante formando caminhos preferenciais o que pode resultar em um tratamento ineficiente.

3.8 LAVAGEM CONVENCIONAL – RASPAGEM DO MEIO FILTRANTE

No método tradicional de limpeza de filtros lentos (fig. 3), ocorre a drenagem até que o nível de água fique logo abaixo da superfície. Dessa forma, o *Schmutzdecke* e os primeiros 1 a 5 cm de areia são raspados, lavados e acondicionados para serem repostos no filtro quando a altura de areia do filtro ficar com a espessura mínima recomendada (60 cm). Extrair, limpar e repor a areia é uma operação trabalhosa e dependendo do tamanho do filtro pode levar um dia ou mais. Segundo revisão literária realizada por Logsdon (2002), em um filtro com dimensões de 100 m² são necessárias mais de 50 horas para a execução da limpeza. (Water Filtration Practice, AWWA, 2008)

A raspagem do meio filtrante como técnica de limpeza torna inevitável a perda de uma quantidade de areia substancial. Segundo Di Bernardo (2005), para que a atividade biológica no filtro se inicie rapidamente, após a limpeza, a reposição da areia deve ser de forma adequada de modo que acima da areia a ser recolocada no filtro permaneça uma camada de areia já com o filme biológico formado. De acordo com Water Quality & Treatment (2011) o tempo de maturação pode ser de alguns dias (1 a 2 dias).

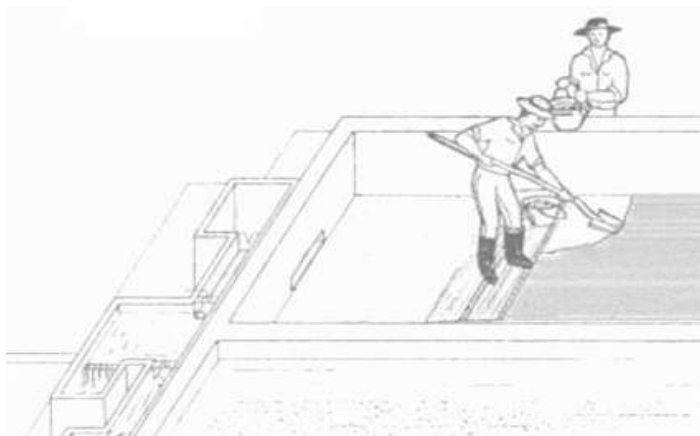


Figura 3 - Procedimento da raspagem da areia (Di Bernardo, 1997)

3.9 RETROLAVAGEM

Com o intuito de facilitar a lavagem dos filtros, em 1992 foi proposto pela primeira vez por Sens a retrolavagem de filtros lento (Emmendoerfer, 2006). O objetivo principal foi empregar filtros lentos em zonas rurais e/ou isoladas, onde as dimensões dos mesmos seriam menores uma vez que cada filtro abasteceria um número menor de pessoas. A filtração lenta proposta foi de escoamento descendente com retrolavagem, utilizando a água filtrada do próprio filtro para realizar a limpeza da camada filtrante.

Em continuidade à proposta de Sens, Michielin (2002) estudou as condições hidráulicas para a fluidificação do material filtrante desenvolvendo o primeiro sistema piloto de filtração lenta com retrolavagem. Em continuidade, Emmendoerfer (2006), avaliou a altura da camada filtrante, a duração das carreiras, qualidade da água tratada, aspectos hidráulicos e o desenvolvimento da lavagem.

Em suas pesquisas Marnoto (2008) produziu um sistema piloto de bancada que reproduzia o filtro lento retrolavável, dando sequência aos trabalhos anteriores, e avaliou diferentes expansões durante a retrolavagem e sua influência na duração nas carreiras de filtração, qualidade da água filtrada e tempo de formação da camada biológica.

Michelan (2010) construiu 3 sistemas pilotos para avaliar a remoção de carbofurano. Dois foram precedidos por filtração em margem de rio, um de filtro lento com limpeza convencional e outro com retrolavagem. O terceiro foi um sistema de colunas filtrantes de sedimentos que simula a filtração em margem em escala laboratorial.

Utilizando água proveniente da Lagoa do Peri, Pizzolatti (2010) avaliou e comparou a limpeza de 3 filtros lentos, um com limpeza por raspagem do meio filtrante, o segundo com retrolavagem utilizando água bruta e o terceiro utilizando água filtrada para retrolavagem.

A retrolavagem é simples e prática, pois apenas com a abertura de uma válvula, a água vai entrar em contra-corrente (por inversão de fluxo), com uma vazão capaz de assegurar uma expansão adequada para o meio filtrante, possibilitando assim uma limpeza eficiente (Emmendoerfer, 2006). Richter e Azevedo Netto (2003) referem que há duas condições para se determinar a altura de lavar em relação à lavagem de filtros rápidos, além de dois critérios para a escolha do filtro a ser lavado:

- Quando o nível de água atingir um certo limite, lava-se o filtro que estiver a operar há mais tempo;

- Se houver controle da turbidez no efluente (água tratada) de cada filtro, lava-se o filtro que apresentar pior resultado.

Estes mesmos critérios podem ser aplicados a filtros lentos (Marnoto, 2008).

A filtração lenta é considerada uma tecnologia que não exige muita manutenção visto que a carreira de filtração tem duração média entre 30 a 60 dias (Medina, 2002).

O volume de água para se realizar a retrolavagem é função do tempo que se pretende lavar o filtro, sendo esse tempo adotado por muitos autores entre 6 e 10 minutos, para os filtros rápidos. Emmendoerfer (2006) afirma que para filtros lentos o tempo de lavagem pode ser reduzido para até 4 minutos, quando o leito tiver 40 cm de areia.

A retrolavagem é uma forma de limpeza que economiza tempo e consequentemente diminui o custo comparada a limpeza manual em que o meio filtrante é raspado, lavado e após varias limpezas retorna ao filtro (Di Bernardo, 1999).

3.10 PRINCÍPIOS DA RETROLAVAGEM

A geometria e a forma dos grãos do leito filtrante tem grande influência na perda de carga, na velocidade mínima de fluidificação e no comportamento da expansão durante a lavagem. Os grãos de forma mais arredondada apresentam maior eficiência durante a lavagem, pois apresentam perda de carga inferior aos grãos de forma irregulares (Di Bernardo, 2003). O comportamento da fluidificação do meio filtrante é influenciado pela esfericidade, tamanho efetivo e densidade (Marnoto, 2008).

Todos estes parâmetros são importantes para a retrolavagem.

3.10.1 Perda de carga ou carga hidráulica

A carga hidráulica disponível e a taxa de filtração são uns dos fatores preponderantes na duração da carreira de filtração. A carga hidráulica disponível total é igual a soma da perda de carga inicial e a correspondente à retenção de impurezas (Di Bernardo, 2003).

Na filtração lenta a ação de coar é a predominante, logo a perda de carga varia com o tempo devido à retenção de impurezas, definida pela equação segundo Di Bernardo (1993):

$$H_{ft} = H_{fo} \cdot e^{kt}$$

Em que:

H_{ft} : perda de carga num tempo t qualquer (m)

H_{fo} : perda de carga inicial (m)

k : coeficiente que depende da taxa de filtração, da qualidade da água do afluente, do meio filtrante, etc. (s-1)

t : tempo de funcionamento (s)

Segundo Di Bernardo quando o meio filtrante está limpo, no início da carreira de filtração, o somatório das perdas de carga (meio filtrante, camada suporte, altura de água sobre o vertedor, tubulações e acessórios) define o nível de água no interior do filtro, acima da crista do vertedor de saída. Com o tempo, para compensar a perda de carga decorrente da retenção de impurezas ocorre o aumento do nível de água no interior do filtro, até que o nível máximo de água é atingido, momento no qual o filtro deve ser retirado de operação para a limpeza.

O diagrama de pressão em um filtro é mostrado na Figura 4, em que podemos também observar a variação da perda de carga (H) com a profundidade do leito (L) e o tempo (t). Este diagrama é obtido com o uso de piezômetros ao longo do meio filtrante.

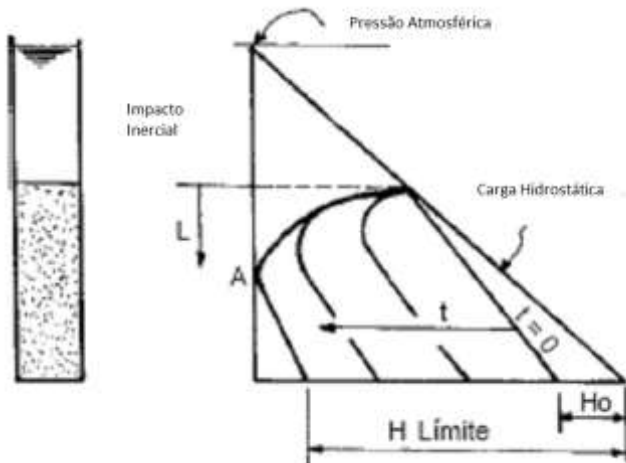


Figura 4 - Diagrama de pressão (Maldonato, 2004)

No início da carreira de filtração, o meio filtrante se encontra limpo, logo a perda de carga resultará em uma reta, pois seu crescimento é pequeno neste momento. Com a retenção de impurezas ao longo do tempo a perda de carga começa a crescer exponencialmente e assim rapidamente a carreira de filtração é finalizada (Di Bernardo, 2005).

3.10.2 Fluidificação e Expansão do Meio Filtrante

- Fluidificação de meios granulares

Ao realizar a retrolavagem é utilizado água no sentido ascensional para liberar as impurezas retidas através da expansão adequada do meio filtrante e promover a fluidificação (Di Bernardo, 2005). O fluxo de água promove uma reorganização das partículas ao produzir uma força contrária ao peso da partícula diminuindo a resistência a passagem da água (Figura 5).

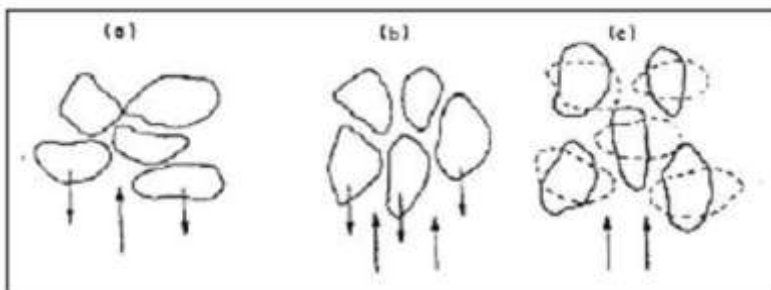


Figura 5 - Variação da posição dos grãos do meio filtrante durante a lavagem (Maldonato, 2004)

A posição dos grãos variam conforme a velocidade ascensional empregada na lavagem, como demonstra a Figura 5. No caso (a) a velocidade ascensional é baixa e a porosidade permanece inalterada e o leito não se expande. No caso (b) com o aumento da velocidade os grãos tendem a se orientar porém a força resultante do fluxo da água é menor que o peso do grão, não ocorrendo a fluidificação. No caso (c) ao aumentar mais a velocidade, o peso do grão é superado pelas forças decorrentes do atrito da água com os grãos, que ficam suspensos no meio fluidificado (Di Bernardo, 2005).

Após a fluidificação, com o aumento da velocidade ascensional verifica-se a proporcional altura do meio granular expandido, além do aumento da porosidade e da variação da perda de carga, como pode ser visualizado na Figura 6.

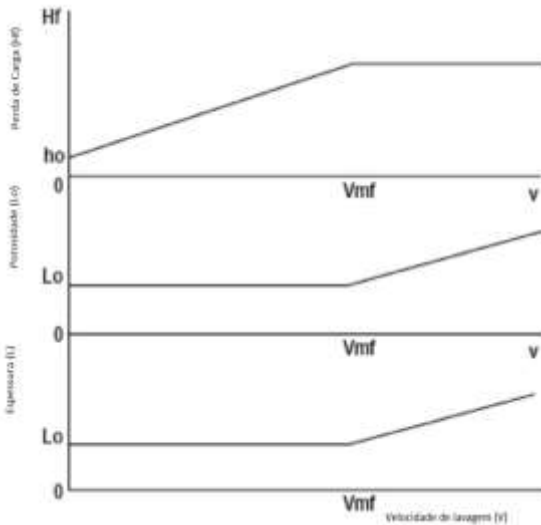


Figura 6 - Variação da espessura do meio granular, porosidade e perda de carga em função da velocidade ascensional (Maldonado, 2004)

Na Figura 6, entre os pontos A e B a porosidade e a espessura do meio praticamente não se alteram e a perda de carga cresce de acordo com a equação de Ergun. O ponto B corresponde à velocidade mínima de fluidificação, ou seja, ponto no qual o meio granular começa a expandir. Neste momento a perda de carga atinge seu valor máximo e se torna constante, já a porosidade e a espessura do meio filtrante aumentam proporcionalmente a velocidade ascensional (Di Bernardo, 2005).

- Expansão de meios granulares

Segundo Maldonado (2004), é possível determinar a expansão de um meio filtrante baseado na curva granulométrica e na porosidade das diferentes subcamadas expandidas para uma determinada velocidade de lavagem, seguindo o modelo de Amirtharajah e Cleaby.

Nos estudos de Ermendoerfer (2006) com uma velocidade ascensional de 0,34 m/min, para uma areia de diâmetro efetivo de 0,15 a 0,22mm, foi obtido uma retrolavagem eficiente. Demonstrou assim uma economia de água na lavagem, pois com uma baixa velocidade já consegue expandir o meio e consequentemente fluidificá-lo.

3.11 SISTEMA DE RETROLAVAGEM SEM RESERVATÓRIO DE ÁGUA PARA LAVAGEM

A água para a lavagem de um filtro pode ser proveniente dos demais filtros da instalação, eliminando-se assim o reservatório elevado de água. A retrolavagem é realizada com apenas manobras de abertura e fechamento de válvulas. Este processo será melhor explicado na metodologia, sessão 4.3.3 e 4.3.4.

Com base na taxa de filtração e da velocidade ascensional obtém-se o número de filtros necessários para realizar a retrolavagem.

3.12 VANTAGENS X LIMITAÇÕES

A filtração lenta apresenta grande eficiência na otimização de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos. Bellamy *et al* (1985), constataram uma eficiência de 100% na remoção de cistos de *Giárdia* operando filtros lentos pilotos.

Segundo estudos de Murta e Heller (2003), a filtração lenta é uma ótima alternativa para a redução e muitas vezes a eliminação total da *Escherichia coli*, que é o principal indicativo de contaminação fecal.

A água proveniente do tratamento realizado pelos filtros lentos tem características menos corrosivas e os equipamentos utilizados são mais simples comparado a tecnologias convencionais (Azevedo Netto,1979) .

Outro aspecto interessante na filtração lenta é que não forma resíduos, pois não utiliza produtos químicos como no tratamento convencional. Murtha *et al.* (1999a), afirma que o lodo gerado pode ser utilizado na agricultura e na piscicultura.

Nos primeiros centímetros do meio filtrante é formada uma camada biológica, reduzindo os espaços entre os grãos, dessa forma essa primeira camada funciona também como barreira física para as impurezas (Pizzolatti, 2010).

A grande limitação da filtração lenta está na qualidade da água bruta, que deve estar entre os recomendados na Tabela 2

Tabela 2 - Valores recomendados de água bruta para uso da filtração lenta

Parâmetro	Valores máximos recomendados	
	Di Bernardo e Dantas (2005)	Cleasby (1991)
Turbidez (uT)	100% < 15 95% < 10 90% < 5	5
Cor verdadeira (uC)	100% < 10 95% < 5	-
Ferro (mg Fe/L)	100% < 1,5 95% < 1,0 90% < 0,5	0,3
Manganês (mg Mn/L)	100% < 0,7 95% < 0,5 90% < 0,2	0,05
Algas	100% < 500 (UPA/mL) 95% < 250 (UPA/mL) 90% < 100 (UPA/mL)	5µg clorofila-a/L
Coli. Totais (NMP/100mL)	100% < 1000 95% < 250 90% < 100	-
E. coli (NMP/100mL)	100% < 500 95% < 250 90% < 100	-

Fonte: Adaptado Di Bernardo e Dantas (2005)

A cor verdadeira é um parâmetro que provem da presença de sólidos dissolvidos, particularmente substâncias húmicas, que processos unicamente físicos não conseguem remover. A coagulação química é a forma eficaz de remover essas substâncias, sendo a filtração lenta ineficiente para remoção de cor verdadeira (Di Bernardo et al, 1999). No entanto se empregado técnicas de pré-tratamento com coagulação utilizando dosagens de até 90% mais baixas que as tecnologias que utilizam coagulação ou pós tratamento com carvão ativado granular, essa limitação pode ser contornada (MANZ, 2004).

O filtro lento também é muito sensível a picos de turbidez e de sólidos suspensos. Se ocorrerem valores superiores aos da tabela 2 por mais de 1 a 2 dias, implicará em carreiras de filtração mais curtas (Di Bernardo *et al*, 1999).

Com relação a filtração lenta com retrolavagem algumas vantagens estão na redução de água necessária para a limpeza e a não necessidade de unidade de recuperação de areia, uma vez que esta não é retirada do filtro para lavação. O tempo gasto com a limpeza do filtro também é reduzido e conseqüentemente o filtro permanece um menor tempo sem produzir água (Pizolatti, 2010). Além disso a maturação do filtro pode ser mais rápida.

4. METODOLOGIA

4.1 LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA PILOTO

O sistema piloto foi construído no Laboratório de Águas da Lagoa do Peri (LALP) situado na Estação de Tratamento de Água da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN), localizado ao Sul de Florianópolis (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). As análises de água necessárias para este trabalho foram realizadas no



LALP.

Figura 7 - Laboratório de Águas da Lagoa do Peri (LALP), ETA.

A água de estudo que entra no sistema provem da mistura de duas águas. Noventa por cento são de água filtrada em margem, que em virtude de conter uma quantidade elevada de ferro, passa por tratamento com aeração e em seguida por um filtro ascendente de lavagem contínua (Figura 8). Dez por cento são provenientes das águas superficiais da Lagoa do Peri. A escolha de utilizar esta mistura foi devido à elevada densidade de fitoplâncton presente nas águas do manancial, constatada em estudos anteriores. Dificuldades operacionais foram verificadas no

tratamento empregado na ETA (filtração direta) como a colmatção rápida dos filtros devido a esta característica da água (SIMONASSI, 2001; MONDARDO, 2004; CORAL, 2009; PIZZOLATTI, 2010). A pesquisa de Pizzolatti (2010), em que filtros lentos foram alimentados pela água do manancial, apresentou curtas carreiras de filtração.

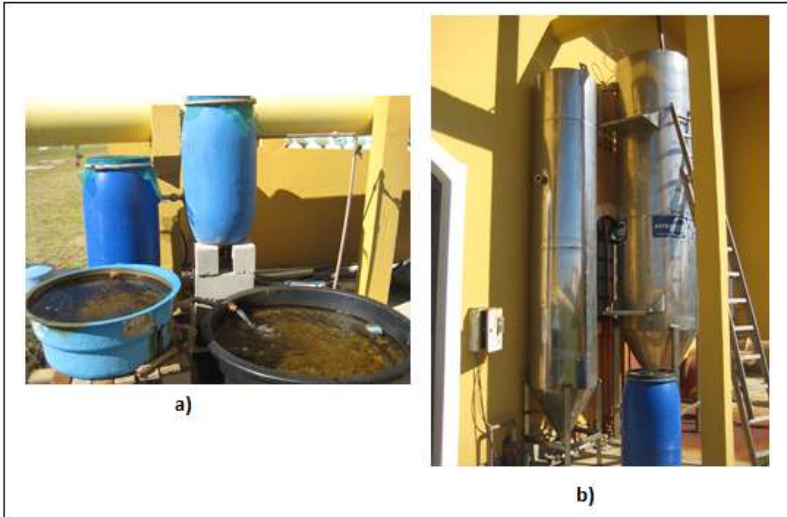


Figura 8 -Sistema preliminar, a) sistema de aeração, b) filtro de limpeza contínua

4.2 ENSAIOS PRELIMINARES

4.2.1 Análise Granulométrica

Para determinar características importantes do meio filtrante, como coeficiente de esfericidade e tamanho efetivo do grão, um ensaio granulométrica foi realizado segundo a NBR 7181/84. Como resultado foi elaborado a curva granulométrica (porcentagem passante x diâmetro do grão).

Após a amostra ser seca ao ar livre, é passada na peneira de 2 mm e pesada. O material é lavado na peneira 0,075 mm com água potável a baixa pressão. Para realizar o peneiramento fino, o material retido na peneira 0,075mm deve secar em estufa a 105° a 110° até constância de massa. Utilizando-se o agitador mecânico, o material passou nas

peneiras N° 16, 30, 40, 50, 70, 100, 200. Anotou-se então as massas acumuladas retidos em cada peneira.

Os dados obtidos estão expressos do anexo 1, a partir da qual foi elaborado a curva granulométrica (Figura 9) da areia escolhida.

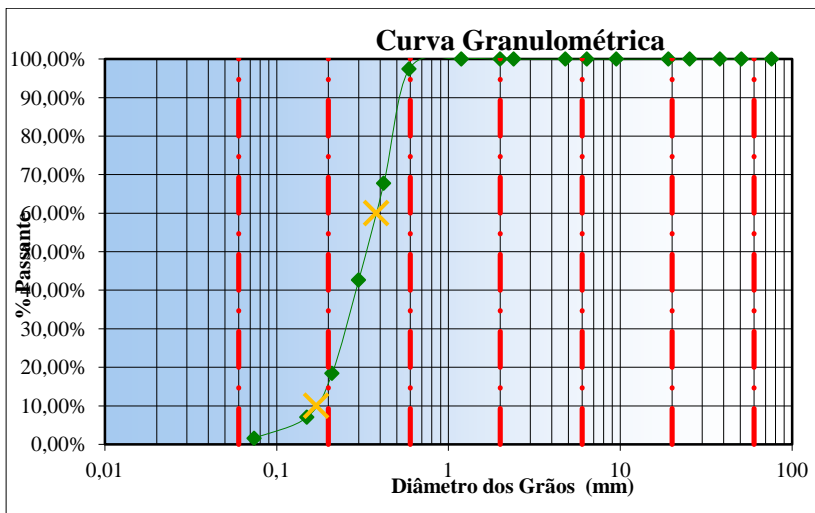


Figura 9 - Curva granulométrica

Na curva granulométrica são destacados os pontos, o tamanho efetivo do grão D10, que corresponde a 10% em peso total do material de todas as partículas menores que ele, de 0,17 mm, e o D60, que corresponde a 60% em peso total das partículas menores que ele, igual a 0,38 mm.

O Coeficiente de uniformidade, dado pela relação D_{60}/D_{10} , igual a 2,24, indica o grau de uniformidade. Quanto menor esse coeficiente mais uniforme será o material granular, o que permite que a penetração das impurezas seja mais profunda e logo a carreira de filtração mais longa (Di Bernardo, 2003).

4.2.2 Ensaio de Expansão

O ensaio de expansão é um teste que a partir da expansão e perda de carga atingida podemos verificar se o leito filtrante foi fluidificado.

Com a areia escolhida, de diâmetro efetivo 0,17mm, realizamos ensaios de expansão no filtro piloto, Figura 10, construído por

Emmendoerfer em seu trabalho de conclusão de curso, situado no Laboratório de Águas da Lagoa do Peri (LALP).

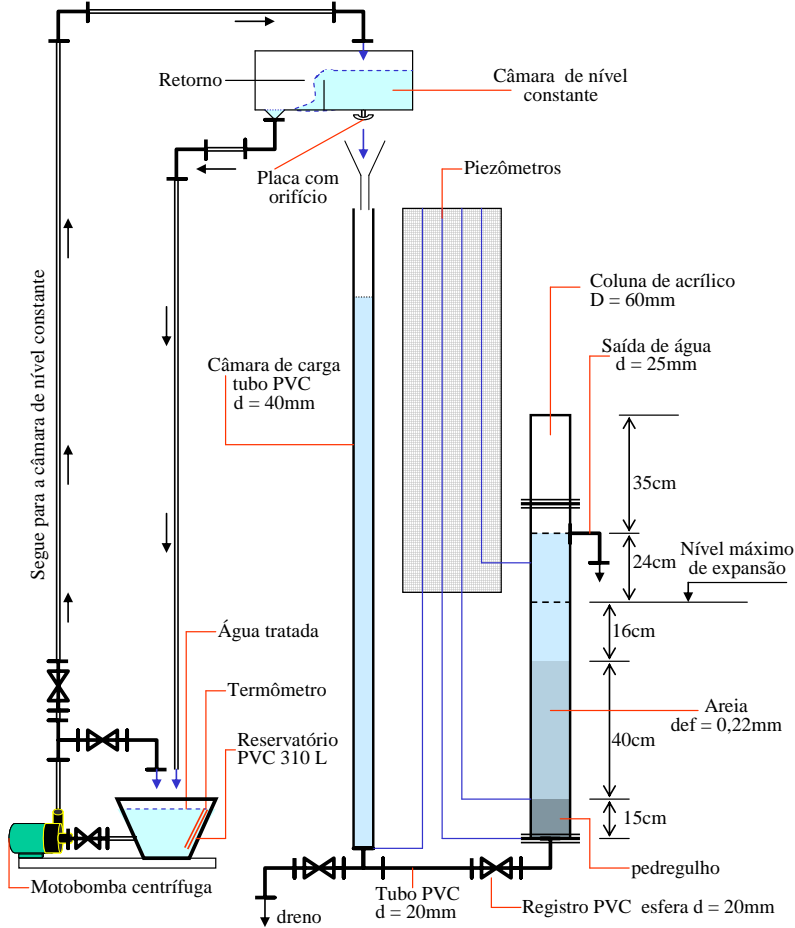


Figura 10 - Esquema sistema piloto do ensaio de expansão (Emmendoerfer, 2006)

O sistema funciona da seguinte forma, a água é bombeada de um reservatório para uma câmara de nível constante, que dessa forma mantém a vazão constante, e por gravidade passa pela câmara de carga e chega ao filtro. A câmara de nível constante em sua saída possui um encaixe para diferentes placas de orifícios, pelos quais podemos controlar e modificar a vazão. Essa vazão é aferida através da medição do volume de água com uma proveta graduada em determinado tempo.

A perda de carga é controlada por piezômetros instalados, um no início da camada suporte (P1), outro no fim da mesma (P2) e um terceiro após o nível máximo de expansão (P3). A expansão é determinada por uma marcação que o filtro de acrílico possui, variando em 5 unidades de 0 a 60%, visualizado nas fotos da Figura 11.



Figura 11 - Fotos vista parcial do sistema

O teste consistiu em variar a vazão mudando os orifícios, de 1 em 1 mm, de 1mm a 5mm. A operação foi repetida três vezes para cada placa no intuito de minimizar possíveis erros de leitura, realizando-se uma média aritmética dos valores encontrados. Assim associada a cada vazão obteve-se a velocidade ascensional, a expansão e a perda de carga. Com esses dados foram construídos os gráficos de velocidade pela perda de carga e velocidade pela expansão.

4.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA PILOTO

4.3.1 Número de filtros do sistema e taxa de retrolavagem

Para dimensionar o sistema com o menor número de filtros, a taxa de filtração utilizada foi de $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$, que está dentro da faixa de taxas de filtração de 2 a $14 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ para filtros lentos segundo

Huisman (1974). A partir da equação 1 foi verificado se o número de filtros do sistema seriam suficientes para atingir uma taxa de lavagem admissível.

(1)

Onde:

n = número de filtros

T_f = Taxa de filtração ($m^3/m^2.d$)

Tr_l = Taxa de retrolavagem ($m^3/m^2.d$)

O sistema ficou com seis filtros, gerando uma taxa de retrolavagem de 60 ($m^3/m^2.d$) equivalente a 0,042 m/min de velocidade ascensional que promove uma expansão média de 0,8%. Durante a retrolavagem de um filtro, o mesmo sai de operação, aumentando a taxa de filtração nos demais filtros. No entanto a vazão não é alterada, por tanto a velocidade média ascensional será a calculada anteriormente.

4.3.2 Vazão de entrada do sistema

A vazão de água bruta que entra no sistema foi determinada a partir da equação 2. Dessa forma a vazão para cada filtro é de 51,3 ml/min, e para o sistema de seis filtros, 308 ml/min.

(2)

Onde:

Q = Vazão de água bruta

T_f = taxa de filtração

A = área de um filtro (diâmetro 100mm)

4.3.3 Alturas úteis disponíveis

A altura da saída de água filtrada foi definida empiricamente, partindo do princípio de garantir uma diferença de alturas (Figura 12) entre esta e a saída de água de lavagem suficiente para ser possível realizar a retrolavagem. Dessa forma com apenas ações de manobras em registros a água filtrada é encaminhada para o filtro que vai ser lavado, e não para a saída de água filtrada. Isto ocorre porque a perda de carga é menor devido à diferença de alturas.

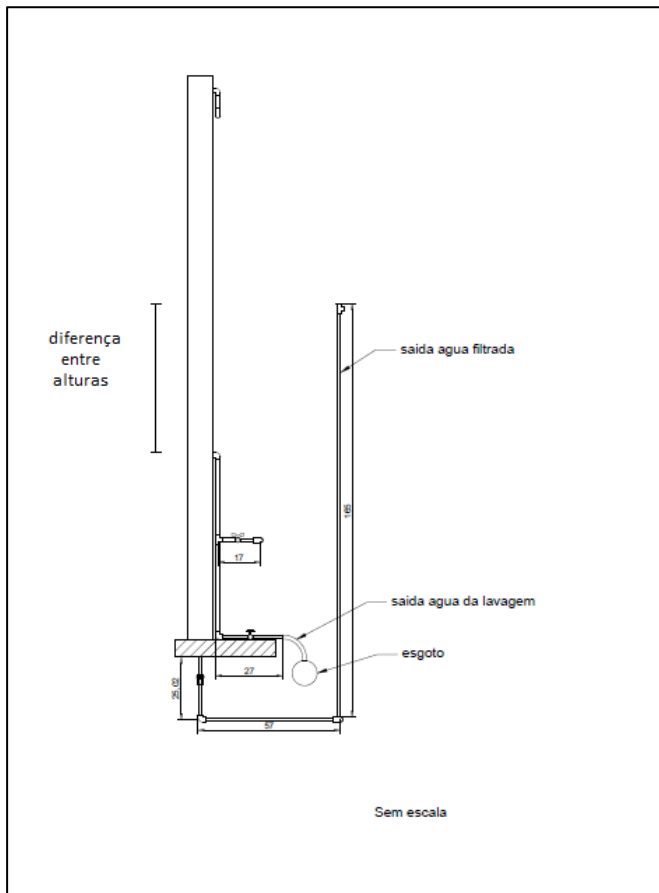


Figura 12 -- Perfil alturas úteis disponíveis

4.3.4 Descrição e operação do sistema piloto

Para a construção do sistema piloto (Figura 12) composto por seis filtros foram utilizados seis tubos de PVC de 100 mm e de diâmetro interno 0,097 m. As tubulações de conexão entre os filtros e demais funções são todas de PVC 20 mm.



Figura 13 - Sistema piloto

Os filtros são igualmente compostos por uma camada suporte com espessura total de 25 cm de seixo rolado dividido em três camadas: 7,5 cm com diâmetro 1/8" a 1/4", 7,5 cm com diâmetro de 1/4" a 1/2" e 10 cm de diâmetro de 1/2" a 3/4". A camada filtrante com espessura de 40 cm foi determinada em função dos estudos preliminares do grupo de pesquisa (Emmendoerfer,2006; Pizzolatti,2010) com filtros lentos. A justificativa está em estudos realizados por Murtha & Heller (1990) que

demonstram que a remoção de bactérias e sólidos ocorrem nos primeiros 30 cm de profundidade, havendo apenas variações inexpressivas de coliformes totais, *Escherichia coli*, turbidez e cor aparente. A areia utilizada na camada filtrante tem diâmetro efetivo de 0,17 mm e coeficiente de uniformidade de 2,24. A configuração interna do filtro pode ser visualizada na Figura 14.

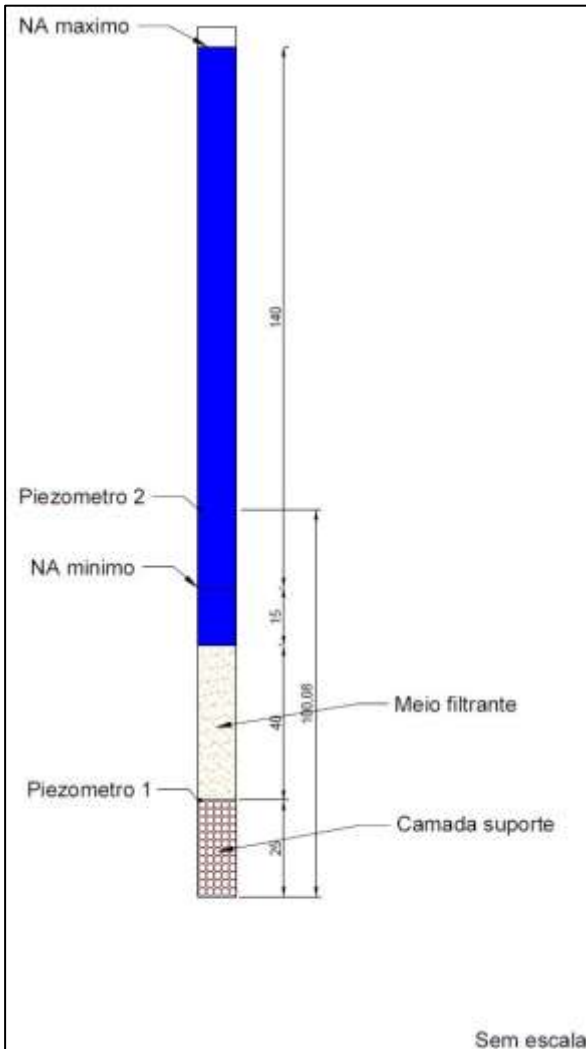


Figura 14 - Configuração interna de um filtro do sistema

O sistema funciona da seguinte forma, uma bomba dosadora (EMC modelo Pompa FCEB 0505) recalca a água e controla a vazão para os filtros. A entrada da água bruta fica no primeiro filtro e é distribuída uniformemente para todos por uma tubulação adjacente de 20 mm conectada a uma altura de 13 cm acima do meio filtrante conforme ilustra a Figura 15. Cada entrada possui um registro que pode isolar o filtro para realizar a retrolavagem.

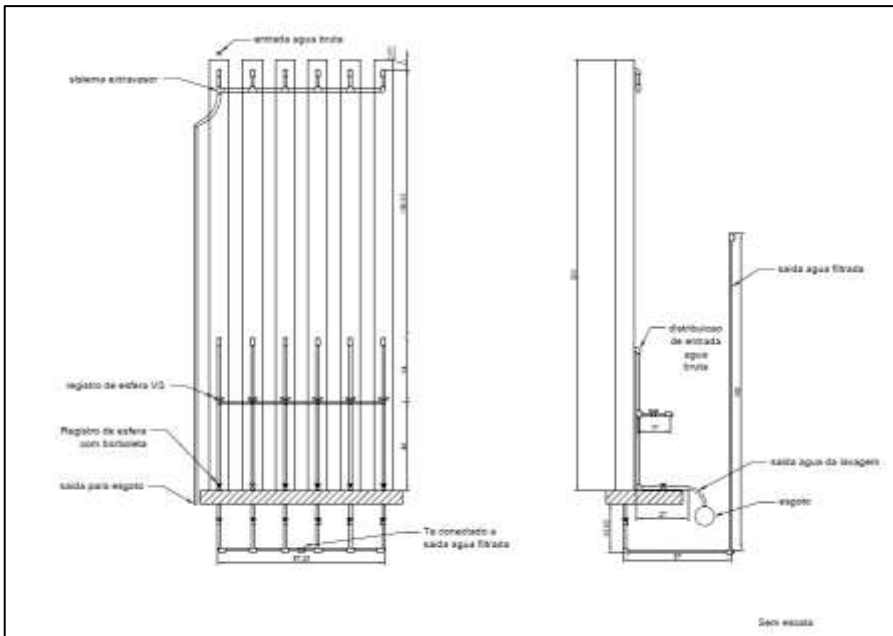


Figura 15 - Desenho de descrição do sistema piloto

Ao fechar o registro de distribuição de entrada de água bruta (visualizado no corte da Fig. 15) e abrir o registro de saída de água da lavagem do filtro a lavar, um caminho com menor perda de carga é aberto e a água de todos os outros filtros que iria para a saída de água filtrada vai para este filtro como um contra – fluxo, realizando –se assim a retrolavagem do mesmo. O tempo de lavagem foi estabelecido conforme a operação e elaboração da curva de turbidez da água da lavagem.

Os filtros estão também conectados em um sistema extravasor, para que se a carga hidráulica atingisse uma altura maior que o limite estabelecido não houvesse transbordamento de água do sistema.

A taxa de filtração é declinante, pois a entrada de água bruta é afogada, e como os filtros estão interligados permanecem no mesmo nível, dessa forma o filtro mais colmatado estará com a taxa menor e o filtro mais limpo estará operando com a maior taxa, porém a média das taxas é a taxa de filtração dimensionada.

4.4 PARÂMETROS DE CONTROLE

4.4.1 Qualidade da água

No monitoramento de qualidade de água foram analisados os parâmetros de cor e turbidez da água bruta e filtrada para avaliar o desempenho dos filtros (Figura 16). Estes parâmetros são exigidos pela Portaria 2.914 – 2011 do Ministério da Saúde como forma de controle da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Os procedimentos das análises seguiram os protocolos definidos no Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. Para a análise de cor aparente foi utilizado o aparelho espectrofotômetro da HACH DR/2010 e para a análise de turbidez o Turbidímetro HACH 2100P.



Figura 16 - Análises da água no LALP

4.4.2 Vazão

A vazão de entrada de água bruta foi aferida volumetricamente (Figura 17) todos os dias com o auxílio de uma proveta graduada e de um cronômetro. A vazão de água filtrada também foi monitorada através do mesmo método.



Figura 17 - Fotos de aferição: a) água bruta de entrada; b) água filtrada

4.4.3 Perda de Carga

Foram instalados piezômetros no início e no fim da camada filtrante para o controle da perda de carga no meio filtrante para cada filtro. Através dos piezômetros era verificada a carga hidráulica disponível para realizar a filtração.

4.4.4 Recuperação da qualidade da água

Após ser realizada a limpeza de um dos filtros a qualidade da água filtrada é prejudicada nas primeiras horas de retorno a operação, isso acontece porque durante a retrolavagem ocorre um revolvimento da camada filtrante.

Este parâmetro foi avaliado em termos de cor e turbidez por um período de 4 horas e meia em intervalos de 15 em 15 minutos, após ser lavado o filtro 1.

4.4.5 Controle da turbidez da retrolavagem

Para avaliar a limpeza dos filtros, durante a retrolavagem foram coletadas amostras de água proveniente da lavagem em intervalos de tempo para a construção de um gráfico de turbidez x tempo (Figura 18). O que ocorre é que a turbidez é elevada nos primeiros momentos e durante a lavagem essa turbidez diminui.

As primeiras lavagens tiveram duração de 15 min e as amostras foram coletadas em intervalos de 30 em 30s. Como a turbidez sofreu elevação e durante a lavagem não conseguiu retornar a turbidez inicial, o tempo de lavagem foi alterado e passou para 25 min, sendo coletadas amostras de 30 em 30s nos primeiros 5 min e em intervalos de 1 min no restante da lavagem durante 20 min.



Figura 18 - Controle de turbidez na lavagem: a) coleta de água da retrolavagem; b) análise de turbidez

4.4.6 Plano amostral

Após a montagem do sistema piloto foram realizadas amostragens diárias durante 20 dias, em que foram analisadas a água bruta e filtrada em termos de cor aparente e turbidez além da lavagem de pelo menos um filtro por dia com amostragem da água de lavagem e realização da curva de turbidez.

5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 TESTES PRELIMINARES DE EXPANSÃO

A partir do ensaio de expansão descrito na metodologia foram plotados os gráficos de velocidade pela perda de carga e velocidade pela expansão, visualizados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

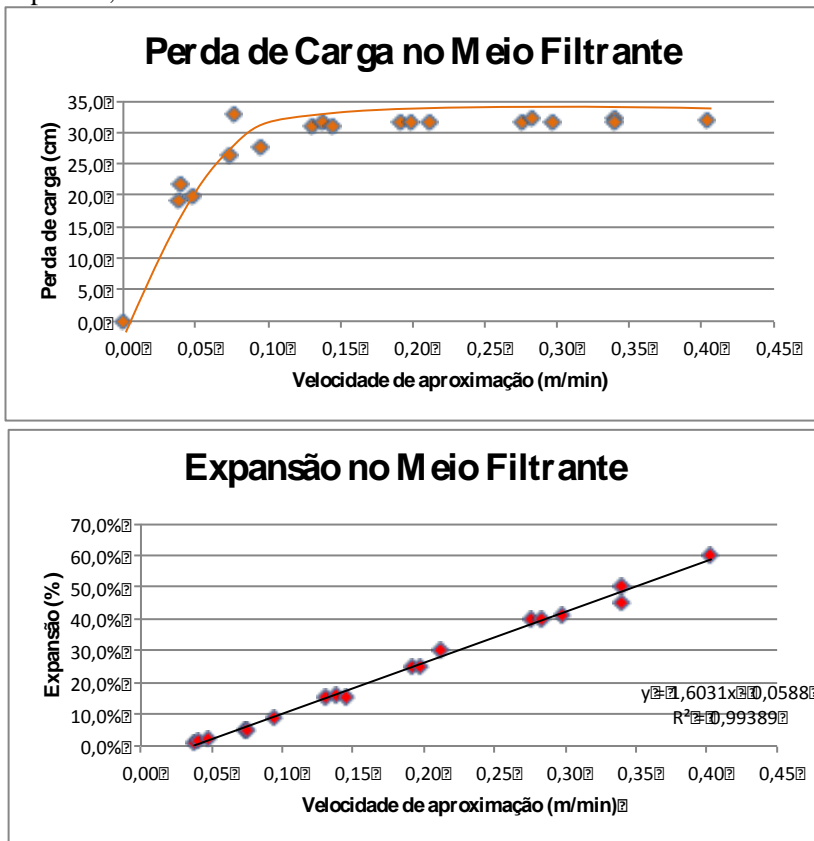


Figura 19 - Expansão (a) **Perda de Carga** (b) x velocidade de aproximação da água

Como pode ser verificado nos gráficos, a fluidificação do meio é atingida a partir da velocidade de aproximação de 0,15 m/min, pois a perda de carga se torna constante. Para esta velocidade, a expansão da

areia fica em torno de 15%, que indica que a aplicação da retrolavagem utilizando essa areia como meio filtrante pode ser promissora, pois não exige altas velocidades para sua expansão.

A taxa de lavagem de $60 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ calculada equivale a $0,042 \text{ m/min}$ de velocidade ascensional, o que provoca, segundo o gráfico de expansão, uma expansão de 0,8%. Este valor é inferior à expansão necessária para a fluidificação do meio, porém pode promover um leve deslocamento da camada superior do leito filtrante, o que é interessante pois a camada de lodo fica nos primeiros centímetros do leito filtrante. Dessa forma a lavagem pode ser eficiente sem remover totalmente o *Schumtzdecke* o que é desejável, pois diminui o tempo de recuperação da ação biológica.

5.2 RESULTADOS DO CONTROLE DA TURBIDEZ NA RETROLAVAGEM

Durante a lavagem de cada filtro foi realizada a amostragem da água da lavagem conforme descrito na metodologia sessão 4.4.5 para verificar a eficiência e o tempo de lavagem.

A cada dia um filtro era lavado seguindo a sequência do 1° ao 6°, para que todos tivessem em média 6 dias de carreira de filtração.

Como foi comentado na metodologia sessão 4.4.5, inicialmente o tempo de lavagem determinado foi de 15 minutos, sendo recolhidas amostras para análise de turbidez de 30 em 30 segundos. Ao analisar o gráfico da Figura 20 verifica-se que 15 minutos não seriam suficientes para uma lavagem eficiente, pois a turbidez continua elevada ao final da lavagem.

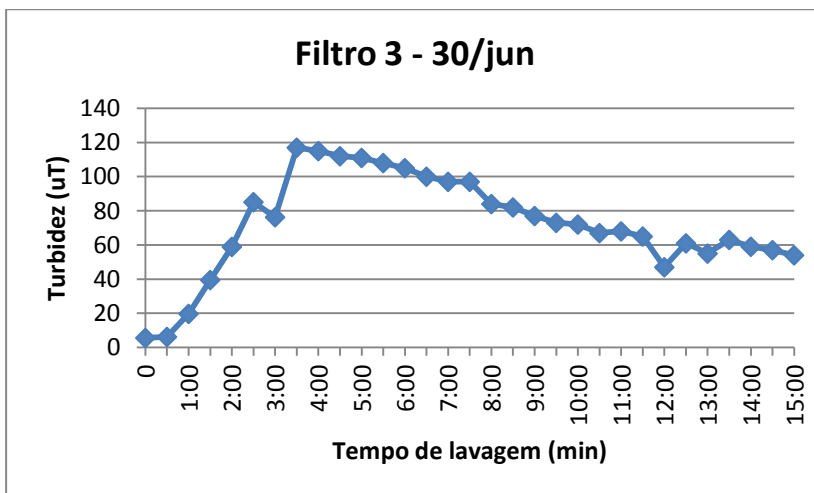


Figura 20 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 3

Por tanto, optou-se por aumentar o tempo de lavagem para 25 minutos a partir da segunda carreira de filtração para todos os filtros, visto que apresentam comportamento semelhante. O gráfico da Figura 21 demonstra que com o tempo de 25 minutos de lavagem, a mesma é suficiente, pois a turbidez ao final da lavagem atinge o valor de 12 uT. O intervalo de amostragem foi modificado, sendo os primeiros 4 min e 30s, mantidos de meio minuto, para evidenciar a evolução inicial da lavagem, e nos demais 20 min e 30s, em intervalos de 1 minuto.

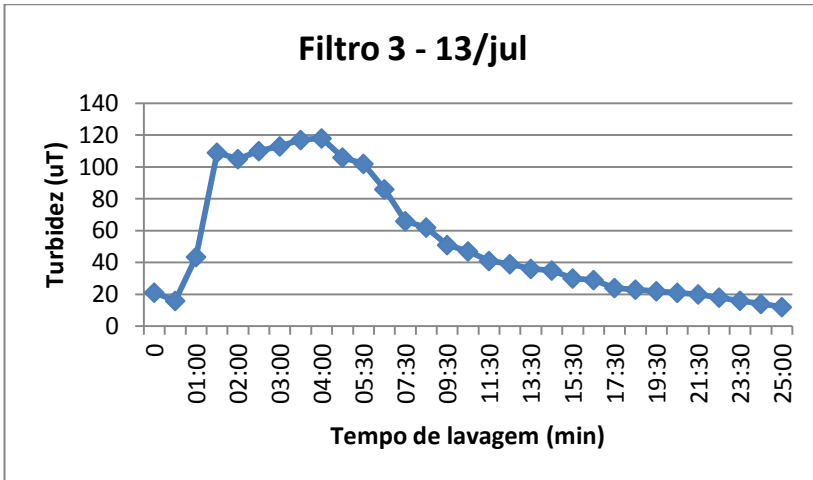


Figura 21 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 3 por 25 min

Os demais filtros em sua maioria tiveram comportamento semelhante, dessa forma seus gráficos de turbidez x tempo estão demonstrado em sequência.

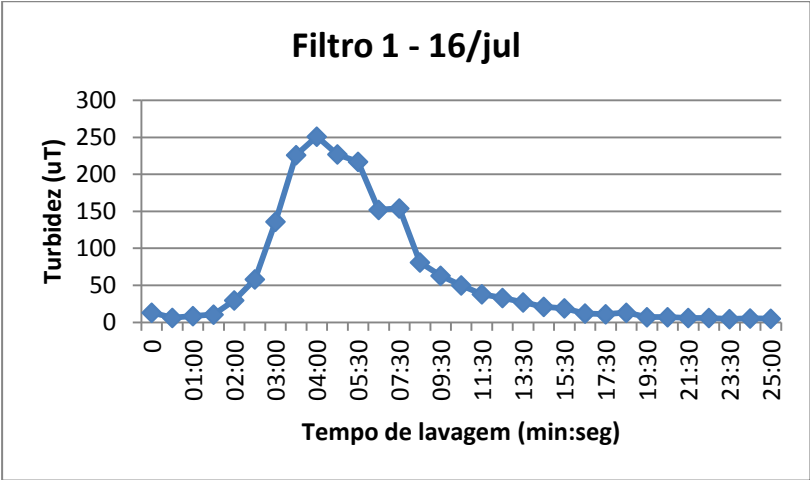


Figura 22 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 1

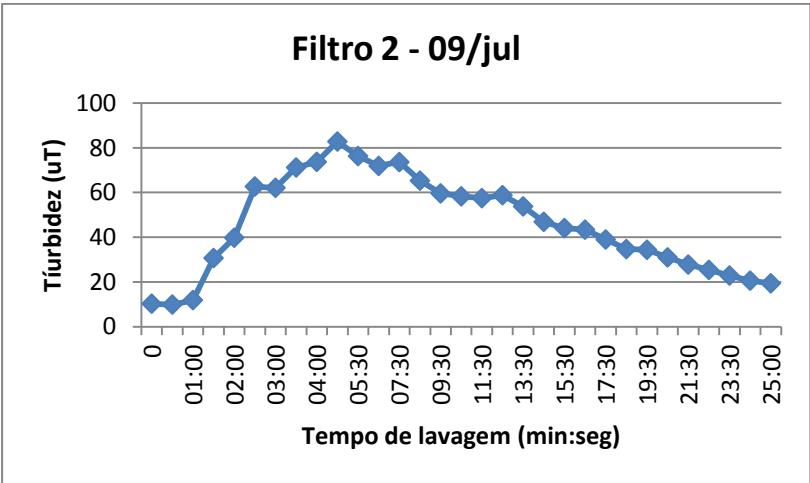


Figura 23 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 2

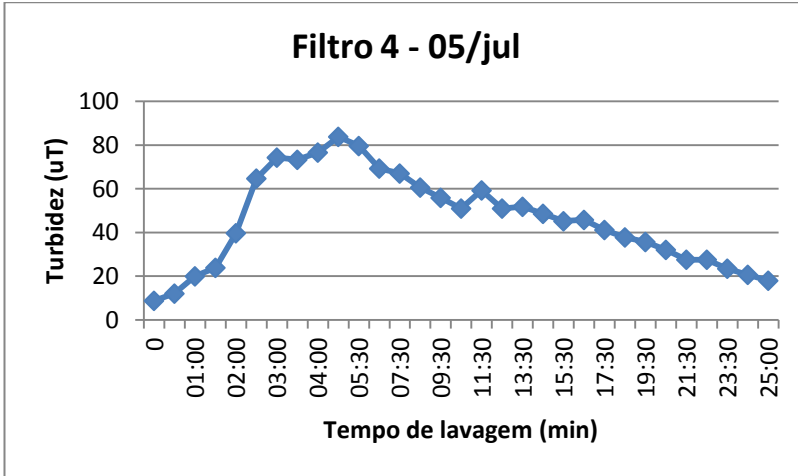


Figura 24 -Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 4

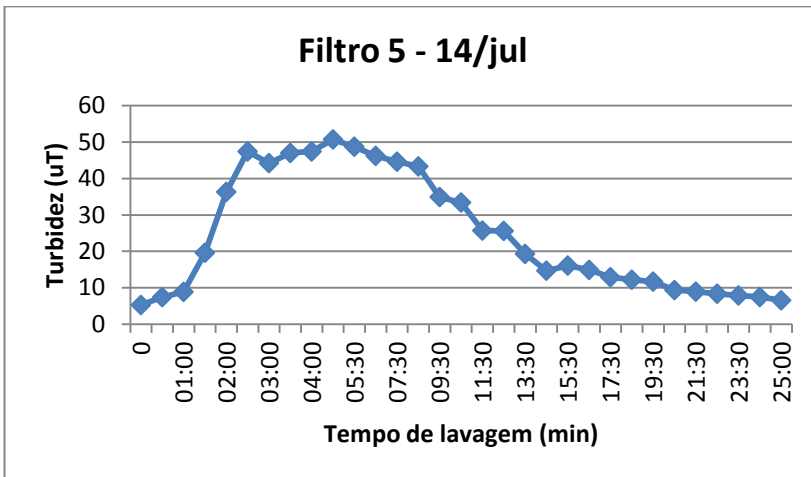


Figura 25 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 5

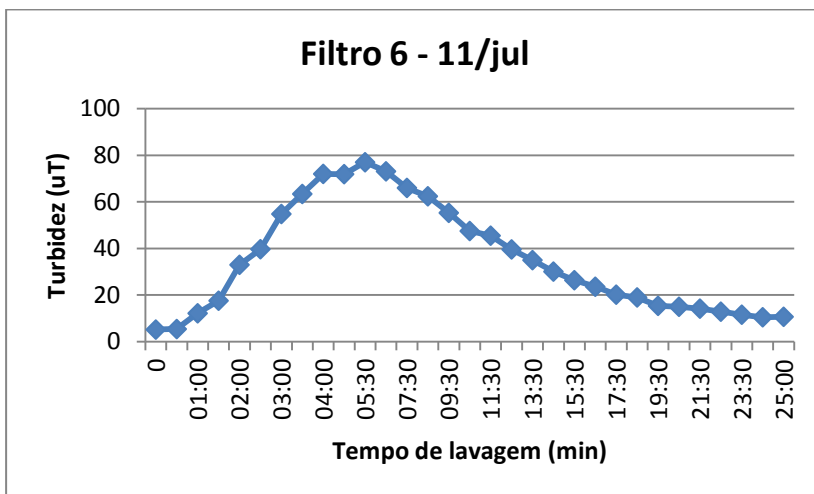


Figura 26 - Gráfico Turbidez x Tempo durante a lavagem do filtro 6

Todos os filtros demonstraram eficiência na limpeza, quando modificado o tempo de lavagem para 25 minutos, pois ao final da lavagem a turbidez retomou o valor inicial. Os filtros 2 (fig.23), 4 (fig. 24) e 6 (fig.26) tiveram comportamento similar em suas lavagens pois atingiram picos de turbidez em torno de 80 uC. Apenas o filtro 1 (fig. 22) recuperou a turbidez em 16 minutos, podendo assim ser reduzido seu tempo de lavagem. Os demais gráficos realizados de turbidez x tempo de todos os filtros estão explicitados no anexo 2.

A partir da taxa de lavagem calculada e de posse do gráfico de expansão x velocidade ascensional (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), obteve-se a expansão teórica esperada de 0,8%. No entanto no momento da lavagem, além da vazão proveniente da taxa de filtração dos demais filtros, havia a carga hidráulica disponível. Dessa forma ao medir a vazão de lavagem obteve-se expansões maiores que a teórica, o que pode ser verificado na Tabela 3.

Tabela 3 - Velocidades de lavagem e expansão correspondentes

Filtro	Vel. asc. (m/min)	Expansão (%)
1	0,06	3,73
2	0,05	2,13
3	0,04	0,53
4	0,05	2,13
5	0,05	2,13
6	0,05	2,13

5.3 QUALIDADE DA ÁGUA APÓS A LIMPEZA

Normalmente após a limpeza dos filtros lentos, nas primeiras horas de filtração a qualidade da água é prejudicada. Durante o monitoramento da qualidade da água, este fato foi constatado, ao se analisar a água filtrada antes e após cada lavagem. Para determinar o tempo de recuperação da qualidade da água, foram monitoradas a cor e a turbidez da água filtrada logo após a lavagem do filtro 1 na 6ª carreira de filtração. As Figura 27 e Figura 28 apresentam a recuperação da qualidade da água após a limpeza.

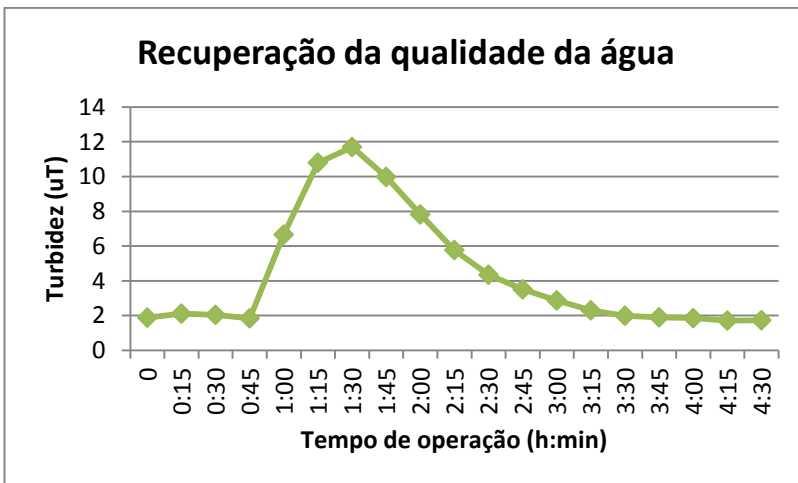


Figura 27 - Recuperação da qualidade da água (turbidez)

Observa-se que na figura 27 a turbidez ultrapassa os 2,0 uT por 2 horas e 45 minutos, valor máximo permitido para água de filtração lenta pela Portaria 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde em 5% das amostras. A turbidez por tanto, atinge um pico e recupera o valor menor que 2,0 uT após 3 horas e 30 minutos de operação. Isto ocorre porque na retrolavagem a camada filtrante sofre um revolvimento, permanecendo um percentual de sólidos suspensos na água por um certo tempo após a lavagem.

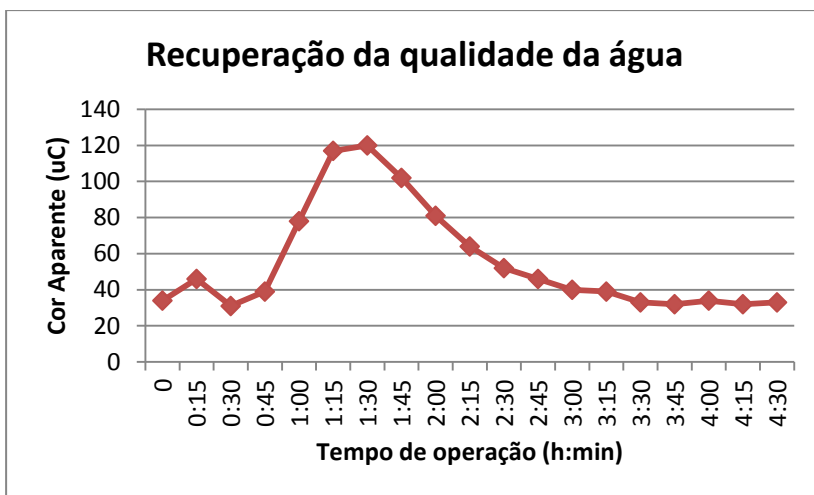


Figura 28 - Recuperação da qualidade da água (cor aparente)

O parâmetro de cor aparente demonstra o mesmo comportamento observado na curva de turbidez ocorrendo um pico e a recuperação da qualidade após 3 horas e 15 minutos. Porém a cor não apresentou valor inferior a 31 uC, portanto acima do que a Portaria 2.914 de 2011 determina como valor máximo permitido de 15 uC .

5.4 QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água foi avaliada diariamente por um período de 20 dias, em termos de cor aparente e turbidez no intuito de examinar o desempenho dos filtros. A tabela 4 apresenta os resultados obtidos no período de monitoramento.

Tabela 4 - Resultado do monitoramento dos filtros

Parâmetro	Água Bruta	Água Filtrada	Padrão de Potabilidade (Portaria 2.914/2011)
Turbidez (uT)	7,01a ± 2,28b (4,60 – 10,4)c	2,24 ± 0,72 (1,03 – 3,66)	5,0 (rede) 1,0 (saída do tratamento)
Cor Aparente (uC)	84,76 ± 19,56 (64 – 115)	36,41 ± 9,13 (22 – 56)	15 (após desinfecção)

a média; b desvio padrão; c intervalo de dados

A cor aparente apresentou resultados acima do valor máximo de 15 uC (Figura 29) permitido pelo padrão de potabilidade, porém teve percentagem de remoção 57%, o que está dentro do esperado de 50 a 60% para filtros lentos de acordo com Azevedo Neto (1979).

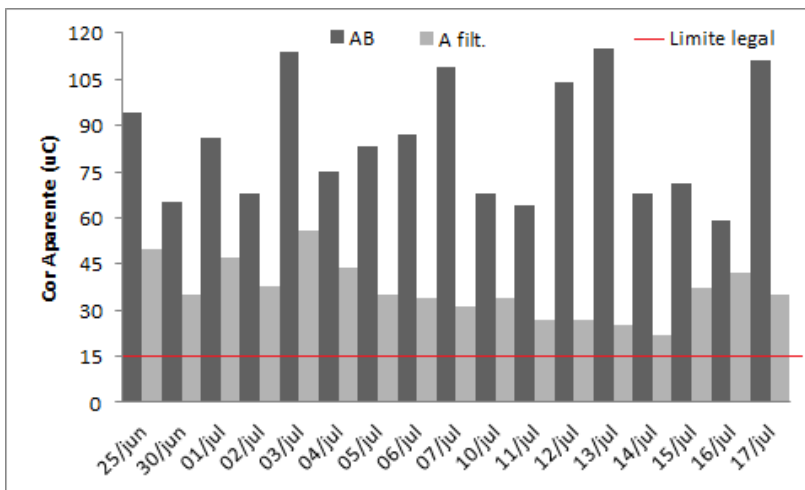


Figura 29 - Médias das medidas de cor aparente

Quanto ao padrão de turbidez o percentual de remoção foi de 68%, porém ainda não foi suficiente para atingir o que preconiza a portaria 2.914 de 2011 para filtração lenta de 1,0 uT como valor máximo permitido. Os resultados estão expressos na Figura 30.

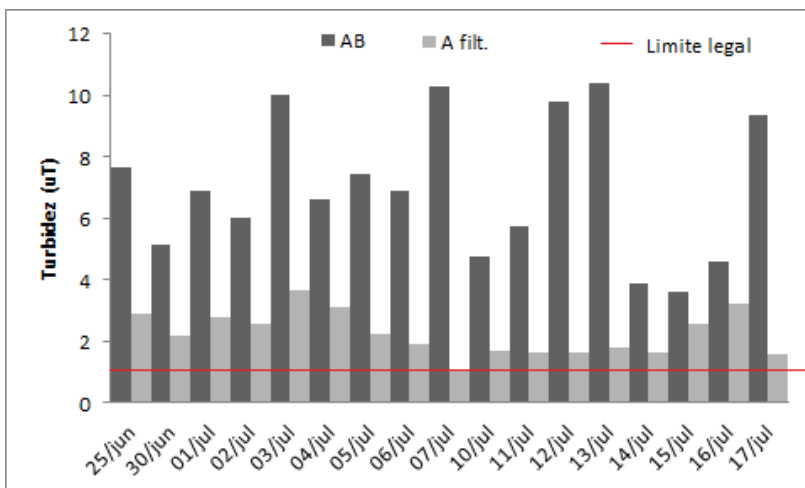


Figura 30 - Médias das medidas de turbidez

5.4.1 Análise estatística da qualidade da água

Para verificar as tendências e padrões dos resultados obtidos foram construídos os Boxplot (diagrama de caixas) com o auxílio do software Mini – tab (Figura 31e Figura 32), A Figura 31 apresenta a comparação da cor aparente entre o boxplot da água bruta e o boxplot da água filtrada.

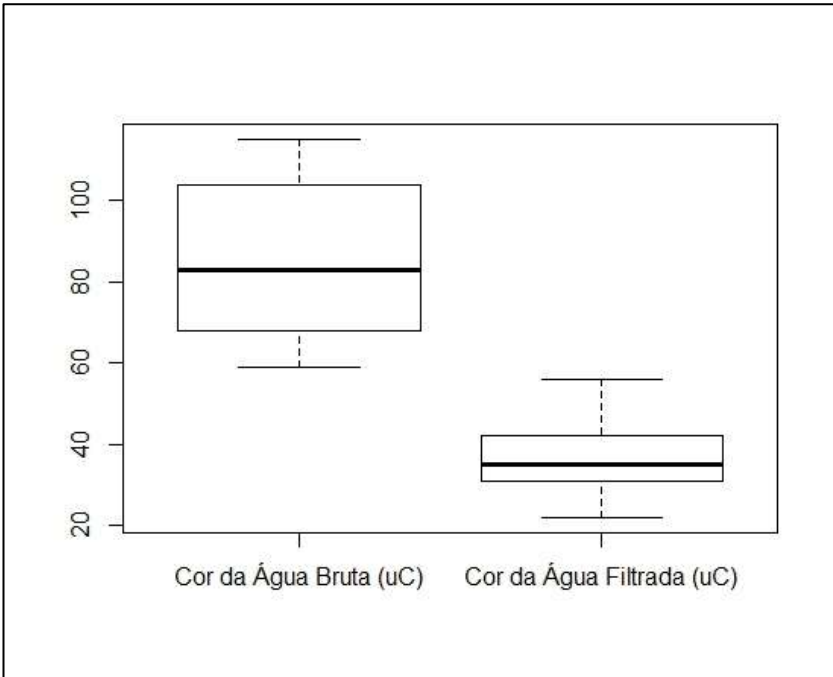


Figura 31 -Boxplot cor da água bruta e água filtrada

O primeiro quartil que representa 25% do total dos resultados para água bruta está em 65 uC e para a água filtrada em 30 uC. A mediana da água bruta ficou em torno de 80 uC o que é um valor alto para o requerido para o tratamento por filtração lenta, já a mediana da água filtrada ficou mais deslocada próxima ao quartil inferior, em torno de 30, o que é desejável do ponto de vista que apresenta valores mais reduzidos. O desvio quartílico, que é a distância entre o quartil inferior e o quartil superior do box da água filtrada, foi reduzido o que representa pouca variabilidade dos dados.

Na Figura 32, são apresentados os boxplot da turbidez de água bruta e filtrada.

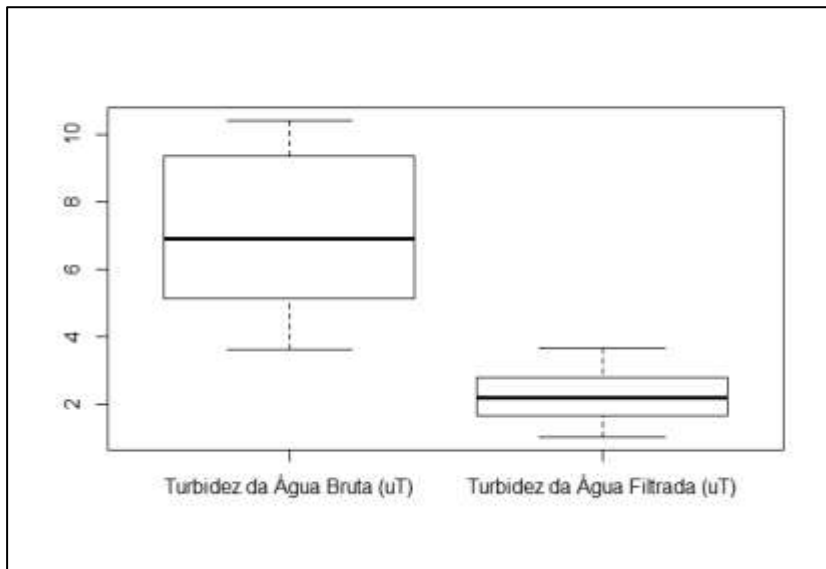


Figura 32 - Boxplot turbidez da água bruta e água filtrada

A turbidez da água bruta apresentou uma maior variabilidade de resultados demonstrada pela grande desvio quartílico, já a turbidez da água filtrada apresentou melhor desempenho visto que seu desvio quartílico foi bem menor. A mediana da água bruta está em torno de 7 uT o que está próximo do desejável recomendado por Cleasby (1991) de 5 uT. Na água filtrada a mediana está próxima de 2 uT, acima do valor máximo permitido pela portaria 2.914 de 2011(1uT).

5.5 PERDA DE CARGA E CARREIRAS DE FILTRAÇÃO

O sistema foi projetado para funcionar com vazão declinante e como todos os filtros estão interligados os níveis variavam em conjunto conforme a colmatação do leito filtrante. Foi constatado variações nas perdas de carga de alguns filtros. Devido a instalação dos piezômetros utilizarem bidim (manta geotêxtil) na conexão com os filtros, e por a areia do meio filtrante ter uma granulometria pequena, alguns piezômetros foram colmatados. Portanto a perda de carga foi medida com base no piezômetro que não sofreu colmatação de um dos filtros.

No mínimo um filtro era lavado por dia, pois a carga atingia valor suficiente (mínimo 60 cm) para realização de uma lavagem. Dessa forma a carreira de filtração ficou em torno de 6 dias para cada filtro.

Essa curta duração dos ensaios não é apropriada para esse tipo de tecnologia, que é caracterizada por longas carreiras de filtração, porém permitiu maior número de dados e conseqüentemente uma melhor avaliação da lavagem, principal objetivo do trabalho.

A Figura 33 apresenta o desenvolvimento da perda de carga durante todo o período de amostragem.

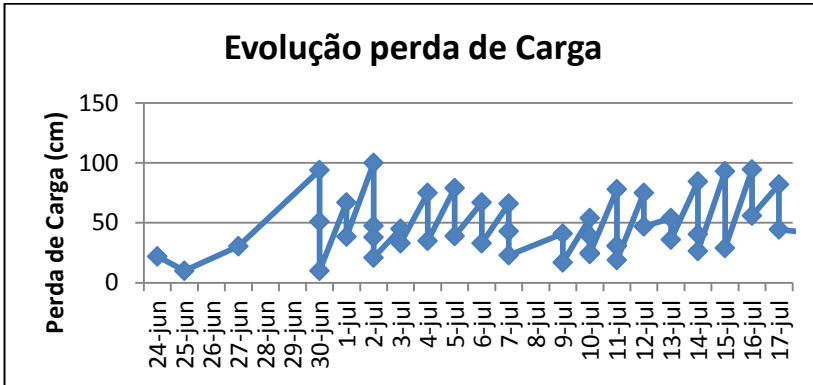


Figura 33 -Evolução da perda de carga

Como a perda de carga era verificada antes e depois de cada lavagem, há dias no gráfico que apresentam maior número de pontos, evidenciando que mais de um filtro foi lavado naquele dia. O dia 30 de julho por exemplo, foram lavados 2 filtros, pois a carga hidráulica disponível permaneceu alta após a 1^o lavagem.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao final deste trabalho foi concluído que:

- A água bruta apesar de ser proveniente da mistura com água previamente tratada ainda não estava de acordo com o ideal para utilização da filtração lenta acarretando curtas carreiras de filtração;

- Quanto a qualidade da água filtrada os filtros demonstraram percentuais de remoção expressivos, porém não alcançaram valores dentro de padrão de potabilidade;

- A limpeza foi satisfatória quando se utilizou tempo de lavagem de 25 minutos;

- Mesmo não atingindo a fluidificação do meio filtrante, a expansão média de 2,13% foi suficiente para proporcionar a limpeza dos filtros;

- A retrolavagem revelou-se um sistema de lavagem de fácil operação aplicável a filtração lenta.

- O sistema de filtros lentos sem reservatório elevado é mais flexível quanto a mudanças na qualidade da água bruta causadas pela sazonalidade, já que não tem limite quanto ao tempo de lavagem pois a água de lavagem é proveniente dos demais filtros e não de um volume predeterminado.

Recomendações para futuras pesquisas:

- Fazer novos testes com taxas de filtração diferentes;

- Aumentar o número de filtros para que dessa forma seja possível aumentar a taxa de lavagem e conseqüentemente a expansão da areia e possibilitar a redução da taxa de filtração;

- Fazer um estudo mais prolongado para observar o desenvolvimento da camada biológica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**:Solo – Análise Granulométrica 1984.

AGUILA, N. K. S.; Di BERNARDO, L. – **Organismos Responsáveis pelo Amadurecimento do Filtro Lento de Areia Precedida da Pré-Oxidação com Ozônio ou Peróxido de Hidrogênio**.2003, S.Carlos(SP). Anais do 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária. Joinville(SC): ABES, 2003. p. 300-301

AMIRTHARAJAH, A. Some theoretical and conceptual views of filtration. **Journal of the American Water Works Association**, v. 80, n.12, p. 36-46, 1988.

AZEVEDO NETTO, J. M. A. - **Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água – Volume 2**. 2ª edição - S. Paulo; CETESB, 1979

BELLAMY, W. B.; HENDRICKS, D. W.; LOGSDON, G. S. Slow sand filtration: influences of selected process variables. **Journal Of The American Water Works Association**, Nova Iorque, p. 62-66. 1 dez. 1985

BRASIL (2011). **Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde**. Estabelece procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e das outras providências. 2011.

CLEASBY, J.L., **Source water quality and pretreatment options for slow sand filters, in Slow Sand Filtration**. American Society of Civil Engineers, p 69-100 New York. 1991

CORAL, L. A. **Remoção de cianobactérias e cianotoxinas em águas de abastecimento pela associação de flotação por ar dissolvido e nanofiltração**. 198 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Florianópolis – SC – Março, 2009.

COSTA, R. H. R. **Estudos comparativos da eficiência de filtros lentos de areia convencionais e de fluxo ascendente.** 1980. 1 v. Dissertação (Mestre) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1980.

Di BERNARDO, L.– **Métodos e técnicas de Tratamento de Água,** vol.II. Rio de Janeiro.ABES, 1993.

Di BERNARDO, L.; RIVERA, E. – **Influence of sand uniformity coefficient on slow sand filtration.** In: Advances in slow sand and alternative biological filtration pp. 179 – 178, John Wiley & Sons Ltd, England, 1996.

DI BERNARDO, L; BRANDÃO, C. C. S.; HELLER, L. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (Brasil). Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas. Rio de Janeiro: ABES, 1999. 114p.

Di BERNARDO, L. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (Brasil). **Tratamento de águas de abastecimento por filtração direta.** Rio de Janeiro, ABES,2003. 498 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** 2. ed. São Carlos: Rima, 2005. 1565 p. 2 v.

EMMENDOERFER, M. L. – **Filtração Lenta com retrolavagem para propriedades rurais de uso familiar.** TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis,2006.

FARIAS, N.J.V. **Desempenho de filtros lentos, com diferentes períodos de amadurecimento, precedidos de pré- filtração em pedregulho no tratamento de águas contendo células tóxicas de *Microcystis aeruginosa*.** 2011, Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação TTARH.DM 137/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UnB, Brasília, DF, 123p.

HESPANHOL, I. **Investigação sobre o Comportamento e Aplicabilidade de Filtros Lentos do Brasil.** São Paulo, 1969, 163p. Tese (Doutorado em Hig. Saúde Pública), Faculdade de Higiene e Saúde Pública - USP.

HUISMAN, L. **Slow sand filtration.** Belgica: World Health Organization, 1974. 120 p.

LOGSDON G. S. et al. – **Slow sand filtration for small water systems** Journal of Environmental Engineering and Science, Volume 1, Number 5, September 2002, pp. 339-348(10). NRC Research Press, Canada, 2002.

MALDONADO, V.; VARGAS, L. C.; BARRENECHEA, A. - **Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida- Manual I - Teoría tomo II.** Capítulo 9: Filtración. pp. 83-152. CEPIS. Lima, 2004.

MANZ, D. H. New Horizons for Slow Sand Filtration. In: **Proceedings of Eleventh Canadian National Conference And Second Policy Forum On Drinking Water And The Biennial Conference Of The Federal-Provincial-Territorial Committee On Drinking Water**, 11., 2004 Canada: Public Health Through Safe Drinking Water, 2004. p. 682 - 692.

MARNOTO, M. J. E. **Expansão da areia durante a retrolavagem dos filtros lentos – influência sobre a qualidade da água para abastecimento e a duração das carreiras.** 2008. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MBWETTE, T.S.A. & GRAHAM, N.J.D. **Improving the Efficiency of Slow Sand Filtration with Non-Woven Synthetic Fabrics.** In: Filtration and Separation, vol. 24. London, 1987. p.46-50.

MEDINA, L. R. **Uso de filtros lentos para el tratamiento de agua a nivel domiciliario.** Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Nova York, p. 44-49. out. 2000.

MICHIELIN, A. K. **Filtro Lento com Retrolavagem.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MICHELAN, D.C.G.S. **Filtração em margem de rio precedendo a filtração lenta, para remoção de carbofurano, em tratamento de água para consumo humano.** Tese (Doutorado) Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Florianópolis – SC, 2010. 342p.

MONDARDO, R. I. **Influência da pré-oxidação na tratabilidade das águas via filtração direta descendente em manancial com elevadas concentrações de microalgas e cianobactérias.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, SC, 2004.

MURTHA, N.A.; HELLER L.; MARCELO, L. – **A Filtração Lenta em areia como alternativa tecnológica para o tratamento de águas de abastecimento no Brasil.** 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. II – 085, pp. 1542 – 1556. ABES, 1999a.

MURTHA, N.A; HELLER L. – **Avaliação da Eficiência da Filtração Lenta em Areia Segundo a Profundidade do Leito Filtrante.** 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. II – 043, pp. 1280 – 1289. ABES, 1999b.

MURTHA, N.A; HELLER L. – **Avaliação da Influência de Parâmetros de Projeto e das Características da Água Bruta no Comportamento de Filtros Lentos de Areia.** Engenharia Sanitária e Ambiental. Brasil, Vol. 8 – Nº 4. pp. 257 – 267, Out/Dez 2003.

NEVES, I. F. Estudo da eficiência de remoção de microrganismos na filtração lenta de águas de abastecimento. São Carlos. 140p. Dissertação

(Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1987.

PÁDUA, V. L.; et al. **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano.** Belo Horizonte: Abes, 2006

PATERNIANI, José E. S.; DA CONCEIÇÃO, Celso H. Z. Eficiência da Pré-Filtração e Filtração Lenta no Tratamento de Água para Pequenas Comunidades - Eng. Ambiental, Espírito Santo do Pinhal, v.1, n.1, p. 017-024, jan./dez., 2004.

PATERNIANI, J. E. S.; ROSTON. D. M. **Tecnologias para Tratamento e Reuso da Água no Meio Rural.** In: HAMADA, E. (Ed.) *Água, agricultura e meio ambiente no Estado de São Paulo: avanços e desafios.* Jaguariúna: Embrapa, 2003

PORTO, Rodrigo de Melo (1998) – Hidráulica Básica. EESC-USP, São Carlos, SP.

PIZZOLATTI, B. S. **Estudos de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem.** Dissertação (Mestrado)) - Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, SC, 2010.

RICHTER, C. A; AZEVEDO NETTO, J.M. **Tratamento de Água – Tecnologia Atualizada;** 5ª re-impressão, Edgard Blucher, São Paulo, 2003

RIWRB – Rhode Island Water Resources Board. **A brief history of drinking water.** Disponível em http://www.wrb.ri.gov/program_eohistory.html>. Acessado em 10/04/2012.

SÁ, J. C. **Influência das características da camada filtrante e da taxa de filtração na eficiência de remoção de *Microcystis aeruginosa* e**

microcistina na filtração lenta em areia. 2006. 190 f. Tese (Doutor) - Universidade De Brasília, Brasília, 2006.

SÁNCHEZ, L. D.; et al. **Multi-Stage Filtration:** Thematic Overview Paper 15. Cali: Irc International Water And Sanitation Centre, 2006. 64 p.

SIMONASSI, J. C. **Caracterização da Lagoa do Peri, através da análise de parâmetros físico-químicos e biológicos, como subsídio ao gerenciamento dos recursos hídricos da ilha de Santa Catarina, SC, Brasil.** 2001. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

STARCIARINI, R. **Análise do comportamento experimental de um sistema de filtração lenta com mantas sintéticas não tecidas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, Campinas, SP, 1998.

Standard Methods for the Examination Water and Wastewater (SMWW) – 20th Edition, 1999.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **The history of drinking water treatment** - EPA 816-F-00-006, Office of Water Washington, D.C., 2000.

VAN DIJK, J.C.; OOMEN, J.H.C.M. – **Filtración Lenta en Arena para Abastecimiento Público de Água en Países en Desarrollo.** Documento Técnico nº 11. WHO – International Reference Centre for Community Water Supply. CEPIS. Haya, 1978.

VARESCHE, M. B. (1989). Estudo sobre a interferência de algas no sistema de filtração lenta em areia. São Carlos. 417p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

ANEXO 1 - Tabela de dados obtidos no ensaio granulométrico

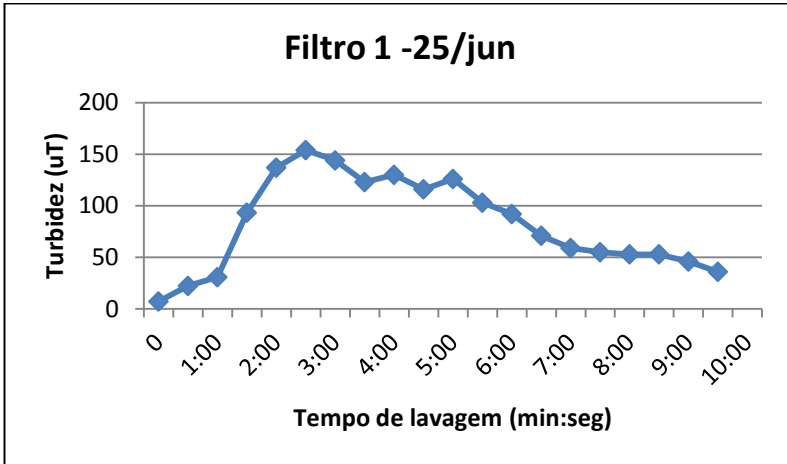
Tabela de dados obtidos no ensaio granulométrico.

Dados de Ensaio											
PENEIRAMENTO	FRAÇÃO	Peneira		Peso da Peneira (g)	Peneira + Material (g)	Material Retido (g)	PORCENTAGEM			PASSANTE	
		Nº	# (mm)				Fração Fina	Fração Grossa	Acumulada	Fração Fina	Fração Grossa
			GROSSA								
		3"	76,2			0,00		0,00%	0,00%		100,00%
		2"	50,8			0,00		0,00%	0,00%		100,00%
		1,5	38,1			0,00		0,00%	0,00%		100,00%
		1"	25,4			0,00		0,00%	0,00%		100,00%
		3/4"	19,1			0,00		0,00%	0,00%		100,00%
		3/8"	9,5			0,00		0,00%	0,00%		100,00%
		1/4"	6,4			0,00		0,00%	0,00%		100,00%
		4	4,8			0,00		0,00%	0,00%		100,00%
		8	2,4			0,00		0,00%	0,00%		100,00%
		10	2			0,00		0,00%	0,00%		100,00%
	FINA	16	1,19	385,66	385,66	0,00	0,00%		0,00%	100,00%	100,00%
		30	0,59	349,28	366,33	17,05	2,58%		2,58%	97,42%	97,42%
		40	0,42	281,41	477,17	195,76	29,68%		32,26%	67,74%	67,74%
		50	0,3	360,71	526,29	165,58	25,10%		57,36%	42,64%	42,64%
		70	0,21	347,75	507,58	159,83	24,23%		81,59%	18,41%	18,41%
		100	0,15	330,00	405,08	75,08	11,38%		92,97%	7,03%	7,03%
		200	0,074	320,53	356,72	36,19	5,49%		98,46%	1,54%	1,54%
	Fundo			317,72	328,42	10,70	1,62%		100,08%	-0,08%	-0,08%

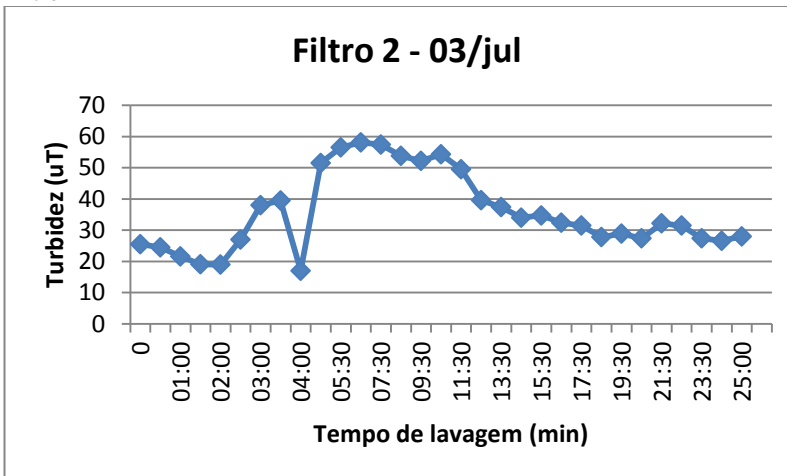
Frações de areia retidas nas peneira

ANEXO 2 - Curvas de turbidez x tempo da retrolavagem.

Filtro 1



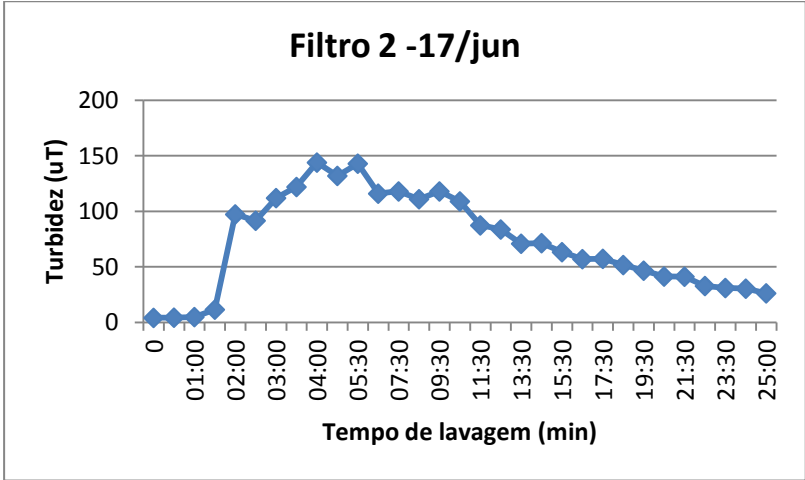
Filtro 2



$Q_{\text{entrada}} = 400 \text{ ml/min}$

$Q_{\text{agua filtrada}} = 200 \text{ ml/min}$

$Q_{\text{retrolavagem}} = 420 \text{ ml/min}$

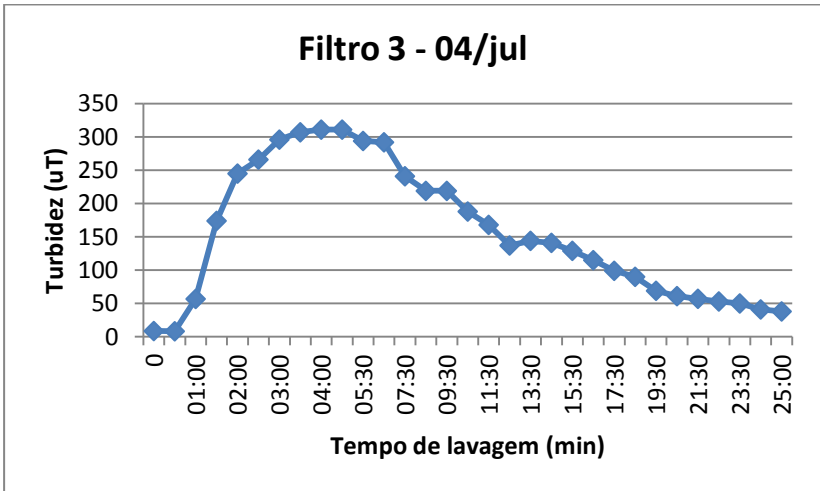


Q entrada = 300 ml/min

Q agua filtrada = 220ml/min

Qretrolavagem = 490 ml/min

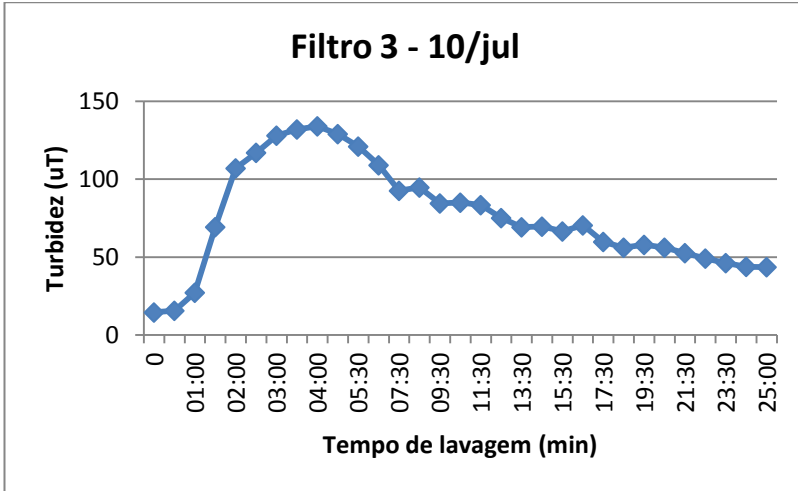
Filtro 3



Q entrada = 410 ml/min

Q agua filtrada = 420ml/min

Qretrolavagem = 410 ml/min

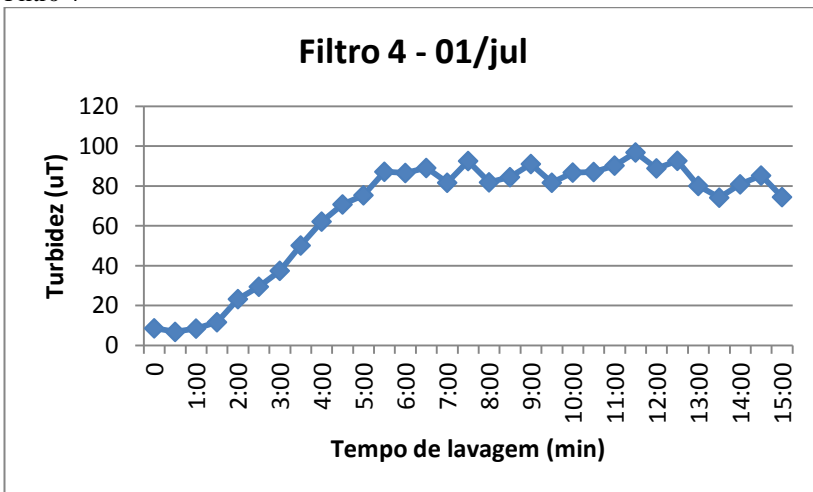


Q entrada = 320 ml/min

Q agua filtrada = 310ml/min

Qretrolavagem = 450 ml/min

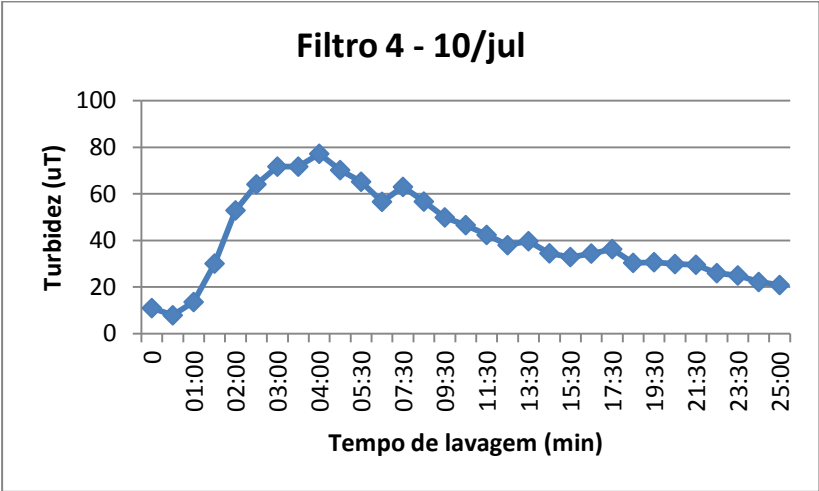
Filtro 4



Q entrada = 390 ml/min

Q agua filtrada = 200 ml/min

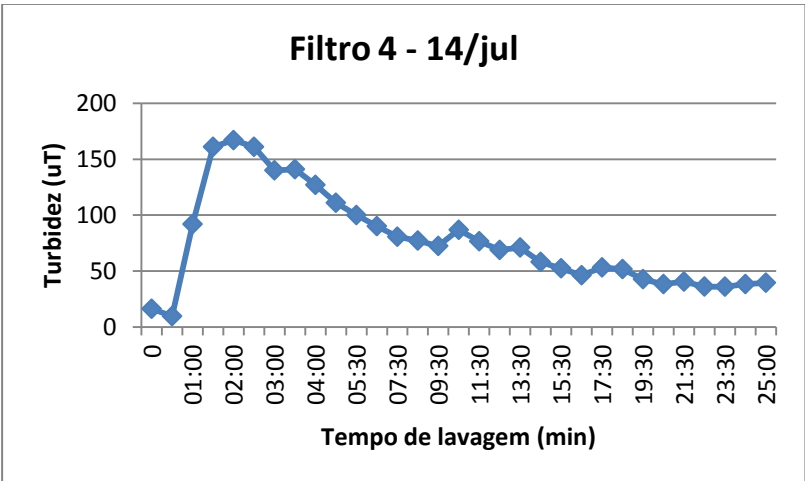
Qretrolavagem = 380 ml/min



Q entrada = 320 ml/min

Q agua filtrada = 290ml/min

Qretrolavagem = 390 ml/min

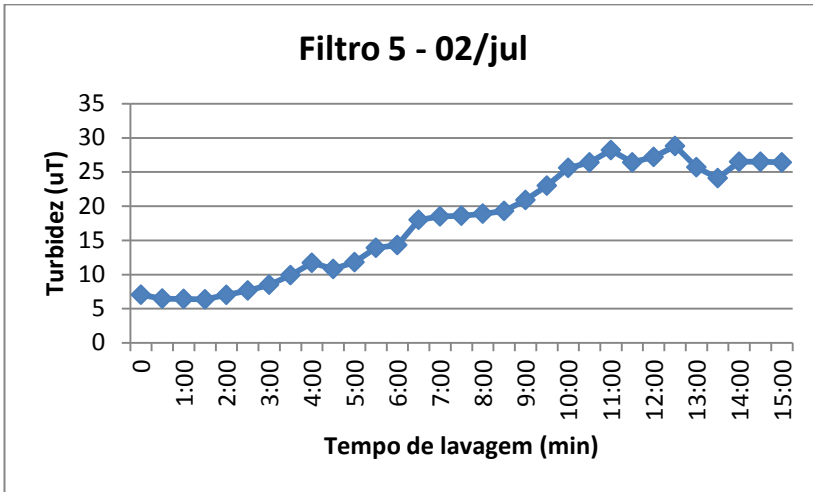


Q entrada = 300 ml/min

Q agua filtrada = 410ml/min

Qretrolavagem = 370 ml/min

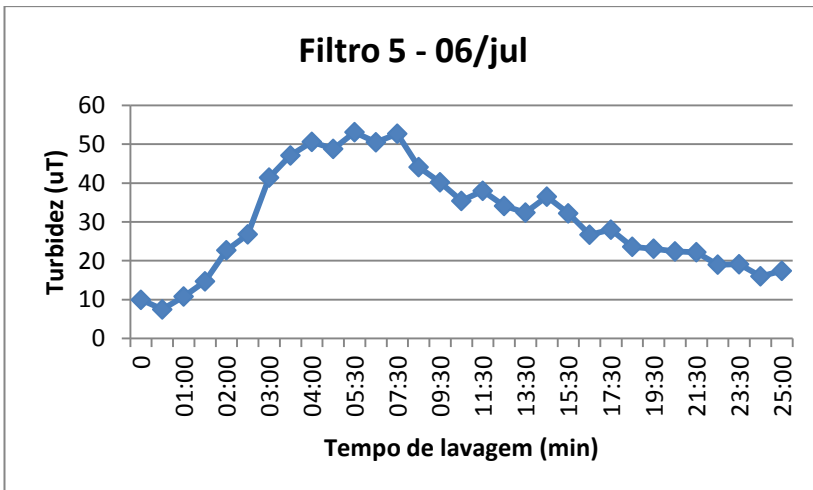
Filtro 5



Q entrada = 380 ml/min

Q agua filtrada = 220 ml/min

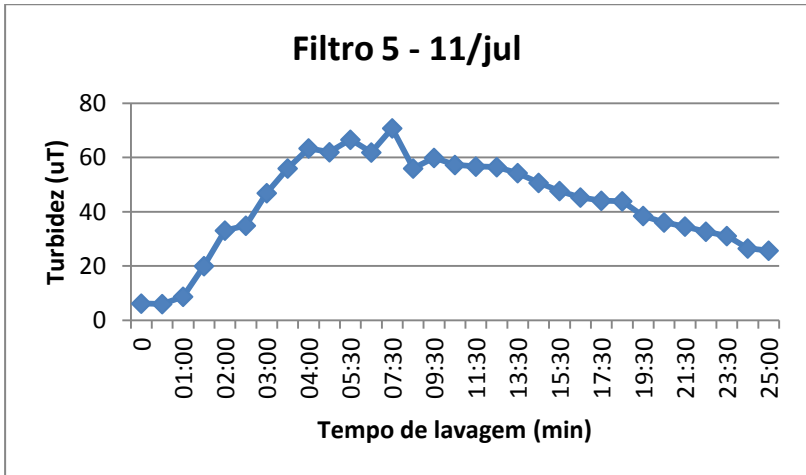
Qretrolavagem = 430 ml/min



Q entrada = 290 ml/min

Q agua filtrada = 270ml/min

Qretrolavagem = 400 ml/min

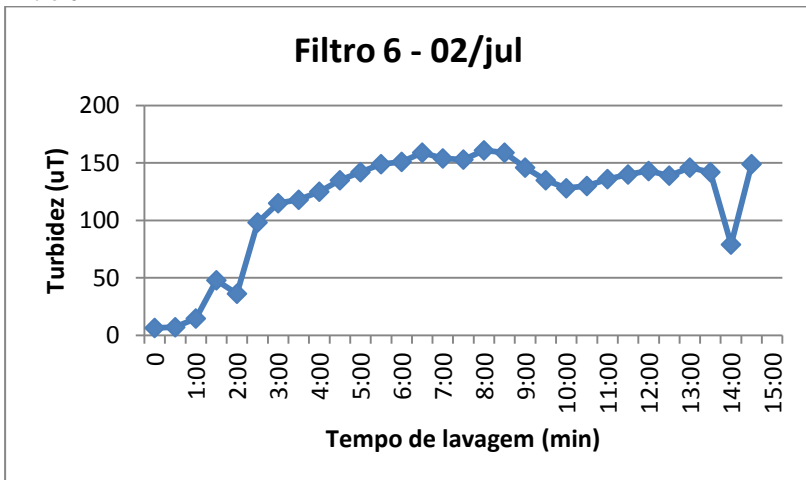


Q entrada = 310 ml/min

Q agua filtrada = 280ml/min

Qretrolavagem = 510 ml/min

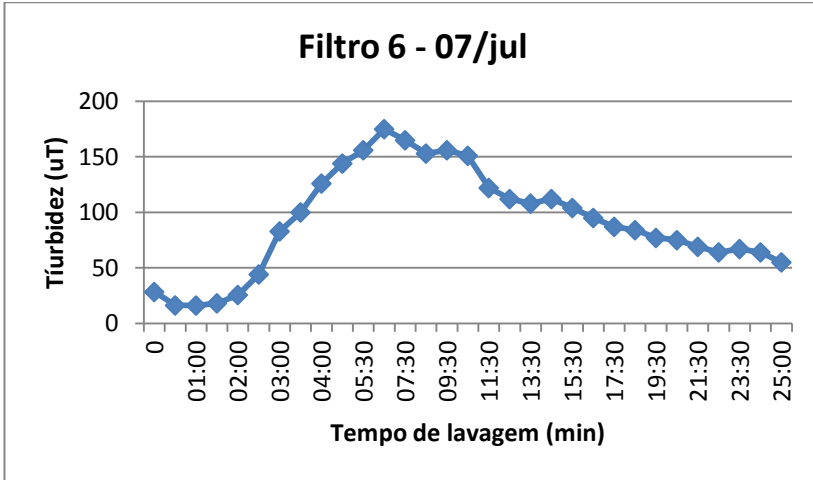
Filtro 6



Q entrada = 380 ml/min

Q agua filtrada = 290 ml/min

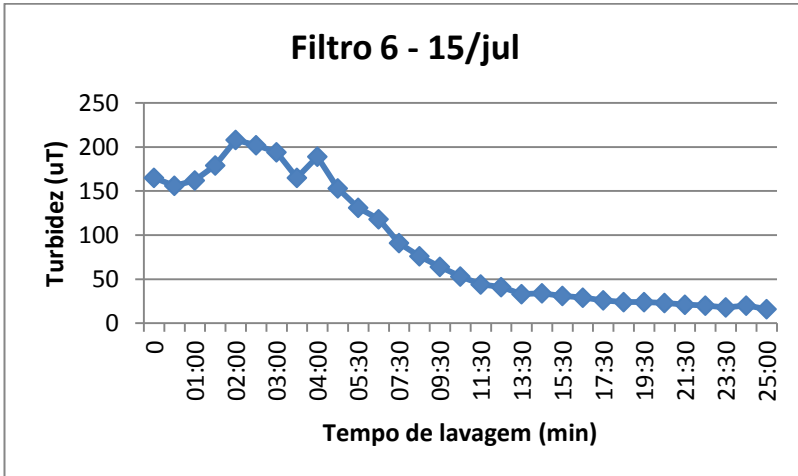
Qretrolavagem = 400 ml/min



Q entrada = 300 ml/min

Q agua filtrada = 190ml/min

Qretrolavagem = 400 ml/min



Q entrada = 300 ml/min

Q agua filtrada = 310ml/min

Qretrolavagem = 250 ml/min

