UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

SIDINEI ANTONIO GOBBI

Remoção de ovos de helmintos de esgotos secundários, por meio de filtros rápidos de areia, carvão antracitoso e zeólito para reúso agrícola e urbano não potável

São Paulo

2010

SIDINEI ANTONIO GOBBI

Remoção de ovos de helmintos de esgotos secundários, por meio de filtros rápidos de areia, carvão antracitoso e zeólito para reúso agrícola e urbano não potável

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de título de Mestre em Engenharia

Área de concentração: Engenharia Hidráulica e Sanitária
Orientador: Prof. Dr. Ivanildo Hespanhol

São Paulo

2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de março de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Gobbi, Sidinei Antonio
Remoção de ovos de helmintos de esgotos secundários, por meio de filtros rápidos de areia, carvão antracitoso e zeólito para reuso agrícola e urbano não potável / S.A. Gobbi. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.
120 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

1. Saneamento básico 2. Uso da água de esgoto 3. Reuso da água I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária II. t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho. Em especial:

Aos meus pais, Eloir Gobbi e Ivete Gobbi, pelo apoio e educação que me deram.

Aos meus irmãos, Vagner Gobbi e Silvio Gobbi, pelo auxílio e colaboração.

À minha noiva, Renata Hatsuko Tada, pela paciência e compreensão durante a elaboração deste trabalho, principalmente nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Ivanildo Hespanhol, pela orientação com sugestões, ideias e conhecimento que tornaram possível a realização desta dissertação.

Aos bolsistas do laboratório de microbiologia, Jeferson Gaspar, Thaila Souza e Fábio Campos, por toda a ajuda que me deram.

À bolsista Carolina Martins, por toda colaboração nas análises microbiológicas.

À Dr. Silvana Audrá Cutolo, pelo apoio e assistência que tornaram possível a realização desta pesquisa.

Aos amigos Ewerton Rangel e Josué Silva, por todo auxílio prestado.

À Celta Brasil pelo apoio durante todo o desenvolvimento do trabalho.

À SABESP em especial aos funcionários da ETE do ABC, a Engenheira Sheila, o Hirata e a todos os operadores da ETE que muito colaboraram para a realização dos testes com esgoto.

RESUMO

A presença de ovos de helmintos é um dos principais problemas do reúso de esgotos tratados na irrigação agrícola e no reúso urbano não potável. Isso porque pode haver contaminação dos trabalhadores que manipulam a água de reúso e da população consumidora. Os ovos de helmintos não são removidos com eficiência por meio de operações e processos unitários convencionais. Esses processos não possibilitam a remoção de ovos de helmintos a níveis estabelecidos pelas diretrizes da Organização Mundial da Saúde (OMS) para o reúso. Avaliar a filtração até a gravidade, como unidade complementar de tratamento, para a remoção de ovos de helmintos é o objetivo desta pesquisa. Como os efluentes de estações de tratamento de esgotos locais apresentam concentrações muito variáveis de ovos de helmintos, foi utilizada uma solução sintética de ovos padronizados *Ascaris suum*. A solução sintética preparada com o uso dos ovos padronizados foi usada na determinação dos parâmetros de operação do processo de filtração. Após esses ensaios, foram realizados testes em escala piloto com esgoto tratado, objetivando o estudo da influência da matéria orgânica, dos sólidos e de outros interferentes do processo. Os experimentos com solução sintética foram desenvolvidos nos laboratórios do Centro Internacional de Referência em Reúso de Água (CIRRA), da Escola Politécnica da USP. As experiências com esgoto tratado foram realizadas na ETE do ABC, da SABESP. Os resultados mostraram que as três colunas de filtração foram muito eficientes na remoção dos ovos de helmintos, produzindo um efluente com concentração final inferior a 1 ovo/l. Além disso, a filtração possibilitou a remoção de sólidos suspensos totais, turbidez, cor e material orgânico particulado, resultando em um efluente com grande potencial para ser reusado na irrigação agrícola, bem como no reúso urbano não potável.

Palavras-chave: *Ascaris*. Areia. Zeólito. Antracitoso. Filtração. Reúso de água.

ABSTRACT

Helminth eggs are one of the major problems regarding the reuse of treated sewage in agriculture and non-potable urban irrigation since both workers who handle the effluent and the consumer population might become contaminated. Helminth eggs are not efficiently removed by conventional unit operations and processes, which do not allow the removal of helminth eggs at levels established by the World Health Organization guidelines. The objective of this research is to assess the gravity filtration as an additional unit of treatment for the removal of helminth eggs. Since local effluent sewage treatment stations have highly variable concentrations of helminth eggs, a synthetic solution of standardized *Ascaris suum* was used. The synthetic solution prepared with standardized eggs was used to determine the operating parameters of the filtration process. Following the trials, pilot scale tests with treated sewage were conducted aimed at evaluating the influence of organic materials, solids, among other materials which might interfere in the process. Experiments with synthetic solution were performed in the laboratory of the International Center of Water Reuse - CIRRA, at the Polytechnic School of the University of São Paulo. Experiments with treated sewage were performed at ETE - ABC, SABESP. The results showed that the three filtration columns were very efficient in removing helminth eggs, which resulted in an effluent with a final concentration of < 1 egg/L. In addition, the filtration allowed the removal of total suspended solids, turbidity, color, and particulate organic material, resulting in an effluent with great potential to be reused in irrigation as well as in non-potable urban reuse.

Keywords: *Ascaris*. Sand. Zeolite. Anthracite. Filtration. Water reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Demanda de água de reúso nas ETEs da SABESP..... 19

Figura 2 - Retenção dos ovos de *Trichuris* por micropeneiramento..... 49

Figura 3 - Fluxograma do processo de filtração à gravidade nas colunas de areia, zeólito e areia/carvão..... 53

Figura 4 - Foto do sistema de filtração à gravidade com três colunas de filtração (areia/carvão, zeólito e areia), um reservatório de alimentação e outro para filtrado..... 54

Figura 5 - Decantador secundário ETE do ABC (local de coleta de esgoto para ensaio) 59

Figura 6 - Dosador usado para a dosagem dos ovos de *Ascaris suum*..... 60

Figura 7 - Porcentagem acumulada passante em função do tamanho de partícula (areia) 62

Figura 8 - Porcentagem acumulada passante em função do tamanho de partícula (zeólito) ... 63

Figura 9 - Porcentagem acumulada passante em função do tamanho de partícula (carvão antracitoso) 64

Figura 10 - Concentração média final a após a filtração para concentração de alimentação do sistema de até 22,95 ovos/l..... 77

Figura 11 - Concentração média final após a filtração para concentração de alimentação de 1.000 ovos/l 78

Figura 12 - Número de partículas *versus* tamanho na alimentação dos filtros (inicial) e no filtrado (areia, zeólito e carvão antracitoso)..... 79

Figura 13 - Remoção de turbidez nas colunas de areia, zeólito e carvão antracitoso..... 80

Figura 14 - Remoção de cor nos filtros de areia, zeólito e carvão antracitoso..... 81

Figura 15 - Variação de pH com a filtração 82

Figura 16 - Avaliação da perda de carga dos leitos filtrantes 83

Figura 17 - Tempo usado na retrolavagem dos filtros..... 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diretrizes de qualidade microbiológica recomendada para esgotos 17

Tabela 2 - Método de irrigação, fatores que afetam a escolha e medidas protetoras necessárias 34

Tabela 3 - Helmintos intestinais e tamanho dos ovos..... 39

Tabela 4 - Remoção de organismos patogênicos em sistemas de tratamento de esgotos..... 42

Tabela 5 - Suporte usado na montagem das colunas 51

Tabela 6 - Características do sistema de filtração 54

Tabela 7 - Distribuição granulométrica da areia 62

Tabela 8: Distribuição granulométrica do zeólito 63

Tabela 9 - Distribuição granulométrica do carvão antracitoso..... 64

Tabela 10 - Principais características dos meios filtrantes..... 65

Tabela 11 - Ensaio com altura de leito de 0,35 m 66

Tabela 12 - Ensaio com altura de leito de 0,55 m 66

Tabela 13 - Ensaio com altura de leito de 0,70 m 67

Tabela 14 - Ensaio com altura de leito de 1,0 m 67

Tabela 15 - Ensaio com altura de leito de 0,35 m 68

Tabela 16 - Ensaio com altura de leito de 0,55 m 68

Tabela 17 - Ensaio com altura de leito de 0,70 m 69

Tabela 18 - Ensaio com altura de leito de 1,0 m 69

Tabela 19 - Ensaio com altura de leito em (0,15 e 0,45) m de areia e carvão antracitoso, respectivamente 70

Tabela 20 - Ensaio com altura de leito em (0,25 e 0,70) m de areia e carvão antracitoso, respectivamente 70

Tabela 21: Ensaio com altura de leito em (0,35 e 1,0) m de areia e carvão antracitoso, respectivamente 70

Tabela 22 - Ensaio com taxa de filtração de 7,5 m³/m².h..... 72

Tabela 23 - Ensaio com taxa de filtração de 10 m³/m².h 72

Tabela 24 - Ensaio com taxa de filtração de 15 m³/m².h 72

Tabela 25 - Ensaio com taxa de filtração de 7,5 m³/m².h..... 73

Tabela 26 - Ensaio com taxa de filtração de 10 m³/m².h 73

Tabela 27 - Ensaio com taxa de filtração de 15 m³/m².h 74

Tabela 28 - Ensaio com taxa de filtração de 7,5 m³/m².h..... 75

Tabela 29 - Ensaio com taxa de filtração de 10 m³/m².h 75

Tabela 30 - Ensaio com taxa de filtração de 15 m³/m².h 75

Tabela 31 - Concentração de ovos de helmintos ao longo das carreiras de filtração (concentração na alimentação de até 22,95 ovos/l e taxa de 15 m/h)..... 76

Tabela 32 - Concentração de ovos de helmintos no filtrado para alimentação de 1.000 ovos/l e taxa de 15 m/h..... 77

Tabela 33 - Remoção de DQO nas colunas filtrantes 81

Tabela 34 - Remoção de SST nas colunas filtrantes..... 82

Tabela 35 - Remoção de coliformes fecais 82

Tabela 36 - Volume de água gasto na etapa de retrolavagem das colunas 84

Tabela 37 - Variáveis de qualidade da água de reúso com base em normas internacionais e nacionais..... 86

Tabela 38 - Variáveis de qualidade da água obtidas pelos filtros estudados 86

Tabela 39- Custo comparativo para sistema de filtração (areia, zeólito e carvão antracitoso) 88

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
SABESP	Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
OMS	Organização Mundial da Saúde
USP	Universidade de São Paulo
TSA	Tratamento Solo-aquífero
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
C	Coeficiente de desuniformidade
D10	Diâmetro de partícula correspondente a 10% de material peneirado
D60	Diâmetro de partícula correspondente a 60% de material peneirado
ε	Porosidade total do leito
d	Densidade da água
ME	Massa específica
P_1	Massa do balão volumétrico, mais água destilada, mais amostra
P_2	Massa do balão volumétrico, mais água destilada
µm	Mícron
DQO	Demanda química de oxigênio
SST	Sólidos suspensos totais
DBO	Demanda biológica de oxigênio
NTU	Unidade nefelométrica de turbidez

SUMÁRIO

1. **INTRODUÇÃO** 12

2. **OBJETIVO** 14

2.1 OBJETIVO GERAL 14

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14

3. **REVISÃO DA LITERATURA** 15

3.1 NECESSIDADE DE REÚSO 15

3.2 AS DIMENSÕES LEGAIS E REGULATÓRIAS DO REÚSO 16

3.3 AS DIRITRIZES INTERNACIONAIS 16

3.4 ALGUNS EXEMPLOS DE REÚSO NO BRASIL 18

3.5 REÚSO NÃO POTÁVEL PARA USOS URBANOS 19

3.6 REÚSO NÃO POTÁVEL PARA FINS INDUSTRIAIS 20

3.7 REÚSO PARA RECARGA DE AQUÍFEROS 22

3.7 REÚSO DE ÁGUA PARA AQUICULTURA 25

3.8 REÚSO DE ÁGUA PARA FINS AGRÍCOLAS 26

3.8.1 **Benefícios do reúso agrícola** 28

3.8.2 **O sistema solo-planta** 29

3.8.3 **Métodos da disposição de esgotos no solo** 31

3.8.3.1 Irrigação por aspersão 32

3.8.3.2 Irrigação por sulcos e canais 32

3.8.3.3 Irrigação por inundação 33

3.8.3.4 Irrigação por gotejamento 33

3.8.4 Considerações para o reúso agrícola 34

3.8.4.1 Salinidade 35

3.8.4.2 Metais pesados 36

3.8.4.3 Micro-organismos e contaminantes biológicos 37

3.9 A CONTAMINAÇÃO POR OVOS DE HELMINTOS 38

3.10 MEDIDAS PARA PREVENÇÃO DOS GRUPOS DE RISCO 41

4. **TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO** 42

4.1 SEDIMENTAÇÃO 43

4.2 FLOCULAÇÃO 44

4.3 DESINFECÇÃO QUÍMICA 44

4.4 LODOS ATIVADOS 45

4.5 SISTEMAS DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO 46

4.6 A FILTRAÇÃO TERCIÁRIA DE ESGOTOS SANITÁRIOS 47

4.6.1 o sistema de filtração proposto e as condições de operação 49

5. **MATERIAIS E MÉTODOS** 51

5.1 MATERIAIS 51

5.1.1 **Meios filtrantes** 51

5.1.2 **Sistema de filtração** 52

5.1.3 **Reagentes e equipamentos laboratoriais** 55

5.2 MÉTODOS 56

5.2.1 **Análise granulométrica** 56

5.2.2 **Porosidade total do leito** 56

5.2.3 **Massa específica aparente** 57

5.2.4 **Avaliação da altura de leito filtrante** 58

5.2.5 **Avaliação da taxa de filtração** 58

5.2.6 **Ensaios com esgoto tratado** 59

5.2.7 **Análise dos ovos de helmintos** 60

5.2.8 **Análise de SST, cor, DQO e coliformes fecais** 61

6. **RESULTADOS E DISCUSSÃO** 62

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS FILTRANTES 62

6.1.1 **Areia** 62

6.1.2 **Zeólito** 63

6.1.2 **Carvão antracitoso** 64

6.2 DETERMINAÇÃO DA ALTURA DE LEITO 66

6.2.1 **Coluna de areia** 66

6.2.2 **Coluna de zeólito** 68

6.2.3 **Coluna de areia e carvão antracitoso** 69

6.3 DETERMNAÇÃO DA TAXA DE FILTRAÇÃO 71

6.3.1 **Coluna de areia** 71

6.3.2 **Coluna de zeólito** 73

6.3.3 **Coluna de areia e carvão antracitoso** 74

6.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ESGOTO TRATADO 75

6.4.1 **Remoção de ovos de helmintos** 76

6.4.2 **Remoção de partículas** 78

6.4.3 **Remoção de turbidez, cor, DQO, SST e coliformes fecais** 79

6.4.4 **Perda de carga e retrolavagem** 83

6.4.5 **Potencial de reúso do efluente produzido** 85

6.4.6 **Análise de custos da filtração** 87

REFERÊNCIAS 91

1. INTRODUÇÃO

O reúso de água é uma necessidade em grandes centros urbanos com baixa disponibilidade hídrica, bem como em regiões agrícolas. O uso de esgotos tratados na agricultura se tornou fundamental devido à necessidade de aumento da produção, escassez e irregularidades das chuvas, dificuldades de identificação de fontes alternativas de água para irrigação, custo elevado dos fertilizantes agrícolas, custo do tratamento necessário para o descarte do esgoto diretamente em corpos hídricos, aceitação sociocultural da prática do reúso agrícola, e reconhecimento do valor intrínseco da prática (HESPANHOL, 1994).

A prática do reúso de águas residuárias para irrigação agrícola e reúso urbano não potável contribui para a proteção dos recursos hídricos, assim como para a qualidade da água e dos ecossistemas aquáticos. Águas de qualidade inferior, tais como esgotos, particularmente os de origem doméstica, águas de drenagem agrícola e águas salobras, sempre que possível, devem ser consideradas como fontes alternativas para usos menos restritos (HESPANHOL, 2002).

O uso de águas residuárias brutas e parcialmente tratadas, principalmente para irrigação agrícola, é uma prática comum em algumas regiões do Brasil, sendo, entretanto, utilizada de forma indiscriminada e sem a proteção da saúde dos trabalhadores agrícolas e consumidores. A exposição dos trabalhadores agrícolas a águas residuárias brutas ou, parcialmente tratadas, aumenta os riscos de infecção por ovos de helmintos e, em especial, por nematódeos intestinais, principalmente *Ascaris lumbricoides*.

Os processos convencionais de tratamento de esgoto, como lodo ativado, filtro biológico ou desinfecção, não alcançam os valores recomendados pela OMS (WHO, 2006), ou seja, ≤ 1 ovo/litro de helmintos para o reúso na irrigação irrestrita (HESPANHOL, 2002).

Desse modo, para o reúso adequado do esgoto doméstico, tanto para fins urbanos não potáveis como para a irrigação agrícola, evitando riscos de contaminação de trabalhadores agrícolas e de consumidores, é fundamental o desenvolvimento de técnicas e processos para a remoção dos ovos de helmintos.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta pesquisa é verificar a viabilidade técnica, em escala piloto, da utilização de um sistema de filtração em leito granular à gravidade, para remover ovos de helmintos do esgoto previamente tratado por meio de processos convencionais de tratamento ─ lodos ativados, filtros biológicos, reatores UASB etc. ─ para atingir a diretriz da OMS com relação a ovos de helmintos para irrigação irrestrita e reúso urbano não potável.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A partir de ensaios pilotos, avaliar filtros alimentados com uma solução sintética contendo ovos padronizados de *Ascaris suum*, para determinação de parâmetros e características de processo, tais como:

- Taxa de filtração;
- Profundidade de leito;
- Eficiência da filtração em leito granular à gravidade, para a remoção de ovos de helmintos.

Realizar as experiências com esgoto tratado, com o intuito de avaliar os interferentes do processo (presença de sólidos e matéria orgânica) em condições reais.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 NECESSIDADE DE REÚSO

Além da escassez, o reúso da água para fins não potáveis compensa a dificuldade de atendimento da demanda por água, substituindo mananciais próximos e de qualidade adequada. Com a política do reúso, importantes volumes de água são poupados, preferindo-se por usar água de qualidade inferior, geralmente efluentes secundários pós-tratados, para atendimento de finalidades que podem prescindir da potabilidade (ABES, 1997).

Em muitos casos, como na região metropolitana de São Paulo, os responsáveis pelo abastecimento de água optam pelo desenvolvimento de novas fontes de captação e tratamento de água em regiões cada vez mais distintas. Embora atenue os problemas relacionados à escassez de água, pelo menos em curto prazo, essa não é a melhor opção devido ao aumento do custo da água, do comprometimento dos recursos hídricos da região, caso não haja uma estrutura compatível para coleta e tratamento dos esgotos gerados (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Como alternativa para a importação de água de outras áreas, são necessárias estratégias que priorizem a conservação e a utilização eficiente dos recursos disponíveis na região, para que as pressões sobre esses recursos sejam menores. Contudo, mesmo com a adoção de medidas destinadas à otimização e redução do consumo de água nas diversas atividades humanas, a adoção de medidas complementares é imprescindível, utilizando-se da prática de reúso de água e efluentes (HESPANHOL, 2005).

A necessidade do reúso de água na agricultura torna-se imprescindível, pois é o setor em que são usados os maiores volumes de água, chegando a 62,7% do consumo (ANA, 2002).

3.2 AS DIMENSÕES LEGAIS E REGULATÓRIAS DO REÚSO

Em termos de reúso de água em nível nacional, o Brasil dispõe apenas da NBR 13969, que aborda o reúso como alternativa para a destinação dos esgotos tratados, e da Resolução 54, de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que contém somente definições de tipos de reúso, estabelece critérios de licenciamento e dá orientações gerais. Desse modo, verifica-se que não há uma norma específica sobre reúso de água que estabelece padrões de qualidade da água para quaisquer tipos de reúso. Torna-se, portanto, necessário, até que se disponha de regulamentação e de padrões nacionais, utilizar diretrizes internacionais (TELLE; COSTA, 2007).

O uso de esgotos, principalmente para a irrigação de culturas, é associado a dois aspectos legais: estabelecimento de um *status* legal para os esgotos e delineação de um regime legal para a utilização (HESPANHOL, 2002).

Essa nova condição deve resultar em:

- Desenvolvimento de uma nova legislação ou complementação da legislação existente, estabelecendo normas, padrões e códigos de prática, associados ao reúso;
- Criação de uma nova instituição, ou delegação de poderes a uma instituição existente;
- Atribuição de competências às agências locais e nacionais associadas ao setor, e bases para o inter-relacionamento e cooperação mútua entre elas.

3.3 AS DIRITRIZES INTERNACIONAIS

A OMS estabelece algumas diretrizes que recomendam padrões de qualidade da água de reúso, de acordo com a aplicação da água. Convém destacar que essas diretrizes são recomendações e que se deve levar em conta a realidade econômica, social e climática de cada país onde o reúso será praticado (HESPANHOL, 1994).

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (WHO, 2006), as diretrizes para a utilização de esgotos tratados na irrigação de culturas agrícolas são as apresentadas na tabela seguinte.

Tabela 1 - Diretrizes de qualidade microbiológica recomendada para esgotos

Categoria	**Tipo de irrigação**	**Grupo de exposição**	**Nematódeos intestinais (ovos/l)[b]**	**Coliformes fecais (N/100 mL)[c]**	**DALY por pessoa ao ano[a]**
A	Irrigação de vegetais consumidos crus, campos de esporte, parques públicos.	Trabalhadores, consumidores, público.	≤ 1	≤ 1000	$\leq 10^{-6}$
B	Irrigação de culturas de cereais, culturas forrageiras, pastagens e árvores[e].	Trabalhadores.	≤ 1	Sem recomen-dação de padrão	$\leq 10^{-6}$
C	Irrigação localizada de culturas na categoria "B", sem exposição de trabalhadores e do público em geral.	Não existente.	Não aplicável.	Não aplicável.	$\leq 10^{-6}$

Notas:
a. Risco adicional de doença por pessoa ao ano.
b. Espécies de *Ascaris*, *Trichuris*, *Necator* e *Ancylostoma*, média aritmética do número de ovos por litro.
c. Média geométrica do número de CF por 100 mL, durante o período de irrigação.
d. Para a irrigação de parques e jardins onde o acesso de público é permitido, deve-se utilizar um padrão mais restritivo ($\leq$ 200 coliformes fecais por 100 mL).
e. No caso de árvores frutíferas, a irrigação deve ser interrompida duas semanas antes da colheita e nenhum fruto deve ser recolhido do chão. A irrigação por aspersão não deve ser utilizada.

Como é possível observar na Tabela 1, para a irrigação irrestrita, o efluente deve conter ≤ 1 ovo de nematódeos intestinais por litro e ≤ 1000 coliformes fecais por 100 mL. Com esse padrão de qualidade de efluente, pode-se irrigar qualquer tipo de cultura agrícola, a exemplo das culturas listadas na categoria “A”. No caso da prática da irrigação restrita, o principal requisito de qualidade do efluente passa a ser com relação aos ovos de helmintos, uma vez que não há recomendação de padrão para coliformes fecais. Nesse caso, podem ser irrigadas as culturas enquadradas na categoria “B”.

3.4 ALGUNS EXEMPLOS DE REÚSO NO BRASIL

Em São Paulo, a SABESP já realiza — e pretende ampliar ainda mais — o reúso planejado de água em suas instalações de tratamento de esgotos (SABESP, 2009).

Para o setor industrial, a empresa está aberta a negociações sobre o reúso da água, com sistemas apropriados de distribuição. A reutilização da água apresenta atrativos econômicos, fornecimento garantido e confiabilidade tecnológica. No aspecto qualidade, os riscos inerentes são gerenciados com adoção de medidas de planejamento, monitoramento, controle e sinalização adequados. Exemplo disso é o projeto AQUAPOLO, que está sendo desenvolvido na ETE do ABC, e estima-se que irá utilizar inicialmente cerca de 600 L/s de água de reúso para aplicação industrial (SABESP, 2009).

A Figura 1 mostra que a cada ano cresce a demanda por água de reúso, principalmente na região metropolitana de São Paulo, onde a disponibilidade hídrica é muito baixa (SAMPAIO, 2005).

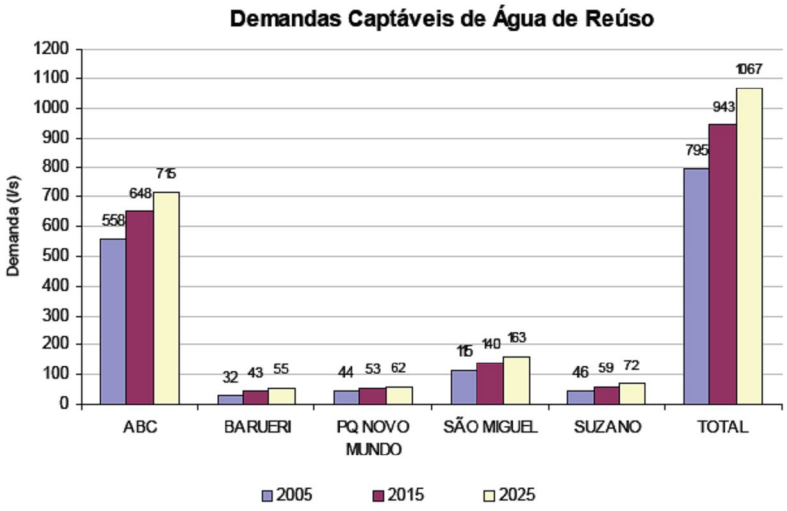

Figura 1 - Demanda de água de reúso nas ETEs da SABESP

Com relação ao reúso industrial, em diversas empresas, as ações de reúso e uso racional da água já são uma realidade. Dentre elas, diversas indústrias têm apresentado publicamente procedimentos que promovem reduções da vazão captada, que também resultam em benefícios econômicos (TELLE; COSTA, 2007).

3.5 REÚSO NÃO POTÁVEL PARA USOS URBANOS

Essa classificação é reservada ao reúso direto de água para o abastecimento de corpos superficiais, como lagos, reservatórios e rios usados para fins recreativos; além de usos em paisagismo, como irrigação de jardins e parques públicos, lagos ornamentais, e na rega de campos esportivos.

Os usos urbanos não potáveis envolvem riscos menores e devem ser considerados como a primeira opção de reúso na área urbana. Entretanto, cuidados especiais devem ser tomados quando ocorre contato direto do público com gramados de parques, jardins, hotéis, áreas turísticas e campos de esporte.

Os problemas associados ao reúso urbano não potável são, principalmente, os custos elevados de sistemas duplos de distribuição, dificuldades operacionais e riscos potenciais de ocorrência de conexões cruzadas. Os custos, entretanto, devem ser considerados em relação aos benefícios de conservar água potável e de, eventualmente, adiar ou eliminar a necessidade do desenvolvimento de novos mananciais para o abastecimento público.

Diversos países da Europa, assim como os países industrializados da Ásia localizados em regiões de escassez de água, exercem extensivamente a prática do reúso urbano não potável. Entre eles, o Japão está utilizando efluentes secundários para diversas finalidades. Em Fukuoka, cidade com aproximadamente 1,2 milhões de habitantes, situada no sudoeste do Japão, diversos setores operam com rede dupla de distribuição de água, uma delas com esgotos domésticos tratados em nível terciário (lodos ativados, desinfecção com cloro em primeiro estágio, filtração, ozonização, desinfecção com cloro em segundo estágio), para uso em descarga de toaletes de edifícios residenciais. Esse efluente tratado também é utilizado para outros fins, incluindo irrigação de árvores em áreas urbanas, lavagem de gases e alguns usos industriais, como resfriamento e desodorização. Diversas outras cidades do Japão, entre as quais Aomori e Tóquio, estão usando esgotos tratados, ou outras águas de baixa qualidade, para fins urbanos não potáveis, proporcionando uma economia significativa dos escassos recursos hídricos localmente disponíveis (HESPANHOL, 2002).

3.6 REÚSO NÃO POTÁVEL PARA FINS INDUSTRIAIS

Na maioria das vezes, os esgotos municipais são tratados para serem dispostos no meio ambiente em níveis compatíveis com a legislação local.

O reúso de água para fins industriais consiste na utilização industrial do esgoto, em vez da disposição no meio ambiente. Evidentemente, o uso desse esgoto tratado definirá os

processos e as operações unitárias adicionais necessários para o condicionamento de acordo com a aplicação.

Os custos elevados da água industrial, associados às demandas crescentes, têm levado as indústrias a avaliar as possibilidades internas de reúso, considerando as ofertas das companhias de saneamento para a compra de esgotos tratados a preços inferiores aos da água potável dos sistemas públicos de abastecimento. A “água de utilidade” produzida por meio de tratamento de efluentes secundários e distribuída por adutoras que servem um agrupamento significativo de indústrias é um grande atrativo para o abastecimento industrial a custos razoáveis.

A proximidade de estações de tratamento de esgotos às áreas de grande concentração industrial contribui para a viabilização de programas de reúso industrial, uma vez que permite adutoras e custos unitários de tratamento menores. Os usos industriais que apresentam possibilidade de viabilização em áreas de concentração industrial significativa são basicamente os seguintes (HESPANHOL, 2002):

• Torres de resfriamento com água de *make-up*;

• Caldeiras;

• Construção civil, incluindo preparação e cura de concreto e compactação do solo;

• Irrigação de áreas verdes de instalações industriais, lavagem de pisos e alguns tipos de peças, principalmente na indústria mecânica;

• Processos industriais.

Dentro do critério de estabelecer prioridades para usos com demanda imediata, sem exigência de níveis elevados de tratamento, é recomendável concentrar a fase inicial do programa de reúso industrial em torres de resfriamento.

Esgotos domésticos tratados têm sido amplamente utilizados como água de resfriamento em sistemas com e sem recirculação. Embora isso corresponda a apenas 17% da demanda de água não potável pelas indústrias, o uso de efluentes secundários tratados, em sistemas de refrigeração, tem a vantagem de requerer qualidade independentemente do tipo de indústria. Ademais, atende a outros usos menos restritivos, tais como lavagem de pisos e equipamentos e água de processo em indústrias mecânicas e metalúrgicas.

Além disso, a qualidade da água adequada para o resfriamento de sistemas semiabertos é compatível com outros usos urbanos não potáveis, como irrigação de parques e jardins, lavagem de vias públicas, construção civil, formação de lagos para modalidades de recreação e para efeitos paisagísticos. Outras indústrias que podem ser consideradas como potenciais para a implementação do reúso utilizam água para a produção de vapor, lavagem de gases de chaminés, e processos industriais específicos, como manufatura de papel e papelão, indústria têxtil, material plástico e produtos químicos, petroquímicas, curtumes, construção civil etc. Essas modalidades de reúso envolvem sistemas de tratamento avançados e demandam, consequentemente, níveis de investimento elevados (HESPANHOL, 2002).

3.7 REÚSO PARA RECARGA DE AQUÍFEROS

O Brasil possui um grande volume de água doce em reservatórios subterrâneos, sendo que boa parte deles está localizada em zonas de fácil acesso e quando exige tecnologias de perfuração tem custo acessível. Essa facilidade estimula a desenfreada exploração dos mananciais como se fossem particulares (comércio, indústria, condomínios e até mesmo em residências). A água dos lençóis está sendo extraída em volumes cada vez mais crescentes, fazendo com que cresça, na mesma proporção, a preocupação com a recarga desses aquíferos (HESPANHOL, 2002).

Os reservatórios hídricos naturais, encontrados em diversas profundidades, formam-se por meio do ciclo hidrológico em condições ambientais favoráveis (solo, topografia, clima etc.). Têm, como principal fator de recarga natural, as mesmas condições hidrogeológicas de sua formação em locais conhecidos como “zona” ou “área de recarga”.

A provável contaminação desses reservatórios ocorre quando a qualidade da água de recarga direta ─ a água de precipitação ou de escoamento que promove a infiltração no solo ─ está comprometida a ponto de contagiar o solo e o lençol freático.

Para os locais onde a captação de água excede a condição de recarga natural dos lençóis, foram desenvolvidas tecnologias de compensação para os aquíferos, aumentando a disponibilidade de água por meio de soluções localizadas de recarga artificial, com a utilização de efluentes de estações de tratamento.

Visando desenvolver um projeto de recarga artificial funcional, confiável e sustentável, é necessário que a qualidade do efluente a ser lançado ao solo esteja adequado aos padrões. Com essa finalidade, um tratamento adicional dos efluentes controla a contaminação da água e do solo, evita a penetração (intrusão) de água salina em aquíferos costeiros, evita o rebaixamento superficial do solo estrutural dos aquíferos (subsidência do solo) e pode aumentar a disponibilidade de água para uso imediato ou futuro (HESPANHOL, 2002).

Por outro lado, as próprias características do efluente a ser lançado, quando adequadamente empregado à recarga de aquíferos, favorecem a biodegradação da matéria orgânica presente. A infiltração e a percolação no solo equivalem a um tratamento auxiliar, podendo atingir níveis de qualidade equivalentes ao tratamento avançado, dependendo das condições hidrogeológicas locais (TELLES; COSTA, 2007).

Dois métodos de recarga artificial de aquíferos podem ser descritos como exposto a seguir (HESPANHOL, 2002).

- *Poços de injeção*: este processo requer a construção de poços projetados especialmente para esta finalidade, estendendo-se desde a superfície e pela camada insaturada até o aquífero. Resultam em custos significativamente elevados para a construção do poço e para a aplicação do tratamento necessário à proteção da qualidade da água do aquífero.
- *Infiltração superficial utilizando bacias ou canais de infiltração*: sua aplicação depende das condições hidrogeológicas locais. Empregam-se bacias ou canais de infiltração, que vão proporcionar níveis de tratamento significativos, devido ao movimento dos efluentes através do solo, da camada insaturada e no próprio aquífero. Este sistema é designado Tratamento Solo-aquífero (TSA), que vem sendo empregado com sucesso em diversas partes do mundo (região do Dan em Israel, Chipre, Estados Unidos nos estados de Arizona, Califórnia, Nevada etc.).

Os sistemas TSA têm, em média, custos 40% inferiores aos dos sistemas de tratamento convencionais equivalentes que operam na superfície, e que proporcionam níveis de tratamento elevados em termos de remoção de compostos orgânicos (DBO e DQO), organismos patogênicos (coliformes fecais, criptosporídeos, giárdia e vírus), e compostos inorgânicos (nitrogênio e metais pesados) (HESPANHOL, 2002).

Algumas condições hidrogeológicas são favoráveis à recarga artificial com esgoto doméstico tratado por meio do sistema TSA, entre elas estão (HESPANHOL, 2002):

- Solos permeáveis com taxas de infiltração razoáveis;
- Camada insaturada com espessura suficiente para estocar o volume de recarga necessário;

- Ausência de camadas impermeáveis que causam excessiva acumulação dos volumes infiltrados antes de atingir o aquífero;
- Distribuição granulométrica na camada insaturada superior que suporta a prática do sistema TSA;
- Coeficientes de transmissividade que não causam retenção excessiva de água no aquífero;
- Aquífero não confinado.

Os parâmetros locais que devem ser caracterizados para dar suporte ao projeto de recarga são basicamente os seguintes: tipos de solos, perfil litológico da camada insaturada e do aquífero, níveis de água, gradiente regional, locação e volumes estimados da recarga natural, características de poços e bombeamentos existentes, parâmetros do aquífero (transmissividade e vazão específica), características de qualidade da água do aquífero em termos dos principais cátions e ânions, poluição existente ou potencial oriunda de aterros ou quaisquer outras fontes e contaminantes do solo que possam ser lixiviados durante a recarga.

A recarga artificial de aquíferos poderá se constituir em benefício duplo a alguns municípios que utilizam aquíferos subterrâneos para abastecimento público. A crescente redução da recarga natural, devido ao aumento significativo da impermeabilização do solo urbano, vem causando o abaixamento dos níveis freáticos em áreas de grande demanda. A possibilidade de recarga artificial com esgotos tratados pelo sistema TSA poderia, além de permitir a disposição adequada de efluentes domésticos, contribuir para a manutenção dos níveis freáticos, facilitando, assim, o abastecimento público (HESPANHOL, 2002).

3.7 REÚSO DE ÁGUA PARA AQUICULTURA

Inicialmente seu desenvolvimento se deu como técnica complementar ao tratamento de esgotos, principalmente por meio da utilização de plantas aquáticas como o aguapé. Posteriormente, a ideia da utilização de peixes para tal fim foi adotada principalmente com o objetivo de produção de proteínas (EDWARDS, 1992).

A prática da aquicultura fertilizada com esgotos ou excreta representa uma fonte de receita substancial em diversos países, entre eles, Bangladesh, Índia, Indonésia e Peru. O sistema de lagoas, em operação há muitas décadas em Calcutá, é o maior sistema existente atualmente, utilizando apenas esgotos como fonte de alimento para a produção de peixes. Dados de 1987 (EDWARDS, 1992), indicam uma área total de lagoas com aproximadamente 3.000 hectares e uma produção anual entre 4 e 9 ton/hectare, que supre quase exclusivamente o mercado local. Outros elementos sobre os benefícios econômicos da aquicultura fertilizada com excreta ou esgotos podem ser encontrados na literatura especializada, por exemplo, Bartone (1985); Bartone, Moscoso e Nava (1990).

3.8 REÚSO DE ÁGUA PARA FINS AGRÍCOLAS

A demanda de água para o setor agrícola brasileiro representa, atualmente, 70% do uso consumptível total, com forte tendência para chegar a 80% até o final desta década. Portanto, ante o significado que essas grandes vazões assumem, em termos de gestão de recursos hídricos, é de extrema importância que se atribua prioridade para institucionalizar, promover e regulamentar o reúso para fins agrícolas em âmbito nacional (ANA, 2002).

Hoje em dia, mais do que nunca, a aplicação de esgotos e efluentes no solo é vista como uma forma efetiva de controle da poluição, bem como uma alternativa viável para aumentar a disponibilidade hídrica, uma vez que utiliza água de qualidade inferior e disponibiliza água de

melhor qualidade para fins mais nobres. Os maiores benefícios dessa tecnologia são os aspectos econômicos, ambientais e de saúde pública (HESPANHOL, 2002).

Durante as duas últimas décadas do século XX, o uso de esgotos para irrigação ou recuperação de solos aumentou significativamente, em virtude de fatores como os citados abaixo (HESPANHOL. 2002):

- Dificuldade crescente de identificar fontes alternativas de água para irrigação em algumas regiões;
- Custo elevado de fertilizantes;
- Segurança de saber que os riscos para a saúde pública e os impactos sobre o solo são mínimos, caso as precauções e as técnicas adequadas são efetivamente utilizadas;
- Custos elevados dos sistemas de tratamento necessários para possibilitar a descarga de efluentes em corpos receptores;
- Início da aceitação sociocultural da prática do reúso agrícola;
- Reconhecimento, pelos órgãos gestores de recursos hídricos, do valor intrínseco da prática.

Estima-se que na região do Alto Tietê a jusante do reservatório de Ponte Nova até as imediações de Guarulhos poderia dispor, com o atendimento da demanda agrícola pelos esgotos coletados dos municípios da região, de aproximadamente três metros cúbicos por segundo de água de boa qualidade para o abastecimento público. Isso é um exemplo de aumento da disponibilidade hídrica por meio da prática do reúso em regiões com escassez de água (HESPANHOL, 2002).

A aplicação de esgotos no solo é uma forma efetiva de controle da poluição e uma alternativa viável para aumentar a disponibilidade hídrica em regiões áridas, semiáridas ou com disponibilidade hídrica baixa (HESPANHOL, 2002).

3.8.1 **Benefícios do reúso agrícola**

Os benefícios econômicos são resultado do aumento da área cultivada e da produtividade agrícola, e são mais significativos em áreas onde se depende apenas de irrigação natural, proporcionada pelas águas de chuvas.

Um exemplo notável de recuperação econômica, associada à disponibilidade de esgotos para irrigação é o caso do Vale do Mesquital, no México, onde a renda agrícola aumentou de quase zero, no início do século passado, quando os esgotos da Cidade do México foram postos à disposição da região, até aproximadamente 4 milhões de dólares por hectare, em 1990 (CNA, 1993).

Estudos efetuados em diversos países demonstraram que a produtividade agrícola aumenta significativamente em sistemas de irrigação com esgotos adequadamente administrados (HESPANHOL, 1999).

Além disso, sistemas de reúso de esgotos para fins agrícolas, adequadamente planejados e administrados, proporcionam melhorias ambientais e das condições de saúde (HESPANHOL, 1999), entre as quais:

- Minimização das descargas de esgotos em corpos de água;
- Preservação dos recursos subterrâneos em que a utilização excessiva de aquíferos provoca intrusão de cunha salina ou subsidência de terrenos;

- Melhoria das características de conservação do solo, pela acumulação de húmus, e aumento da resistência à erosão;
- Aumento da matéria orgânica contida do solo, possibilitando maior retenção de água;
- Contribuição, principalmente em áreas carentes, para o aumento da produção de alimentos, elevando, assim, os níveis de saúde, qualidade de vida e condições sociais de populações associadas aos esquemas de reúso.

3.8.2 **O sistema solo-planta**

A exemplo do que acontece nos processos naturais de autodepuração dos corpos de água, o esgoto bruto ou tratado, ao ser lançado no solo, tem sua carga poluidora diminuída por processos físicos, químicos e biológicos. Para compreendê-los, é preciso ter conhecimento de que o solo é mais do que um simples meio físico formado por substâncias minerais e orgânicas, que, juntamente com a vegetação superior, a energia solar e a água, asseguram a continuidade de um dos ciclos mais importantes da natureza: a transformação da matéria orgânica em energia renovável.

O solo é um meio físico formado por substâncias minerais e orgânicas, cujas formas, predominantemente granulares, conferem-lhe propriedades características, como porosidade, permeabilidade, textura que tornam o hábitat natural de um grande número de seres vivos microscópios, vegetais e animais.

Pelo menos quatro propriedades do solo são extremamente importantes para sua utilização como local de disposição de esgotos, ou de efluentes de estações de tratamento (PAGANINI, 1997):

- *Capacidade de troca iônica*: representada a quantidade total de cátions e ânions absorvidos por unidade de peso do solo. Solos úmidos possuem capacidade de troca de cátions entre moderada e grande, mas capacidade limitada para ânions. A capacidade de troca iônica influi na capacidade que o solo possui de reter os íons metálicos trazidos pelos esgotos para impedi-los de atingir as águas superficiais e/ou subterrâneas.
- *Capacidade tampão*: provém de diversos fatores, como solos carbonatados tamponados para pH (igual ou maior que 7), que inibem a solubilidade dos metais pesados.
- *Filtrabilidade*: característica relacionada à eficiência do solo em funcionar como um filtro físico de partículas em suspensão. A filtrabilidade de organismos patogênicos presentes nos esgotos é um fator importante para o sucesso da utilização de sua disposição em áreas agrícolas. Solos permeáveis, de textura intermediária, possuem conteúdo coloidal suficiente para reter partículas e, por isso, são os melhores filtros.
- *Microbiologia*: a disposição de esgotos brutos ou tratados no solo promove transformações microbiológicas no meio. Tais transformações ocorrem com a participação de micro-organismos que transformam alguns compostos que contêm elementos essenciais para o desenvolvimento das plantas, como o nitrogênio, o fósforo, o enxofre e o carbono.

Cada tipo de solo pode sofrer de diversas formas as influências dessas propriedades. A resultante das interações sinérgica ou inibitória definirá o comportamento desse solo na depuração do esgoto.

3.8.3 **Métodos da disposição de esgotos no solo**

Visando o posterior reúso, os esgotos brutos ou tratados podem ser aplicados no solo por um dos seguintes processos: irrigação, infiltração-percolação e escoamento à superfície.

O uso da irrigação, como técnica de tratamento e disposição de efluentes, foi desenvolvido para esgotos domiciliares e para uma quantidade variada de indústrias. Nesse processo, os esgotos são submetidos a fenômenos diferentes (PAGANINI, 1997):

- Infiltração até atingir o lençol subterrâneo, usualmente constituindo a maior parcela;
- Incorporação pela vegetação e parcial lançamento à atmosfera por meio de transpiração e evapotranspiração;
- Incorporação ao solo por reações químicas ou na forma de umidade podendo ser transitória ou permanente;
- Evaporação direta para a atmosfera.

Dependendo fundamentalmente da infiltração, os métodos de irrigação são aplicáveis preferencialmente em solos que apresentam uma camada superficial suficientemente permeável e espessa, acima do lençol subterrâneo.

As taxas de aplicação de esgotos e a frequência das regas devem possibilitar, ciclicamente, as condições de umidade e secagem necessárias à adequada aeração do solo. Além disso, a fim de preservar o papel das plantas, é igualmente necessário que o teor de umidade do solo e as concentrações dos elementos tóxicos não superem o que a vegetação tem condições de suportar.

A área total para a disposição dos esgotos deve ser modulada, e sua aplicação precisa ser feita sucessivamente em cada um dos módulos, em constante rodízio, para que sejam asseguradas as condições de umidade e secagem citadas.

A irrigação pode ser executada por cinco sistemas distintos de aplicação: aspersão, sulcos, inundação, gotejamento e gotejamento superficial.

3.8.3.1 Irrigação por aspersão

Este método prevê a condução do esgoto por tubulações pressurizadas e aplicação no solo sob a forma de gotas. A pressão é mantida por bombas ou reservatórios em cotas elevadas. O sistema aspersor pode ser fixo ou móvel.

Segundo Paganini (1997), é o sistema de irrigação de custo mais elevado por necessitar de bombas, tubulações e aspersores, além de mão de obra qualificada. Entretanto, é o mais eficiente do ponto de vista agrícola, porque obtém maior uniformidade de distribuição da massa líquida pelo terreno.

O transporte de esgotos por tubulações pressurizadas e a aplicação por aspersão possibilitam sua utilização em solos cobertos por qualquer tipo de vegetação, inclusive a florestal. Todavia, essa forma de irrigação pode apresentar problemas de saúde pública, como a possibilidade da formação de aerossóis, o que pode restringir seu emprego.

3.8.3.2 Irrigação por sulcos e canais

O sistema de aplicação por sulcos e canais é efetuado por gravidade, e a infiltração ocorre nos sulcos que são alimentados pelos canais. O terreno é preparado em sulcos e canais

alternados, com larguras e profundidades variando de acordo com o volume do efluente a ser disposto no solo.

A disposição habitual é aquela em que os canais acompanham aproximadamente as curvas de nível, e os sulcos seguem na direção de maior declive do terreno. Entretanto, em terrenos mais acidentados, a disposição pode ser totalmente inversa, com os sulcos acompanhando as curvas de nível e os canais de distribuição na direção de maior declividade (PAGANINI, 1997).

As principais vantagens deste sistema são a facilidade da operação de distribuição dos esgotos e o baixo custo de execução, composto basicamente pela terraplenagem dos canais e sulcos e das pequenas obras complementares.

3.8.3.3 Irrigação por inundação

Consiste na inundação do terreno (terraços) com o efluente. O volume disposto no solo é calculado considerando a vazão de rega, que é determinada pela escolha da vegetação e do tipo de solo.

Esse tipo de irrigação é aplicado, preferencialmente, em terrenos pouco ondulados ou planos, com pequenas declividades ─ 4 a 6% ─, dependendo do terreno e da vegetação. É especialmente indicado para culturas que suportam inundações periódicas.

As principais vantagens da irrigação por inundação são a facilidade de operação na distribuição dos esgotos e o baixo custo de execução, limitado à terraplenagem dos canais de distribuição e aos diques que circundam os terraços (PAGANINI, 1997).

3.8.3.4 Irrigação por gotejamento

Consiste na disposição de tubos com pequenos diâmetros, geralmente menores que 25 mm, com furos ou dispositivos que permitam o gotejamento uniforme ao longo de toda a sua extensão.

Esses tubos secundários de diâmetros pequenos dependem da instalação de sistema primário de distribuição (maiores diâmetros), de bombeamento e de sistemas de filtração para evitar o entupimento dos orifícios. Essa é uma das únicas desvantagens deste sistema.

A disposição dos tubos secundários é feita de forma que possibilita uma cobertura homogênea da vegetação, bem como permite que os orifícios, ou dispositivos de gotejamento, estejam instalados próximos ao sistema radicular da planta.

Os fatores que afetam a escolha do processo de irrigação e as medidas de proteção requeridas ao utilizar esgotos estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Método de irrigação, fatores que afetam a escolha e medidas protetoras necessárias

Método de irrigação	**Fatores que afetam a escolha**	**Medidas protetoras necessárias**
Inundação	Custos menores, Necessidade de nivelamento preciso do terreno.	Proteção completa para operários agrícolas, consumidores e manipuladores de culturas.
Sulcos	Custo baixo, Possível necessidade de nivelamento.	Proteção para operários agrícolas, Possivelmente necessária para consumidores e manipuladores de culturas.
Aspersores	Eficiência média do uso da água, Não há necessidade de nivelamento.	Algumas culturas da categoria B, principalmente árvores frutíferas, são excluídas, Distância mínima de 100 m de casas e estradas.
Subsuperficial ou localizada	Custos elevados, Elevada eficiência do uso da água, Alta produtividade agrícola.	Filtração para evitar entupimento de orifícios (exceto no caso de irrigação por "*bubbers*").

Fonte: HESPANHOL, 2002.

3.8.4 **Considerações para o reúso agrícola**

Existem muitos aspectos e detalhes importantes a serem considerados quando se pretende implantar um sistema de reúso para fins agrícolas. Entre eles, existem aqueles classificados como notáveis por serem de interesse agrícola e sanitário. São eles: riscos da salinidade, da contaminação por metais pesados, da contaminação biológica e, por fim, a potencialidade deletéria da lixiviação de elementos através do solo até os lençóis subterrâneos (PAGANINI, 1997).

3.8.4.1 Salinidade

Águas contendo sais solúveis, quando dispostas no solo, podem causar danos à vegetação pelo simples contato direto. Os sais podem se acumular no solo, dentro dos limites do sistema radicular das plantas, inibindo sua germinação e seu crescimento. Além disso, a disposição de esgotos com baixa salinidade, porém com alta percentagem de sódio intercambiável, ou seja, com significativa predominância dos íons de sódio, pode provocar a dissolução das partículas de argila. Isso acarretará na diminuição da permeabilidade do solo, causando também a redução de sua aeração e a inibição do desenvolvimento do sistema radicular das plantas (PAGANINI, 1997).

Os riscos da aplicação de águas com salinidade elevada, bem como os da aplicação do sódio e de outros íons específicos, devem ser considerados com rigor na análise da conveniência da utilização de esgotos para irrigação.

A salinidade do esgoto é importante, mas não deve ser considerada de forma isolada. Entretanto, devem ser estudadas as condições intervenientes como um todo, pois se alteram acentuadamente de local para local (PAGANINI, 1997). Dessa maneira, um esgoto com salinidade relativamente elevada, se analisado isoladamente, pode não representar grandes

riscos quando consideradas outras condições de contorno locais, que podem amenizar a aparente severidade da disposição.

A qualidade dos esgotos a serem dispostos, a salinidade do solo e a tolerância a esses sais pela vegetação a ser irrigada determinarão qual será a produtividade da cultura e o método de irrigação a ser usado.

3.8.4.2 Metais pesados

De forma geral, os metais pesados podem ser tóxicos para plantas e animais. Entretanto, a literatura especializada não relata casos de toxicidade crônica sobre esses organismos em decorrência da disposição de esgotos no solo, em razão das baixas concentrações desses elementos nesse tipo de água residuária (PAGANINI, 1997).

Em caso de disposição de efluentes industriais, há necessidade de pesquisas específicas.

Na infiltração e na percolação, os metais pesados são retidos pela maioria dos solos, principalmente quando são ricos em matéria orgânica e com pH > 7,0. Entretanto, quando o pH do solo é muito reduzido, não há retenção e acabam atingindo o lençol freático e os corpos de águas superficiais por lixiviação, poluindo-os (PAGANINI, 1997).

A disposição no solo de esgotos com altos teores de metais pesados deve ser avaliada com bastante critério. Sua acumulação ao longo do perfil vertical do solo pode propiciar fitotoxicidade às plantas, além de constituir em um risco à saúde humana, na medida em que os materiais podem ser introduzidos na cadeia alimentar pelo consumo de vegetais, carnes ou água contaminada (PAGANINI, 1997). .

Os mecanismos mais importantes, responsáveis pela remoção dos elementos-traço, são a adsorção em coloides de argila e de matéria orgânica na camada superficial do solo, a

precipitação como complexo hidroxilado insolúvel, e a formação de complexos organometálicos com a matéria orgânica da camada superficial do solo (PAGANINI, 1997).

3.8.4.3 Micro-organismos e contaminantes biológicos

A disposição de esgotos no solo com a finalidade de irrigação ou outra que utilize o sistema solo-planta propicia riscos imediatos e diretos de contaminação por micro-organismos. Esse risco de contaminação é maximizado em processos que utilizam a aspersão como sistema de distribuição, ou seja, que colocam em contato o líquido a ser disposto e a vegetação a ser consumida direta ou indiretamente (SHUVAL, 1990).

Embora os micro-organismos, inclusive os patogênicos, de maneira geral, sobrevivam por um período de tempo menor na superfície das culturas do que no solo e na água, podem se depositar em copas, fendas, hastes e talos que os protejam da dessecação, da irradiação solar, da alta temperatura, mantendo a umidade suficiente para dar condições ideais de sobrevivência, de modo a alcançar o período de colheita que viabiliza a ingestão, fechando o ciclo de contaminação.

O tempo de sobrevivência dos agentes patogênicos varia em relação ao tipo de micro-organismo e de vegetal. Vírus, bactérias e protozoários têm tempo de sobrevivência menor em relação aos ovos de helmintos, principalmente os de membranas mais espessas, como *Ascaris* e *Taenia sp*. Para vírus, o tempo de vida é de 4 a 60 dias; para bactérias, de 10 a 40 dias; enquanto para protozoários o tempo máximo de sobrevivência é de 15 dias. Os ovos de helmintos são mais resistentes e podem sobreviver vários meses (SIMONETI, 2006).

O arranjo mais crítico é a irrigação de esgotos brutos em legumes e verduras que serão consumidos crus, sem cozimento algum. Mesmo que a concepção do sistema preconize a irrigação de culturas que não venham a ser consumidas diretamente, e o efluente a ser

aplicado tenha tratamento primário ou secundário, o risco de contato ainda é grande. Isso porque, diferentemente da contaminação do solo e dos aquíferos, ou até mesmo da contaminação por aerossóis, além da existência de bactérias e vírus, também há protozoários (cistos) e ovos de helmintos que representam risco de contaminação por contato direto e sobrevivência por período mais extenso no meio ambiente, em relação aos outros micro-organismos (SHUVAL, 1990).

3.9 A CONTAMINAÇÃO POR OVOS DE HELMINTOS

As infecções causadas por helmintos estão entre os mais frequentes agravos infecciosos do mundo. Estima-se que o número de infectados seja de aproximadamente 3,5 bilhões de pessoas. A cada ano acontecem cerca de 60.000 óbitos decorrentes das infecções por *Ascaris lumbricoides* (WHO, 1996).

Os helmintos (vermes) são animais metazoários (organismos pluricelulares), parasitas de animais e do homem. Compreendem três ramos ou filos do reino animal: os platelmintos, vermes achatados em forma de folha ou fita e com tubo digestivo ausente ou rudimentar; os nematelmintos, vermes cilíndricos com tubo digestivo completo; e os anelídeos, que não são parasitas.

O homem é o hospedeiro definitivo e específico de várias espécies de helmintos, possibilitando que se desenvolvam, atinjam a maturidade e se instalem em localizações anatômicas características, comumente no intestino. A Tabela 3 mostra os principais helmintos intestinais:

Tabela 3 - Helmintos intestinais e tamanho dos ovos

Filo	**Espécies prevalentes**	**Tamanho dos ovos (µm)**
Platelmintos	*Taenia solium*	-
	Taenia saginata	*40 x 35*
	Schistosoma mansoni	*50 x 150*
Nematelmintos	*Ascaris lumbricóides*	*55 x 40*
	Ascaris suum	*65 x 45*
	Trichuris trichiura	*22 x 50*
	Ancylostoma duodenalis	*60 x 40*
	Necator americanus	-

Fonte: MARTINS, 2000.

Os nematelmintos são helmintos cujo ciclo evolutivo, em parte, pode ocorrer no solo ─ fonte de infecção, contendo larvas infectantes ou ovos ─, prescindindo de outro hospedeiro além do homem. Quanto ao ciclo de desenvolvimento, o hospedeiro que alberga as formas sexuadas adultas elimina os ovos com as fezes. Nesses ovos, desenvolvem-se as larvas que, após um período variável de tempo, tornam-se infectantes (MARTINS, 2000).

A maturação das larvas até o estágio infectante pode ocorrer por completo no interior do ovo. A larva permanece no interior do ovo (*Ascaris lumbricoides*, *Enterobius vermicularis* e *Trichuris trichiura*) até que seja ingerido e ocorra a sua destruição pelas secreções digestivas do hospedeiro, ou pela ação de enzimas líticas do parasita. A infecção acontece, então, pela ingestão do ovo. No caso do *Enterobius vermicularis* e do *Trichuris trichiura*, habitualmente não há invasão da mucosa e, uma vez exposto o ovo, a larva se desenvolve até o estágio adulto sem deixar a luz intestinal ─ ciclo direto ─ (MARTINS, 2000).

Em outras espécies (*Necator americanus* e *Ancylostoma duodenalis*), a maturação da larva até o estágio infectante continua após sua liberação pela eclosão do ovo. A capacidade de infectar só se estabelece algum tempo depois da saída do ovo. As larvas, dotadas de

movimento, penetram ativamente através da pele, chegando à circulação venosa e encaminhando-se até os pulmões (SIMONETI, 2006).

No caso do *Ascaris lumbricoides*, a larva, uma vez livre na luz do trato gastrointestinal, penetra ativamente pela mucosa (do ceco) e ganha a circulação venosa, encaminhando-se por meio dela em direção aos pulmões (ciclo pulmonar).

A ascaridíase, por ser extremamente comum em diversas partes do mundo, é uma infecção de particular importância para os programas de saneamento. Outra razão deve-se ao fato de os ovos de *Ascaris* serem extremamente resistentes no meio ambiente, capazes de sobreviver até sete anos no solo, sendo de difícil eliminação em processos de tratamento (SIMONETI, 2006).

As fêmeas de *Ascaris lumbricoides* têm entre 200 e 400 mm de comprimento, enquanto os machos medem de 150 a 300 mm. Os ovos férteis formam ovoide que medem de 45 a 70 micrômetros, por 35 a 50 micrômetros. As fêmeas põem até $2{,}10^4$ ovos por dia, sendo cerca de 15% normalmente inférteis. Sob condições ideais de umidade do solo, sombreamento e temperatura, um período mínimo de 10 a 15 dias é necessário para que 75% dos ovos frescos se tornem infectos. Quando os ovos são ingeridos pelo contato com as mãos, alimentos, utensílios ou poeira, as larvas eclodem no duodeno e são levadas pelos vasos linfáticos e sanguíneos, através do fígado e do coração, até os pulmões. As larvas penetram pelas passagens e atingem a traqueia onde, ao serem engolidas, passam pelo esôfago e atingem o intestino fino. Elas se desenvolvem em vermes adultos por 60 a 75 dias e vivem por até 1,5 anos. Grandes infestações causam distúrbios alimentares, sono, vômitos e incapacidade quase total para o trabalho (SIMONETI, 2006).

3.10 MEDIDAS PARA PREVENÇÃO DOS GRUPOS DE RISCO

Os grupos de risco associados a sistemas de reúso de água para fins agrícolas são: consumidores de culturas, carne e leite originários de campos e irrigados com esgotos, operários agrícolas e suas famílias, manipuladores ou transportadores de colheitas, e populações localizadas nas proximidades de campos irrigados por sistemas de aspersores (HESPANHOL, 2002).

A saúde pública desses grupos de risco pode ser protegida pela aplicação de quatro medidas básicas. São elas: tratamento dos esgotos, seleção e restrição de culturas, técnicas de aplicação dos esgotos e controle da exposição humana (HESPANHOL, 2002).

Nesta dissertação, foca-se como medida de prevenção o tratamento dos esgotos, salientando a remoção de ovos de helmintos.

4. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO

Os critérios de tratamento para reúso agrícola são distintos daqueles estabelecidos para a descarga de efluentes líquidos em corpos de água. É extremamente benéfico que os efluentes tratados contenham concentrações significativas de matéria orgânica, assim como o máximo possível dos nutrientes e micronutrientes contidos no esgoto bruto. Portanto, os critérios de tratamento para reúso agrícola devem estar associados a manutenção da DBO até um máximo de, aproximadamente, 100 miligramas por litro, manutenção de nutrientes, e eliminação de organismos patogênicos em níveis estabelecidos pela legislação local (HESPANHOL, 2002).

A Tabela 4 sumariza as informações disponíveis sobre a remoção de bactérias e helmintos presentes em esgotos domésticos por diversos sistemas de tratamento, indicando em quais as diretrizes da Organização Mundial da Saúde para irrigação irrestrita (Tabela 1) podem ser atendidas (HESPANHOL, 2002).

Tabela 4 - Remoção de organismos patogênicos em sistemas de tratamento de esgotos

Tratamento	Remoção (log_{10})			
	Bactérias	Helmintos	Vírus	Cistos
Sedimentação Primária:				
Simples	0 - 1	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Com coagulantes	1 - 2	1 - 3[f]	0 - 1	0 - 1
Lodos ativados[a]	0 - 2	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Filtro biológico[a]	0 - 2	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Lagoa aerada[b]	1 - 2	1 - 3	1 - 2	0 - 1
Valo de oxidação[a]	1 - 2	0 - 2	1 - 2	0 - 1
Desinfecção[c]	2 - 6[f]	0 - 1	0 - 4	0 - 3
Lagoa de estabilização[d]	1 - 6[f]	1 - 3[f]	1 - 4	1 - 4
Reservatórios de acumulação[e]	1 - 6[f]	1 - 3[f]	1 - 4	1 - 4

Notas:
a. Incluído decantador secundário
b. Incluída lagoa de sedimentação
c. Cloração ou ozonização

d. A eficiência depende do número de unidades em série e outros fatores ambientais
e. A eficiência depende do tempo de detenção
f. Com projeto e operação adequados, as diretrizes para irrigação irrestrita podem ser atendidas

De acordo com a Tabela 4, a remoção de ovos de helmintos não pode ser atendida por sistemas convencionais de tratamento, tais como os sistemas de lodos ativados, filtros biológicos ou desinfecção (HESPANHOL, 2002).

4.1 SEDIMENTAÇÃO

O intervalo de tempo para os ovos de helmintos sedimentarem dependem do seu peso. O peso dos ovos de helmintos, particularmente do *Ascaris lumbricoides*, faz com que se sedimentem mais rapidamente. Cistos de protozoários são mais leves e, portanto, demoram mais para sedimentar, tornando-os mais aptos a serem encontrados no efluente líquido (FOSTER; ENGELBRECHT, 1974). Cram (1943) mostra que, após 3 horas, nem todos os cistos de *E. histolytica* sedimentam no fundo de um tanque de 66 cm de profundidade. Em 2,5 horas, alguns ovos de ancilóstomo são encontrados no topo, e 1/3 surgem no fundo de um tanque experimental de 66 cm de profundidade.

Liebmann (1964) reporta que um período de sedimentação de 2 horas foi suficiente para remover todos os ovos com gravidade específica igual ou maior que 1,1. Os ovos de *Taenia saginata* sedimentam 68% em esgoto bruto após 2 horas, e 89% em 3 horas. Liebmann também aponta que, em caso de alta concentração de detergentes no esgoto, há interferência na sedimentação dos ovos. Os efeitos de corantes e vários outros distúrbios no tanque afetam igualmente a eficiência da sedimentação. Koot (1967), em um estudo sobre a prevalência de *E. histolytica* em Israel, destaca que os cistos aparecem no efluente, assim como no biossólido.

Já Newton e seus companheiros (1949) consideram que 1 a 2 horas de sedimentação é o tempo necessário para remover ovos de *Taenia saginata*, em uma planta de laboratório. Reinoso e Becares (2007) mostram que a remoção de ovos de helmintos provenientes de dejetos de suínos chega a 75% com a sedimentação primária.

Os ovos de helmintos são sedimentáveis, porém, somente a sedimentação simples não é suficiente para atingir a remoção recomendada pela OMS para uso em irrigação irrestrita (Tabela 4).

4.2 FLOCULAÇÃO

Liebmann (1964) aponta que vários agentes químicos da floculação aperfeiçoam a taxa e a eficiência de sedimentação de ovos de parasitas. Cram (1943) observa o uso de agente floculante particularmente para auxiliar na sedimentação de cistos e *E. histolytica*, Koot (1967) salienta as dificuldades em assegurar que todos os cistos sedimentem, considerando cistos de *E. histolytica* no efluente de uma planta em Israel.

Em geral, a coagulação química do esgoto bruto, seguida de sedimentação, pode remover de 60 a 90% dos sólidos suspensos totais, 40 a 70% de DBO, 30 a 60% de DQO, 70 a 90% de fósforo, e 80 a 90% das bactérias. Em comparação, sedimentação sem a adição de coagulante remove apenas 40 a 70% dos sólidos suspensos totais, 40 a 70% de DBO, 25 a 40% de DQO, 5 a 10% de fósforo, e 50 a 60% das bactérias (METCALF; EDDY, 1991).

De acordo com a Tabela 4, a floculação seguida da sedimentação com projeto e operação adequados pode atender às diretrizes para irrigação irrestrita da OMS.

4.3 DESINFECÇÃO QUÍMICA

Ovos de parasitas e cistos são extremamente resistentes a agentes químicos que, normalmente, destroem bactérias e vírus. Concentrações de agentes químicos (cloro e ozônio) usados para a desinfecção não têm efeito sobre os ovos de helmintos e cistos de protozoários. Dos vários ovos de helmintos estudados, os de *Ascaris* mostraram ser os mais resistentes à destruição por produtos químicos (LIEBMANN, 1964).

Kamizoulis (2006) cita que a desinfecção com cloro e a ozonização alcançam uma remoção de cerca de 90% dos ovos de helmintos (log_{10} 0-1). Essa remoção é insuficiente para adequar o esgoto ao reúso agrícola irrestrito. Bertolucci et al. (1998) afirmam que os ovos de helmintos são altamente resistentes a desinfecção e podem se desenvolver em ambientes hostis.

4.4 LODOS ATIVADOS

A sedimentação e aeração são as operações responsáveis pela redução dos organismos patogênicos em sistemas de lodos ativados. Primeiramente, a sedimentação é mais efetiva na remoção de patógenos de maior tamanho, como ovos de helmintos, mas bactérias associadas a sólidos também são removidas. Boa parte da remoção ocorre devido principalmente à adsorção de micro-organismos aos flocos. A capacidade de remoção de vírus em sistemas de lodos ativados é atribuída, em especial, à remoção de sólidos já que os vírus tendem a se associar aos sólidos que são removidos na fase de sedimentação secundária. Sistemas de lodos ativados removem de 0 a 2 log de bactérias, de 0 a 2 log de ovos de helmintos, e de 0 a 1 log de vírus e cistos. Essas remoções não são suficientes para obedecer às diretrizes da OMS para o reúso do esgoto na irrigação agrícola (HESPANHOL, 2002).

Kamizoulis (2006) destaca que os processos secundários de tratamento de esgotos atingem uma remoção de 1 a 2 log, ou seja, a concentração de ovos de helmintos no esgoto

tratado será superior a 1 ovo por litro. Há, portanto, a necessidade de um tratamento adicional para o reúso adequado desse esgoto na agricultura.

4.5 SISTEMAS DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

São sistemas de tratamento biológico integrados por unidades em série de lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação. Em essência, as unidades anaeróbias e facultativas são designadas para a remoção de matéria orgânica, e a lagoa de maturação realiza a remoção de patógenos, embora também ocorra remoção de patogênicos nas lagoas anaeróbias e facultativas e remoção de material orgânico nas lagoas de maturação. A qualidade do efluente final depende da temperatura local e do número e do tamanho das lagoas de maturação.

Havendo tempo de detenção suficiente, as lagoas de oxidação podem atingir significante remoção de patógenos, especialmente de ovos de helmintos, porém, ocupam um grande espaço físico para a implantação. A inativação ou remoção de patógenos nas lagoas de estabilização é controlada por vários fatores, tais como: temperatura, luz solar, pH, presença de bacteriófagos, predação por outros micro-organismos e adsorção em sólidos. As bactérias podem ser reduzidas em 90 a 99%, dependendo do tempo de detenção. A eficiência de lagoas de oxidação depende, principalmente, do tempo de detenção do efluente, da radiação solar e da temperatura (MIL et al., 1992).

Em função desses fatores, a eficiência na remoção de bactérias e matéria orgânica varia de acordo com a localização e com a estação do ano. Por exemplo, verificou-se uma inativação de polivírus de 99% em uma lagoa de estabilização, com 5 dias de detenção; no inverno foram necessários 25 dias para a obtenção do mesmo percentual (FUNDERBURG et al., 1978). Ovos de helmintos podem ser removidos em sistemas de lagoas de estabilização com o tempo de detenção de 10 dias (SCHWARTZBROD et al., 1989).

Segundo Silva (1986), as lagoas em série constituídas por unidades anaeróbias, facultativas e de maturação, com tempos de detenção hidráulicos médios de 10 a 30 dias (dependendo da temperatura), podem ser projetadas para atender às diretrizes da Organização Mundial da Saúde para coliformes fecais e para helmintos.

Cavalcanti et al. (2001) e Von Sperling et al. (2002a, 2002b) comentam que a remoção de ovos de helmintos é assumida como um processo de sedimentação discreta que, na teoria, está associada à taxa de aplicação hidráulica superficial ($m^3/m^2.h$) e independe da profundidade.

4.6 A FILTRAÇÃO TERCIÁRIA DE ESGOTOS SANITÁRIOS

A filtração é uma operação muito usada no tratamento de água potável, mas, em tratamento de esgotos, é utilizada apenas como uma etapa terciária. A filtração é, atualmente, usada na remoção de sólidos suspensos (incluindo matéria orgânica particulada) de residuais líquidos, tratados por processos biológicos ou químicos.

A operação de filtração de esgotos é muito distinta da filtração de água natural, pois os esgotos possuem vários fatores que influem na operação, tais como, maior concentração de sólidos e presença de matéria orgânica solúvel e particulada. A combinação dos sólidos retidos no filtro com a matéria orgânica particulada retida torna o mecanismo de filtração mais complexo do que em sistemas de tratamento de água potável. Como a operação de filtração é influenciada por vários fatores, estudos pilotos são recomendados para adequação do sistema de acordo com as características do residual a ser tratado (METCALF; EDDY, 1991).

Os processos convencionais de tratamento, como lodos ativados, filtros biológicos ou desinfecção, não são eficientes para atender à diretriz da OMS para reúso agrícola, com relação à presença de ovos de helmintos (HESPANHOL, 2002).

Devido ao tamanho desses ovos, podem ser removidos pelo processo de filtração em leito granular. O sistema de filtração é uma alternativa muito interessante para o tratamento de esgotos que visam o reúso agrícola, pois parte dos nutrientes e a matéria orgânica são mantidos no esgoto. Além disso, trata-se de um tratamento compacto e de simples operação e manutenção (JIMENEZ et al., 2000).

Usualmente, a remoção de cistos de Giárdia Lamblia é maior do que a remoção de oocistos de *cryptosporidium* porque os cistos possuem tamanho maior (ROSE; CARNAHAM, 1992; GERBA; ROSE, 1996). A remoção de vírus e bactérias fica em torno de 90% ou menos. A adição de auxiliares de filtração, como os polímeros, pode aumentar a remoção de vírus para 99% (USEPA, 1992).

Gerba et al. (1985) avaliaram filtros de camadas simples, dupla camada e de três camadas filtrantes para remoção de coliformes, vírus e ovos de helmintos (*Ascaris lumbricoides*). Segundo os resultados obtidos, não foram detectados ovos após os filtros estudados.

Quinzaños et al. (2006) testou um sistema de micropeneiras (com 10 μm de abertura) para a remoção de ovos de helmintos em solução sintética, para avaliar a eficiência de remoção foram usados ovos padronizados de *Trichuris eggs*. A eficiência foi de 100%, para uma alimentação de cerca de 1.000 ovos de *Trichuris*. A Figura 2 mostra os ovos retidos nas micropeneiras.

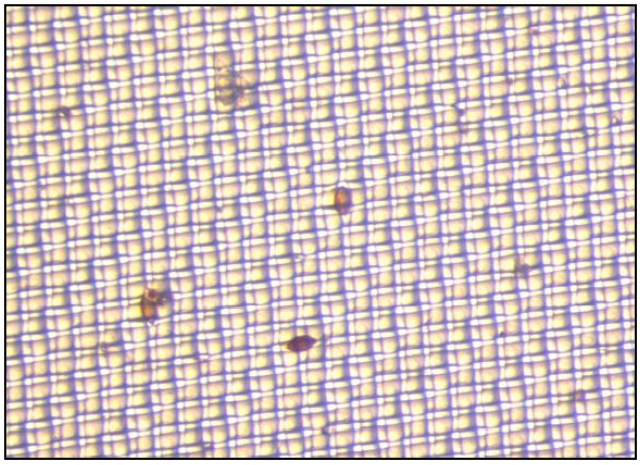

Figura 2 - Retenção dos ovos de *Trichuris* por micropeneiramento

Jimenez et al. (2000) estudou a eficiência da remoção de ovos de helmintos em um sistema de filtração de esgoto doméstico, em filtros à gravidade usando leito de areia e esferas de PVC, com a finalidade do reúso do esgoto tratado na irrigação agrícola. A filtração foi usada após um tratamento físico-químico do residual proveniente da Cidade do México. Tanto o leito de areia quanto o de esferas de PVC foram muito eficientes na remoção dos ovos, reduzindo a concentração para menos de 0,4 ovos de helmintos/litro para concentração média na alimentação dos filtros de 22 ovos de helmintos por litro, adequando o esgoto tratado com destino à irrigação agrícola de acordo com as recomendações das diretrizes da OMS.

4.6.1 O SISTEMA DE FILTRAÇÃO PROPOSTO E AS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Como não foram encontrados estudos na literatura que mostrem a eficiência da filtração em altas concentrações de ovos de helmintos e operando com esgotos domésticos, por exemplo, 1000 ovos por litro, concentração que pode ser encontrada em populações infectadas segundo a OMS (1989), optou-se por realizar uma de pesquisa em que fosse testada a eficiência da filtração em leito granular a gravidade em condições de operação distintas das encontradas em estudos já realizados.

Além disso, não foram encontrados estudos que comparassem a eficiência da remoção de ovos de helmintos utilizando-se diferentes meios filtrantes, tais como: areia, carvão antracitoso e zeólitos, utilizando esgotos domésticos para a produção de água para reúso.

A areia e o carvão antracitoso são meios filtrantes tradicionalmente conhecidos na filtração, mas o zeólito apesar de pouco conhecidos é um material com grande potencial de aplicação de aplicação devido a alta dureza e porosidade dos grãos (MUMPTON, 1981).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, serão apresentados os materiais e os métodos usados no desenvolvimento deste trabalho.

5.1 MATERIAIS

5.1.1 **Meios filtrantes**

- Areia usada na granulometria de 0,35 a 1,2 mm, com coeficiente de desuniformidade de 1,7 e tamanho efetivo de 0,60 mm. Marca ACOSAN.

- Carvão antracitoso foi usado na granulometria de 0,6 a 2,0 mm, com coeficiente de desuniformidade de 1,8 e tamanho efetivo de 0,85 mm. Marca ACOSAN.

- Zeólito, meio filtrante utilizado na granulometria de 0,35 a 1,2 mm, com coeficiente de uniformidade de 1,5 e tamanho efetivo de 0,6 mm. Marca WATERCEL.

- Na base das colunas, utilizou-se um suporte padronizado de acordo com a Tabela 5. Marca ACOSAN.

Tabela 5 - Suporte usado na montagem das colunas

Tamanho (mm)	Espessura (cm)
2,4 a 4,8	7,5
4,8 a 12,5	7,5
12,5 a 19,0	10,0
19,0 a 38,0	10,0
38,0 a 63,0	15,0

5.1.2 **Sistema de filtração**

Este sistema é composto por:

- Três colunas filtrantes com 2,0 m de altura total e 0,20 m de diâmetro, construídas com polipropileno e revestidas com fibra de vidro.
- Três caixas de polipropileno revestidas com fibra de vidro, com capacidade para armazenar 1.000 litros em cada reservatório.
- Sistema de agitação usado para agitar a solução inicial, evitando que os ovos de helmintos sofram decantação no reservatório de alimentação do sistema. A agitação foi realizada com a utilização de duas bombas submersíveis com vazão de 7m³/h em cada bomba, e 0,5 HP de potência (Modelo, 5 K 9000).
- Tubulação, válvulas e conexões em PVC.

As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, o fluxograma do processo de filtração e uma foto do sistema com os principais equipamentos usados. As colunas de filtração foram usadas tanto para os ensaios com solução sintética quanto para os testes com esgoto tratado.

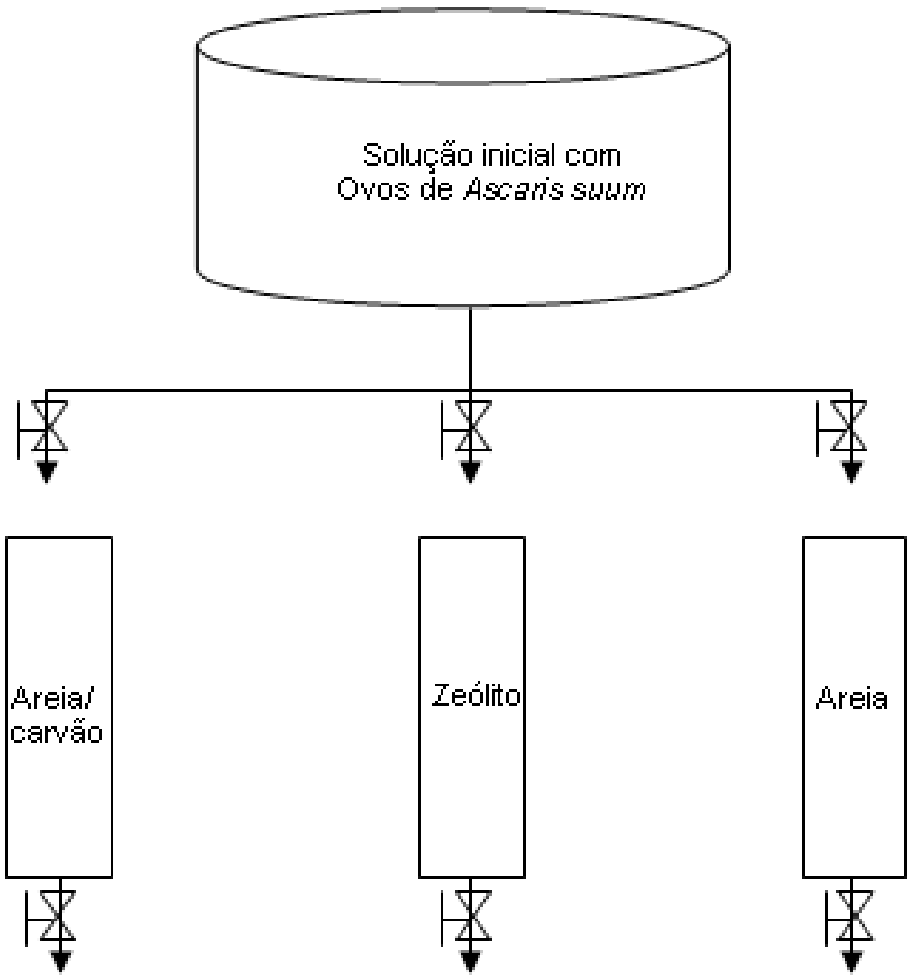

Figura 3 - Fluxograma do processo de filtração à gravidade nas colunas de areia, zeólito e areia/carvão

Figura 4 - Foto do sistema de filtração à gravidade com três colunas de filtração (areia/carvão, zeólito e areia), um reservatório para alimentação e outro para o filtrado

Na Tabela 6, estão relacionadas as principais características do sistema de filtração, dimensões das colunas e operação.

Tabela 6 - Características do sistema de filtração

Parâmetro	Colunas (areia, zeólito e carvão antracitoso)
Diâmetro (m)	0,20
Altura (m)	2,00
Área de filtração (m²)	0,03
Operação	taxa declinante
Retrolavagem	água

5.1.3 **Reagentes e equipamentos laboratoriais**

Ovos de helmintos padronizados: na alimentação das colunas, foi usada uma solução sintética na qual foram adicionados ovos padronizados de suínos *Ascaris suum* como indicador para helmintos. Os ovos de *Ascaris suum* usados foram obtidos do biossólido de dejetos de suínos infectados com *Ascaris*, depois, foram separados e concentrados (SIMONETI, 2006). O emprego de ovos de *Ascaris suum*, como indicador de helmintos, foi baseado na alta resistência já que, de todos os ovos de parasitas e cistos encontrados no biossólido, os ovos de *Ascaris* são os mais resistentes às influências químicas e mecânicas, além de serem mais fáceis de obter e identificar. Ademais, estão presentes nos esgotos com alta frequência (SIMONETI, 2006).

Solução de sulfato de zinco com densidade de 1,2. Pesou-se 454 g de $ZnSO_4$ em 1 litro de H_2O destilada. Dissolveu-se e ajustou-se a gravidade específica com um densímetro para 1,2.

Lugol: corante a base de iodo usado na identificação dos ovos de *Ascaris suum*.

Centrífuga de topo da marca HERAEUS, modelo MEGAFUME 1.0.

Contador de partículas Eigth Channel Particle Counter 8000 A, da marca HIAC ROYCO. Amostrador Liquid Syringe Sample 3000 A.

Rotores para sustentar quatro tubos de centrífuga de plástico de 50 ml, da marca HERAEUS, modelo MEGAFUME 1.0.

Micropipeta da marca EPPENDORF, modelo RESEARCH.

Balança eletrônica de precisão, marca MARTE, modelo, LC2.

Peneiras de 2; 1,18; 0,60; 0,42; 0,35; 0,15; 0,075 mm de abertura.

Membranas de acetato de celulose, com 0,45 mícron de abertura de poro.

Microscópio ótico, marca OLYMPUS, modelo CH-2.

Vidraria de laboratório: erlenmeyers, tubos cônicos para centrífuga de 15 e 50 ml, béqueres, balões volumétricos e vidros relógio utilizados no preparo das soluções.

Turbidímetro da marca TECNOPON, modelo TB 1000.

pHmetro, modelo CAAL pHBANC.

Colorímetro, modelo Smart 2 da marca Policontrol.

5.2 MÉTODOS

5.2.1 **Análise granulométrica**

Para um ensaio de classificação granulométrica dos meios filtrantes, utilizou-se a metodologia da NBR 7181, da ABNT (NBR 7181, 1994).

Inicialmente, o material foi seco de 105 a 110 graus Celsius, até a constância da massa, e com agitados mecânicos passou-se o material nas peneiras de 2,0; 1,2; 0,6; 0,42; 0,35; 0,15 e 0,075 mm, verificando as massas retidas e acumuladas em cada peneira. Para o cálculo do coeficiente de desuniformidade, utilizou-se a equação 1, em que D60 corresponde ao tamanho de partícula passante em 60% da massa de leito filtrante, e D10 a 10%:

$$C = \frac{D60}{D10} \qquad \text{(equação 1)}$$

5.2.2 **Porosidade total do leito**

Para o ensaio de porosidade total, utilizou-se uma proveta de 100 ml Colocaram-se os meios filtrantes na proveta e, em seguida, o volume vazio foi preenchido com água. O volume

de vazios corresponde à massa que a água ocupa do leito. A equação 2 mostra como se obteve a porosidade do leito:

$$\varepsilon = \frac{m(g)}{100(cm^3)xd(g/cm^3)} x100(\%) \qquad \text{(equação 2)}$$

Legenda:
ε → é a porosidade total do leito (%)
m → é a massa de água que ocupa o volume de vazios
d → é a densidade da água

5.2.3 **Massa específica aparente**

Para a determinação da massa específica aparente, utilizou-se a norma MB-3413 (NBR 14234, 1998) da ABNT. Secou-se aproximadamente 150 g de amostra em estufa a (110+/−5)ºC durante 1 hora. Em seguida, resfriou-se em dessecador até a temperatura ambiente. Pesou-se 100,0 g de amostra (m_1) com exatidão de 0,1 g, depois, transferiu-se quantitativamente a amostra para um balão volumétrico de 500 ml, onde se adicionou água destilada até cobrir a amostra. Após isso, avolumou-se com água destilada, pesou-se o balão volumétrico com água destilada (amostra (P_1)). A seguir, realizou-se uma prova em branco com água destilada, usando o mesmo balão volumétrico previamente limpo (P_2).

A massa específica (ME) é expressa em g/cm³ e calculada pela equação abaixo:

$$ME = \left(\frac{m1}{P2 + (m1 - P1)} \right) x(d) \qquad \text{(equação 3)}$$

Legenda:
ME → é a massa específica
P_1 → é a massa do balão volumétrico, mais água destilada e mais amostra, em gramas
P_2 → é a massa do balão volumétrico, mais água destilada, em gramas
m_1 → é a massa da amostra, em gramas
d → é densidade da água em g/cm³

5.2.4 **Avaliação da altura de leito filtrante**

Nas colunas de areia e zeólito, variou-se a altura de leito de (0,35; 0,55; 0,70 e 1,0 m), e para a coluna de areia/carvão antracitoso [(0,15 e 0,45), (0,25 e 0,70) e (0,35 e 1,0) m].

Para a avaliação da eficiência de cada altura, preparou-se uma solução sintética com cerca de 1.000 ovos de *Ascaris suum* por litro e utilizou-se a taxa de filtração de 7,5 $m^3/m^2.h$. Para cada altura de leito foram coletadas 6 amostras no intervalo de tempo de 30 minutos, sendo coletadas a cada 10 minutos de filtração e realizadas em duplicata.

Nesta etapa do trabalho, não foram realizadas carreiras completas de filtração já que, como o preparo da solução sintética com ovos de helmintos foi realizado com água potável, a perda de carga era muito pequena devido à baixa presença de sólidos suspensos totais.

5.2.5 **Avaliação da taxa de filtração**

A influência da taxa de filtração na remoção dos ovos de *Ascaris suum* foi determinada ao se fixar a altura de leito ótima, variando a velocidade de filtração. Nas colunas de areia e zeólito, fixou-se a altura de leito em 1,0 m, pois foi essa altura que apresentou as maiores eficiências de remoção. Na coluna de areia/carvão antracitoso, a altura ideal foi de (0,35; 1,0 m) de areia e carvão antracitoso, respectivamente. A taxa de filtração foi variada de 7,5; 10 e 15 $m^3/m^2.h$, sendo que para avaliar cada velocidade de passagem preparou-se a solução de alimentação com cerca de 1.000 ovos/litro de *Ascaris suum*, filtrando durante um intervalo de 30 minutos. As amostras foram coletadas no intervalo de 10 minutos para cada coleta realizada em duplicada. Para avaliar cada taxa de filtração, coletou-se 6 amostras de água filtrada em cada coluna de teste.

5.2.6 **Ensaios com esgoto tratado**

Para avaliar a influência dos sólidos, da matéria orgânica e de outros possíveis interferentes do processo de filtração, montou-se a unidade piloto para operar com esgotos tratados. As colunas de filtração foram montadas na ETE do ABC da SABESP, situada no município de São Paulo.

Os ensaios foram realizados com o esgoto tratado pelo processo de lodos ativados. Os filtros de areia, zeólito e carvão antracitoso foram instalados após os decantadores secundários da ETE, recebendo o efluente final tratado.

Visando avaliar a eficiência do processo de filtração, utilizou-se a taxa de 15 $m^3/m^2/h$, altura de leito de 1,0 m para a coluna de areia e de zeólito, e 0,30 m e 1,0 m para o filtro de dupla camada, areia e carvão antracitoso, respectivamente.

Na Figura 5, é mostrado o decantador secundário da ETE do ABC, onde se realizou os ensaios com esgoto tratado.

Figura 5 - Decantador secundário ETE do ABC (local onde se coletou o esgoto para ensaio)

Para avaliar o desempenho do processo de filtração, foi necessária a dosagem de *Ascaris suum*, essa dosagem foi realizada pelo uso de um dosador de diafragma. A Figura 6 mostra o dosador usado nos experimentos.

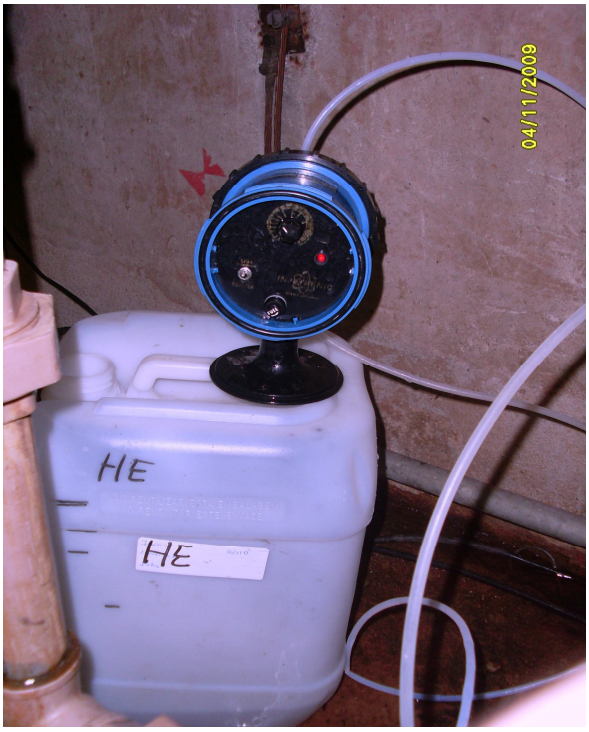

Figura 6 - Dosador usado para a dosagem dos ovos de *Ascaris suum*

5.2.7 **Análise dos ovos de helmintos**

A técnica para a detecção de parasitos em amostras líquidas usada foi a metodologia desenvolvida por Ayres e Mara (1996).

As amostras foram analisadas em nível quantitativo, cuja análise consiste na determinação numérica de ovos de helmintos em determinada alíquota da amostra.

Para o cálculo do número de parasitos por litro, utilizou-se a equação 4, apresentada a seguir:

$$\text{Nº parasitos/ Litro} = \frac{A \times X}{P \times V}. \qquad \text{(equação 4)}$$

Legenda:
A = número de ovos de helmintos quantificados na câmara de Sedgwick-Rafter
X = volume do produto final (ml)
P = volume da câmara de Sedgwick-Rafter
V = volume original da amostra (Litro)

Para cada amostra de filtrado, foram coletados 10 litros de volume e 1 litro para a solução inicial contaminada com maior concentração de ovos de *Ascaris*. As amostras foram colocadas para decantação durante 12 horas e, após a decantação, foram removidos por meio de sifão, 8 litros do sobrenadante, os 2 litros restantes foram novamente postos para decantação por mais 12 horas. Após esse intervalo, 1,5 litros do sobrenadante foram removidos com uso do sifão, os 100 ml foram colocados em tubos de centrífuga e centrifugados a 2.500 rpm por 15 minutos. Depois da centrifugação, o sobrenadante foi removido e, no sólido, adicionou-se 5 ml de uma solução de sulfato de zinco e duas gotas de lugol (corante). Na solução final, foi realizada a contagem do número de ovos de *Ascaris* presentes por meio de um microscópio com aumento de 100 vezes.

5.2.8 **Análise de SST, cor, DQO e coliformes fecais**

A análise de sólidos em totais em suspensão (SST), a demanda química de oxigênio (DQO), presença de coliformes fecais e cor foram realizadas de acordo com a metodologia do Standard Methods (APHA, 19th Edition, 1995).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS FILTRANTES

6.1.1 **Areia**

A Tabela 7 mostra a distribuição granulométrica da areia utilizada na filtração. A Figura 7 apresenta o percentual de massa acumulado passante, em função do tamanho da partícula de areia.

Tabela 7 - Distribuição granulométrica da areia

Peneira (mm)	Massa média retida (g)	Acumulado passante (%)
1,30	0,00	100,00
1,18	232,77	76,72
0,60	653,21	11,38
0,43	69,26	4,45
0,35	24,59	1,99
0,15	15,19	0,47
0,08	3,89	0,08
Fundo	0,85	0,00

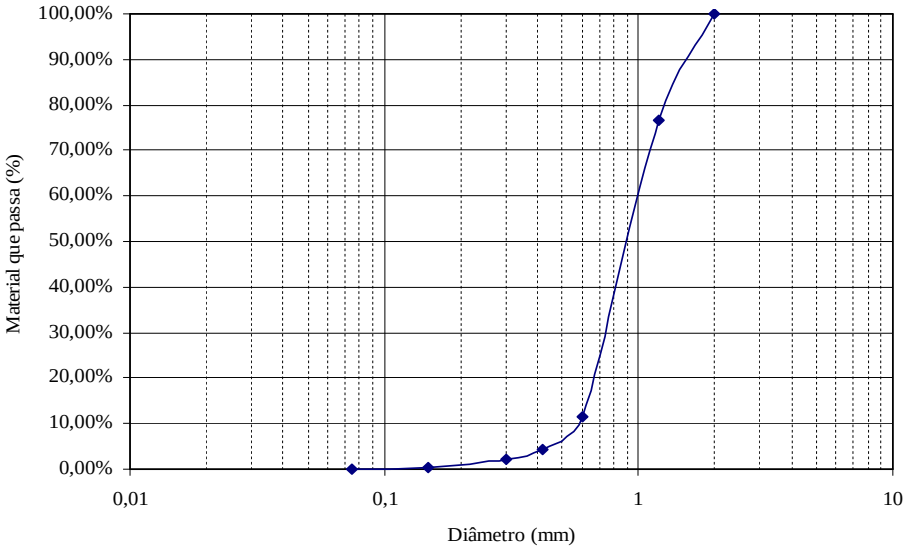

Figura 7 - Porcentagem acumulada passante em função do tamanho de partícula (areia)

De acordo com os resultados mostrados na Figura 7, o diâmetro corresponde a 10% de material passante, (D10) é de 0,60 mm e (D60) é de 1,0 mm. Isso resulta em um coeficiente de desuniformidade de 1,7.

6.1.2 **Zeólito**

A Tabela 8 mostra a distribuição granulométrica do zeólito utilizada na filtração. A Figura 8 destaca o percentual de massa acumulado passante em função do tamanho de partícula de zeólito.

Tabela 8: Distribuição granulométrica do zeólito

Peneira (mm)	Massa média retida (g)	Acumulado passante (%)
1,30	0,00	100,00
1,00	151,50	84,82
0,60	747,75	9,93
0,43	70,30	2,88
0,30	18,25	1,06
0,15	8,14	0,24
0,08	1,68	0,07
Fundo	0,72	0,00

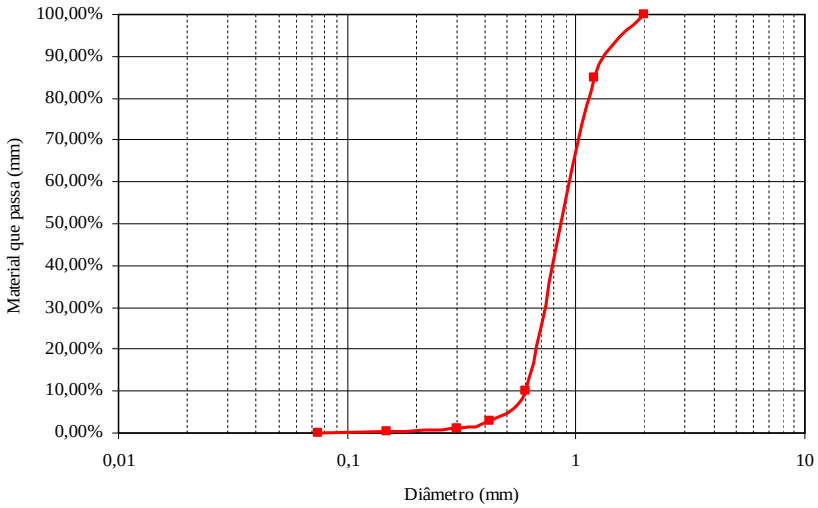

Figura 8 - Porcentagem acumulada passante em função do tamanho de partícula (zeólito)

Pelos resultados da Figura 8, calculou-se o diâmetro corresponde a 10% de material passante: (D10) 0,6 mm e (D60) 0,92 mm. O resultado é um coeficiente de desuniformidade de 1,5.

6.1.2 **Carvão antracitoso**

A Tabela 9 apresenta a distribuição granulométrica do carvão antracitoso utilizado na filtração, ao passo que a Figura 9 mostra o percentual de massa acumulado passante em função do tamanho de partícula de carvão antracitoso.

Tabela 9 - Distribuição granulométrica do carvão antracitoso

Peneira (mm)	Massa retida média (g)	Acumulado passante (%)
2,00	28,50	97,15
1,18	811,50	15,85
0,60	155,50	3,72
0,43	1,77	0,28
0,30	0,64	0,21
0,15	0,81	0,13
Fundo	1,33	0,00

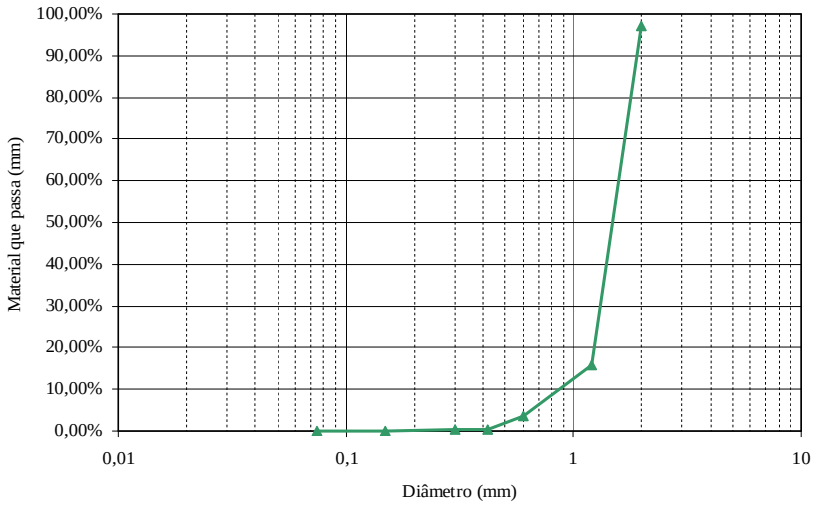

Figura 9 - Porcentagem acumulada passante em função do tamanho de partícula (carvão antracitoso)

Pelos resultados da Figura 9, estimou-se (D10) em 0,85 e (D60) em 1,6 mm, resultando em um coeficiente de desuniformidade de 1,8.

A Tabela 10 mostra as principais características dos meios filtrantes usados nas colunas de filtração.

Tabela 10 - Principais características dos meios filtrantes

Parâmetro	**Areia**	**Zeólito**	**Carvão antracitoso**
Granulometria (mm)	0,35 a 1,2	0,35 a 1,2	0,6 a 2,0
Massa específica aparente (g/cm³)	2,77	2,05	1,86
Porosidade total (%)	33,04	48,14	42,31
Coeficiente de desuniformidade	1,7	1,5	1,8
Diâmetro efetivo (mm)	0,60	0,60	0,85

Comparando-se os leitos filtrantes (Tabela 10) é observado que os leitos de zeólito e carvão antracitoso possuem a maior porosidade. Isso irá refletir na capacidade de remoção de sólidos, ou seja, na carreira de filtração já que os leitos com maior porosidade e com partículas mais uniformes possuem maior capacidade de retenção de sólidos, propiciando maiores carreiras de filtração. Com relação ao diâmetro efetivo, a areia e o zeólito possuem os mesmos valores de diâmetro (0,6 mm). Esse parâmetro influencia na eficiência de retenção de partículas e na perda de carga (DI BERNARDO, 2003). Além disso, a Tabela 10 mostra que o leito de carvão antracitoso é composto por partículas maiores que os leitos de areia e de zeólito, o que também influi na perda de carga e na carreira de filtração (DI BERNARDO, 2003).

A respeito da massa específica aparente, o zeólito e o carvão antracitoso estão próximos, enquanto a areia possui a maior massa específica (Tabela 10).

6.2 DETERMINAÇÃO DA ALTURA DE LEITO

6.2.1 **Coluna de areia**

A altura de leito de areia foi variada de (0,35; 0,55; 0,70 e 1,0 m). Para alimentar a coluna, utilizou-se uma solução com cerca de 1.000 ovos de *Ascaris suum* por litro, e uma taxa de filtração de 7,5 m³/m².h. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos com a altura de leito de 0,35 m.

Tabela 11 - Ensaio com altura de leito de 0,35 m

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1300	1377,5	109,60	6,5	7,25	3,21	99,53	99,47	0,23
2	1455			11			99,20		
3				10			99,27		
4				2,5			99,82		
5				5			99,64		
6				8,5			99,38		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

De acordo com a Tabela 11, houve uma remoção da ordem de 99,47%, mas ainda não foi possível atingir menos de 1 ovo/l já que a concentração média do filtrado ficou em 7,25 ovos/l.

Na Tabela 12, encontram-se os resultados obtidos com a altura de leito de 0,55 m.

Tabela 12 - Ensaio com altura de leito de 0,55 m

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	815	737,5	109,60	1	0,83	0,61	99,86	99,89	0,08
2	660			0,5			99,93		
3				1,5			99,80		
4				0			100,00		
5				0,5			99,93		
6				1,5			99,80		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Os resultados da Tabela 12 destacam que houve uma remoção ótima da ordem de 99,9%, com concentração final do efluente podendo atingir até 1,44 ovos/l. Dessa forma, não se atinge o objetivo do trabalho que é obter um efluente com menos de 1 ovo/litro de helmintos.

A Tabela 13 mostra a remoção obtida com o aumento da altura de leito para 0,70 m.

Tabela 13 - Ensaio com altura de leito de 0,70 m

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	2925	3305	537,40	0,5	0,92	0,49	99,98	99,97	0,01
2	3685			0,5			99,98		
3				1,5			99,95		
4				0,5			99,98		
5				1			99,97		
6				1,5			99,95		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Segundo a Tabela 13, o resultado médio ainda está acima de 1 ovo/l. Assim, foi aumentado o leito de areia para 1,0 m de altura de coluna filtrante (Tabela 14).

Tabela 14 - Ensaio com altura de leito de 1,0 m

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1795	1227,5	802,57	0	0,17	0,26	100,00	99,98	0,04
2	660			0,5			99,93		
3				0			100,00		
4				0			100,00		
5				0,5			99,93		
6				0			100,00		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Os resultados da Tabela 14 expõem que a há uma alta eficiência de remoção, pois a concentração média de ovos de *Ascaris suum* no filtrado foi de 0,17 ovo/litro, com desvio padrão de 0,26. Com essa altura de coluna filtrante de areia, é possível reduzir a concentração final do efluente a menos de 1 ovo/litro, com uma concentração média de alimentação de até 1227,5 ovos/l.

6.2.2 **Coluna de zeólito**

A altura de leito de zeólito foi variada de (0,35; 0,55; 0,70 e 1,0 m). Para alimentar a coluna, utilizou-se uma solução com cerca de 1.000 ovos de *Ascaris suum* por litro e taxa de filtração de 7,5 m³/m².h.

Tabela 15 - Ensaio com altura de leito de 0,35 m

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1300	1377,5	109,602	2	2,25	1,21	99,85	99,84	0,09
2	1455			1			99,93		
3				2,5			99,82		
4				1,5			99,89		
5				2			99,85		
6				4,5			99,67		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Na Tabela 15, observa-se que houve uma remoção da ordem de 99,84%, baixando a concentração média final para 2,25 ovos/litro. Apesar de o resultado ser superior ao obtido no leito de areia, ainda não foi possível atingir o objetivo do trabalho. Assim, aumentou-se a altura de leito para 0,55 m de coluna filtrante (Tabela 16).

Tabela 16 - Ensaio com altura de leito de 0,55 m

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	815	737,5	109,60	0	1	0,55	100,00	99,86	0,07
2	660			1			99,86		
3				1,5			99,80		
4				1			99,86		
5				1			99,86		
6				1,5			99,80		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

A concentração média no filtrado foi de 1 ovo/litro e desvio padrão de 0,55 (Tabela 16). Houve uma remoção da ordem de 99,9%, porém, acima de 1. Desse modo, o leito zeolítico foi aumentado para 0,70 m, cujos resultados são relatados na Tabela 17.

Tabela 17 - Ensaio com altura de leito de 0,70 m

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	2925	3305	537,40	0,5	0,42	0,38	99,98	99,99	0,01
2	3685			0			100,00		
3				0,5			99,98		
4				1			99,97		
5				0			100,00		
6				0,5			99,98		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

De acordo com a Tabela 17, a altura de coluna filtrante de zeólito em 0,70 m propicia uma concentração média no filtrado de 0,42 ovo/litro e um desvio padrão de 0,38. Isso significa menos de 1 ovo/L alcançando, assim, o objetivo deste trabalho.

A Tabela 18 apresenta a remoção obtida com a altura de leito para 1 m de zeólito.

Tabela 18 - Ensaio com altura de leito de 1,0 m

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1795	1227,5	802,57	0	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
2	660			0			100,00		
3				0			100,00		
4				0			100,00		
5				0			100,00		
6				0			100,00		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Segundo a Tabela 18, com altura de leito de 1,0 m de zeólito, houve uma remoção melhor do que com a altura de leito em 0,7m.

6.2.3 **Coluna de areia e carvão antracitoso**

A altura de leito da coluna com areia e carvão antracitoso foi variada de [(0,15 e 0,45) m, (0,25 e 0,70) m e (0,35 e 1,0) m], respectivamente. Para alimentar a coluna, utilizou-se uma solução com cerca de 1.000 ovos de *Ascaris suum* por litro e taxa de filtração de 7,5 $m^3/m^2.h$. Na Tabela 19, são mostrados os resultados obtidos com a altura de leito de (0,15 e 0,45).

Tabela 19 - Ensaio com altura de leito em (0,15 e 0,45) m de areia e carvão antracitoso, respectivamente

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1300	1377,5	109,602	3,5	3,75	1,67	99,75	99,73	0,12
2	1455			6,5			99,53		
3				2,5			99,82		
4				5			99,64		
5				2,5			99,82		
6				2,5			99,82		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Pelos resultados da Tabela 19, observa-se uma remoção da ordem de 99,73%, mas a concentração no filtrado ainda foi alta, pois atingiu 3,75 ovo/litro. Assim, realizou-se novo ensaio com aumento da altura de leito (Tabela 20).

Tabela 20 - Ensaio com altura de leito em (0,25 e 0,70) m de areia e carvão antracitoso, respectivamente

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	815	737,5	109,60	0	0,58	0,74	100,00	99,92	0,10
2	660			0			100,00		
3				1,5			99,80		
4				0			100,00		
5				0,5			99,93		
6				1,5			99,80		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Na Tabela 20, observa-se que a concentração média final, para a condição avaliada, foi de 0,58 ovo/litro. Porém, com o desvio padrão de 0,74, a concentração final pode ser maior que 1 ovo/l, então, aumentou-se a quantidade de leito (Tabela 21).

Tabela 21: Ensaio com altura de leito em (0,35 e 1,0) m de areia e carvão antracitoso, respectivamente

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	2925	3305	537,40	0,5	0,42	0,20	99,98	99,99	0,01
2	3685			0,5			99,98		
3				0			100,00		
4				0,5			99,98		
5				0,5			99,98		
6				0,5			99,98		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Com a altura de leito testada na Tabela 21, houve uma remoção suficiente para atingir a concentração de menos de 1 ovo/l, pois a concentração média no efluente foi de 0,42 ovo/litro e desvio padrão de 0,20.

De acordo com os resultados, a coluna de areia alcança a remoção de menos de 1 ovo/litro com a altura de leito em 1,0 m. Nas alturas de coluna filtrante de 0,50 e 0,70 m, a eficiência de remoção é superior a 99%, mas não atinge o objetivo do trabalho. Com relação à coluna de zeólito, a concentração no filtrado menor de 1 ovo/litro é obtida com altura de leito de 0,70 m, sendo que a maior eficiência de remoção foi alcançada com a altura de leito de 1,0 m.

A respeito da coluna de dupla filtração, a eficiência de remoção de menos de 1 ovo por litro no filtrado foi atingida com altura de leito de 0,35 m de areia e 1,0 m de carvão antracitoso.

As alturas de leito que obtiveram as maiores eficiências na remoção dos ovos de helmintos são utilizadas nos experimentos com esgoto tratado, em que se avalia a carreira de filtração completa.

6.3 DETERMNAÇÃO DA TAXA DE FILTRAÇÃO

6.3.1 **Coluna de areia**

A taxa de filtração foi variada de (7,5, 10 e 15 $m^3/m^2.h$) e a altura de leito usada foi de 1,0 m. Para alimentar a coluna, utilizou-se uma solução com cerca de 1.000 ovos de *Ascaris* por litro.

Tabela 22 - Ensaio com taxa de filtração de 7,5 m³/m².h

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1795	1227,5	802,57	0	0,17	0,26	100,00	99,99	0,02
2	660			0,5			99,96		
3				0			100,00		
4				0			100,00		
5				0,5			99,96		
6				0			100,00		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Os resultados da Tabela 22 mostram que com a taxa de 7,5 m³/m².h e altura de leito de 1,0 m o filtro de areia obtém um efluente final com 0,17 ovo/litro, e desvio padrão de 0,26.

Tabela 23 - Ensaio com taxa de filtração de 10 m³/m².h

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1345	1290	77,78	0	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
2	1235			0			100,00		
3				0			100,00		
4				0			100,00		
5				0			100,00		
6				0			100,00		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

A Tabela 25 destaca que, mesmo com o aumento da taxa de filtração para 10 m³/m².h, não foram detectados ovos de *Ascaris suum* no filtrado. Desse modo, aumenta-se a taxa de filtração para 15 m³/m².h (Tabela 24).

Tabela 24 - Ensaio com taxa de filtração de 15 m³/m².h

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	890	887,5	3,54	0	0,08	0,20	100,00	99,99	0,02
2	885			0,5			99,94		
3				0			100,00		
4				0			100,00		
5				0			100,00		
6				0			100,00		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Na Tabela 26, observa-se que a concentração de ovos no filtrado é muito baixa, cerca de 0,08 ovo/litro. Dessa forma, os resultados apontam que o aumento da taxa de filtração de 7,5 até 15 m³/m².h na coluna de areia não influenciou na qualidade do filtrado com relação à

remoção de ovos nas condições testadas, isso porque a concentração permaneceu menor de 1 ovo/litro.

6.3.2 **Coluna de zeólito**

A taxa de filtração utilizada foi de (7,5; 10 e 15 m³/m².h), a altura de leito foi determinada no ensaio de variação de altura de coluna filtrante, sendo que a ótima é de 1,0 m de zeólito. Para alimentar o filtro, utilizou-se uma solução com cerca de 1.000 ovos de *Ascaris suum* por litro.

Tabela 25 - Ensaio com taxa de filtração de 7,5 m³/m².h

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1795	1227,5	802,57	0	0,00	0,00	100,00	100,00	0,00
2	660			0			100,00		
3				0			100,00		
4				0			100,00		
5				0			100,00		
6				0			100,00		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Os resultados da Tabela 25 não detectaram a presença de ovos no filtrado. Assim, foi aumentada a velocidade de passagem no leito para 10 m³/m².h.

Tabela 26 - Ensaio com taxa de filtração de 10 m³/m².h

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1345	1290	77,78	0	0,17	0,41	100,00	99,99	0,03
2	1235			0			100,00		
3				0			100,00		
4				0			100,00		
5				0			100,00		
6				1			99,92		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

O aumento da velocidade de passagem de 7,5 para 10 m³/m².h não afetou significativamente a eficiência da remoção dos ovos (Tabela 26), já que a concentração no filtrado permaneceu menor de 1 ovo/l.

Na Tabela 27, a taxa de filtração é aumentada para 15 m³/m².h.

Tabela 27 - Ensaio com taxa de filtração de 15 m³/m².h

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	890	887,5	3,54	0,5	0,25	0,27	99,94	99,97	0,03
2	885			0,5			99,94		
3				0			100,00		
4				0,5			99,94		
5				0			100,00		
6				0			100,00		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Essa tabela demonstra que a taxa de filtração de 15 m³/m².h, com altura de leito em 1,0 m de coluna filtrante de zeólito, não afetou significativamente a remoção de ovos de *Ascaris suum*, permanecendo o efluente final com menos de 1 ovo/l.

6.3.3 **Coluna de areia e carvão antracitoso**

Assim como na areia e no zeólito, na coluna de areia/carvão antracitoso, a taxa de filtração foi variada em (7,5, 10 e 15 m³/m².h), a altura de leito usada foi de 0,35 m para a areia e de 1,0 m para o carvão antracitoso. Na alimentação da coluna, utilizou-se uma solução com aproximadamente 1.000 ovos de *Ascaris suum* por litro. As Tabelas 28, 29 e 30 apresentam os ensaios com velocidade de 7,5; 10 e 15 m³/m².h, respectivamente.

Tabela 28 - Ensaio com taxa de filtração de 7,5 m³/m².h

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1795	1227,5	802,57	0,5	0,42	0,20	99,96	99,97	0,02
2	660			0,5			99,96		
3				0			100,00		
4				0,5			99,96		
5				0,5			99,96		
6				0,5			99,96		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Tabela 29 - Ensaio com taxa de filtração de 10 m³/m².h

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	1345	1290	77,78	1	0,60	0,40	99,92	99,96	0,03
2	1235			0,5			99,96		
3				0,5			99,96		
4				1			99,92		
5				0			100,00		
6							100,00		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Tabela 30 - Ensaio com taxa de filtração de 15 m³/m².h

Amostra	Bruta (He/L)	Média	Desvio padrão	Filtrado (He/L)	Média	Desvio padrão	Remoção (%)	Média	Desvio padrão
1	890	887,5	3,54	0	0,25	0,27	100,00	99,97	0,03
2	885			0			100,00		
3				0,5			99,94		
4				0			100,00		
5				0,5			99,94		
6				0,5			99,94		

He/L = concentração de ovos de helmintos por litro

Nos resultados das Tabelas 28, 29 e 30, observa-se que a variação da taxa de filtração de 7,5 a 15 m³/m².h não influenciou produzindo um filtrado com mais de 1 ovo/l, pois em todas as taxas testadas a concentração final de ovos no filtrado permaneceu inferior a 1 ovo/litro.

6.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS COM ESGOTO TRATADO

Nesta etapa da pesquisa, foram utilizados esgotos tratados pelo processo convencional de lodos ativados para alimentar os filtros. Os filtros foram montados após a etapa de decantação secundária do esgoto. Nessa fase, a concentração de sólidos e a matéria orgânica se encontravam em baixa concentração.

6.4.1 **Remoção de ovos de helmintos**

Para avaliar a eficiência da remoção dos ovos de helmintos, foi usada uma dosagem de ovos padronizados de *Ascaris suum*, já que o efluente produzido pelo lodo ativado da ETE do ABC apresentou uma baixa concentração de ovos de helmintos.

A Tabela 31 mostra a concentração final de ovos, após a passagem do efluente pelos filtros de areia, zeólito e carvão antracitoso.

Tabela 31 - Concentração de ovos de helmintos ao longo das carreiras de filtração (concentração na alimentação de até 22,95 ovos/l e taxa de 15 m/h)

Tempo de filtração (h)	Concentração inicial ovos (He/L)	Inicial Desvio padrão	Areia (Concentração (He/L) após filtro)	Areia Desvio padrão	Zeólito (Concentração (He/L) após filtro)	Zeólito Desvio padrão	Carvão antracitoso (Concentração (He/L) após filtro)	Carvão antracitoso Desvio padrão	Diretriz OMS
1,00	15,15	4,60	0,20	0,10	0,00	0,02	0,00	0,06	≤1
2,00	13,00		0,00		0,00		0,00		≤1
3,00	12,75		0,00		0,00		0,20		≤1
4,00	22,95		0,00		0,00		0,00		≤1
5,00	7,85				0,20		0,00		≤1
6,00	15,15				0,00		0,00		≤1
7,00	20,20				0,00		0,00		≤1
8,00	5,10				0,00		0,20		≤1
11,00	10,25				0,00		0,00		≤1
12,00	15,25						0,00		≤1
13,00	15,00						0,20		≤1
15,00	15,25						0,00		≤1
17,00	17,75						0,20		≤1
19,00	12,75						0,00		≤1
21,00	12,75						0,20		≤1
23,00	22,75						0,00		≤1

De acordo com os resultados apresentados na tabela 31, para uma concentração de ovos na entrada dos filtros de até 22,95 ovos/l, os três meios filtrantes produzem um efluente com menos de 1 ovo/l ao longo das carreiras de filtração.

A Figura 10 destaca os resultados médios da concentração de ovos de helmintos após o processo de filtração.

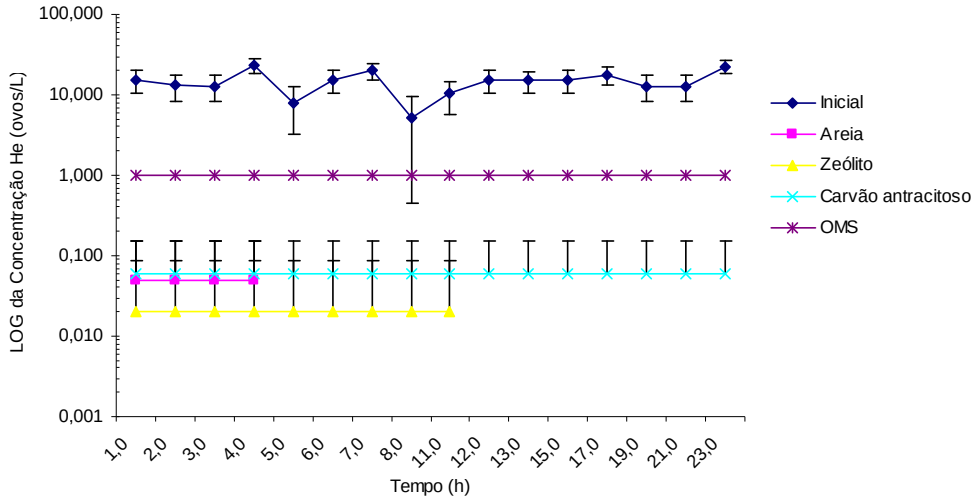

Figura 10 - Concentração média final após a filtração, para a concentração de alimentação do sistema em até 22,95 ovos/l

Para testar a eficiência das colunas filtrantes, realizou-se um novo ensaio com maior concentração de ovos de *Ascaris suum.* Nesse teste foi aumentada a concentração para cerca de 1.000 ovos/l no esgoto que alimentou os filtros, a concentração de ovos de helmintos raramente ultrapassa o valor de 1.000 ovos/l, mesmo em populações infectadas, segundo a OMS (1989).

Na tabela 32, observa-se que, mesmo com o aumento da quantidade de ovos na entrada dos filtros, a concentração do filtrado permaneceu inferior a 1 ovo/l. Isso mostra a alta eficiência da filtração como unidade complementar, com o objetivo de remover ovos de helmintos e reduzir o risco para o reúso do esgoto.

Tabela 32 - Concentração de ovos de helmintos no filtrado para alimentação de 1.000 ovos/l e taxa de 15 m/h

Tempo de filtração (h)	Concentração inicial ovos (He/L)	Inicial Desvio padrão	Areia (Concentração (He/L) após filtro)	Areia Desvio padrão	Zeólito (Concentração (He/L) após filtro)	Zeólito Desvio padrão	Carvão antracitoso (Concentração (He/L) após filtro)	Carvão antracitoso Desvio padrão	Diretriz OMS
1,00	999,90	198,80	0,00	0,10	0,00	0,03	0,20	0,03	≤1
2,00	1010,00		0,20		0,00		0,00		≤1
3,00	1136,25		0,00		0,20		0,00		≤1
4,00	683,40		0,00		0,00		0,00		≤1
5,00	1081,20				0,00		0,00		≤1
6,00	1100,00				0,00		0,00		≤1
7,00	1407,60				0,00		0,00		

A Figura 11 mostra a média de remoção obtida com as colunas de areia, zeólito e carvão antracitoso. Nas três colunas, a concentração do efluente produzido permaneceu inferior a 1 ovo/l.

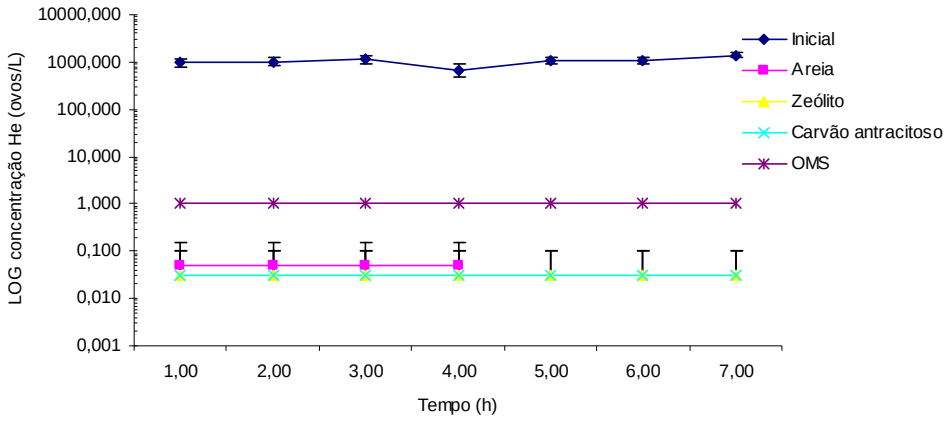

Figura 11 - Concentração média final após a filtração, para a concentração de alimentação de 1.000 ovos/l

Eficiências similares de remoção de ovos de helmintos também foram obtidas por Jimenez et al. (2000), que realizou a filtragem em areia de esgoto previamente decantado em reservatórios de acumulação, visando o reúso na irrigação agrícola na Cidade do México.

Quinzaños et al. (2006), utilizando ovos de *Trichuris* em solução sintética e filtragem em discos com micropeneiras de 10 µm de abertura, também obteve remoções com 100% de eficiência.

A alta eficiência da remoção dos ovos de helmintos pelos filtros testados pode ser compreendida por meio da verificação da eficiência de remoção de sólidos pela filtração.

6.4.2 **Remoção de partículas**

Os resultados mostrados na Figura 12 demonstram que as partículas com tamanho superior a 30 µm são retidos com alta eficácia nos meios filtrantes testados, esta alta

eficiência de remoção destas partículas está diretamente relacionada com eficiência de remoção dos ovos de helmintos, uma vez que os ovos possuem tamanho acima de 30 µm (Tabela 3) e dessa forma são retidos de maneira nos meios filtrantes utilizados nas colunas de filtração.

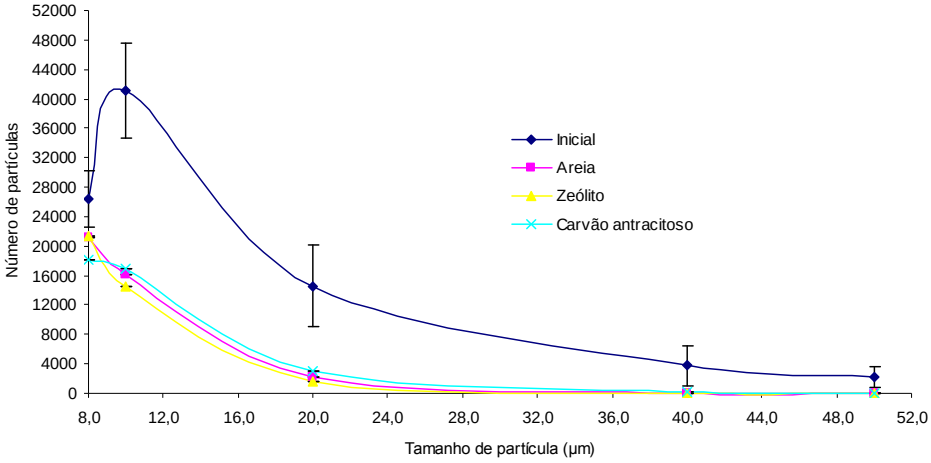

Figura 12 - Número de partículas *versus* tamanho na alimentação dos filtros (inicial) e no filtrado (areia, zeólito e carvão antracitoso)

6.4.3 **Remoção de turbidez, cor, DQO, SST e coliformes fecais**

Remoção de turbidez

O esgoto tratado após o processo de decantação secundária da ETE do ABC apresentou uma baixa concentração de sólidos. Após a filtração, a turbidez foi reduzida a menos de 1 NTU nos 3 filtros testados. A Figura 13 mostra os valores obtidos.

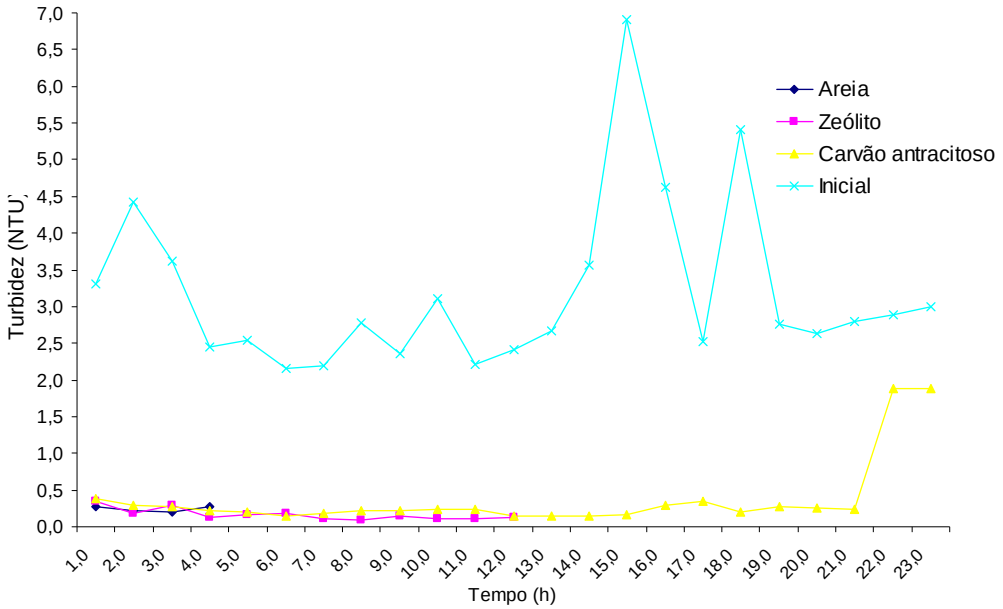

Figura 13 - Remoção de turbidez nas colunas de areia, zeólito e carvão antracitoso

Remoção de cor

A cor do efluente varia de acordo com as variações no esgoto produzido pela ETE. Dessa forma, a remoção de cor pelos filtros testados também sofre variações. De maneira geral, os filtros de zeólito e de areia foram mais eficazes na redução de cor que o filtro de carvão antracitoso, conforme o exposto na Figura 14.

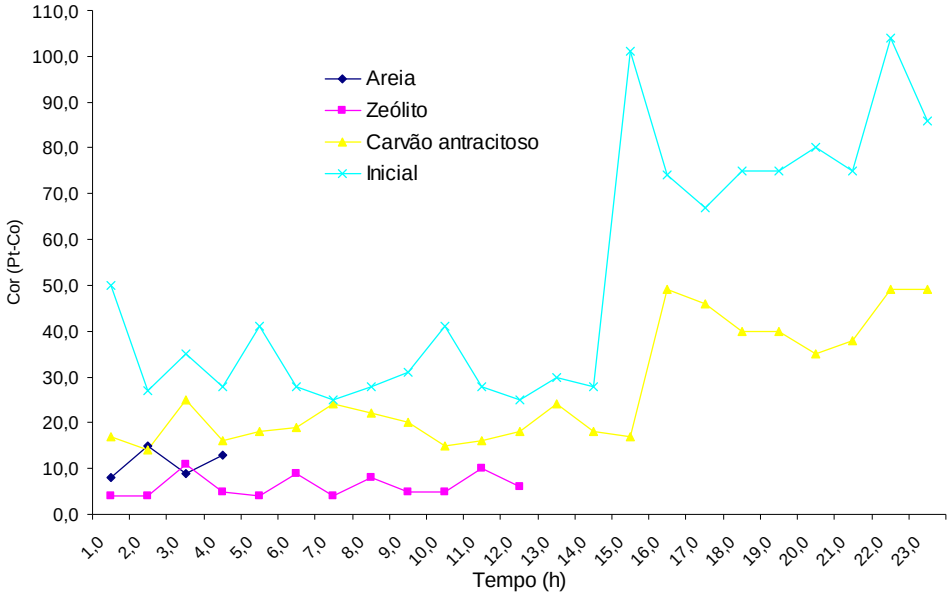

Figura 14 - Remoção de cor nos filtros de areia, zeólito e carvão antracitoso

Remoção de DQO

A Tabela 33 mostra a redução de DQO através dos filtros estudados. A remoção de material orgânico nos leitos granulares ocorre, principalmente, devido à redução de material carbonáceo particulado presente no esgoto decantado. Foram obtidas remoções da ordem de 60% para os filtros de zeólito e areia, e de cerca de 50% para o leito de carvão antracitoso.

Tabela 33 - Remoção de DQO nas colunas filtrantes

Amostra	DQO Média (ppm)	Desvio padrão	Remoção
Inicial	51,25	17,72	
Coluna Areia	34,00	18,57	63,77
Coluna zeólito	23,25	17,52	65,81
Coluna carvão antracitoso	31,00	23,39	54,36

Remoção de SST

Na Tabela 34 é observada a redução da concentração de sólidos suspensos totais. Os três filtros apresentaram remoção na faixa de 60%, produzindo um efluente com baixo teor de sólidos.

Tabela 34 - Remoção de SST nas colunas filtrantes

Amostra	SST Média (ppm)	Desvio padrão	Remoção (%)
Inicial	5,2	1,37	
Coluna Areia	2,30	0,75	55,77
Coluna zeólito	1,75	0,19	66,35
Coluna carvão antracitoso	1,86	0,97	64,23

Remoção de coliformes fecais

Com relação à remoção de coliformes fecais, os filtros estudados não possuem capacidade significativa de remoção, e a eficiência de redução foi de aproximadamente 1 log, como mostra a Tabela 35.

Tabela 35 - Remoção de coliformes fecais

Amostra	Coliformes fecais/100 mL	Remoção (LOG)
Inicial	1,3E+04	
Coluna Areia	3,E+03	1,0
Coluna zeólito	4,E+03	1,0
Coluna carvão antracitoso	4,E+03	1,0

Variação de pH

Não houve variação significativa de pH devido ao processo de filtração. A faixa de pH ficou ente 6 e 7,2 para as três colunas filtrantes estudadas. A Figura 15 apresenta os resultados obtidos.

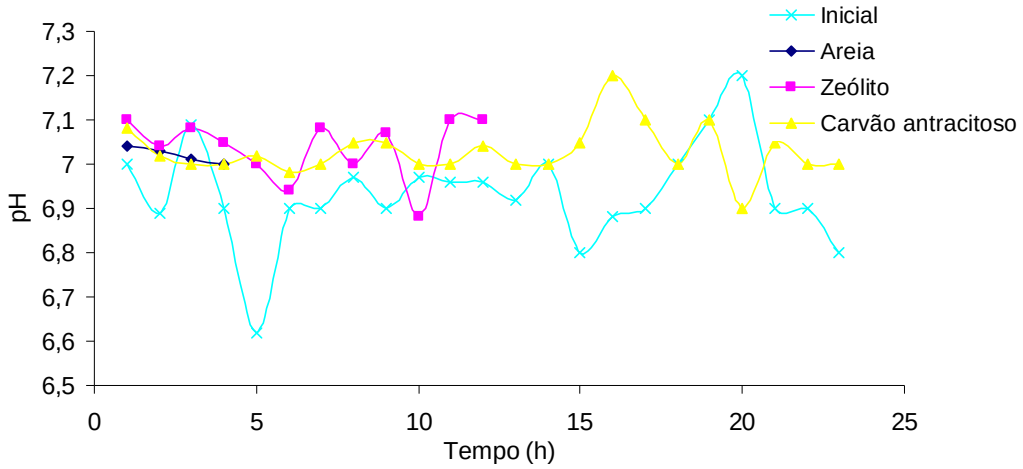

Figura 15 - Variação de pH com a filtração

6.4.4 **Perda de carga e retrolavagem**

A Figura 16 mostra a evolução da perda de carga dos filtros em função do tempo de operação. Os resultados mostram que a areia, como meio filtrante, apresentou a maior perda de carga, reduzindo a carreira de filtração para 4 horas. O zeólito propiciou uma carreira de 12 horas de operação, ao passo que com o carvão antracitoso foi possível operar por 23 horas para atingir a perda de carga máxima estabelecida em 1,5 m.

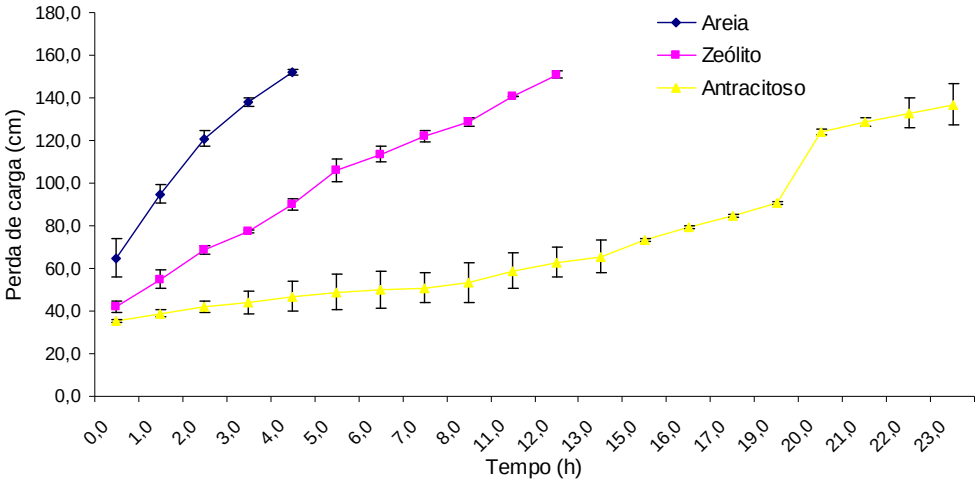

Figura 16 - Avaliação da perda de carga dos leitos filtrantes

O leito de areia proporcionou uma baixa carreira de filtração (4 horas), devido à baixa porosidade do leito, e maior presença de finos no leito. A coluna de zeólito mostrou uma carreira de filtração maior que a da areia (12 horas), em virtude da maior porosidade do material e da maior uniformidade dos grãos (DI BERNARDO, 2003).

O filtro de dupla camada (carvão antracitoso) foi o que teve a maior carreira de filtração (23 horas). Isso pode ser atribuído à alta porosidade do leito e ao maior tamanho do grão.

Para a retrolavagem dos filtros, utilizou-se o efluente filtrado. A Figura 17 mostra que o tempo mínimo usado foi de cerca de 2 minutos para retrolavar os leitos.

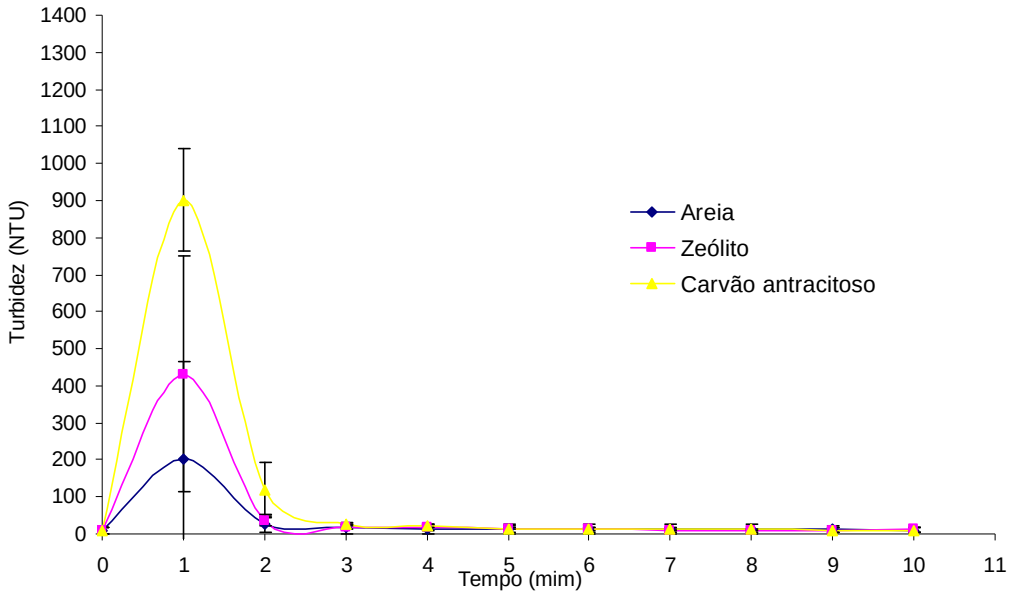

Figura 17 - Tempo usado na retrolavagem dos filtros

A Tabela 36 apresenta o volume de água e a taxa de filtração usada na etapa de lavagem das colunas. Os resultados mostram que o leito de zeólito é o meio filtrante que utilizou o menor volume de água nessa operação, além de usar uma menor taxa de retrolavagem para a fluidização do meio filtrante. A Tabela 36 evidencia que os ovos retidos nos meios filtrantes durante a etapa de filtração foram eliminados na etapa de lavagem das colunas, devido à alta concentração de ovos na água de retrolavagem dos filtros.

Tabela 36 - Volume de água gasto na etapa de retrolavagem das colunas

Coluna	Vazão de retrolavagem (l/segundo)	Volume de água gasto (l)	Concentração na retrolavagem (ovos He/L)
Areia	0,86	515	4552
Zeólito	0,43	390	7560
Carvão antracitoso	0,60	560	6820

6.4.5 **Potencial de reúso do efluente produzido**

Reúso na irrigação agrícola

De acordo com os resultados obtidos, principalmente relativos à remoção de ovos de helmintos, o efluente tratado pelas colunas de filtração apresenta grande potencial para ser aplicado no reúso agrícola, para a irrigação de cultivos de vegetais consumidos crus, campos de esporte e parques públicos, onde há maior risco de trabalhadores e de consumidores, uma vez que a concentração média do filtrado pelas colunas de areia, zeólito e carvão antracitoso foi inferior a 1 ovo/l, atingindo a recomendação da diretriz da OMS sobre a remoção de ovos de helmintos.

Quanto aos demais parâmetros da diretriz da OMS, como, por exemplo, coliformes fecais, não foram estudados com profundidade nesta pesquisa porque não fazia parte do objetivo proposto.

Reúso urbano não potável

A Tabela 37 apresenta os parâmetros de qualidade da água recomendados por normas internacionais e nacionais para o reúso urbano não potável, tais como:

- Lavagem de pisos, pátios e logradouros;
- Desobstrução de tubulações de águas pluviais e de esgotos;
- Compactação de solos e controle de pó em vias públicas.

Tabela 37 - Variáveis de qualidade da água de reúso com base em normas internacionais e nacionais

	DBO mg/L	*SST mg/L*	*COL. FECAIS NMP/100mL*	*TURBIDEZ NTU*	*pH*	*HELMINTOS ovo/l*	*ÓLEOS E GRAXAS mg/L*
FLÓRIDA	< 20	< 5	nd em 75% das amostras	< 2	-	-	-
OMS	-	-	< 1000	-	-	<1	-
ESPANHA	< 25	< 35	<= 2000	< 20	6 a 9	-	-
MÉXICO	< 30	< 30	< 1000	-	-	<= 5	< 15
EPA	< 10	< 5	nd	< 2	6 a 9	-	-
NBR 13969*	-	-	< 500	< 5	-	-	-

Fonte: Morelli, 2005.
"-" → não faz nenhuma referência
"nd" →não detectável
* (NBR 13969, 1997)

Para a comparação de qualidade da água entre os valores das normas e os números obtidos pelos ensaios de filtração, elaborou-se a Tabela 38.

Tabela 38 - Variáveis de qualidade da água obtidas pelos filtros estudados

	DQO mg/L	*SST mg/L*	*COL. FECAIS NMP/100mL*	*TURBIDEZ NTU*	*pH*	*HELMINTOS ovo/l*
INICIAL	51	5,2	13.000	3,2	6,90	-
AREIA	34	2,3	3.000	0,24	7,02	0,05
CARVÃO ANTRACITOSO	31	1,8	4.000	0,37	7,03	0,03
ZEÓLITO	23	1,7	4.000	0,17	7,04	0,03

Comparando-se os parâmetros de qualidade da água de reúso (Tabela 37) com os resultados obtidos no estudo de filtração realizado (Tabela 38), observa-se que o efluente produzido pelas colunas de areia, zeólito e carvão antracitoso possui alto potencial para o reúso urbano não potável e para o reúso agrícola. Com exceção dos coliformes fecais, os demais parâmetros encontram-se com a qualidade recomendada pelas normas internacionais e nacionais de reúso.

6.4.6 **Análise de custos da filtração**

A análise de custos foi preparada para a comparação do custo de operação e o custo de implantação do sistema.

Para a avaliação de custo foram estimados os seguintes custos unitários:

Eletricidade (R$ kWh)	0,27
Água de retrolavagem (R$ /m³)	0,30
Pedregulho (R$ / Kg)	0,40
Areia (R$ / Kg)	0,40
Carvão antracitoso (R$ / Kg)	1,50
Zeólito (R$ / Kg)	2,30

As seguintes categorias foram baseadas em percentuais do custo total de equipamentos (incluindo o tipo de meio filtrante), (ASANO, 1998):

Elétrica	10 %
Instrumentação	7 %
Engenharia	15 %
Contingências	20 %

A tabela 39 mostra um comparativo de custos para os filtros de areia, carvão antracitoso e zeólito.

Tabela 39- Custo comparativo para sistema de filtração (areia, zeólito e carvão antracitoso)

	Areia	Zeólito	Antracitoso
Custos de capitais (R$)			
Sistema de bombeamento	300	300	300
Filtros (tanques)	400	400	400
Meio filtrante	43,6	97,02	71,9
Elétrica (10% do custo total de equipamentos)	74,36	79,7	77,19
Instrumentação (7% do custo total de equipamentos)	52,05	55,79	54,03
Engenharia (15% do custo total de equipamentos)	111,54	119,55	115,78
Contingências (20% do custo total de equipamentos)	148,72	159,4	154,38
Custo total de capital (R$)	1130,27	1211,46	1173,28
Amortização 8% do capital em 20 anos (R$ /m³)	0,029	0,031	0,03
Custos de operação e manutenção (R$ /m³)			
Energia	0,013	0,013	0,013
Água de retrolavagem	0,086	0,022	0,015
Meio filtrante (reposição anual)	0,011	0,025	0,018
Custo de manutenção (R$ /m³)	0,11	0,06	0,046
CUSTO TOTAL (R$ /m³)	0,139	0,091	0,076

De acordo com a Tabela 39 o custo de implantação da filtração com areia, zeólito e carvão antracitoso foram muito próximos devido ao uso da mesma estrutura (filtros, bombas, instrumentação e engenharia). Todavia, os custos de manutenção foram distintos, o leito de carvão antracitoso foi o que apresentou o menor custo de operação e manutenção (R$0,046 / m³), seguido do leito de zeólito (R$0,060 /m³). O leito de areia teve o maior custo de operação e manutenção cerca de (R$0,11 / m³) devido principalmente ao maior consumo de água de retrolavagem.

O custo total da filtração foi de R$ 0,076/m³ para a coluna de carvão antracitoso (dupla filtração), R$ 0,091/m³ para o filtro de zeólito e R$ 0,139/m³ para o leito de areia.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os testes de variação de altura de leito com a solução sintética mostraram que foi atingida a concentração de menos de 1 ovo/litro, com a altura de leito em 1,0 m para os leitos filtrantes de areia e zeólito e para o filtro de dupla camada. A maior eficiência foi obtida com 0,35 m de areia e 1,0 m de carvão antracitoso.

A variação da taxa de filtração, também realizada com efluente sintético, variada de 7,5 a 15 $m^3/m^2.h$, praticamente não influenciou na eficiência da remoção dos ovos de *Ascaris suum* tanto no leito de dupla filtração, quanto nos leitos de areia e zeólito. Isso ocorreu porque a concentração final de ovos no filtrado permaneceu inferior a 1 ovo/litro, mesmo com o aumento da velocidade de filtração.

A avaliação da perda de carga realizada com o esgoto tratado mostrou que o leito de carvão antracitoso (filtro de dupla camada) foi o que teve a maior carreira de filtração: 23 horas; seguido do filtro de zeólito com 12 horas de operação, e o filtro de areia com 4 horas.

Os resultados de remoção de ovos de helmintos são inéditos, pois foram obtidos em altas concentrações (cerca de 1000 ovos/L) e utilizando-se esgoto doméstico. Os três filtros reduziram a concentração de ovos para menos de 1 ovo/L, para uma concentração de entrada de até 1.400 ovos/L, mostrando um alto potencial de aplicação da filtração como polimento final de esgotos tratados por processos biológicos, que têm como finalidade a aplicação no reúso urbano não potável e na irrigação agrícola.

Com relação à presença de sólidos (SST), turbidez, cor e DQO, os resultados destacaram que o efluente produzido possui boas qualidades para o reúso urbano não potável e para o reúso agrícola, necessitando apenas de uma desinfecção final.

Quanto aos custos da filtração terciária do esgoto, os leitos de carvão antracitoso e zeólito foram os que apresentaram os mais econômicos, devido à maior economia destes

leitos na manutenção. O custo total da filtração foi de R$ 0,076/m³ para a coluna de carvão antracitoso (dupla filtração), R$ 0,091/m³ para o filtro de zeólito e R$ 0,139/m³ para o leito de areia.

REFERÊNCIAS

ABES-SP. **Reúso da Água**. Série “Cadernos de Engenharia Sanitária e Ambiental”. São Paulo, 1997.

ANA (Agência Nacional das Águas). **A evolução dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2002.

APHA; AWWA; WPCF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, D.C., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation, 19th edition, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14234**: carvão pulverizado – determinação da massa específica aparente, Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo – determinação granulométrica, Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969**: tanques sépticos, unidade de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – projeto, construção e operação, Rio de Janeiro, 1997.

AYRES R. M; MARA D. D. Análisis de aguas residuales para su uso en agricultura. **Manual de técnicas parasitológicas y bacteriológicas de laboratorio**. Organización Mundial de la Salud. Genebra. 1997.

BARTONE, C. R. **Reuse of Wastewater in the San Juan de Miraflores Stabilization Ponds**: Public Health, Environmental and Socio-Economic Implications. PAHO Bulletin, Washington, D. C., v. 19, n. 2, p. 146 164, 1985.

BARTONE, C. R.; ARLOSOROFF, S. **Irrigation Reuse of Pond Effluents in Developing Countries**. Wat. Sci. Tech., n. 19 (12), p. 289-297, 1987.

BASTOS, R. K. X. Utilização agrícola de águas residuárias. Notas de aula do Curso de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, 1998.

BERTOLUCCI, G.; GILLI, G.; CARRAZO, E.; GIACOSA, D. **Influence of raw water storage on Giardia, Cryptosporidium and nematodes**. Water Sci. Techonol, 37 (1998) 261-267.

CAVALCANTI, P. F. F.; VAN HAANDEL, A. C.; KATO, M. T.; VON SPERLING, M.; LUDUVICE, M. L.; MONTEGGIA, L. O. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por lagoas de polimento. In: HERNICHARO, C. A. L. (coord.). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Rio de Janeiro: PROSAB/ABES, 2001. p. 105-170.

CNA. **Información General de los Districtos de Riego 03 e 100, Alfajayuacan**. Gerencia Estatal, Pajuca, Hidalgo, México. Cidade do México: Comisión Nacional de Aguas, 1993.

CODE OF FEDERAL REGULATIONS, **Title 40**, Part 35, Appendix A, Washington D.C., 1973.

CRAM, E. B. **The Effest of Various Treatment Processes on the Survival of Helminth Ova and Protozoan Cysts in Sewage**. Sewage Works Jounal, v. 15, n. 6, 1943.

DI BERNARDO, L. **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. ABES, RiMa: Rio de Janeiro, 2003.

DYER, A.. Zeolite surface and reactivity. In: VANGHAN, D. J.; PATTRICK, R. A. D. (eds.). **Mineral Surfaces**. The Mineralogical Society Series, n. 5. London: Chapmann & Hall, 1995. p. 333-354.

EDWARDS, P. **Reuse of Human Excreta in Aquaculture** – A Technical Review. UNDP and World Bank Water and Sanitation Programme. Washington, D. C.: World Bank, 1992.

FOSTER, D. H.; ENGELBRECHT R. S. Microbial Hazards of Disposing of Wastewater on soil. Conferency Recycling Treated Municipal Wastewater Through Forest and Cropland. EPA 660/2 -74-003, 1974.

FUNDERBURG, S. W.; MOORE, B. E.; SORBER, C. A.; SAGIK; B. P. Survival of poliovirus in model wastewater holding pond. Prog. Water Technol. 10:619-629, 1978.

GERBA, C. P.; ROSE, J. B. Quantitative microbial risk assessment for reclaimed wastewater. Proceedings Water Tech. 1996. p. 254-260. Australian Water and Wastewater Assoc. Inc., Artarmon, NSW.

GERBA, C. P.; SINCLAIR, N. A.; KUTZ, S. M.; MUSIAL, C.E.; MULLINAX, R. L.; ROSE, J. B.; SINGH, S.N.; LEON R. Micoorganism removal from wastewater by rapid mixed media filtration, Water Resource, v. 20, p. 583-587, 1996.

HESPANHOL, I., Água e saneamento básico. Uma visão realista. In.: A.C. (coord.). Águas doces no Brasil, São Paulo, escrituras, 1999.

_____. "Potencial de Reúso de Água no Brasil-Agricultura, Indústria, Municípios, Recarga de Aquíferos", **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, RBRH, v. 7 n. 4, dezembro, Edição Comemorativa, p. 75-97, Porto Alegre, 2002.

HESPANHOL, I.; PROST, A. M. E. "WHO Guidelines and National Standards for Reuse and Water Quality, Water Research, v. 28. n. 28. p. 124. United Kingdon, 1994.

JIMENEZ, B.; CHAVEZ, A.; LEYVA, A.; TCHOBANOGLOUS, G. Sand and Synthetic Medium Filtration of Advanced Primary Treatment Effluent From Mexico City. Wat. Res. v. 34, n. 2, p. 473-480, 2000.

KAMIZOULIS, G. **Setting health basel targets for waste reuse (in agriculture)**. Desalination, 2006.

KOOT, H. Detection and variability of Endamoeba Histolytica Cysts in Sewage Effuents. Water Sewage Works, v. 114, n. 1, 1967.

LIEBMANN N. D. **Parasities in Sewage on the Possibilities of their Extinction.** Water Pollution Resource Proceeding, Pergamon Press: Tokio, 1964.

MARTINS, F.; CASTINEIRAS, T. M. **Infecção por helmintos e entereoprotozoários**. Centro de informação em saúde para viajantes. Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2000.

MEDEIROS LEITÃO, S. A. **Wastewater stabilization ponds:** a critical review. Tese (Mestrado). Centre for Environmental Sanitation. University of Ghent. Ghent, Bélgica, 1993.

MEICHES, J. **Contribuição para o estudo das limitações impostas pela qualidade das águas naturais para seu aproveitamento**. O problema da poluição de águas e a sua recuperação para o uso em sistemas de abastecimento de água. Tese (Livre-docência). Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 1964.

METCALF L.; EDDY, H. P. **Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse**. Singapore: Mc. Graw Hill, 1991.

MIERZWA, J. C., HESPANHOL, I. Água na indústria: uso racional e reúso. Oficina de textos, São Paulo, 2005.

MIJARES, G. R. Water Pollution Resources. Proceeding 2nd International Conference Tokyo. Pergamon Press, Oxford, 1964.

MILL, S. W.; ALABASTER, G. P.: MARA, D. D., PEARSON, H. W.; THITAI, W. N. 1992. Efficiency of faecal bacterial removal in waste stabilization ponds in Kenya. Water Sci. Technol. 26:1739-1748.

MONTGOMERY CONSULTING, J.M. **Water treatment principles end design**. Nova York: John Wily & Sons, 1985.

MORELLI, E. B., **Reúso de água da lavagem de veículos**. Universidade de São Paulo: São Paulo, 2005.

MOSCOSO, J.; NAVA, H. Reuse of Waste Stabilization Effluents for Fishculture: Productivity and Sanitary Quality Results. In: Charles R. O'Melia, Ed., Environmental

Engineering, of the 1990. In: SPECIALITY CONFERENCE, Arlington, Virginia, 8 11 July 1990, Proceedings. New York: American Society of Civil Engineers, 1990.

MUMPTON, F.A. (1981). Natural zeolites. In: Mumpton, F.A. (ed.) Mineralogy and Geology of Natural Zeolites. Mineralogical Society of América. Reviews in Mineralogy, 4. p.1-17.

NEWTON, W. L.; BENNETT, H. J.; FIGGGOT, W. B. Observation on the Effects of Various Swage Treatment process Upon Eggs of Taenia Saginata. **Journal Hygienic**. v. 49, n. 4, 1949.

PAGANINI, W. S. **Disposição de esgotos no solo:** escoamento à superfície. São Paulo: Fundo Editorial da AESABESP, 1997.

POUND, C.; CULP, R.L. **Handbook of advanced wastewater treatment**. 2 ed. Nova York: Van Nostrand Reinhold Companey, 1977.

QUINZAÑOS, S.; DAHL, C.; and MUJERIEGO, R.; Helminth eggs renoval by micorscreenig for water reclamation and reuse. Association on Water Pollution Research, v.53, 139-47, 2006.

REINOSO, R.; BECARES, E. **The occurrence of intestinal parasites in swine slurry and their removal in activated sludge plants**. Bioresource Technology, 2007.

REYES, W. L.; KRUSE, C. W.; BASTSON, M. The effect of Anaerobic Digestion on Eggs of Ascaris Lumbricoides var. suum in Nightsoil. **American Journal Tropical Medicine**. v. 12. n. 6. 1963.

ROSE, J. B.; CARNAHAM. Pathogen removal by full scale wastewater treatment. Report to Department of Environmental Regulation, State of Florida, 1992.

SABESP – Cia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em <www.sabesp.com.br>. Acesso em: dezembro de 2009.

SAMPAIO, O. A. Oficina de trabalho de reúso de água não potável. São Paulo. Agosto de 2005.

SHUVAL, H. I. **Wastewater irrigation in developing countries**. World Bank, 1990.

SHWARTZBROD, J.; STIEN, J. L.; BOUHOUM, K.; BALEUX; B. Impact of wastewater treatment on helminth eggs. Water Sci. Technol. 21:295-297, 1989.

SILVA, S. A. Removal of Intestinal Nematode Eggs in Tropical Waste Stabilization Ponds. **Journal of Tropical Medicine and Hygiene**, 1986.

SIMONETI, M. F. **Inativação térmica de ovos de helmintos em água e em biossólido digerido**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TAKASHI ASANO, " Watewater Reclamation and Reuse, (1998), Water Quality Management Library, vol. 10, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, Basel;

TCHOBANOGLOUS, G.; CALISKANER, O. Evaluation of the Fuzzy Filter for the Filtration of Secondary Effluent. Wastewater Environmental Federation 70th Annual Conference and Exposition. WEFTEC 97, Chicago, 1997.

TELLES, A. D.; COSTA, G. P. H. R. **Reúso de água:** Conceitos, teorias e práticas, São Paulo: 2007.

U.S. EPA. United States Environmental Protection Agency. **Guidelines for water reuse**. EPA/625/R-92/004. Washington D.C., 1992.

VON SPERLING, M. Relationship between first-order decay coefficients in ponds, according to plug flow, CSTR and dispersed flow regimens. **Water Science and Technology**. v. 45. n. 1. p. 17-24, 2002a.

_____ . Influence of the dispersion number on the estimation of faecal coliform removal in ponds. In: INTERNATIONAL IWA SPECIALIST GROUP CONFERENCE ON WASTE STABILISATION PONDS, 5, 2002, Auckland, New Zealand. Anais. Auckland, 2002b.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for the safe use of wastewater excreta and greywater**. v. 2, França, 2006.

_____. **Health guidelines for use of wastewater in agriculture and acquaculture**. Technical Report Series. 778. Geneva, 1989.

_____. **Report of an informal consultation on hook worm infection and anaemia in girls and women**. Geneva. 1996. Document WHO/CTD/SIP/96.1.

WESTERHOFF, G. P. An update of research needs for water reuse. In: Water Reuse Symposium, 3, 1984. San Diego, California, Proceedings, p. 1731-42.