



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

EFEITO DA TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL NA REMOÇÃO DE  
MATÉRIA ORGÂNICA EM FILTROS DE AREIA

ROBSON ARRUDA DOS SANTOS

JOÃO PESSOA – PARAÍBA  
SETEMBRO – 2015

EFEITO DA TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL NA REMOÇÃO DE  
MATÉRIA ORGÂNICA EM FILTROS DE AREIA

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre.

ROBSON ARRUDA DOS SANTOS

ORIENTADOR: Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior

JOÃO PESSOA – PARAÍBA

SETEMBRO – 2015

“EFEITO DA TAXA DE APLICAÇÃO SUPERFICIAL NA REMOÇÃO DE  
MATÉRIA ORGÂNICA EM FILTROS DE AREIA”

ROBSON ARRUDA DOS SANTOS

Dissertação aprovada em 28 de setembro de 2015

Período letivo 2015.2

---

Prof. Dr. GILSON BARBOSA ATHAYDE JÚNIOR - UFPB  
Orientador

---

Prof. Dr. RENNIO FELIX DE SENA - UFPB  
Examinador Interno

---

Prof. Dr. JOSÉ TAVARES DE SOUSA - UEPB  
Examinador Externo

João Pessoa – PB

2015

A Deus, por permitir mais essa vitória. Aos meus pais, Alzeni e José  
Manoel, o porto seguro de todas as horas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu força e saúde para chegar até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior, por toda ajuda e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do PPGECA, pelos ensinamentos, dentro e fora da sala de aula, durante a época da graduação e agora do mestrado.

Aos meus grandes amigos Piêtro Monteiro, Anderson Klisnmann, Pedro Henrique e Ranilson Oliveira, pelo incentivo de sempre.

Aos meus colegas de mestrado, especialmente a Rômulo Andrade e Samara Gama, amigos especiais.

À minha grande amiga e colega de mestrado, Cinthya Santos, pela amizade desde a graduação, dividindo bons e maus momentos durante essa jornada.

Aos bolsistas de iniciação científica, Nathalia Guedes, Matheus Carvalho e Afonso Eris, pelo auxílio nas coletas e manutenção do sistema pesquisado.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

“Portanto, a tarefa não é tanto ver o que ninguém viu ainda, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”

*Arthur Schopenhauer*

## RESUMO

Esta pesquisa consiste no estudo da taxa de aplicação superficial para dimensionamento do filtro de areia, com efluentes de tanque séptico e filtro anaeróbio. Trata-se de um parâmetro de projeto definido pela NBR 13969/1997 como a relação entre a vazão de esgoto e a área superficial de uma unidade de tratamento. Avaliou-se o efeito da taxa de aplicação na remoção de matéria orgânica pelos filtros de areia, bem como a pertinência da interposição do filtro anaeróbio entre o tanque séptico e o filtro de areia. A pesquisa foi desenvolvida em dois sistemas de tratamento de esgoto, ambos montados na Residência Universitária da UFPB: (1) Tanque Séptico + Filtro Anaeróbio + Filtro de Areia e (2) Tanque Séptico + Filtro de Areia, com a finalidade de obter-se a taxa de aplicação superficial a ser adotada em projetos para as condições da região de estudo (nordeste do Brasil), para ambas as opções. Foram analisadas as taxas de aplicação nos valores de 200, 300, 500 e 600 L/m<sup>2</sup>.dia. As análises de DBO<sub>5</sub>, DQO e NO<sub>3</sub> foram realizadas no equipamento Pastel UV. Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram a viabilidade do uso de filtros de areia em um sistema de tratamento individual de esgoto, seja para unidades residenciais, condomínios ou pequenas comunidades, visto os elevados valores de eficiência de remoção de matéria orgânica alcançados. Obteve-se bom desempenho quanto a nitrificação dos efluentes do tanque séptico e do filtro anaeróbio nos filtros de areia. Por fim, com a análise dos resultados do comportamento dos filtros às variações das taxas aplicadas, chegou-se a um valor “ótimo” de 300 L/m<sup>2</sup>.dia, para ambos os sistemas estudados.

Palavras-chave: Tratamento de esgoto, Filtro de areia, Taxa de aplicação superficial.

## ABSTRACT

This research consists of a study of the rate of surface application for sand filter sizing, with septic tank effluents and anaerobic filter. It is a design parameter set by the NBR 13969/1997 as the relation between the flow of sewage and surface area of a treatment unit. We evaluated the effect of rate of application in the removal of organic matter by sand filters as well as the relevance of the anaerobic filter interposed between the septic tank and the sand filter. The research was conducted on two wastewater treatment systems, both mounted in the University Residence of UFPB: (1) Septic Tank + Anaerobic Filter + Sand Filter and (2) Septic Tank + Sand Filter, in order to get the rate of surface application to be adopted in projects for the conditions of the study area (northeastern Brazil), for both options. The rates of application were analyzed in values of 200, 300, 500 and 600 L/m<sup>2</sup>.d. Analyses of BOD<sub>5</sub>, COD and NO<sub>3</sub> were held in Pastel UV equipment. The results of this research show the feasibility of using sand filters in an individual treatment system of sewage, whether for residential units, condominiums or small communities, since the high efficiency values reached on the removal of organic matter. It was obtained a good performance on the nitrification of effluents from the septic tank and the anaerobic filter in the sand filters. Finally, with the analysis of the behavior of the filters results to changes in the applied rates, it reached an "excellent" value of 300 L / m<sup>2</sup>.d, for both systems studied.

Keywords: Sewage treatment, Sand filter, Rate of surface application.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DE FILTRO DE AREIA (NBR 13969/1997).....	21
FIGURA 2 - MECANISMO BÁSICO DO TRANSPORTE DA ÁGUA NA FILTRAÇÃO..	24
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM BIOFILME BACTERIANO .	27
FIGURA 4 - EFEITO DA CARGA HIDRÁULICA NOS FILTROS .....	28
FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO DAS FASES DO MEIO FILTRANTE.....	29
FIGURA 6 – RESULTADOS DE COLMATAÇÃO EM DIFERENTES PROFUNDIDADES (RODGERS <i>et. al.</i> , 2004).....	34
FIGURA 7 - ESQUEMA E FOTOS DO FILTRO DE AREIA (TONETTI <i>et al.</i> , 2012).....	35
FIGURA 8 - ESQUEMA DOS FILTROS DE AREIA (TONETTI <i>et al.</i> , 2010) .....	36
FIGURA 9 - FILTROS DE AREIA PESQUISADOS POR KANG <i>et al.</i> (2007) .....	37
FIGURA 10 - RESULTADOS DE REMOÇÃO DE DBO <sub>5</sub> NA PESQUISA DE KANG <i>et al.</i> (2007).....	38
FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – JOÃO PESSOA/PB.....	43
FIGURA 12 – ESGOTO AFLUENTE AO SISTEMA DE TRATAMENTO - TUBOS DE QUEDA (SOUZA, 2014) .....	44
FIGURA 13 – ESQUEMA GERAL DO SISTEMA ESTUDADO. ....	44
FIGURA 14 – VISÃO GERAL DO SISTEMA (SEM OS FILTROS DE AREIA) (SOUZA, 2014).....	45
FIGURA 15 – CAIXA DE DISTRIBUIÇÃO DE VAZÃO (SOUZA, 2014).....	45
FIGURA 16 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO MEIO FILTRANTE .....	48
FIGURA 17 – CORTE DO FILTRO DE AREIA .....	49
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS. ....	49
FIGURA 19 – DISPOSITIVO DOSADOR DE ESGOTO .....	50
FIGURA 20 – VALORES DA DBO <sub>5</sub> PARA O TANQUE SÉPTICO E FILTRO ANAERÓBIO.....	55
FIGURA 21 – VALORES DA DQO PARA O TANQUE SÉPTICO E FILTRO ANAERÓBIO.....	55
FIGURA 22 – REMOÇÃO DE DBO <sub>5</sub> E DQO PARA TODAS AS TAXAS (FILTRO DE AREIA 1).....	57
FIGURA 23 – REMOÇÃO DE DBO <sub>5</sub> E DQO PARA TODAS AS TAXAS (FILTRO DE AREIA 2).....	57
FIGURA 24 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COM OUTRAS PESQUISAS. ....	59

FIGURA 25 – EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DE DBO<sub>5</sub> (FILTROS 1, 2 E SISTEMA 1)..60

FIGURA 26 – EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DE DQO (FILTROS 1, 2 E SIESTEMA 1).60

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESULTADOS DE TRABALHOS DE PESQUISAS SOBRE TAXAS DE APLICAÇÃO EM FILTROS DE AREIA.....	39
TABELA 2 – RESULTADO DO ENSAIO DE GRANULOMETRIA DA AREIA.....	48
TABELA 3 - DATAS DAS COLETAS.....	51
TABELA 4 – RESULTADOS DE DBO <sub>5</sub> , DQO E REMOÇÕES PARA A TAXA DE 200 L/m <sup>2</sup> .DIA .....	53
TABELA 5 – RESULTADOS DE DBO <sub>5</sub> , DQO E REMOÇÕES PARA A TAXA DE 300 L/m <sup>2</sup> .DIA .....	53
TABELA 6 – RESULTADOS DE DBO <sub>5</sub> , DQO E REMOÇÕES PARA A TAXA DE 500 L/m <sup>2</sup> .DIA .....	54
TABELA 7 – RESULTADOS DE DBO <sub>5</sub> , DQO E REMOÇÕES PARA A TAXA DE 600 L/m <sup>2</sup> .DIA .....	54
TABELA 8 – DATAS DE COLETA DE CADA TAXA DE APLICAÇÃO.....	56

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - ESTÁGIOS DO BIOFILME.....	26
QUADRO 2 – VOLUMES DAS APLICAÇÕES NO FILTROS DE AREIA.....	51

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Transformação da amônia para nitrito .....	30
Equação 2 – Produto final da nitrificação .....	30
Equação 3 – Desnitrificação .....	30
Equação 4 – Equação empírica da concentração de amônia no efluente .....	31
Equação 5 – Volume útil do tanque séptico .....	46
Equação 6 – Volume útil do filtro anaeróbio .....	47
Equação 7 – Diâmetro efetivo da areia.....	48
Equação 8 – Coeficiente de uniformidade da areia .....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio (BOD em inglês)
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxigênio padrão de 5 dias
DQO	Demanda Química de Oxigênio (COD em inglês)
SS	Sólidos Solúveis
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FA1	Filtro de Areia 1
FA2	Filtro de Areia 2
FAN	Filtro Anaeróbio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
pH	Potencial Hidrogeniônico
TE	Tamanho efetivo da areia
CU	Coefficiente de uniformidade da areia
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UFPB	Universidade Federal da Paraíba

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Objetivo Específico:.....</b>	<b>19</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Aspectos técnicos e operacionais dos filtros de areia.....</b>	<b>20</b>
3.1.1 Características construtivas .....	20
3.1.2 Definição e parâmetros de manutenção e operação dos filtros de areia.....	21
<b>3.2 Mecanismos de remoção de matéria orgânica nos filtros de areia.....</b>	<b>22</b>
3.2.1 Filtração.....	23
3.2.2 Interceptação.....	24
3.2.3 Adesão .....	25
3.2.4 Processos biológicos.....	25
<b>3.3 Biofilme.....</b>	<b>26</b>
<b>3.4 Remoção de nitrogênio.....</b>	<b>29</b>
3.4.1 Remoção de nutrientes em Filtros de Areia.....	31
3.4.2 Combinação de reatores anaeróbios e aeróbios em sistema de tratamento .....	33
<b>3.5 Colmatação.....</b>	<b>33</b>
<b>3.6 Taxa de aplicação superficial.....</b>	<b>35</b>
<b>3.7 Aplicação de filtros de areia para água de reuso.....</b>	<b>41</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Local de estudo.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 Sistema de tratamento de esgoto instalado na Residência Universitária .....</b>	<b>43</b>
4.2.1 Dimensionamento das unidades de tratamento .....	46
4.2.1.1 Tanque séptico.....	46
4.2.1.2 Filtros anaeróbios .....	47
<b>4.3 Montagem dos filtros de areia .....</b>	<b>47</b>
<b>4.4 Divisão dos sistemas estudados.....</b>	<b>49</b>
<b>4.5 Determinação das taxas de aplicação superficial.....</b>	<b>50</b>
<b>4.6 Aplicação do esgoto nos filtros: .....</b>	<b>50</b>
<b>4.7 Análises em campo.....</b>	<b>51</b>

<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>52</b>
<b>5.1 Remoção de matéria orgânica .....</b>	<b>52</b>
<b>5.2 Remoção de nitrogênio .....</b>	<b>61</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>

# 1 INTRODUÇÃO

---

O saneamento básico, com destaque ao esgotamento sanitário é uma importante ferramenta para a preservação dos recursos hídricos, visto que os esgotos são descartados na maioria das vezes em corpos hídricos sem um tratamento adequado.

A garantia do direito ao saneamento está disposta como diretriz da Política Urbana, na Lei nº 10.257/2001, em seu artigo 2º (BRASIL, 2013). Contudo, o cenário atual das condições de infraestrutura urbana relacionadas a coleta e tratamento de efluentes não atende a grande parte da população brasileira.

A quantidade de municípios atendidos com esgotamento sanitário no Nordeste brasileiro é muito baixa. Os piores resultados estão nos Estados do Piauí e Maranhão, com apenas 4 e 5%, respectivamente, de municípios atendidos SNIS (2015). As outras regiões também apresentam índices baixos de esgotamento, trata-se de um problema nacional.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, SNIS (2015), o índice médio nacional de atendimento da população identificado para o abastecimento de água foi de 82,5%, enquanto que o percentual médio de atendimento por rede de coleta de esgoto constatado foi de apenas 48,6%. Além disso, a abrangência dos serviços de saneamento apresenta grande variação entre os estados do país: enquanto que o Sudeste apresenta percentual de coleta de esgoto acima de 70% de cobertura, o Norte apresenta 6,5% e o Nordeste 22,1%.

Os sistemas de coleta e transporte de esgotos podem ser individuais ou coletivos. Os sistemas coletivos são adotados para o atendimento de uma comunidade e são constituídos por uma rede, que recebe os esgotos para transportar adequadamente ao destino final. O atendimento com relação ao tratamento do esgoto gerado por essa comunidade é realizado através de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), que requer investimento para construção; assim, em pequenos municípios, obras de saneamento desse porte sequer são levados em consideração pelos governantes como solução para o tratamento dos efluentes.

Na ausência desse sistema coletivo (por dificuldade de implantação ou inviabilidade), são adotadas soluções individuais, em que a coleta, tratamento e disposição final dos efluentes são realizados de modo a atender apenas uma unidade residencial, ou um pequeno número delas.

Os sistemas individuais mais comuns consistem em tanques sépticos seguido por sumidouros, ou ainda tanques sépticos, filtros anaeróbios e sumidouros. A inserção do filtro

de areia após o tanque séptico ou filtro anaeróbio, confere ao sistema de tratamento elevada eficiência de remoção de matéria orgânica, assim, a qualidade do efluente desses sistemas individuais será significativamente melhorada, que contribuirá para a diminuição do impacto ambiental nos corpos d'água e solo. O Plano Nacional de Saneamento Básico apresenta como ação estruturante a revalorização de soluções individuais para o esgotamento sanitário.

Esta pesquisa consiste no estudo da taxa de aplicação superficial para dimensionamento do filtro de areia, com efluentes de tanque séptico e filtro anaeróbio. Trata-se de um parâmetro de projeto definido pela NBR 13969/97 (Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação) no item 3.23 como a relação entre a vazão de esgoto e a área superficial de uma unidade de tratamento.

Segundo a NBR 13969/1997, as taxas de aplicação são de, no máximo, 100 L/m<sup>2</sup>.dia, quando da aplicação direta de efluentes de tanques sépticos, e 200 L/m<sup>2</sup>.dia, para efluentes de processos aeróbios de tratamento. Esta Norma não faz menção a taxa de aplicação a ser adotada para efluente de filtro anaeróbio, deixando aberta a escolha da taxa de aplicação para o dimensionamento.

A pesquisa foi desenvolvida em dois sistemas de tratamento de esgoto: (1) Tanque Séptico + Filtro Anaeróbio + Filtro de Areia e (2) Tanque Séptico + Filtro de Areia, com a finalidade de obter-se a taxa de aplicação superficial a ser adotada em projetos para as condições da região de estudo (nordeste do Brasil), para ambas as opções.

O efluente de cada sistema proposto foi monitorado durante 3 meses, variando as taxas de aplicação do esgoto a cada semana, totalizando a aplicação de 4 taxas distintas (200 L/m<sup>2</sup>.dia, 300 L/m<sup>2</sup>.dia, 500 L/m<sup>2</sup>.dia e 600 L/m<sup>2</sup>.dia) com o intuito de avaliar a qualidade final do efluente de pós-tratamento, para então determinar a relação entre a taxa de aplicação superficial e o desempenho do filtro de areia na remoção de matéria orgânica.

## **2** OBJETIVOS

---

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar o efeito da taxa de aplicação superficial na remoção de matéria orgânica em filtros de areia tratando efluente de processos anaeróbios.

### **2.2 Objetivo Específico:**

Avaliar a pertinência da interposição do filtro anaeróbio entre o tanque séptico e o filtro de areia.

## 3 REVISÃO DE LITERATURA

---

Neste capítulo apresenta-se a revisão de literatura referente à pesquisas realizadas sobre filtros de areia como pós-tratamento de efluentes de tanque séptico e filtro anaeróbio, bem como temas relacionados ao processo aeróbio dos filtros: nitrificação e microrganismos aderidos ao meio filtrante.

### 3.1 Aspectos técnicos e operacionais dos filtros de areia

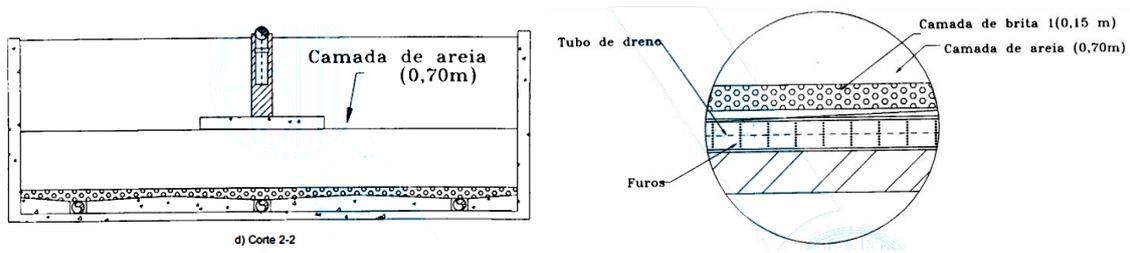
#### 3.1.1 Características construtivas

A norma brasileira que traz as recomendações para construção de filtros de areia para pós-tratamento de esgoto apresenta algumas características técnicas para a construção destes (NBR 13969/97):

- a) sobre a superfície do filtro aberto de areia devem ser admitidas somente as águas das precipitações pluviométricas diretas;
- b) não devem ser permitidas percolações ou infiltrações de esgotos ao meio externo ao filtro de areia;
- c) conforme a necessidade local, pode ser empregado o filtro compacto pré-fabricado de pressão em substituição ao filtro aberto.

Essas recomendações visam a manutenção da condição aeróbia do processo de tratamento do esgoto nos filtros, bem como a estanqueidade deste, com o intuito de não contaminar o solo da área de instalação do sistema de tratamento.

A NBR 13969/97 recomenda os materiais do meio filtrante, bem como a profundidade do leito de areia a ser considerada na construção do filtro. A configuração geométrica do filtro pode variar (filtros circulares, retangulares), sendo que estes devem possuir uma camada de 70 cm de areia, 15 cm de brita (fundo) e um dreno para saída do efluente tratado. A Figura 1 apresenta o esquema proposto pela norma.



**Figura 1 - Esquema de filtro de areia (NBR 13969/1997)**

### 3.1.2 Definição e parâmetros de manutenção e operação dos filtros de areia

A NBR 13969/97 define filtro de areia como um tanque preenchido de areia e outros meios filtrantes, com fundo drenante e com esgoto em fluxo descendente, onde ocorre a remoção de poluentes, tanto por ação biológica quanto física (figura 1). Jordão e Pessoa (2005) discorrem que é incorreto chamar esse sistema de filtro, posto que o seu funcionamento não possui como mecanismo principal a filtração, pois a população microbiana presente no leito de areia é similar àquela encontrada em sistemas de lodos ativados. Nesta linha de pensamento, Kristiansen (1981) discorre que o leito de areia, juntamente aos microrganismos, forma um filtro vivo.

Apesar de suas vantagens já conhecidas, o uso do filtro de areia no Brasil ainda é limitado, tendo ganhado notoriedade com a publicação da norma específica para o pós-tratamento de efluente do tanque séptico, a NBR 13969 (1997).

Com relação a taxa de aplicação superficial nos filtros de areia, a NBR 13969/1997 recomenda a aplicação no valor limitado a 100 L/m<sup>2</sup>.dia, quando da aplicação direta de efluentes de tanques sépticos, e 200 L/m<sup>2</sup>.dia, para efluentes de processos aeróbios.

A NBR 13969/1997 recomenda a aplicação dos filtros de areia como forma de pós-tratamento de efluentes, nas seguintes situações:

- O lençol freático estiver próximo à superfície do terreno; devido ao fato da eficiência de remoção/tratamento nos filtros;
- A legislação da qualidade das águas dos corpos receptores impõe uma alta remoção de poluentes do efluente gerado no tanque séptico ou no filtro anaeróbio;

Tratando-se dos aspectos de dimensionamento e operação dos filtros intermitentes, de filtração lenta, temos:

- A especificação do material para filtração;
- Manutenção da condição aeróbia e intermitência na aplicação de esgotos;

- Taxa de aplicação;
- Alternância de uso;
- Manutenção.

Dos aspectos listados acima tratar-se-á com mais detalhe nesta pesquisa sobre a taxa de aplicação superficial.

### 3.2 Mecanismos de remoção de matéria orgânica nos filtros de areia

A simplicidade, requisitos químicos e energéticos, para uma boa remoção de matéria orgânica, fizeram com que os filtros de areia ganhassem popularidade (HAIG, 2011). Os filtros são aplicados no tratamento de água e esgotos, sendo que o foco desta pesquisa está no efluente de filtros anaeróbios e tanque séptico.

O funcionamento deste reator baseia-se na aplicação intermitente de esgoto sobre a superfície de um leito de areia por meio de uma tubulação de distribuição (MENORET *et al.* 2002). Durante a infiltração do líquido acontece o tratamento do efluente por mecanismos físicos, químicos e biológicos (AUSLAND *et al.*, 2002). Esses processos ocorrem simultaneamente nos filtros.

Silva (2006) lista alguns mecanismos de remoção de matéria orgânica na filtração de esgoto em areia: filtração, sedimentação, impacto inercial, interceptação, adesão, floculação, difusão, adsorção, absorção e atividade biológica:

- A filtração envolve a retenção mecânica, que corresponderia aos sólidos de maior tamanho;
- O impacto inercial, a interceptação e a adesão ocorrem através do choque que há entre as partículas presentes no efluente e os grãos do leito filtrante. Com movimento das partículas entre os poros do filtro ocorre a formação de flocos, que são removidos posteriormente por outros mecanismos.
- A difusão ocorre devido aos pequenos interstícios que existem no meio poroso, também porque o fluxo no filtro é laminar. Esse mecanismo é importante na remoção de vírus, por exemplo, que são partículas muito pequenas.
- A adsorção é dividida em dois tipos: física e química. A adsorção física dos ocorre na superfície do meio filtrante devido a forças eletrostáticas, eletrocinéticas e de Van der Waals; enquanto que a adsorção química ocorre devido à ligação e interação química entre as

partículas presentes no efluente e o meio filtrante (ANDERSON *et al.*, 1985; CRITES e TCHOBANOGLIOUS, 1998; MENORET, 2001).

Os processos biológicos são os principais responsáveis pela remoção da matéria orgânica nos filtros de areia, com maior atuação de bactérias, bem como animais multicelulares, inclusive (CALAWAY, 1957).

### 3.2.1 Filtração

A filtração é um fenômeno essencialmente físico, que depende de fatores como o tamanho das partículas do material que se deseja filtrar e da granulometria do leito filtrante. A fração das partículas retidas cresce na medida em que o tamanho dos grãos que compõem o leito se reduz, ou seja, com a diminuição dos espaços vazios. A matéria em suspensão mais grosseira é retida na superfície do filtro por ação mecânica. As partículas menores são retidas entre os grãos do leito filtrante (SILVA, 2006).

A filtração em areia é uma forma extremamente simplificada de tratamento, desenvolvida a partir de uma analogia estabelecida com a percolação de águas naturais através do solo até os aquíferos e de lá para as fontes, que atendiam às exigências estéticas e sanitárias do homem. Assim, foram desenvolvidos, principalmente na Grã-Bretanha, os filtros de areia, estudados com várias taxas de aplicação superficial, com maior eficiência na remoção de partículas para taxas reduzidas (MURTHA *et al.*, 1997).

A filtração lenta em areia tem sido indicada pela literatura especializada como alternativa de viável aplicação, principalmente em pequenas comunidades. São atribuídas algumas vantagens à filtração: facilidade operacional, baixos custos de implantação e operação e grande eficiência na remoção de sólidos e organismos patogênicos (MURTHA *et al.*, 2003).

Di Bernardo (1999) discorre que o uso de baixas taxas de filtração faz com que o efluente permaneça por mais tempo sobre o meio filtrante e no seu interior, o que favorece uma intensa atividade biológica no filtro, que confere elevada eficiência na remoção de bactérias, vírus e cistos de *Giardia*. No entanto, o desempenho dos filtros lentos na remoção de microrganismos não depende apenas da taxa de filtração, tem relação direta com a temperatura, da espessura do meio filtrante, do tamanho dos grãos do meio filtrante, da maturidade microbiológica deste, etc.

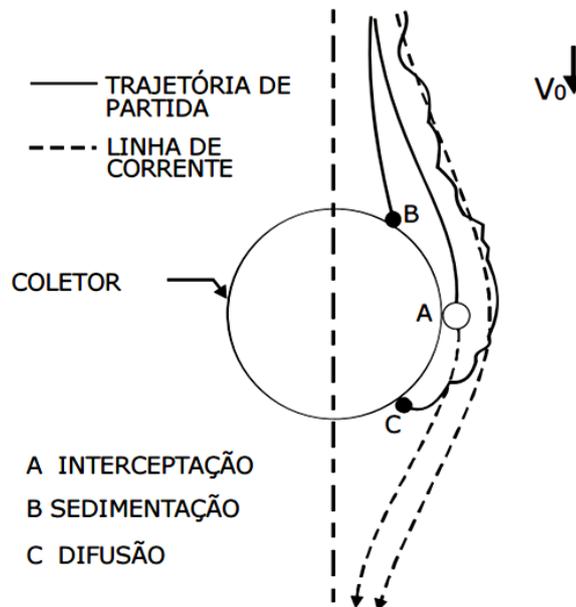
### 3.2.2 Intercepção

A intercepção ocorre sempre quando há o contato entre as partículas suspensas e os grãos do leito filtrante. Yao (1971) discorre sobre três mecanismos de intercepção: a intercepção propriamente dita, a sedimentação e a difusão (Figura 2).

Silva (2006) define a intercepção propriamente dita como a forma por meio da qual as partículas em suspensão podem colidir com os grãos do leito filtrante se forem conduzidas através de uma linha de fluxo muito próxima do grão, em que há o contato com a superfície deste. Assim, a intercepção das partículas aumentará na medida que for maior sua dimensão (ponto A da Figura 2).

No caso em que a partícula é mais densa que a água, a sedimentação ocorre como ação da força da gravidade que atua sobre a partícula. Essa força produz uma componente vertical da resultante da velocidade de condução dessas partículas. A colisão destas com os grãos do meio filtrante dá-se pelo efeito combinado do peso das partículas submersas e da força de arraste do fluxo (linha B da Figura 2) (SILVA, 2006).

Silva (2006) descreve o processo de difusão (letra C da figura 2) através do movimento Browniano das partículas, em que energia térmica dos fluidos manifesta-se como um movimento desordenado de suas moléculas.



**Figura 2 - Mecanismo básico do transporte da água na filtração**

Fonte: YAO (1971).

### 3.2.3 Adesão

Cánepa de Vargas (1992) ressalta que enquanto não se produz a aderência da partícula aos grãos do leito filtrante não há qualquer remoção. A aderência ocorre através do processo físico-químico de adsorção, que compreende três mecanismos (SILVA, 2006):

- As forças de atração e de Van der Waals
- Adsorção eletrostática devido às cargas elétricas da partícula e dos grãos do leito filtrante;
- Adsorção devido às interações químicas entre a partícula e os grãos do leito filtrante.

A aderência das partículas ao biofilme formado nos filtros possui um papel importante na remoção de matéria orgânica, coloidal e solúvel, além dos microrganismos. (CÁNEPA DE VARGAS, 1992; CRITES E TCHOBANOGLIOUS, 1998).

### 3.2.4 Processos biológicos

No início da operação dos filtros de areia, já se verifica a formação de uma fina camada de bactéria em torno dos grãos da parte superior do leito filtrante, o biofilme. Este é de fundamental importância na operação dos filtros, visto que retém por meio de absorção a matéria orgânica, solúvel e coloidal, e os microrganismos. Segundo Crites e Tchobanoglous (1998), o material retido é decomposto e oxidado durante o período de descanso entre duas aplicações.

A depuração biológica aeróbia se divide esquematicamente em duas fases (CRITES e TCHOBANOGLIOUS, 1998):

- Uma fase rápida de adsorção e de acumulação dos compostos sob a forma de reserva;
- Uma fase mais lenta de mineralização e de excreção dos compostos mineralizados. É durante esta fase que acontece a maior parte do consumo do oxigênio.

Além dessas duas fases há uma etapa preliminar de degradação extracelular da matéria orgânica presente sob a forma de macromoléculas não diretamente assimiláveis, através da excreção de enzimas extracelulares. A matéria solúvel é consumida rapidamente, enquanto a matéria coloidal é solubilizada enzimaticamente. O material solubilizado é então transferido através da membrana celular e convertido em produtos finais. O produtos dessa

degradação são transportados para camadas inferiores do filtro, sendo eventualmente removido através dos drenos (CRITES e TCHOBANOGLOUS, 1998).

Silva (2006) ressalta alguns aspectos fundamentais para o correto funcionamento dos filtros de areia:

- Hidráulico: o efluente deve penetrar no leito e ter um tempo de contato suficientemente longo com o biofilme depurador para garantir a degradação da matéria orgânica;
- Aeração: o oxigênio deve penetrar no interior do leito e atender às necessidades dos microrganismos aeróbios responsáveis pela degradação da matéria orgânica.

### 3.3 Biofilme

Costa (1989) define biofilme como um conjunto de microrganismos e de produtos extracelulares aderidos a um suporte sólido, que formam uma camada volumosa e espessa, com uma estrutura externa não totalmente regular e uniforme.

Iwai & Kitao (1994) *apud* Von Sperling (1996) descreve o processo de formação de um biofilme em três estágios, conforme o quadro 1:

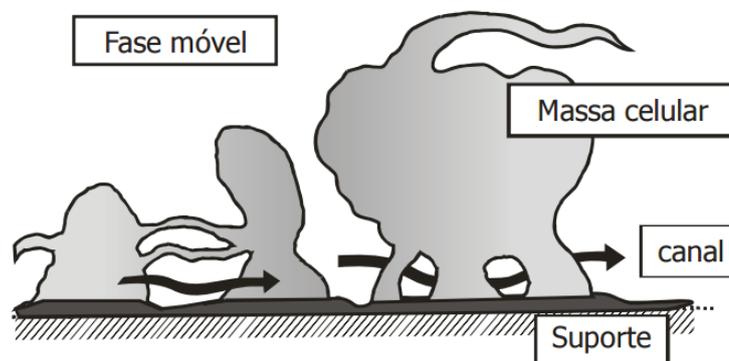
Quadro 1 - Estágios do biofilme

Espessura do biofilme	Características
Fina	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O filme é fino e frequentemente não cobre toda a superfície do meio suporte;</li> <li>• O crescimento bacteriano se dá segundo uma taxa logarítmica</li> <li>• Todos os microrganismos crescem nas mesmas condições, com o crescimento sendo similar ao de uma biomassa dispersa.</li> </ul>
Intermediária	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A espessura do filme torna-se maior;</li> <li>• A taxa de crescimento bacteriano torna-se constante;</li> <li>• A espessura da camada ativa permanece inalterada, independentemente do aumento da espessura total do biofilme;</li> <li>• Caso o suprimento de matéria orgânica seja limitado, os microrganismos assumem um metabolismo suficiente apenas para a sua manutenção, não havendo crescimento bacteriano;</li> <li>• Caso o suprimento de matéria orgânica seja inferior aos requisitos para manutenção, a espessura do biofilme torna-se menor.</li> </ul>

Elevada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A espessura do biofilme atinge um valor bastante elevado;</li> <li>• O crescimento microbiano é contraposto pelo próprio decaimento dos organismos, pelo consumo por outros organismos e pela tensão de cisalhamento;</li> <li>• Partes do biofilme podem ser desalojadas do meio suporte;</li> <li>• Caso o biofilme continue a crescer, sem ser desalojado do meio suporte, ocorrerão entupimentos do biofiltro.</li> </ul>
---------	--

Fonte: Baseado em IWAI & KITAO, 1994 *apud* VON SPERLING, 1996.

Segundo Menoret (2001), o biofilme apresenta uma estrutura porosa e muito absorvente. Estudos sobre o biofilme mostram que este não é um empilhamento regular de células, apresentam uma grande heterogeneidade. A Figura 3 apresenta a idealização de um biofilme real, que segundo Menoret (2001) é um aglomerado de células interligadas por fibrilas e percorridas por uma rede de canais.



**Figura 3 - Representação esquemática de um biofilme bacteriano**

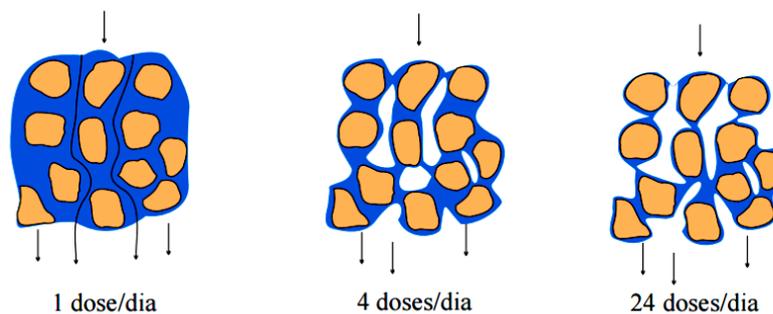
Fonte: MENORET (2001).

Para um bom desenvolvimento e eficiência do biofilme resalta-se alguns pontos importantes (MELO, *et al.*, 1999):

- propriedades do material suporte - densidade, rugosidade, porosidade, tamanho dos poros e forma da superfície;
- microrganismos envolvidos e as propriedades destes e do meio aquoso: pH, temperatura, velocidade de escoamento, tempo de detenção, concentração de microrganismos, tensão superficial e força iônica do meio.

Para atender principalmente à manutenção do suprimento permanente de ar que bactérias necessitam, os filtros intermitentes funcionam segundo uma alternância entre dosagem e descanso. É durante esta última fase que o oxigênio nos espaços vazios do leito de areia é renovado por meio dos mecanismos de difusão molecular (SILVA, 2006).

Outro ponto a ser ressaltado com relação a alternância, dosagem – descanso, refere-se ao crescimento biológico. No processo biológico que acontecem nos filtros, como em qualquer processo, a oxidação da matéria orgânica é acompanhada de um desenvolvimento bacteriano que, se não for equilibrado, provoca a colmatação do filtro. Durante a fase de repouso, quando cessa a entrada de carga orgânica, que ocorre o processo regulador da massa biológica através da respiração endógena. Esse controle ajuda ainda na preservação das condições de infiltração do leito. Para isso, resalta-se a importância da granulometria do leito filtrante, a carga hidráulica diária e a forma como esta é aplicada na manutenção de um fluxo não saturado, conforme ilustrado na Figura 4 (CRITES e TCHOBANOGLIOUS, 1998).



**Figura 4 - Efeito da carga hidráulica nos filtros**

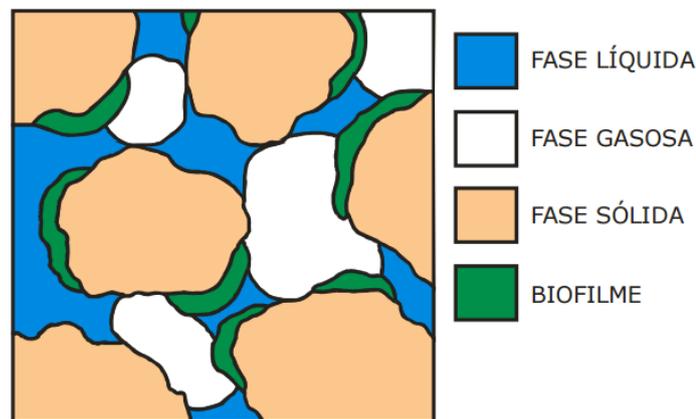
Fonte: (CRITES e TCHOBANOGLIOUS, 1998).

Quando o volume de efluente aplicado é suficiente para preencher todo o espaço vazio do meio, parte da matéria orgânica e microrganismos passam através do filtro sem tratamento, geralmente acontece quando a carga diária é aplicada apenas em dose. Quando se reduz o volume aplicado por dose, ocorre um fluxo parcialmente saturado. Quando se reduz ainda mais, o fluxo torna-se não saturado e escoar em uma fina lâmina em torno das partículas do meio (situações da figura 4 ) Com isso, os fenômenos físicos de remoção são favorecidos e o oxigênio do ar pode acessar todo o leito através dos espaços intersticiais (CRITES e TCHOBANOGLIOUS, 1998).

O fracionamento do volume aplicado em várias doses favorece o aporte convectivo de ar atmosférico, rico em oxigênio (LEFEVRE, 1988; SCHMITT, 1989). Outro aspecto relevante desse fracionamento é o aumento do contato do esgoto tratado com o biofilme, pois

ele favorece os mecanismos físicos de remoção e a troca de solutos entre o biofilme e o esgoto (SILVA, 2006).

Em condições não saturadas, o meio filtrante se caracteriza por apresentar três fases: líquida, gasosa e sólida. Os microrganismos presentes no leito adicionam uma quarta fase: o biofilme.



**Figura 5 - Ilustração das fases do meio filtrante**

Fonte: MENORET, 2001.

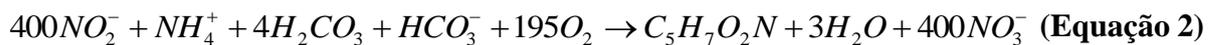
As fases apresentadas na Figura 5, com exceção do meio filtrante inerte, estão em interação contínua, os espaços que estas ocupam mudam constantemente (SILVA, 2006).

### 3.4 Remoção de nitrogênio

O nitrogênio presente no esgoto fresco está quase todo combinado sob a forma de proteína e ureia. A oxidação biológica realizada pelas bactérias transformam o nitrogênio presente em amônia, depois em nitritos e nitratos, em sequência. A concentração de nitrogênio, sob essas varias formas citadas, indica a idade do esgoto e/ou a sua estabilização. (DRIVER et al, 1972; PESSOA; JORDÃO, 1982; PAGANINI, 1997).

Segundo Foco et al. (2014) a remoção biológica de nitrogênio compreende os processos sequenciais de nitrificação e desnitrificação. Na nitrificação, bactérias autotróficas realizam a oxidação de amônia para nitrito e, em seguida, nitrato. Esse processo requer a presença de oxigênio dissolvido, logo só é possível em ambiente aeróbio. Na desnitrificação, o nitrato ou nitrito são reduzidos a nitrogênio molecular, utilizando material orgânico como redutor e bactérias heterotróficas mediando o processo em ambiente anóxico (FOCO *et al.*, 2014).

A conversão de amônia em nitrito, produto intermediário no processo, envolve uma série complexa de reações, nas quais a equação (1) descreve a transformação da amônia para nitrito sob a ação de bactérias Nitrosomonas. O produto final da nitrificação é descrito pela equação (2), que resume a conversão de nitrito para nitrato sob a ação de bactérias Nitrobacter (Metcalf & Eddy, 2003):

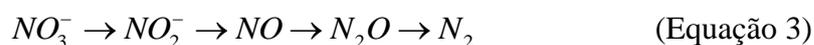


Nos processos anaeróbios, o principal efeito sobre o nitrogênio orgânico é sua hidrólise a nitrogênio amoniacal. Esse composto, além de ser tóxico para algumas espécies aquáticas, ao atingir o corpo receptor exercerá demanda por oxigênio, já que no ambiente aquático pode ser oxidado para nitrito e nitrato, no processo de nitrificação. Assim, a inserção de reatores aeróbios nos sistemas de tratamento contribuem para diminuição do impacto no corpo receptor do efluente tratado (HAGOPIAN; RILEY, 1998).

Um processo biológico aplicado à degradação do nitrogênio amoniacal proveniente do tratamento anaeróbio, consiste em uma etapa aeróbia, em que ocorre a nitrificação, seguida por uma etapa anóxica, onde o nitrato deve ser reduzido a nitrogênio molecular, que é liberado para a atmosfera, em um processo chamado desnitrificação (BEG, 1980; HÄNEL, 1988; ABREU, 1994).

A reação de desnitrificação dá-se através da seguinte sequência: nitrato, nitrito, óxido nitroso e nitrogênio gasoso (CARLSON, *et al.*, 1974). A desnitrificação ocorre por meio de bactérias que utilizam uma fonte de carbono como doador de elétrons e o nitrogênio oxidado comoceptor (em ambiente anóxico). A redução de nitrato a nitrogênio gasoso completa-se em dois estágios básicos, o primeiro corresponde a redução do nitrato a nitrito, no segundo, o nitrito é reduzido a nitrogênio gasoso (N<sub>2</sub>). Vários gêneros de bactérias heterotróficas são capazes em desnitrificar efluentes em condições anóxicas: *Pseudomonas*, *Paracoccus*, *Alcaligenes*, *Thiobacillus* *Bacillus* (BARNES *et al.*, 1983; VAN HAANDEL *et al.*, 1994; SÁNCHEZ *et al.*, 2000; METCALF; EDDY, 2003).

A reação abaixo caracteriza o processo de desnitrificação (Metcalf & Eddy, 2003):



Barnes *et al.* (1983) discute que a temperatura ótima para o crescimento das bactérias nitrificantes varia entre 28 e 36°C, e que em temperaturas abaixo de 4 °C esperando-se pouco ou insignificante crescimento.

Os valores de pH ótimo para a nitrificação são próximos de 7,5. O pH tem acentuado efeito inibitório para *Nitrobacter*, e governa a dissociação do íon amônio (SANTOS, 2012).

O processo de nitrificação é estreitamente vinculado à disponibilidade de oxigênio, compondo com a DBO<sub>5</sub> a demanda total de oxigênio (DTO), pois as bactérias nitrificantes são estritamente aeróbias. Desse modo, filtros com sobrecarga, em que a DTO aplicada excede a capacidade de oxidação ou que estão submetidos a longos períodos de submersão de sua superfície, que impede a renovação de ar no leito, não concluem a oxidação, ou mesmo em parte, da amônia. A perda de nitrogênio por desnitrificação ocorre em pequenas proporções, em microssítios anóxicos, em leito filtrante intermitente (CRITES e TCHOBANOGLOUS, 1998).

### 3.4.1 Remoção de nutrientes em Filtros de Areia

Verma e Mancl (2001) utilizaram os resultados dos filtros de areia de Massachusetts do período de 1893 a 1897 e da Flórida publicados por Furman em 1955, totalizando 143 observações, nesse estudo desenvolveram uma equação empírica que correlaciona alguns aspectos construtivos e operacionais dos filtros ( $R^2 = 0,908$ ):

$$N_0 = -1,78 + (11 \times TE) - (3,9 \times H) - (0,17 \times CU) + (0,054 \times Ni) - (0,024 \times T) + (0,0019 \times NTK) - (0,029 \times L) \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde,

$N_0$  : concentração de amônia no efluente, mg/l

$TE$  : tamanho efetivo, mm

$H$  : profundidade do leito, m

$CU$  : coeficiente de uniformidade

$NTK$  : nitrogênio total de Kjeddahl afluente, mg/l

$T$  : temperatura do ar, °C

$Ni$  : concentração de amônia no afluente, mg/l

$L$  : carga hidráulica diária, l/m<sup>2</sup> .dia

Na equação de Verma e Mancl (2001), equação 4, evidencia-se a importância dos aspectos de projeto e operação dos filtros, no que se refere a oxidação da amônia. Analisando os coeficientes de cada variável da equação nota-se a grande importância do tamanho efetivo da areia e da profundidade do leito.

Alguns estudos mostram resultados com relação a nitrificação nos filtros de areia:

- Mottier *et al.* (2000) encontraram um aumento da nitrificação com a profundidade do leito, até esta atingir 98% a 2,0 m, com a aplicação de uma carga hidráulica de 25,0 cm/dia.
- Schmitt (1989), baseado nos estudos de McLaren (1969), obteve uma nitrificação total em apenas 40 cm de profundidade. Contudo, o estudo utilizou uma carga de 3,85 cm/dia, muito baixa quando comparado com Mottier *et al.* (2000).
- Darby *et al.* (1996) obtiveram resultados próximos aos de Mc Laren (1969) em filtros de areia com espessura de 38,0 cm e cargas hidráulicas entre 4,1 e 16,3 cm/dia.
- Chadwick (1937) *apud* Widrig *et al.* (1996) avaliou espessuras de leito de 0,31 a 1,63 m com areias de TE=0,25mm e carga hidráulica de 7,6 cm/dia de esgoto decantado, obtendo concentrações de amônia efluente de 2,12 mg/L para o de menor profundidade e de 0,18 mg/l para o mais profundo. Assim, chegou a conclusão de que profundidades superiores a 0,90 m não apresentavam vantagem.
- Widrig *et al.* (1996) avaliou as profundidades de 0,60, 0,45 e 0,30m com areia de TE=0,44 mm e uma carga hidráulica de 23,6 cm/dia aplicada em dose única e encontraram percentuais de oxidação de 98, 93 e 96%, respectivamente.
- Schmitt (1989) discorre que a carga hidráulica diária não tem relação com o desempenho de filtros de areia na oxidação da amônia, sendo seus efeitos atribuídos à deficiência na renovação do oxigênio no leito filtrante.

Darby *et al.* (1996) chegaram a resultados que para qualquer valor de tamanho efetivo da areia, quando se aumenta a frequência de aplicação obtém-se melhores resultados de remoção de nitrogênio.

Nos sistemas biológicos, operando em condições normais geralmente apresentam eficiências de nitrificação entre 85 e 99%, constatando-se eficiências menores fora das faixas adequadas de pH, OD e idade do lodo. Assim, o pH é um fator de grande importância na eficiência do sistema, visto que as mudanças no teor de nitrogênio introduzidas pelos

efluentes geram variações de pH a ponto de causarem inibição, enquanto que outros fatores apresentam são mais controláveis (ORTIZ *et al.*, 2012).

### 3.4.2 Combinação de reatores anaeróbios e aeróbios em sistema de tratamento

A tendência atual de inserir reatores anaeróbios e aeróbios no mesmo sistemas de tratamento, tem como objetivo otimizar o efluente do reator anaeróbio, pela aeração e pela redução complementar da matéria orgânica carbonácea, bem como, pela remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo (ISOLDI, *et al.*, 2005).

Kassab *et al.* (2010) em sua revisão de literatura sobre tratamento de esgoto doméstico em sistema com reatores aeróbios e anaeróbios, ressalta a eficácia dos sistemas anaeróbio-aeróbio. As contribuições do tratamento anaeróbio no desempenho global dos sistemas são expressivas, enfatizando a redução no consumo de energia e excesso de produção de lodo em relação a substituição do sistema convencional aeróbico por sistemas anaeróbio-aeróbio.

Na combinação de processos, como por exemplo, reator anaeróbio de fluxo ascendente e processo aeróbio constata-se a degradação da matéria orgânica e a remoção do conteúdo de nitrogênio amoniacal do efluente, caracterizando-se pelo baixo custo e fácil operação, que constitui-se numa alternativa eficaz para novas instalações, principalmente, quando se dispõe de espaço físico (DURAN *et al.*, 1993 *apud* ISOLDI, *et al.*, 2005).

## 3.5 Colmatação

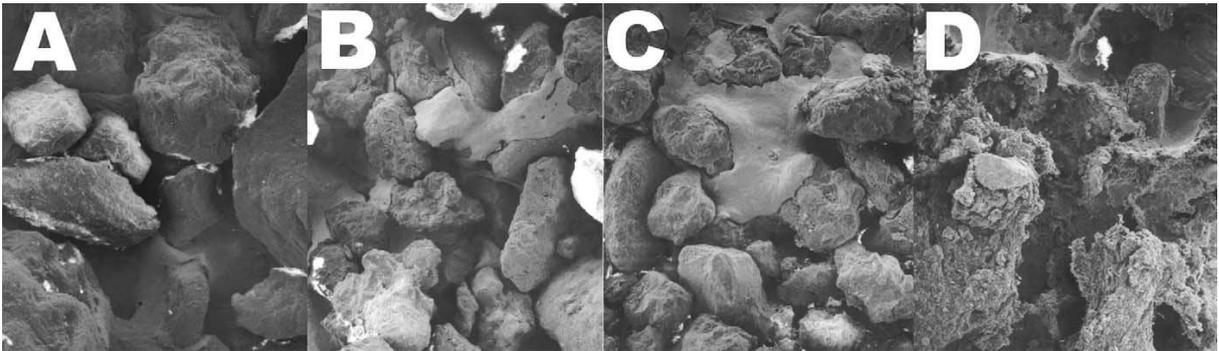
A colmatação consiste na redução da área transversal dos espaços vazios de um determinado meio poroso, disponíveis ao fluido percolante. É um processo que ocorre ao longo do tempo, que reduz a eficiência do sistema drenante (REMÍGIO, 2006).

Em consulta a trabalhos que trazem estudos sobre a colmatação, alguns autores (RICE, 1974; LEFEVRE, 1988, SCHMITT, 1989; BANCOLÉ, 2001; MENORET, 2001) discorrem sobre três origens para esse processo: física, química e biológica.

- A colmatação física resulta do depósito dos sólidos suspensos que reduz a porosidade do leito filtrante. Verifica-se maior atividade em leitos com granulometrias mais finas, e menor atividade nos que têm granulometrias mais grosseiras.
- A colmatação química resulta da deposição de sais dissolvidos no interior dos poros por precipitação, ou ainda pela ação defloculante do íon sódio, caracterizando-se pela cimentação dos cinco primeiros centímetros do leito de areia.

- A colmatção biológica caracteriza-se por uma camada negra e decorre da submersão por períodos prolongados da superfície de infiltração. Essa camada é rica em bactérias que produzem polímeros extracelulares em grande quantidade. Kang *et al.*, (2007), relata um exemplo de colmatção biológica em taxas de aplicação superficial elevadas.

Rodgers *et al.* (2004) apresenta resultados sobre colmatção em filtros intermitentes de areia, relacionando a acumulação de biomassa e deposição de partículas sólidas em suspensão no meio filtrante.



**Figura 6 – Resultados de colmatção em diferentes profundidades (RODGERS *et al.*, 2004)**

A figura 6 mostra o resultado do estudo de Rodgers *et al.* (2004). São análises de microscopia eletrônica de varredura dos grãos de areia grossa, camada superior, tomadas com uma ampliação de 40 vezes. (A) amostra de areia limpa; (B) amostra com uma profundidade de 0,07 m abaixo da superfície após 806 d de operação; (C) da amostra a uma profundidade de 0,02 m abaixo da superfície após 806 d de operação; (D) de uma amostra de superfície após 806 d de operação.

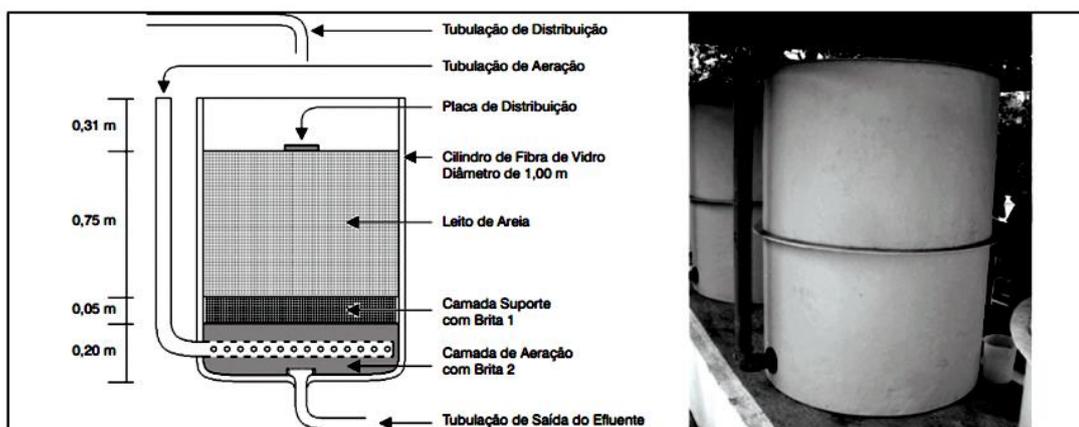
Os resultados de Rodgers *et al.* (2004) mostram a matéria orgânica aderida ao meio filtrante. Em filtros de areia intermitentes, o principal mecanismo responsável pela colmatção indica-se ser o desenvolvimento de biofilme, que segundo o autor é em grande parte um fenômeno de superfície.

### 3.6 Taxa de aplicação superficial

A NBR 13969/97 define taxa de aplicação hidráulica superficial como a relação entre a vazão de esgoto e a área superficial de uma unidade de tratamento; sendo um dos parâmetros de projeto e operação de filtros de areia.

Em uma pesquisa com sistema composto pela combinação de filtro anaeróbio com filtro de areia, para tratamento de esgoto domiciliar, Tonetti *et al.* (2012) chegaram a uma eficiência global de remoção de 93% da matéria orgânica.

No mesmo estudo, Tonetti *et al.* (2012) discorrem sobre taxas de aplicação, ressaltando que quanto a este quesito a NBR 13969/1997 (ABNT, 1997) é extremamente conservadora para a taxa limite de aplicação de efluente anaeróbio; a norma orienta o máximo de 100 L/m<sup>2</sup>.dia para efluentes oriundos de tanques sépticos e 200 L/m<sup>2</sup>.dia quando proveniente de um tratamento aeróbio. Na pesquisa, o autor afirma que com os resultados obtidos em seu trabalho, fazendo uma extrapolação para o desempenho ao longo de todo um dia de funcionamento, pode-se chegar a uma taxa de aplicação de 500 L/m<sup>2</sup>.dia, mantendo a mesma remoção de DBO<sub>5</sub>.



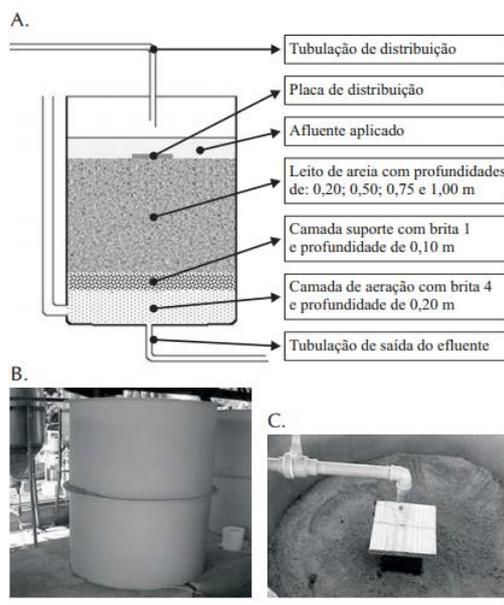
**Figura 7 - Esquema e fotos do filtro de areia (TONETTI *et al.*, 2012).**

A figura 7 mostra o esquema dos filtros da pesquisa realizada por Tonetti *et al.* (2012), em que pode-se observar a profundidade do leito filtrante, 75 cm de areia e 25 cm de brita. A NBR 13969/97 recomenda 70 cm de leito de areia e 25 cm de camada de brita para drenagem.

Tonetti *et al.* (2005, 2010) avaliaram a eficácia da associação dos filtros de areia aos filtros anaeróbios com recheio de bambu, utilizando esgoto doméstico de pequenas

comunidades rurais. Foi avaliada a variação de profundidade do leito de areia dos filtros, bem como a aplicação de diferentes taxas de aplicação superficial. Os leitos de areia foram fixados em 0,25, 0,50, 0,75 e 1,00 m (Figura 8); as taxas de aplicação foram distribuídas em 20, 40, 60, 80, 100, 120, 160, 180, 200, 240 e 300 L/m<sup>2</sup>.dia.

O estudo de Tonetti *et al.* (2005, 2010) apresentou melhores resultados para remoção de matéria orgânica nos filtros com leito de areia nas profundidades de 0,75 e 1,00m, valores próximos ao recomendado pela norma quanto a profundidade a ser adotada em projeto; os filtros com profundidade de 0,25 e 0,5m obtiveram resultados satisfatórios apenas para taxas de aplicações pequenas (20, 40 L/m<sup>2</sup>.dia), muito abaixo do recomendando pela ABNT. O aumento das taxas de aplicação resultou no decréscimo da eficiência de remoção de DBO<sub>5</sub> e DQO, mesmo nos filtros de maior profundidade (0,75 e 1m).



**Figura 8 - Esquema dos filtros de areia (Tonetti *et al.*, 2010)**

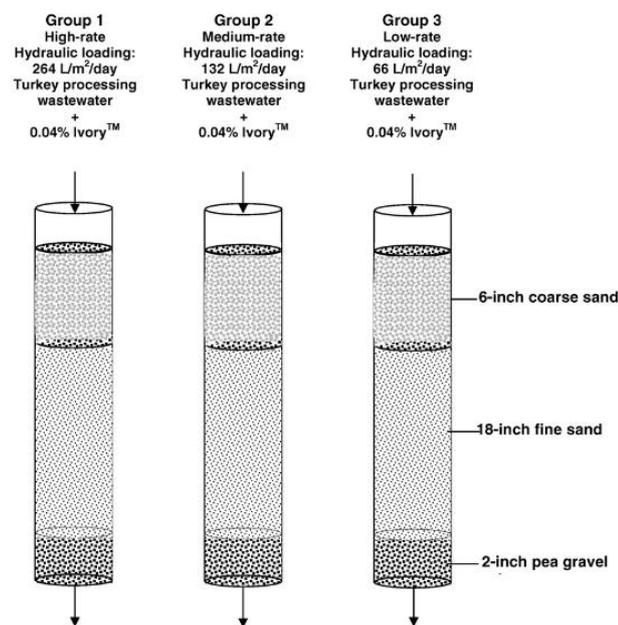
Darby *et al.* (1996), em pesquisa com meios filtrantes uniformes, com diferentes frequências de aplicação, não encontraram diferença entre as areias com tamanhos efetivos distintos, aplicando taxa de 163 e 326 L/m<sup>2</sup>.dia, com relação ao comportamento dos parâmetros DBO<sub>5</sub>, DQO, SS, e turbidez. A diferença deu-se, principalmente, pela variação das taxas de aplicação, ao aumentá-las a remoção de matéria orgânica nos reatores diminuía.

Dultra (2007) estudou os efeitos da variação de tamanhos efetivos e o coeficiente de uniformidade das areias que preenchem os filtros, a frequência de aplicação do esgoto e a variação das taxas de aplicação superficial. Constatou o mesmo que Darby *et al.* (1996) e Silva (2006), que os tamanhos efetivos não são relevantes nos resultados de remoção de

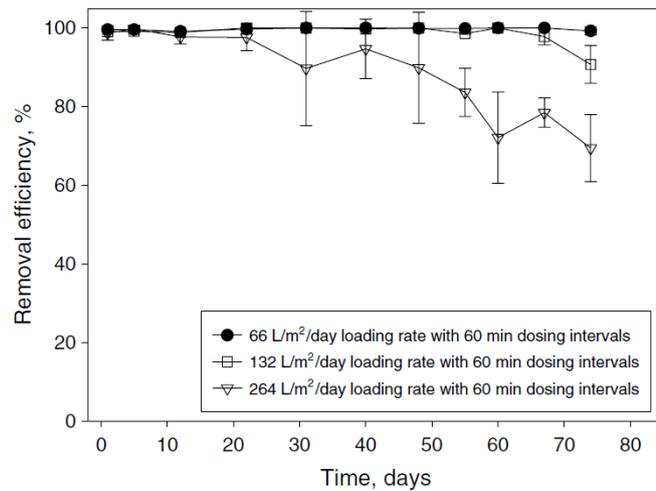
matéria orgânica. Os parâmetros mais importantes consistem na frequência de aplicação, quanto mais distribuído durante o dia melhor o desempenho do filtro, e a taxa de aplicação superficial de esgoto; o aumento desta implicou em uma redução da eficiência do filtro.

Tonetti *et al.* (2012) avaliou diferentes taxas de aplicações em filtros de areia para pós-tratamento de efluentes de filtros anaeróbios. O referido autor variou as taxas em 50, 100, 150 e 200 L/m<sup>2</sup>.dia. Chegou a resultados de remoção decrescente à medida que aumentava a quantidade de esgoto disposta nos filtros, com pouca diferença entre os resultados, visto que a taxas são baixas, comparadas ao estudo de Dultra (2007) e Darby (1996).

Kang *et al.*, (2007) aplicaram taxas superficiais de 264, 132 e 66 L/m<sup>2</sup>.dia em três filtros de areia estratificados constituídos com duas camadas de areia: 46 cm de areia grossa (d<sub>10</sub>: 2,4 mm; CU: 1,35), e 15 cm de areia fina (d<sub>10</sub>: 0,93 mm; CU: 1,50) , além de 5 cm brita (d<sub>10</sub>: 3,8 mm; CU: 1,68), durante 81 dias (Figura 8). Obtiveram remoção de 99, 98 e 88% de DBO<sub>5</sub>, respectivamente, para as taxas de aplicação de 66, 132 e 264 L/m<sup>2</sup>.dia. Quando aplicadas taxas elevadas (264 L/m<sup>2</sup>.dia), ocorreu a formação de uma camada escura na superfície do filtro com 30 dias e na camada mais profunda com 50 dias, os autores atribuem esse fato a aplicação de elevadas taxas superficiais, contudo, não investigaram com detalhes as causas da camada escurecida. Concluíram que a adoção de taxas de aplicação superficiais menores resultam em bons desempenhos, atendendo os requisitos rigorosos da descarga a um custo razoável.



**Figura 9 - Filtros de areia pesquisados por Kang et al. (2007)**



**Figura 10 - Resultados de remoção de  $DBO_5$  na pesquisa de Kang *et al.* (2007)**

A Figura 9 mostra o detalhe do filtro pesquisado por Kang *et al.* (2007), diferente do recomendado no Brasil, os autores utilizaram areias de tamanhos efetivos diferentes, dispostas em duas camadas. A Figura 10 mostra os resultados da remoção de  $DBO_5$  para as taxas estudadas, em que notou-se maior diferença nas remoções a partir do 30º dia, período que coincide com o surgimento da camada escura na superfície do filtro, podendo ai ter iniciado uma colmatação biológica, não avaliada pelos autores. Ressalta-se que para cada taxa de aplicação há um filtro de areia.

Segundo Ausland *et al.* (2002) a aplicação de baixas taxas, menor tamanho efetivo dos grãos do meio filtrante e distribuição uniforme influenciam na operação do filtro, aumentando o tempo de retenção e diminuindo a dispersão do efluente no filtro. Os referidos autores chegaram a tais resultados em um trabalho realizado com o objetivo de remoção de coliformes e estreptococos fecais em filtros de areia, em que avaliaram as taxas de aplicação superficiais de 20, 40 e 80 L/m<sup>2</sup>.dia, métodos de distribuição (pressão ou gravidade), e variaram o diâmetro efetivo da areia, na faixa de 0,08 – 2,05 mm, e o coeficiente de uniformidade, de 1,46 a 15.

Os resultados obtidos por Ausland *et al.*,(2002) confirmaram que a uniformidade do fluxo de efluente na superfície, camada com pequena profundidade, do filtro é um importante fator, uma vez que uma taxa de remoção mais elevada nessa camada resulta em uma adequada renovação de oxigênio, maior número de protozoários ativos e menores tamanhos de poros devido a maior retenção sólidos (MELO, 2013).

O diâmetro efetivo tem dividido opiniões quanto sua influência no desempenho dos filtros de areia, enquanto Darby (1996), Silva (2006) e Dultra (2007) defendem outros fatores

serem mais importantes, Ausland *et al.* (2002) e Torrens *et al.* (2009) defendem que o tamanho efetivo da areia tem uma relação direta com a infiltração do afluente e a profundidade de penetração com a matéria sólida insolúvel. Quando são adotadas partículas maiores para o meio filtrante há uma maior velocidade de passagem do fluxo dentro do filtro, provocando uma inadequada decomposição biológica e baixa retenção do líquido, visto que não ocorre o adequado contato íntimo entre o afluente percolado e os poros do meio filtrante (MELO, 2013).

Darby (1996), Silva (2006), Dultra (2007), Torrens *et al.*, (2009) e Anderson *et al.*, (1985) defendem a frequência de dosagem como fator importante na operação dos filtros, ou seja, não se avalia apenas o volume de esgoto aplicado por dia, mas também como esse volume é distribuído.

Torrens *et al.* (2009) afirmam que o fracionamento das taxas de aplicação aumenta o tempo de retenção, existindo um contato mais intenso entre o meio filtrante e o afluente, resultando em uma maior eficiência do reator.

Cohim (2008) concluiu em seu estudo que ao aumentar a frequência de aplicação resulta em um funcionamento de filtro com maior eficiência. Porém, o excessivo fracionamento acarreta em perda de intermitência na carreira do filtro devido à relação deste com a condutividade hidráulica do meio poroso.

Foram resumidos os resultados (remoção de matéria orgânica) de diversos pesquisadores que estudaram a variação de taxa de aplicação superficial em filtros de areia, dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados de trabalhos de pesquisas sobre taxas de aplicação em filtros de areia

Referência (autor)	Pré-tratamento	Taxa de aplicação superficial (L/m <sup>2</sup> .dia)	Remoção %	
			DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)
Darby <i>et al.</i> , 1996	Tanque séptico	323	71,6	76,1
Darby <i>et al.</i> , 1996	Tanque séptico	163	94,3	99,5
Dultra, 2007	Contactador Biológico Rotativo – CBR	400	-	85
Dultra, 2008	Contactador Biológico Rotativo – CBR	1100	-	80
Dultra, 2009	Contactador Biológico Rotativo – CBR	1400	-	75

Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	20		96
Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	40		97
Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	60		98
Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	80		97
Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	100		91
Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	120		91
Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	160		91
Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	180		90
Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	200		78
Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	240		71
Tonetti <i>et al.</i> (2005,2010)	Filtro anaeróbio	300		81
Tonetti, 2012	Filtro anaeróbio	50	-	85
Tonetti, 2012	Filtro anaeróbio	100	-	84
Tonetti, 2012	Filtro anaeróbio	150	-	83
Tonetti, 2012	Filtro anaeróbio	200	-	82
Kang <i>et al.</i> , 2007	Sem informação	66		99
Kang <i>et al.</i> , 2007	Sem informação	132		98
Kang <i>et al.</i> , 2007	Sem informação	264		88
Gratham <i>et al.</i> , 1949 apud Reed <i>et al.</i> , 1988	Sem informação	70 – 160		90
Furman <i>et al.</i> , 1955 apud Reed <i>et al.</i> , 1988	Sem informação	80 – 530		92
Ronayne <i>et al.</i> , 1984 apud Reed <i>et al.</i> , 1988	Sem informação	10 – 40		98
Nolte e Associates,	Sem informação	50		94

1992 apud Reed <i>et al.</i> , 1988				
Nor, 1991 <i>apud</i> Reed <i>et al.</i> , 1988	Sem informação	40 – 160		99
Nolte e Associates, 1992 <i>apud</i> Reed <i>et al.</i> , 1988	Sem informação	20		96

Os valores de remoção apresentados na Tabela 1 foram obtidos por pesquisas em que não se tem um padrão de filtro de areia, variam a profundidade do leito de filtrante, as características granulométricas da areia, a frequência de aplicação do esgoto, etc. Contudo, a diminuição da remoção de matéria orgânica à medida que se aumenta o volume de esgoto aplicado diariamente (taxa de aplicação superficial) é notório.

Alguns resultados mostram pouca diferença no decréscimo de remoção pelos filtros avaliados ao aumentar as taxas de aplicação superficial, estatisticamente considerados iguais. Entretanto, levando em consideração diretrizes para projeto de engenharia deve-se nortear para o emprego de uma taxa de aplicação em que sejam considerados os aspectos: área para construção do sistema de tratamento e eficiência deste.

Os trabalhos supracitados (Tabela 1) não avaliam nesse viés, mostram que a queda na remoção dá-se pela maior quantidade de esgoto aplicado; não estudam inserção de outros reatores, não chegam a uma taxa de aplicação superficial adequada para projetos na região estudada.

### 3.7 Aplicação de filtros de areia para água de reuso

O filtros de areia constituem uma alternativa barata e muito eficiente. Devido a qualidade do seu efluente, muitas pesquisas têm como objetivo o estudo de alternativas para utilização deste.

Além dos benefícios aos corpos d'água que recebem os efluentes de um pós-tratamento através de filtro de areia, alguns estudos mostram a alternativa de utilizar-se esse na irrigação de culturas. Marinho (2013) realizou um estudo em que avaliou a utilização de efluentes de filtros anaeróbios e filtros de areia intermitentes na produção de roseiras (*Rosa hybrida* "Ambiance"). O rendimento da cultura irrigadas com água residuária tratada excedeu o obtido

com o cultivo tradicional, chegando a um valor 31,8% superior ao empregar efluente proveniente de filtros de areia, sem diferença na qualidade do produto.

Tonetti et al. (2012), em pesquisa sobre a produção de água de reuso com o emprego de filtros de areia, obteve bons resultados, que comparados aos valores microbiológicos sugeridos pela OMS. (OMS, 2000) para uso de esgoto doméstico tratado, constata-se que o efluente produzido seria viável para a irrigação de cereais e culturas a serem industrializadas, silviculturas, árvores frutíferas e forrageiras para feno e silagem. Comparando também com os valores propostos por Capra e Scicolone (1998), com relação a concentração de sólidos suspensos, o efluente apresenta risco baixo de obstrução dos gotejadores.

Luna (2013) no estudo sobre o tratamento de esgoto de tanque séptico em filtros de areia chegou a valores médios de coliformes termotolerantes no efluente dos filtros de  $10^4$  e  $10^5$  UFC/100mL (estudo em dois filtros), atendendo recomendações da World Health Organization. Além disso, os efluentes dos filtros não apresentavam ovos de helmintos atendendo as recomendações da Organização Mundial da Saúde para reuso irrestrito na agricultura; e médias de nitrato de  $28 \text{ mgN-NO}_3^- \cdot \text{L}^{-1}$  e  $35 \text{ mgN-NO}_3^- \cdot \text{L}^{-1}$ , que garante um efluente com alta concentração de nitrogênio disponível para fertirrigação.

Ressaltando os benefícios de uma alternativa simples e eficiente para tratamento do efluente do esgoto (no caso deste trabalho, o doméstico), temos que este dá condições que vão além de dispor esse efluentes nos corpos hídricos, possibilitam seu reuso (como o caso supracitado). Este reuso dos efluentes tratados vem tornando-se um componente importante no planejamento, desenvolvimento e utilização dos recursos hídricos (SETTI *et al.*, 2001).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

---

### 4.1 Local de estudo

Foi estudado um sistema de tratamento de esgoto domiciliar instalado na Residência Universitária do Campus I da UFPB, na cidade de João Pessoa-PB. Cidade com clima tropical, que segundo o banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia/INMET as médias para temperatura e umidade relativa do ar são, respectivamente, 26,9°C e 75,4% .



**Figura 11 – Localização da área de estudo – João Pessoa/PB.**

Fonte: Agência de notícias da UFPB.

### 4.2 Sistema de tratamento de esgoto instalado na Residência Universitária

Os filtros de areia, objeto desta pesquisa, foram inseridos em um sistema experimental de tratamento de esgoto instalado na Residência Universitária, em que já foram desenvolvidas três dissertações de mestrado do PPGECAM (FERNANDES, 2012; SOUZA, 2014; OLIVEIRA, 2014). A figura 12 apresenta uma vista geral do sistema, ainda sem os filtros de areia, com detalhe aos tubos de queda dos dois apartamentos.



Figura 12 – Esgoto afluente ao sistema de tratamento - tubos de queda. (SOUZA, 2014)

O sistema de tratamento de esgoto que já estava em operação era composto por um tanque séptico (com 1428 L de volume útil), caixa distribuidora de vazão e 3 (três) filtros anaeróbios de fluxo ascendente (com 201 L, cada reator), conforme a figura 13. Esta pesquisa utilizou o efluente de apenas 1 (um) dos filtros anaeróbios (FAN2).

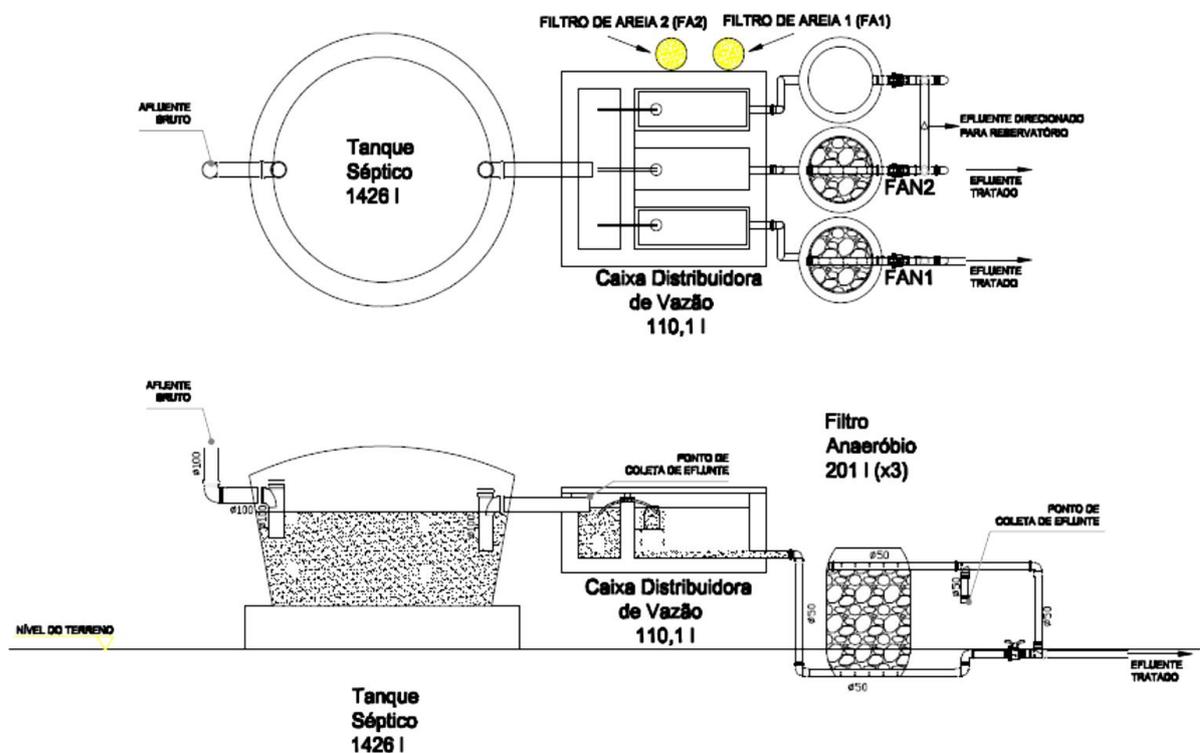


Figura 13 – Esquema geral do sistema estudado.

A Figura 13 mostra o esquema do sistema estudado nesta pesquisa, resultado do sistema já em operação com a inserção dos Filtros de Areia (FA1 e FA2), destacados em amarelo. Foram realizadas algumas alterações no sistema em operação: o filtro anaeróbio 3 foi desativado e utilizado como reservatório para o efluente do filtro anaeróbio 2 (FAN2), afluente ao filtro de areia 1 (FA1).



**Figura 14 – Visão geral do sistema (sem os filtros de areia) (SOUZA, 2014).**

O esgoto dos banheiros eram direcionados para o tanque séptico diretamente dos tubos de queda, como vê-se na Figura 14. Não houve contribuições de cozinhas ou áreas de serviço. O tanque séptico foi construído com um reservatório cilíndrico em fibra de vidro de 2000 litros. Para distribuir equitativamente o efluente do tanque séptico este passava por uma caixa de distribuição de vazão. Esta foi construída em alvenaria de tijolo cerâmico, revestida, com compartimentos no formato prismático retangular, como mostra a Figura 15.



**Figura 15 – caixa de distribuição de vazão (SOUZA, 2014).**

O efluente do tanque séptico era direcionado a um primeiro compartimento e deste era transferido a outros dois compartimentos em paralelo, que alimentavam os dois filtros anaeróbios, já considerando que o terceiro filtro anaeróbio foi desativado. O esgoto era transferido através de sifões (Figura 15).

## 4.2.1 Dimensionamento das unidades de tratamento

### 4.2.1.1 Tanque séptico

As unidades de tratamento já existentes no sistema estudado foram dimensionadas por Fernandes (2012). O referido autor seguiu as recomendações da NBR 7229/1993 (ABNT, 1993), em que o volume útil total do tanque séptico deve ser calculado pela fórmula:

$$V = 1000 + N (CT + K Lf) \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

V : volume útil, em litros

N : número de pessoas ou unidades de contribuição

C : contribuição de despejos, em litro/pessoa x dia ou em litro/unidade x dia

T : período de detenção, em dias

K : taxa de acumulação de lodo digerido em dias, equivalente ao tempo de acumulação de lodo fresco

Lf : contribuição de lodo fresco, em litro/pessoa x dia ou em litro/unidade x dia

Fernandes (2012) obteve um volume útil 1588 L. O referido autor considerou a edificação do tipo residencial de padrão médio, com contribuição média de 100 litros/pessoa.dia. Contudo, reduziu-se a contribuição para 90 litros/pessoa.dia, pois não houve contribuição de cozinha e lavanderia. Com estes valores, tem-se contribuição de lodo fresco de 1 l/hab.dia ( $Lf = 1 \text{ L/hab.d}$ ); o número de ocupantes era de duas pessoas em cada apartamento, ou seja, um total de 4 (quatro) habitantes. Assim, para os dois apartamentos a contribuição diária era de 360 L/dia. A partir desta contribuição, foi adotado tempo de detenção hidráulica de 1 dia ( $T = 1\text{dia}$ ). Por fim, o autor adotou o intervalo de limpeza do lodo de 1 (um) ano. Para este intervalo de limpeza e sendo a temperatura ambiente maior que 20°C, tem-se taxa de acumulação de lodo é igual a 57 dias ( $K = 57 \text{ dias}$ ).

O volume útil final do tanque séptico resultou em 1.426 L, por motivos práticos de execução em um reservatório em fibra de vidro de 2000.

#### 4.2.1.2 Filtros anaeróbios

Fernandes (2012) dimensionou os filtros anaeróbios de acordo com a NBR 13969/1997 (ABNT, 1997), obtendo o volume útil do leito filtrante ( $V_u$ ), em litros, pela equação:

$$V_u = 1,6 NCT \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

N é o número de contribuintes;

C é a contribuição de despejos, em litros x habitantes/ dia;

T é o tempo de detenção hidráulica, em dias.

Com base na vazão média diária total obtida, 360 litros/dia, e na temperatura local, tem-se tempo de detenção hidráulica de 0,92 dias ( $T=0,92$  dias). Com estes valores e considerando os mesmos parâmetros utilizados no dimensionamento do tanque séptico, Fernandes (2012) obteve volume útil  $V_u = 530$  L.

O volume útil calculado foi dividido para os três filtros anaeróbios, obtendo assim um volume de 177 L para cada filtro. Contudo, por praticidade, utilizaram-se três bombonas de polietileno, com volume útil é de 201L.

### 4.3 Montagem dos filtros de areia

Os filtros foram construídos utilizando tubo de PVC da linha de infraestrutura com diâmetro interno de 22cm.

A NBR 13969 recomenda que podem ser utilizados como meio filtrante, conjuntamente ou isoladamente:

a) areia, com diâmetro efetivo na faixa de 0,25 mm a 1,2 mm, com coeficiente de uniformidade inferior a 4;

b) pedregulho ou pedra britada;

Para calcular o diâmetro efetivo, bem como o coeficiente de uniformidade da areia utilizada no filtro foi realizado o ensaio de granulometria no material. O diâmetro efetivo ( $d_{ef}$ ) corresponde a abertura da peneira que deixa passar apenas 10% da areia, ou seja, abertura que retém 90% da areia e, que o coeficiente de uniformidade é obtido pela relação entre as

aberturas da peneira que permite a passagem de 60% e a que permite a passagem de 10% da areia, conforme as equações (1) e (2) (LIMA JUNIOR, 2010).

$$d_{ef} = d_{10} \quad \text{(Equação 7)}$$

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{(Equação 8)}$$

Assim, com o resultado da granulometria, tabela 1, pode-se chegar aos resultados de  $d_{ef} = 0,6$  mm e  $C_u = 2,9$ , valores dentro do limite recomendado pela NBR 13969.

Tabela 2 – Resultado do ensaio de granulometria da areia.

Peneira (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Ac. Retida	% Ac. Passante
9,5				
6,3				
4,8	20	1,86	1,86	98,14
2,4	250	23,19	25,05	74,95
1,2	330	30,61	55,66	44,34
0,6	370	34,32	89,98	10,02
0,3	58	5,38	95,36	4,64
0,15	34	3,15	98,52	1,48
Fundo	16	1,48	100,00	0,00

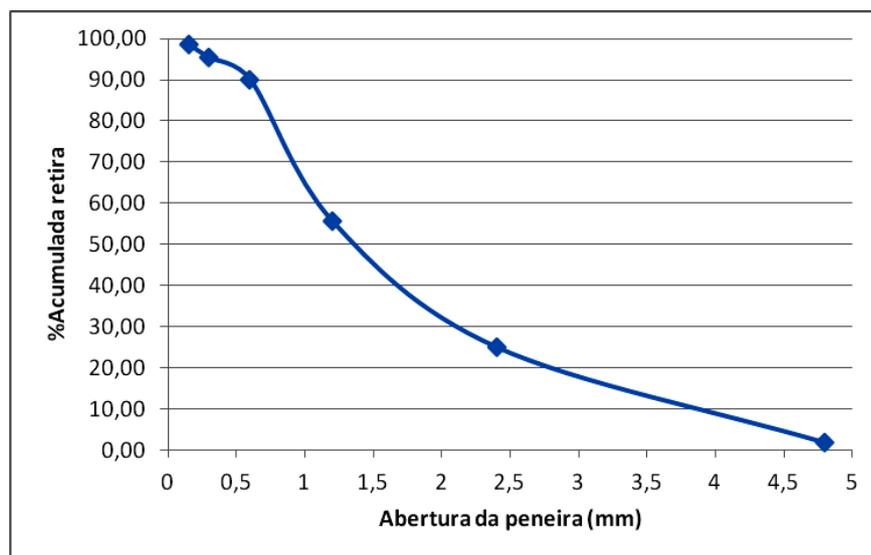


Figura 16 – Curva granulométrica do meio filtrante

A NBR 13969 não faz recomendação para diâmetro da pedra britada, assim foi utilizada brita nº 2 no fundo do filtro. A Figura 17 apresenta os detalhes da construção do filtro de areia.

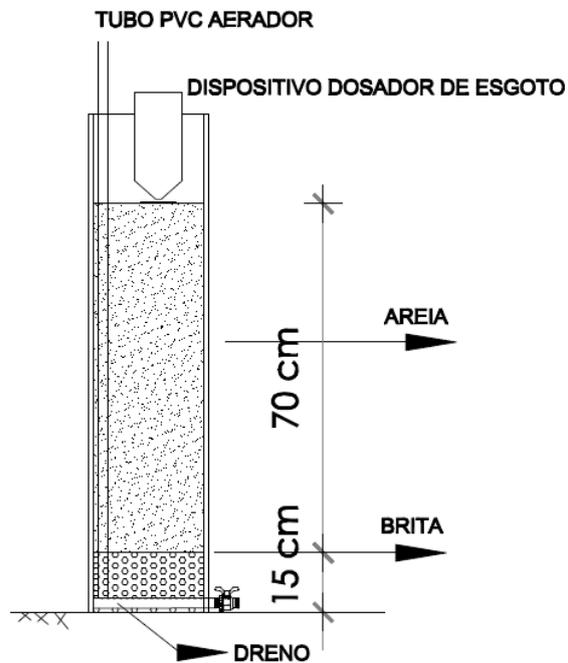


Figura 17 – Corte do filtro de areia .

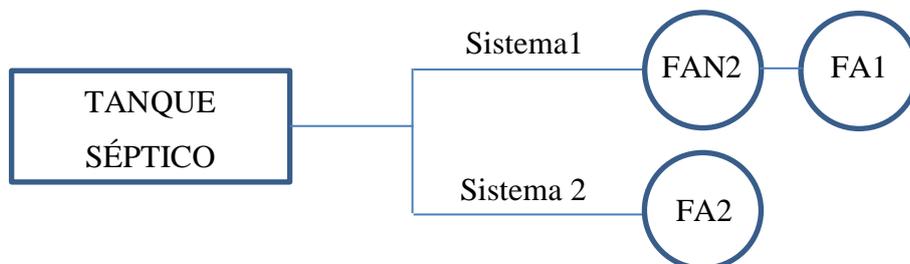
#### 4.4 Divisão dos sistemas estudados

A pesquisa avaliou dois sistemas:

Sistema 1: Tanque Séptico + Filtro Anaeróbio (FAN2) + Filtro de Areia 1 (FA1);

Sistema 2: Tanque Séptico + Filtro de Areia 2.

A Figura 17 apresenta a configuração dos sistemas



FA1: Filtro de areia 1; FA2: Filtro de areia 2; FAN2: Filtro anaeróbio.

Figura 18 – Representação dos sistemas.

#### 4.5 Determinação das taxas de aplicação superficial

Foram escolhidas 4 (quatro) taxas distintas para operação e monitoramento dos filtros: 200 L/m<sup>2</sup>.dia, 300 L/m<sup>2</sup>.dia, 500 L/m<sup>2</sup>.dia e 600 L/m<sup>2</sup>.dia. Partiu-se da taxa inicial de 200 L/m<sup>2</sup>.dia devido a norma ser bem conservadora (como enfatiza Tonetti (2012)) ao propor a taxa de 100 L/m<sup>2</sup>.dia para efluentes de tanque séptico.

#### 4.6 Aplicação do esgoto nos filtros:

Os efluentes (sistema 1: do filtro anaeróbico; sistema 2: do tanque séptico)eram aplicados três vezes ao dia: às 7:00, 13:00 e 18:00 horas. Os volumes eram aplicados a partir de um dispositivo confeccionado com garrafa plástica e mangueira dosadora. Os sistemas foram operados de 6 de junho a 29 de agosto de 2014.



**Figura 19 – Dispositivo dosador de esgoto**

O volume aplicado diariamente nos dois filtros foi determinado através da área superficial do filtro (0,038 m<sup>2</sup>) e de cada uma das taxas de aplicação. Com os volumes definidos, calibrou-se um recipiente para as medições e aplicações do volume de esgoto. Para evitar erros nas aplicações dos efluentes foram definidos os volumes de cada horário, para cada taxa de aplicação (Quadro 2).

Quadro 2 – Volumes das aplicações no filtros de areia

Taxa de aplicação (L/m <sup>2</sup> .dia)	Volume diário (L)	Volume de cada aplicação (L)
200	7,6	2,53
300	11,4	3,8
500	19	6,33
600	22,8	7,6

A tabela 3 apresenta as datas de coleta para cada taxa de aplicação superficial estudada:

Tabela 3 - Datas das coletas

	Taxa de aplicação			
	200 L/m <sup>2</sup> .dia	300 L/m <sup>2</sup> .dia	500 L/m <sup>2</sup> .dia	600 L/m <sup>2</sup> .dia
Dias da coleta	06/06/14	13/06/14	27/06/14	20/06/14
	04/07/14	09/07/14	23/07/14	16/07/14
	30/07/14	11/07/14	25/07/14	18/07/14
	01/08/14	27/08/14	20/08/14	13/08/14
	06/08/14	28/08/14	21/08/14	14/08/14
	07/08/14	29/08/14	22/08/14	15/08/14
	08/08/14	-	-	-

#### 4.7 Análises em campo

Os parâmetros estudados foram obtidos pelo Pastel UV (Secoman). Este equipamento consiste em um dispositivo de análise in loco, com base em um ponto de amostragem, que fornece medições da demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>), carbono orgânico total (COT), sólidos suspensos totais (SST), nitrato (NO<sub>3</sub>), e surfactantes.

Segundo Gonzalez (2007) o equipamento foi validado em condições de laboratório e campo para a medição das concentrações de nitratos em águas superficiais. O equipamento é de fácil operação, requerendo apenas atenção com relação às diluições quando as amostras apresentam grandes concentrações de nitrato, caso dos efluentes dos filtros de areia.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 5.1 Remoção de matéria orgânica

A metodologia empregada nesta pesquisa através do Pastel UV mostrou-se eficiente, visto os resultados das amostras. O equipamento foi calibrado para as condições de cada efluente amostrado. Todos os valores apresentados nas tabelas 4,5,6 e 7 foram obtidos pelo referido equipamento, escolhido devido a sua praticidade e rapidez nas análises.

As tabelas 4,5,6 e 7 apresentam os resultados da DBO<sub>5</sub>, DQO, nitrato, bem como as remoções para as taxas de aplicação superficial de 200, 300, 500 e 600 L/m<sup>2</sup>.dia, nos filtros 1 e 2. Não foram expressas as remoções de nitrato porque não foram constatados valores deste no tanque séptico nem no filtro anaeróbio. Os resultados representam as médias de todas as coletas realizadas para a taxa de aplicação correspondente; os dias de cada coleta estão contidos na tabela 6.

Os resultados das tabelas supracitadas mostram o melhor desempenho na remoção de matéria orgânica no FA1 em relação ao FA2. O FA1 recebe o efluente do filtro anaeróbio, isento de sólidos grosseiros, já retidos e/ou digeridos no tanque séptico. Verifica-se esse resultado até a taxa de aplicação de 300 L/m<sup>2</sup>.dia, para taxas maiores o FA2 apresenta melhores remoções. Assim, pelos resultados, o inserção do filtro anaeróbio confere melhor desempenho para uma taxa limite de 300 L/m<sup>2</sup>.dia.

Nos valores de mínimo e máximo dos parâmetros (DBO<sub>5</sub>, DQO e NO<sub>3</sub>) das taxas de 200 e 300 L/m<sup>2</sup>.dia verifica-se um diferença expressivas nos valores do FA1, que pode ter relação com a maturação do filtros nas primeiras coletas, mesmo estes tendo passado por alguns dias de aclimação, em que era disposto os efluentes antes da primeira semana contabilizada nas coletas.

Tabela 4 – Resultados de DBO<sub>5</sub>, DQO, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e remoções para a taxa de 200 L/m<sup>2</sup>.dia

	Efluente do Tanque Séptico				Efluente do Filtro Anaeróbio				Efluente do Filtro de Areia								
	mg/L				mg/L				Filtro 1				Filtro 2				
	Méd.	Máx.	Mín	%R	Méd.	Máx.	Mín	%R	Méd.	Máx.	Mín	%R	%R Global	Méd.	Máx.	Mín	%R
DBO	56,2	57,2	53,5		40,4	49,7	21,2	<b>28,1</b>	27,8	34	5	<b>31,1</b>	<b>50,5</b>	46,2	58	35	<b>17,7</b>
DQO	93,9	99,2	88		82,6	92,5	59,5	<b>12,1</b>	31,5	37,5	5	<b>61,9</b>	<b>66,5</b>	77,1	98	63	<b>17,9</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0		0	0	0	0	48,1	86,6	39,6	0		43,7	54,5	26,8	

Tabela 5 – Resultados de DBO<sub>5</sub>, DQO, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e remoções para a taxa de 300 L/m<sup>2</sup>.dia

	Efluente do Tanque Séptico				Efluente do Filtro Anaeróbio				Efluente do Filtro de Areia								
	mg/L				mg/L				Filtro 1				Filtro 2				
	Méd.	Máx.	Mín	%R	Méd.	Máx.	Mín	%R	Méd.	Máx.	Mín	%R	%R Global	Méd.	Máx.	Mín	%R
DBO	50,14	60	32,5		26,25	37,5	21,33	<b>47,6</b>	16,21	29,25	5	<b>38,2</b>	<b>67,7</b>	40,56	54,5	32	<b>19,1</b>
DQO	107,94	140,33	87		53,21	59	44,25	<b>50,7</b>	25,17	44,25	5	<b>52,7</b>	<b>76,7</b>	53,77	88	36,25	<b>50,2</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0		0	0	0	0	55,51	77,5	35,58	0		61,06	69,75	46,4	

Tabela 6 – Resultados de DBO<sub>5</sub>, DQO, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e remoções para a taxa de 500 L/m<sup>2</sup>.dia

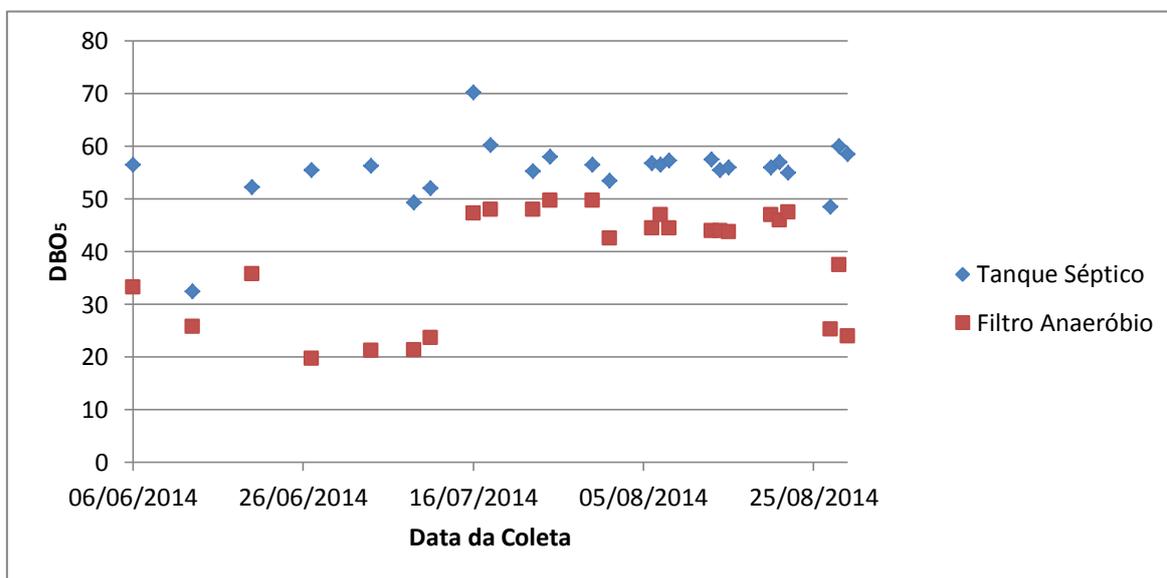
	Efluente do Tanque Séptico				Efluente do Filtro Anaeróbio				Efluente do Filtro de Areia								
	mg/L				mg/L				Filtro 1				Filtro 2				
	Méd.	Máx.	Mín	%R	Méd.	Máx.	Mín	%R	Méd.	Máx.	Mín	%R	%R Global	Méd.	Máx.	Mín	%R
DBO	56,13	58	55		43	49,75	19,75	<b>23,4</b>	38,46	43,75	30,5	<b>10,6</b>	<b>31,5</b>	47,13	57,5	36,75	<b>16,0</b>
DQO	94,21	99	92,5		79,42	89,5	47,25	<b>15,7</b>	48,92	57	25,25	<b>38,4</b>	<b>48,1</b>	65,33	81,25	48	<b>30,7</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0		0	0	0	0	70,38	83,35	32,85	0		70,85	88,25	40,65	

Tabela 7 – Resultados de DBO<sub>5</sub>, DQO, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e remoções para a taxa de 600 L/m<sup>2</sup>.dia

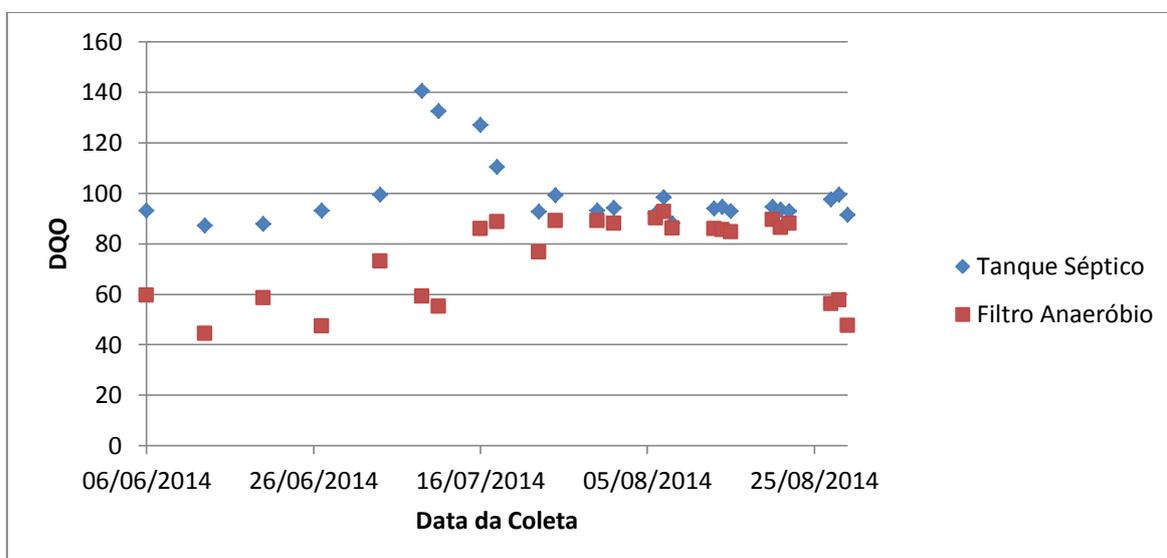
	Efluente do Tanque Séptico				Efluente do Filtro Anaeróbio				Efluente do Filtro de Areia								
	mg/L				mg/L				Filtro 1				Filtro 2				
	Méd.	Máx.	Mín	%R	Méd.	Máx.	Mín	%R	Méd.	Máx.	Mín	%R	%R Global	Méd.	Máx.	Mín	%R
DBO	58,63	70,25	52,25		43,79	48	35,75	<b>25,3</b>	42,13	49	36	<b>3,8</b>	<b>28,1</b>	47	51,25	40	<b>19,8</b>
DQO	101	127	87,75		81,42	88,5	58,5	<b>19,4</b>	46,04	51,75	36,75	<b>43,5</b>	<b>54,4</b>	83,25	88	72	<b>17,6</b>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0		0	0	0		50,82	81,6	27,8	0		45,14	68,4	29	

A pertinência da inserção do filtro anaeróbio entre o tanque séptico e o filtro de areia expressa-se nos resultados da DBO<sub>5</sub> e DQO afluente aos filtros de areia. Os valores da DBO<sub>5</sub> e DQO afluente ao FA1 são de 23 a 48% e de 12 a 51%, respectivamente, menores que as afluente ao FA2 (recebe diretamente do tanque séptico). Outro fator que confirma a inserção do filtro anaeróbio são os valores das tabelas 4,5,6 e 7, contudo, apenas para as taxas de aplicação até 300 L/m<sup>2</sup>.dia.

As Figura 20 e 21 apresentam as variações dos valores de DBO<sub>5</sub> e DQO durante toda a pesquisa para tanque séptico e filtro anaeróbio; alguns dias mostram expressiva diferença na remoção da matéria orgânica no reator em questão.



**Figura 20 – Valores da DBO<sub>5</sub> para o tanque séptico e filtro anaeróbio**



**Figura 21 – Valores da DQO para o tanque séptico e filtro anaeróbio**

As figuras 22 e 23 mostram as remoções de matéria orgânica (DBO<sub>5</sub> e DQO) para o FA1 e FA2, respectivamente. As faixas de cores identificam as taxas de aplicação correspondente àquele período de coleta, representados na tabela 8, em que apresenta-se também os dias de coleta de cada taxa aplicada.

Tabela 8 – Datas de coleta de cada taxa de aplicação.

	Taxa de aplicação			
				
	200 L/m <sup>2</sup> .dia	300 L/m <sup>2</sup> .dia	500 L/m <sup>2</sup> .dia	600 L/m <sup>2</sup> .dia
Dias da coleta	06/06/14	13/06/14	27/06/14	20/06/14
	04/07/14	09/07/14	23/07/14	16/07/14
	30/07/14	11/07/14	25/07/14	18/07/14
	01/08/14	27/08/14	20/08/14	13/08/14
	06/08/14	28/08/14	21/08/14	14/08/14
	07/08/14	29/08/14	22/08/14	15/08/14
	08/08/14	-	-	-

Nas primeiras coletas (figuras 22 e 23), o FA1 e FA2, as remoções de DBO<sub>5</sub> e DQO foram baixas, visto que o filtro estava no início da sua operação, então a eficiência se deu predominantemente pela remoção física; a fração de remoção por meio biológico ainda era pequena, sendo necessário alguns dias para maturação, crescimento do biofilme. Ressalta-se que os microrganismos do biofilme desenvolveram-se a partir da aplicação do efluente, não utilizou-se inóculo.

Ressalta-se que a variação das taxas de aplicação deu-se em um só filtro, em cada sistema, objetivo desta pesquisa, diferente da maioria dos resultados dos trabalhos de outros autores. Um filtro de areia em operação é submetido a variações diárias de vazões, assim a taxa de aplicação superficial adotada no dimensionamento deve ser suficiente para garantir uma boa operacionalidade do filtro nesses picos.

Verifica-se os picos de remoção de 91% no FA1 e 70% no FA2, ambos para DQO, nas taxas de aplicação de 200 – 300 L/m<sup>2</sup>.dia. O FA1 mostrou-se mais eficiente, mesmo com menor quantidade de matéria orgânica de fácil degradação. Nas figuras vê-se o comportamento das eficiências durante a pesquisa, enquanto que as tabelas 4,5,6 e 7 apresentam os resultados das médias de cada taxa de aplicação.

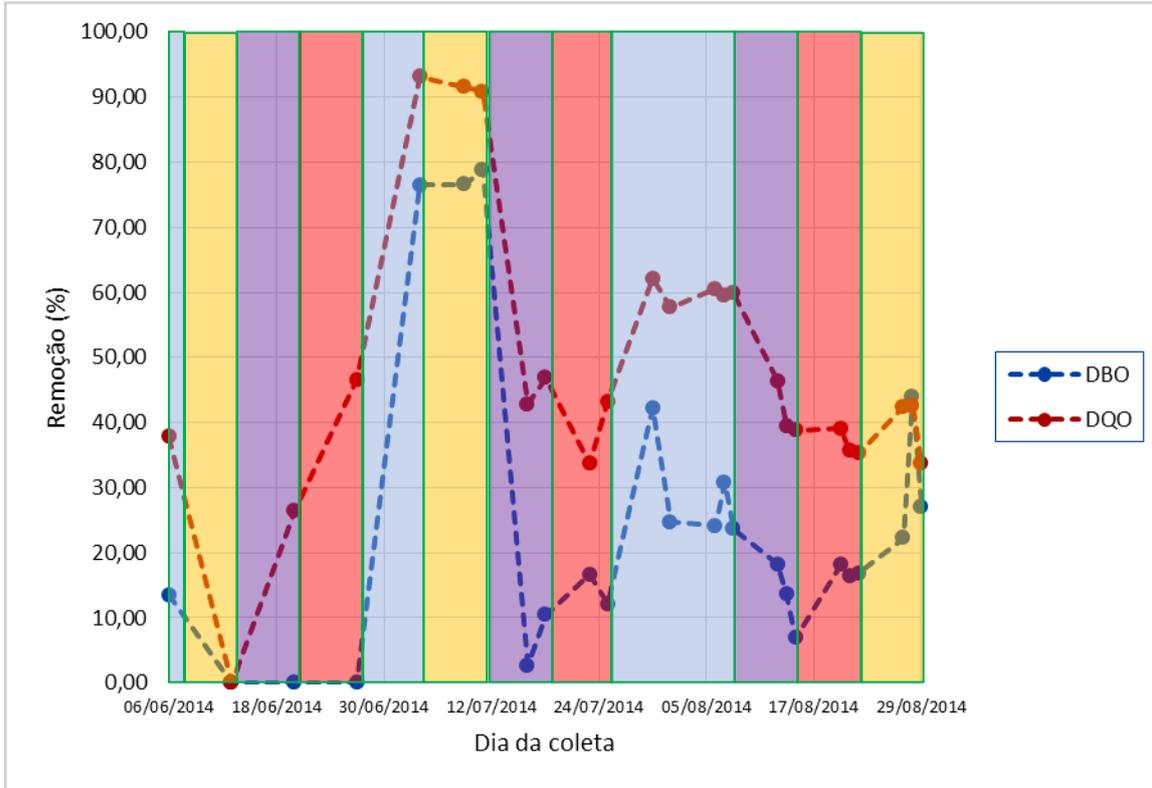


Figura 22 – Remoção de DBO5 e DQO para todas as taxas (filtro de areia 1)

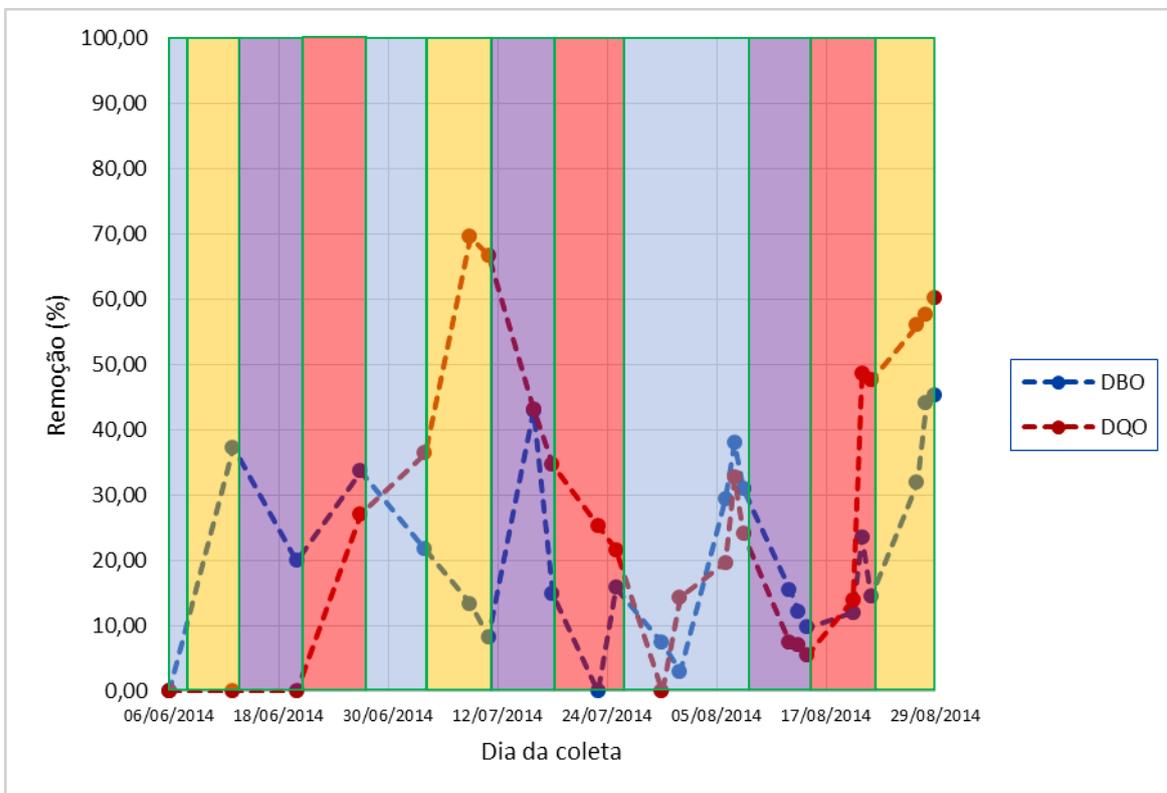


Figura 23 – Remoção de DBO5 e DQO para todas as taxas (filtro de areia 2)

200 L/m<sup>2</sup>.dia

300 L/m<sup>2</sup>.dia

500 L/m<sup>2</sup>.dia

600 L/m<sup>2</sup>.dia

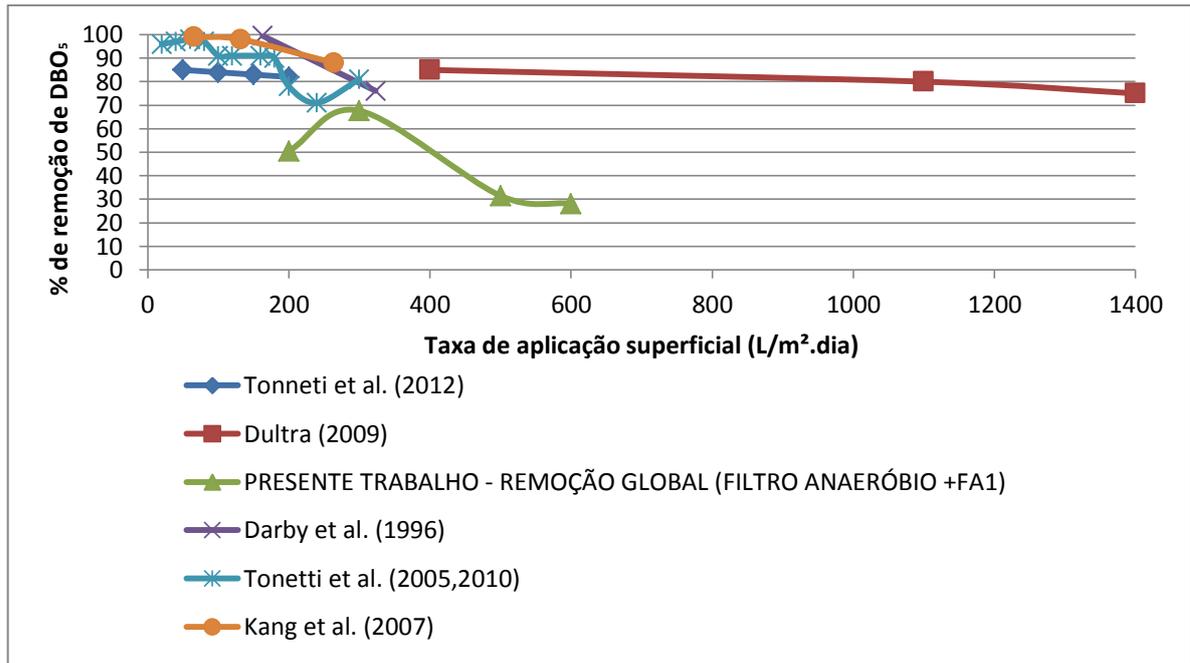
A figura 24 mostra uma comparação entre os resultados obtidos por Tonneti *et al.* (2012), Dutra (2009), Darby *et al.* (1996), Kang *et al.* (2007) e Tonetti *et al.* (2005, 2010), remoções globais, quando avaliaram a mudança de taxas de aplicação em filtros de areia. Em todos os trabalhos houve uma linearidade em relação ao decréscimo da remoção quando aumentada a taxa de aplicação nos filtros.

Nenhuma das referências pesquisadas avaliaram as mudanças de taxas de aplicação de forma a alternar entre taxas maiores e menores, aumentaram gradativamente. Outro ponto comum nas referências consultadas ( exceto Tonetti *et al.*, 2005 e 2010), e diferente nesta pesquisa, consiste na avaliação das taxas em filtros distintos, ou seja, para cada taxa de aplicação existia um filtro, monitorado do início a fim dos estudos sem alterar o volume aplicado.

A diferença de metodologia entre outras pesquisas fica evidente no resultado do gráfico da figura 23. A alternância de taxas adotadas resultou numa curva na qual identifica-se um ponto que se pode ter como referência para dimensionamento de filtros de areia com as mesmas condições ambientais da área estudada, na taxa de 300 L/m<sup>2</sup>.dia.

Ressalta-se que nesta pesquisa o esgoto afluente ao filtro anaeróbio (sistema 1) e ao filtro de areia 2 (sistema 2) teve parte da matéria orgânica removida no tanque séptico. Esta remoção não está incluída nos valores previamente discutidos neste trabalho.

Em todas as referências consultadas há diferenças na construção dos filtros, mesmo nas referências de pesquisadores brasileiros, não avaliaram os filtros tal qual a NBR 13969/1997 recomenda, além da taxa de aplicação superficial avaliaram outros aspectos, construtivos e operacionais.



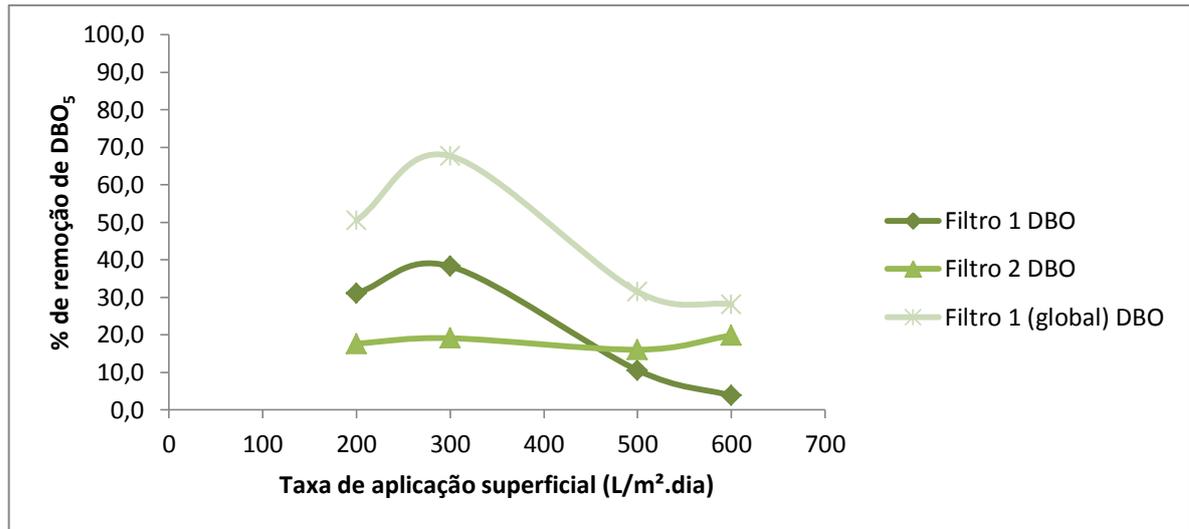
**Figura 24 – Comparação de resultados com outras pesquisas.**

A única referência em que identificou-se a variação das taxas de aplicação foi Tonetti et al. (2005, 2010). As outras pesquisas (Figura 24) mostram o comportamento linear, em que a eficiência diminui com o aumento das cargas do filtro. Ao contrário dessa tendência linear, Tonetti et al. (2005, 2010) mostra uma curva com trechos em que a eficiência aumenta e outros que diminui, similar aos resultados desta pesquisa. Contudo, com esta curva não se tira conclusão de uma taxa de aplicação “ótima” para os filtros naquelas condições, visto a grande variação dos resultados.

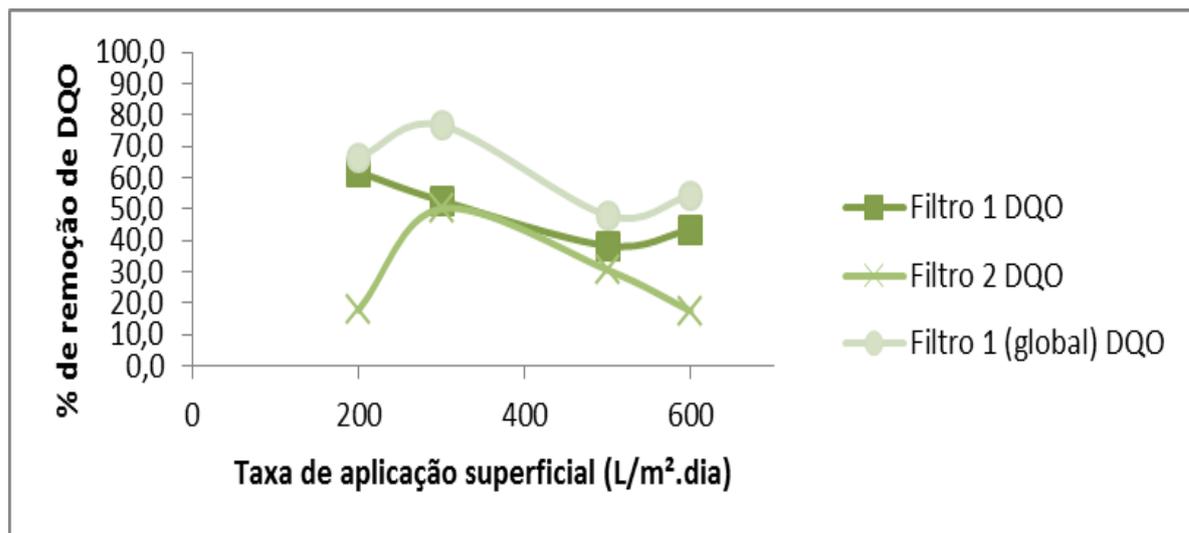
Como visto na Figura 22, as curvas do FA1, para DBO<sub>5</sub> e DQO, apresentam os picos de eficiência na taxa de 300 L/m<sup>2</sup>.dia, quando variadas as taxas de 200, 300, 500 e 600 L/m<sup>2</sup>.dia. No FA2, o pico de eficiência para remoção de DQO deu-se também na taxa de aplicação de 300 L/m<sup>2</sup>.dia.

Para confirmar se essa taxa de aplicação que apresentou picos de eficiência (Figuras 22 e 23) seria a maior taxa a ser aplicada, visando a eficiência de remoção de matéria orgânica e a diminuição da área dos filtros, avaliou-se as curvas das eficiências médias de DBO<sub>5</sub> e DQO dos dois filtros de areia e a curvas das eficiências médias globais do sistema 1 (tanque séptico - filtro anaeróbio – filtro de areia 1), dispostas nos gráficos das figuras 25 e 26.

Para as eficiências médias tem-se melhor parâmetro para avaliação da variação das taxas de aplicação nos FA1 e FA2. Os resultados confirmam a análise dos resultados ao longo do tempo das coletas, com pico de eficiência média na taxa de aplicação de 300 L/m<sup>2</sup>.dia.



**Figura 25 – Eficiências de remoção de DBO<sub>5</sub> (Filtros 1, 2 e Sistema 1)**



**Figura 26 – Eficiências de remoção de DQO (Filtros 1, 2 e Sistema 1)**

Ressalta-se que as eficiências de remoção de matéria orgânica mais baixas em relação a literatura podem estar relacionadas ao tipo de efluente tratado nos sistemas estudados, visto que não havia contribuição de esgoto de cozinha, apenas de banheiro. Destaca-se também que os efluentes, tanto do tanque séptico, como do filtro anaeróbio apresentavam valores baixos de DBO<sub>5</sub> e DQO.

Atendendo ao objetivo geral da pesquisa, verifica-se que a maior taxa de aplicação a ser adotada, sem que haja prejuízos de eficiência de remoção de matéria orgânica, consiste em 300 L/m<sup>2</sup>.dia, visto que a partir desta a eficiência reduz significativamente, nos filtros 1 e 2. Logo, o resultado desta pesquisa mostra que a norma brasileira para dimensionamento de filtros de areia é muito conservadora para as taxas de aplicação superficial, recomendando

uma taxa três vezes menor que a obtida nesta pesquisa. Ressalta-se que os filtros foram concebidos seguindo as recomendações para a areia do leito filtrante e para sua profundidade.

## **5.2 Remoção de nitrogênio**

Das formas de nitrogênio, o Pastel UV, equipamento utilizado nas análises, faz as leituras apenas do nitrato contido nas amostras. Não foram detectadas concentrações de nitrato nos efluentes do tanque séptico nem do filtro anaeróbio, sendo estes resultados explicados pelo fato de que se tratam de reatores anaeróbios, nos quais não ocorre nitrificação.

As elevadas concentrações de nitrato nos efluentes dos filtros de areia expressam a eficiência destes com relação a nitrificação,. De acordo com Silva (2006) o expressivo grau de nitrificação do efluente indica a natureza aeróbia do processo de digestão.

Um ponto destacado pelo autor supracitado refere-se ao fracionamento da carga hidráulica diária em um número maior de doses, que favorece os mecanismos de convecção para aporte de oxigênio ao meio filtrante. Nesta pesquisa a carga foi dividida em 3 (três) doses diárias, que aplicadas por um dispositivo dosador proporcionou ainda mais o fracionamento nas aplicações, contribuindo para uma boa nitrificação nos filtros de areia.

Outro fator determinante para uma boa nitrificação corresponde a profundidade do leito de areia, quanto mais profundo for, maior será o processo de nitrificação, segundo Tonetti (2004). A profundidade adotada, segundo a NBR 13969/1997, foi suficiente para o processo de nitrificação, sendo confirmada por pesquisas que avaliaram profundidades próximas a recomendada (70 cm).

## 6 CONCLUSÕES

---

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram a viabilidade do uso de filtros de areia em um sistema de tratamento individual de esgoto, seja para unidades residenciais, condomínios ou pequenas comunidades, visto os elevados valores de eficiência de remoção de matéria orgânica alcançada.

Com resultados das análises cabe destaque, por fim:

- A avaliação do comportamento dos filtros de areia variando as taxas de aplicação, em um mesmo filtro, tornou possível obter-se o resultado de uma taxa de aplicação “ótima” para dimensionamento dos filtros, visto que a avaliação feita em filtros exclusivos para cada taxa de aplicação não simula as situações reais de operação em um sistema de tratamento, resultando em curvas de eficiência decrescente ao aumentar a taxa de aplicação, sem efeitos conclusivos com relação a recomendações de parâmetro de projeto.
- Os resultados de nitrificação dos efluentes dos Sistemas 1 e 2 foram semelhantes em valores médios, mostrando o bom desempenho dos filtros de areia para efluentes de tanque séptico e filtro anaeróbio.
- A inserção do filtro anaeróbio se mostrou pertinente em função do bom desempenho, em relação ao sistema que possuía apenas tanque séptico, nas taxas de até de 300 L/m<sup>2</sup>.dia. Visto que na avaliação das taxas de aplicação encontrou-se um valor “ótimo” de 300 L/m<sup>2</sup>.dia, torna-se notória a viabilidade técnica do Sistema 1 (Tanque séptico + Filtro anaeróbio + Filtro de areia). Corrobora com Isoldi, *et al.*, (2005), que discorre sobre os benefícios da combinação de reatores anaeróbios e aeróbios em um mesmo sistema.

## REFERÊNCIAS

ABREU, L.M. Aspectos microbiológicos de los procesos de nitrificación-denitrificación. In: 3° TALLER Y SEMINARIO LATINO-AMERICANO DE TRATAMIENTO ANAERÓBIO DE ÁGUAS RESIDUALES. Montevideo, Uruguay, p. 55-63. 1994.

ANDERSON, J.; DAMANN, L.; SIEGRIST, Robert L.; OTIS, Richard J. Tec Assess of Int Sand Filter. Municipal Environmental Research Laboratory. Cincinnati, Ohio: U.S. Environmental Protection Agency (EPA),1985.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 13969 - Tanques Sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AUSLAND, G., et al. Intermittent filtration of wastewater – Removal of fecal coliforms and fecal streptococci. Water Research. Número 36, pp. 3507–3516. 2002.

BANCOLÉ, A. L'Oxidation en infiltration percolation. 2001. 151 p. These (Doctorat) Université de Montpellier II. 2001.

ARNES, D.; BLISS, P. J. Biological control of nitrogen in wastewater treatment. E. & F. N. Spon. 327 p. London. 1983.

BEG, S.A.; SIDDIQI, R.H.; ILIAS, S. Effect of toxicants on biological nitrification for treatment of fertilizer industry wastewater. In: 35th INDUSTRIAL WASTE CONFERENCE, Illinois, Purdue University. Proceedings. Ann Arbor Science, p.826-834. 1980.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB. Brasília, DF, 2013.

CALAWAY, W.T. Intermittent Sand Filters and Their Biology. Sewage Works, 29, 1.1957.

CÁNEPA DE VARGAS, Lúcia. Manual I: teoría y evaluación. In: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Tratamiento filtración lenta. Lima: CEPIS, 1992. p.1-68

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. Journal of Agricultural Engineering Research, v. 70, n. 4, p. 355-365, 1998.

CARLSON, C. A. et al. Overland flow Treatment of wastewater. Vicksburg, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station. 1974.

CHERNICHARO, C. A. L. Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. PROSAB/FINEP, Rio de Janeiro, 2001.

COHIM, E. Polimento de efluente de UASB com filtros intermitentes de areia. 2006, 117 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

COSTA, R.H. Etude du controle du biofilm developpe dans um lit fluidise triphasiqu em epuration carbonee aerobie. These de doctorat. INSA – Toulouse, France;1989.

CRITES, R.; G. TCHOBANOGLOUS. Small and Decentralized Wastewater Management Systems. New York:The McGraw-Hill, 1998.

DARBY, J. et al. Shallow Intermittent Sand Filtration: Performance Evaluation. The Small Flows Journal, 2 (1). 1996.

DI BERNARDO, L., BRANDÃO, C.C.S., HELLER, L.. Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas. Rio de Janeiro: ABES, 114p. 1999.

DRIVER, C. H. et al. Assessment of the effectiveness and effects of land disposal methodologies of wastewater management”. Washington, Department of the Army Corps of Engineers. 1972.

DULTRA, F. A. Aplicação da filtração intermitente em leito de areia e de escória da metalurgia do cobre no tratamento de esgotos com ênfase em reúso. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Produção Limpa. UFBA. Salvador. 2007.

FERNANDES, W. V. Uso da luffa cylindrica como meio suporte para crescimento bacteriano em filtro anaeróbio tratando esgotos domésticos. Dissertação. Programa de

FOCO, M. L. R.; NOUR, E. A. A. Desempenho de Sistema Combinado Anaeróbio-Aeróbio na Remoção de Nitrogênio no Tratamento de Esgoto Sanitário. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 35, n. 2, p. 131-138, jul./dez. 2014.

HAGOPIAN, D. S.; RILEY, J. G. A closer look at the bacteriology of nitrification. Aquacultural Engineering. Philadelphia: Elsevier Inc. v. 18, p. 223-244, 1998.

HAIG, S. J. et al. Biological aspects of slow sand filtration: past, present and future. *Water Science & Technology: Water Supply*;2011, Vol. 11 Issue 4, p468.

HÄNEL, K. *Ellis Horwood series in water and wastewater technology biological treatment of sewage by the activated sludge process*. New York: Ellis Horwood Limited, 1988.

ISOLDI, L. A.; KOETZ, P. R.; ISOLDI, L. A.. Pós-tratamento de efluente nitrificado da parboilização de arroz utilizando desnitrificação em reator UASB. *Eng. Sanit. Ambient.*, Rio de Janeiro , v. 10, n. 4, p. 271-277, Dec. 2005 .

JORDÃO, E. P. & PESSOA, ARRUDA, C.: *Tratamento de esgotos domésticos 4ªedição*, Rio de Janeiro, 2005, 932p.

KANG, Y.W.; KAREN M. MANCL, K. M.; TUOVINEN, O. H. Treatment of turkey processing wastewater with sand filtration. *Bioresource Technology*, v. 98, p. 1460-1466, 2007.

KASSAB, G., HALALSHEH, M.; KLAPWIJK, A.; FAYYAD, M.; VAN LIER, J.B. Sequential anaerobic-aerobic treatment for domestic wastewater – A review. *Bioresource Technology*, vol. 101, 2010.

KRISTIANSEN, R. Sand-filter trenches for purification of septic tank effluent: III. The micro flora, *Journal of Environmental Quality*. Número 10, pp. 361–364, 1981.

LEFEVRE, F. *Epuration des eaux usées urbaines en infiltration percolation. Etude expérimentale et definition de procédé*. 341 p. These (Doctorat) Université de Montpellier II. 1988.

LUNA, M. L. D.; SOUSA, J. T.; LIMA, V. L. A.; ALVES, A. S.; PEARSON, H .W. Pós-tratamento de efluente de tanque séptico utilizando filtros intermitentes de areia operando em condições tropicais. *Scientia Plena* Vol. 9, Num. 9. 2013.

MARINHO, L.E.O. , TONETTI, A.L. , STEFANUTTI, R. , CORAUCCI FILHO, B. Application of Reclaimed Wastewater in the Irrigation of Rosebushes (2013) *Water, Air and Soil Pollution*, 224 (9), pp. 1-7.

MELO, L. F.; VIEIRA, J. Physical stability and biological activity of biofilms under turbulent flow and low substrate concentration. *Bioprocess Engineering*, vol. 20, pp. 363-368. 1999.

MÉNORET, C.; BOUTIN, C.; LIÉNARD, A.; BRISSAUD, F. Use of recycling through medium size granular filters to treat small food processing industry effluents. *Water Science Technology*. Volume 45, número 12, pp. 225-232. 2002.

MENORET, C. *Traitement D'Effluents Concertres par Cultures Sur Gravier ou Pouzzolane*. 151 p. These (Doctorat) Université de Montpellier II. 2001.

METCALF; EDDY. *Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse*. New York: McGraw-Hill, 2003. 1334 p.

MOTTIER, V.; BRISSAUD, F.; NIETO, P.; ALAMY, Z. Wastewater treatment by infiltration percolation: a case study. *Water Science and Tecnology*, Vol. 41, n°.1, p. 77-84, 2000.

MURTHA, N. A.; HELLER, L. Avaliação da Eficiência da Filtração Lenta em Areia segundo a Profundidade do Leito Filtrante. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997. Anais eletrônicos, Foz do Iguaçu, 1997.

MURTHA, N.A., HELLER, L. Avaliação da influência de parâmetros de projeto e das características da água bruta no comportamento de filtros lentos de areia. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.8, n.4, p.267-277, 2003.

PAGANINI, W. S. *Disposição de Esgotos no Solo: (escoamento a supefície)*. São Paulo: Fundo Editorial da AESABESP. 1997.

PESSOA, A. C. & JORDÃO, P. E. *Tratamento de esgotos domésticos*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 1982.

REED, Sherwood, C.; CRITES, Ronald W; MIDDLEBROOKS, E Joe. *Natural Systems US Environmental Protection Agency (USEPA)*, 1995.

REMÍGIO, ALINE FLÁVIA NUNES *Estudo da Colmatação Biológica de Sistemas Filtro-Drenantes Sintéticos de Obras de Disposição de Resíduos Domésticos Urbanos sob Condições Anaeróbias*. [Distrito Federal] 2006. xx, 134 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2006). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

RODGERS, M., MULQUEEN, J., HEALY, M.G. Surface clogging in an intermittent stratified sand filter. *Soil Science Society of America Journal* 68: 1827-1832. 2004.

SANCHEZ ORTIZ, I. A. et al . Nitrificação de diferentes substratos em reatores aeróbios de leito fluidizado de circulação interna. Rev. ing. univ. Medellín, Medellín , v. 11, n. 21, 2012 .

SANTOS, K. D. Remoção biológica de nitrogênio em águas residuárias através de reator anaeróbio. Dissertação de mestrado – PRODEMA – UEPB. Campina Grande, 2007.

SCHMITT, A. Modélisation de l'épuration par infiltration. 297 p. These (Doctorat). Université de Montpellier II.. 1989.

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. ANA - Agência Nacional de Águas, Brasília. 2001.

SILVA, E. H. B. C. Polimento de efluente de UASB com Filtros intermitentes de areia. Dissertação - mestrado profissional em Gerenciamento e tecnologias Ambientais no processo produtivo, Escola Politécnica – UFBA. Salvador, 2006.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO: DIAGNÓSTICO DOS SERVIÇOS DE ÁGUA E ESGOTO 2013. Brasília: Ministério das Cidades. SNSA, 2015.

SOBREIRA, L. C. Expansão urbana e variações mesoclimáticas em João Pessoa – PB. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. UFPB. João Pessoa. 2010.

SOLOMON, C. et al. Intermittent Sand Filter. US Environmental Protection Agency (USEPA), 1998. Disponível em: . Acesso em: 04 nov. 2003.

TONETTI, A. L., et al. Avaliação de um sistema simplificado de tratamento de esgotos visando a utilização em áreas rurais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 14(2), 227–234. 2010.

TONETTI, A. L.; CORAUCCI FILHO, B.; STEFANUTTI, R.; FIGUEIREDO, R. F.; SÃO PEDRO, C. C. O. Remoção de matéria orgânica, coliformes totais e nitrificação no tratamento de esgotos domésticos por filtros de areia. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.10, n.3, p.209-218, 2005.

TONETTI, A. L.; et. al. O emprego do filtro de areia no pós-tratamento de efluente de filtro anaeróbio. Sanare. Revista Técnica da Sanepar, Curitiba, v.21, n.21, p. 42-52, jan./jun. 2004.

TONETTI, Adriano Luiz et al. Tratamento de esgoto e produção de água de reúso com o emprego de filtros de areia. Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2012, vol.17, n.3, pp. 287-294.

TORRENS, A.; MOLLE, P.; BOUTIN, C.; SALGOT, M. Removal of bacterial and viral indicators in vertical flow constructed wetlands and intermittent sand filters. Desalination, n. 246, p. 169–178, 2009.

VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. Tratamento anaeróbio de esgotos : Um manual para regiões de clima quente. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1994,232p.

VERMA, A.; MANCL, K. Empirical models of effectiveness of single pass sand filters for wastewater treatment. On-Site Wastewater Treatment. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON INDIVIDUAL AND SMALL COMMUNITY SEWAGE SYSTEMS, 9th. Proceedings. 2001.

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Princípios básicos do tratamento de esgotos. Vol. 2. 3ª.ed. Belo Horizonte. DESA/UFMG, 211 p. 1996.

WIDRIG, D.; PEEPLES, J.; MANCL, K. Intermittent sand filtration for domestic wastewater treatment: effects of filter depth and hydraulic parameters. Applied Engineering in Agriculture, Vol. 12(4):451-459.1996.

YAO, K.; HABIBIAN, M.; O'MELIA, C. Water and wastewater filtration: Concepts and Applications. Environmental Science and Technology, Vol. 5, nº.11, 1971.

**Apêndice: Resultados das eficiências de remoção das coletas durante toda pesquisa**

**Remoções do filtro de areia 1:**

Taxa de aplicação	Dia da coleta	Remoções (%)	
		DBO <sub>5</sub>	DQO
200	06/06/2014	13,53	37,82
300	13/06/2014	0,00	0,00
600	20/06/2014	0,00	26,50
500	27/06/2014	0,00	46,56
200	04/07/2014	76,47	93,15
300	09/07/2014	76,56	91,53
300	11/07/2014	78,87	90,91
600	16/07/2014	2,65	42,86
600	18/07/2014	10,42	46,89
500	23/07/2014	16,67	33,66
500	25/07/2014	12,06	43,26
200	30/07/2014	42,21	62,08
200	01/08/2014	24,71	57,67
200	06/08/2014	24,16	60,56
200	07/08/2014	30,85	59,45
200	08/08/2014	23,59	59,88
600	13/08/2014	18,18	46,39
600	14/08/2014	13,63	39,47
600	15/08/2014	6,85	38,76
500	20/08/2014	18,08	39,10
500	21/08/2014	16,31	35,65
500	22/08/2014	16,84	35,23
300	27/08/2014	22,27	42,41
300	28/08/2014	44,00	42,60
300	29/08/2014	27,08	33,68

**Remoções do filtro de areia 2:**

Taxa de aplicação	Dia da coleta	Remoções (%)	
		DBO <sub>5</sub>	DQO
200	06/06/2014	0,00	0,00
300	13/06/2014	37,36	0,00
600	20/06/2014	20,00	0,00
500	27/06/2014	33,78	27,15
200	04/07/2014	21,78	36,52
300	09/07/2014	13,51	69,60
300	11/07/2014	8,33	66,75
600	16/07/2014	43,06	43,31
600	18/07/2014	14,94	34,69
500	23/07/2014	0,00	25,41

500	25/07/2014	15,95	21,72
200	30/07/2014	7,52	0,00
200	01/08/2014	3,08	14,44
200	06/08/2014	29,51	19,74
200	07/08/2014	38,05	32,82
200	08/08/2014	31,00	24,14
600	13/08/2014	15,65	7,46
600	14/08/2014	12,16	7,14
600	15/08/2014	9,80	5,66
500	20/08/2014	12,06	14,02
500	21/08/2014	23,68	48,66
500	22/08/2014	14,55	47,71
300	27/08/2014	31,96	56,15
300	28/08/2014	44,17	57,68
300	29/08/2014	45,3	60,28