



DENISE VAZQUEZ MANFIO

**Uso de polímeros naturais no desaguamento de lodo  
de tanque séptico em leito de secagem alternativo**

CAMPINAS

2014





Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

DENISE VAZQUEZ MANFIO

## **Uso de polímeros naturais no desaguamento de lodo de tanque séptico em leito de secagem alternativo**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Saneamento e Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Adriano Luiz Tonetti

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO APRESENTADA AOS MEMBROS DA BANCA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA PELA ALUNA DENISE VAZQUEZ MANFIO ORIENTADO PELO PROF. DR. ADRIANO LUIZ TONETTI

---

Adriano Luiz Tonetti

CAMPINAS

2014

iii

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M313u Manfio, Denise Vazquez, 1988-  
Uso de polímeros naturais no desaguamento de lodo de tanque séptico em leito de secagem alternativo / Denise Vazquez Manfio. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Adriano Luiz Tonetti.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Lodo de esgoto. 2. Coagulantes. 3. Pavimentos. I. Tonetti, Adriano Luiz. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Dewatering septic tank sludge with natural polymers in alternative drying bed

**Palavras-chave em inglês:**

Sludge

Coagulants

Paving

**Área de concentração:** Saneamento e Ambiente

**Titulação:** Mestra em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Adriano Luiz Tonetti [Orientador]

Carlos Gomes da Nave Mendes

Miguel Mansur Aisse

**Data de defesa:** 27-08-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**Uso de polímeros naturais no desaguamento de lodo  
de tanque séptico em leito de secagem alternativo**

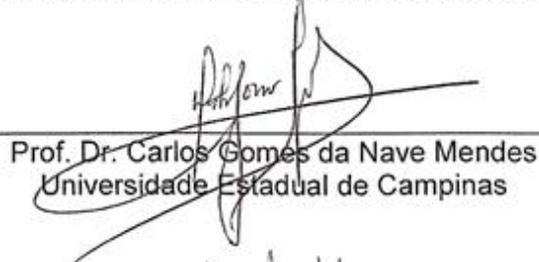
**Denise Vazquez Manfio**

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



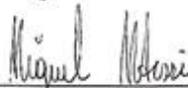
---

Prof. Dr. Adriano Luiz Tonetti  
Presidente e Orientador/Universidade Estadual de Campinas



---

Prof. Dr. Carlos Gomes da Nave Mendes  
Universidade Estadual de Campinas



---

Prof. Dr. Miguel Mansur Aisse  
Universidade Federal do Paraná

Campinas, 27 de agosto de 2014



## RESUMO

O gerenciamento do lodo de tanque séptico é uma atividade complexa, de alto custo e pode promover impactos ambientais negativos caso seja mal executada, sendo que a etapa mais crítica é a de desaguamento. O leito de secagem é uma das principais técnicas, mas demanda grandes áreas e muito tempo para remoção da torta seca. A modificação destes leitos, utilizando pavimentos permeáveis e polímeros podem diminuir o tempo e área deste leito. O objetivo do trabalho foi comparar a eficiência de desaguamento da porção de água livre contida no lodo de tanque séptico com o emprego de leito de secagem convencional e leito de secagem composto por pavimento permeável e avaliar a eficiência da utilização de polímeros naturais oriundos da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), moringa (*Moringa oleifera*) e quiabo (*Abelmoschus esculentus*) como auxiliares do processo. A avaliação foi realizada em escala de bancada. Somente o polímero sintético mostrou-se eficiente no condicionamento do lodo. O lodo não condicionado desaguou nos sistemas: pavimento permeável e pavimento permeável e areia, convencional: 611, 620 e 547 mL em média e no lodo condicionado: 1464, 1434 e 1214 mL, respectivamente. Os teores de sólidos da torta seca do lodo sem polímero foram de 24,08, 26,67 e 29,92% para os sistemas: pavimento permeável e pavimento permeável e areia e convencional respectivamente e, no lodo com polímero foram de 23,95, 25,19 e 28,59%. O tempo médio de desaguamento do lodo sem condicionamento foi de 35 dias, enquanto que no lodo condicionado foi de 6 dias. Estes resultados apontam que as tortas secas obtiveram resultados próximos entre si, porém o lodo com adição de polímero teve maior volume desaguado e menor duração, possibilitando redução na área dos leitos e a realização de mais ciclos de secagem por ano. Ademais, os leitos alternativos produziram lodos com umidade semelhante ao leito convencional em menor tempo, podendo otimizar o desaguamento do lodo em Estações de Tratamento de Esgoto.

**Palavras chaves:** desidratação de lodo de esgoto; condicionamento químico; coagulantes naturais; pavimento permeável.



## ABSTRACT

The sludge management is a complex and high cost activity. It can promote negative impacts if it is poorly executed, and the most critical step is the dewatering. The drying bed is one of the principal techniques, but it demands big areas and a long period for the sludge cake removal. The drying beds change can decrease the time and the area of them, if using permeable paving and polymers. The objective of this work was to compare the efficiency of two techniques to dewatering the bulk water portion inside the septic tank sludge. It was compared the conventional drying bed and the drying bed made of permeable paving. It was also evaluated the efficiency of natural polymers from cassava (*Manihot esculenta* Crantz), moringa (*Moringa oleifera*) and okra (*Abelmoschus esculentus*) as auxiliaries in the process. The evaluation was performed in bench scale. The main results showed that only the synthetic polymer was efficient in sludge conditioning. The unconditioned sludge dewatered from the systems: permeable paving, permeable paving plus sand and conventional: 611, 620 and 547 mL on average and for conditioned sludge: 1464, 1434 and 1214 mL, respectively. The dry solids cake in unconditioned sludge was 24,08, 26,67 and 29,92% and in conditioned sludge was 23,95, 25,19 and 28,59% for systems: permeable paving, permeable paving plus sand and conventional, respectively. The average time for dewatering sludge without conditioning was 35 days, whereas in sludge conditioning was 6 days. These results show that the dry solids cake obtained similar results, however the conditioned sludge had higher volume dewatered and shorter time duration. The alternative drying beds produced sludges with suchlike dry solids results dry solids as compared to conventional drying bed in a shorter time, it may optimize sludge dewatering in Waste Water Treatment Plants.

**Key words:** dehydration sludges, chemical conditioning, natural coagulants, permeable paving.



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVOS .....	3
2.1.	Objetivos específicos .....	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
3.1.	Breve histórico do saneamento básico na zona rural no Brasil .....	5
3.2.	Tanque Séptico .....	7
3.3.	Lodo de esgoto .....	11
3.4.	Desaguamento do lodo de esgoto .....	15
3.5.	Condicionamento do lodo .....	21
3.6.	Pavimento permeável.....	27
4.	METODOLOGIA.....	29
4.1.	Pavimento permeável.....	29
4.2.	Lodo .....	31
4.3.	Polímeros .....	35
4.4.	Montagem dos leitos de secagem.....	39
4.5.	Taxa de infiltração.....	43
4.6.	Avaliação dos sistemas quanto ao desaguamento do lodo.....	43
4.6.1.	Avaliação do desaguamento sem adição de polímero (Série 1).....	44
4.6.2.	Avaliação do desaguamento com adição de polímeros (Séries 2 a 5).....	45
4.6.3.	Sistema controle.....	45
4.6.4.	Avaliação do Lodo Desaguado.....	46
5.	RESULTADOS .....	47

5.1. Taxa de infiltração dos sistemas .....	47
5.2. Caracterização do lodo bruto .....	47
5.3. Dosagem ótima dos polímeros.....	50
5.3.1. Polímero Sintético.....	52
5.3.2. Mandioca.....	53
5.3.3. Moringa.....	54
5.3.4. Quiabo.....	55
5.3.5. Avaliação geral da dosagem dos polímeros.....	55
5.4. Desaguamento do lodo nos sistemas .....	56
5.4.1. Sistema composto por Pavimento Permeável.....	59
a) Lodo não condicionado.....	59
b) Lodo condicionado.....	60
a) Lodo condicionado.....	62
5.4.3. Sistema Convencional.....	63
a) Lodo não condicionado.....	63
b) Lodo condicionado.....	64
5.5. Teor de sólidos das tortas secas.....	65
5.6. Análise geral dos sistemas.....	67
5.7. Hipótese I – Água evaporada do lodo sendo percolada.....	73
5.8. Hipótese II – Ausência de evaporação nos sistemas .....	76
5.9. Manutenção dos pavimentos .....	80
6. CONCLUSÃO.....	83
7. RECOMENDAÇÕES .....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87

APÊNDICE A: Alcalinidade, pH e concentração de Sólidos do lodo bruto.....	93
APÊNDICE B: Infiltração dos sistemas, volume desaguado e tortas secas dos sistemas, temperatura registradas, duração, evaporação das séries .....	96



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Maria Elisa e Reinaldo, por terem me dado além da educação, o amor e a noção de que a vida tem um propósito maior. Agradeço também aos meus familiares, em especial ao meu irmão Júlio e a minha avó Amélia, com quem tenho a oportunidade do convívio do lar há tantos anos. Pela paciência que têm comigo em dias que estou impossível e pelos risos que cobriram meu rosto muitas vezes.

Agradeço ao Prof. Adriano pela excepcional orientação, por todos os conselhos e paciência durante esses mais de dois anos.

Às amigas e amigos que compartilharam algumas xícaras de café e *happy hours* comigo: Amanda Maia, Amanda Marchi, Artur Cardoso, Bianca Gomes, Gabriela Bosshard, Gabriela dos Reis, Guilherme da Silva, Guilherme Rebecchi, Jenifer Silva, João Paulo Hadler, Jorge Barbarotto, Lays Leonel, Luana Cruz, Márcio Haiba, Mônica Rodrigues, Rodolfo Valentim, Thalita Cruz e Thaita Rissi. Os conselhos e as risadas foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao Ademir que, além de toda a ajuda na idealização, construção dos sistemas e avaliação dos pavimentos, se tornou meu amigo. Ao Diego e Eduardo da Secretaria de Pós-Graduação e ao Ariovaldo da Secretaria do Departamento de Saneamento e Ambiente, por terem resolvido muito dos meus pepinos burocráticos, pela simpatia e gentileza com que me trataram sempre. Aos até então técnicos do Lab San: Enelton, Fernando e Lígia pelo grande suporte nas análises. Ao meu amigo David Matta que além da amizade, me deu uma super ajuda com a análise estatística dos meus dados.

De uma forma ou de outra, todas e todos aqui mencionados, contribuíram não só para a obtenção do meu título de mestra, mas também para o meu crescimento enquanto pessoa. Saibam que aprendi muito com vocês!



*“Vivendo, se aprende; mas o que se aprende,  
mais, é só fazer outras maiores perguntas”  
(João Guimarães Rosa, Grande Sertão:  
Veredas, 1956).*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do funcionamento de tanque séptico de câmara única. ....	8
Figura 2 - Planta de um leito de secagem convencional. ....	17
Figura 3 - Corte transversal de um leito de secagem convencional. ....	17
Figura 4 - Exemplo de aplicação de pavimento permeável em estacionamento. ....	28
Figura 5 - Pavimento permeável utilizado no projeto. ....	29
Figura 6 - Extratora de corpo de prova utilizada para o corte do pavimento utilizado na pesquisa. ....	30
Figura 7 - Teste de jarros para dosagem ótima de polímero. ....	33
Figura 8 - Aparelho utilizado para aferir o Tempo de Sucção Capilar (Capillary Suction Time). ....	35
Figura 9 - Preparo da solução de polímero produzida a partir da mandioca. ....	37
Figura 10 - Semente de <i>Moringa oleífera</i> . ....	38
Figura 11 - Preparo da solução de polímero produzida a partir do quiabo. ....	39
Figura 12 - Sistema de bancada de leito de secagem utilizado na pesquisa. ....	40
Figura 13 - Bancada experimental localizada no Laboratório de Protótipos. ....	42
Figura 14 - Detalhe dos sistemas em utilização na bancada experimental. ....	42
Figura 15 - Coluna d'água utilizada como controle na bancada experimental. ....	46
Figura 16 - Hidrograma do desaguamento do sistema composto por pavimento permeável com lodo de esgoto sem polímero. ....	59
Figura 17 - Hidrograma do desaguamento do sistema composto por pavimento permeável com lodo de esgoto com adição de polímero. ....	61
Figura 18 - Hidrograma do desaguamento do sistema composto por pavimento permeável com lodo de esgoto sem polímero. ....	62

Figura 19 - Hidrograma do desaguamento do sistema composto por pavimento permeável e areia com lodo de esgoto com adição de polímero. ....	63
Figura 20 - Hidrograma do desaguamento do sistema convencional com lodo de esgoto sem polímero.....	64
Figura 21 - Hidrograma do desaguamento do sistema convencional com lodo de esgoto com adição de polímero. ....	65
Figura 22 - Teor de sólidos da torta seca do lodo desaguado sem polímero. ....	66
Figura 23 - Teor de sólidos da torta seca do lodo desaguado com polímero sintético...	67
Figura 24 - Hidrograma do desaguamento do lodo em todos os sistemas no lodo não condicionado e condicionado. ....	68
Figura 25 - Desaguamento do lodo sem polímero - médias das séries. ....	69
Figura 26 - Desaguamento do lodo com polímero - médias das séries. ....	70
Figura 27 - Detalhe da constituição do leito de secagem convencional. ....	71
Figura 28 - Teor de sólidos das tortas secas sem condicionamento químico - Hipótese II. ....	78
Figura 29 - Teor de sólidos das tortas secas com condicionamento químico - Hipótese II. ....	79
Figura 30 - Boxplot dos Sólidos Totais encontrados no lodo bruto. ....	93
Figura 31 - Boxplot dos Sólidos Suspensos Totais encontrados no lodo bruto.....	94
Figura 32 - Boxplot da Alcalinidade encontrada no lodo bruto. ....	94
Figura 33 - Boxplot do pH encontrado no lodo bruto.....	95
Figura 34 - Boxplot da taxa de infiltração dos pavimentos no Teste 1. ....	96
Figura 35 - Taxa de infiltração dos pavimentos permeáveis nos testes 1 (sem utilização), 2 (lavagem) e 3 (lavagem com solução detergente). ....	97
Figura 36 - Taxa de infiltração dos sistemas compostos por pavimento permeável e areia nos testes 1 (sem utilização) e 2 (após lavagem dos pavimentos com solução detergente).....	98

Figura 37 - Taxa de infiltração dos sistemas convencionais nos testes 1 (sem utilização) e 2 (após lavagem dos pavimentos com solução detergente).....	99
Figura 38 - Temperaturas registradas na Série I sem polímero. ....	100
Figura 39 - Temperaturas registradas na Série II sem polímero. ....	100
Figura 40 - Temperaturas registradas na Série III sem polímero. ....	100
Figura 41 - Temperaturas registradas na Série I com polímero. Em que: Máx: Temperatura Máxima; Min: Temperatura Mínima e Lab: Temperatura no Laboratório. ....	101
Figura 42 - Temperaturas registradas na Série II com polímero. ....	101
Figura 43 - Temperaturas registradas na Série III sem polímero. ....	102
Figura 44 - Evaporação da coluna d'água nas séries sem adição de polímero. ....	102
Figura 45 - Evaporação da coluna d'água nas séries com adição de polímero. ....	103
Figura 46 - Boxplot do volume desaguado com ou sem polímero em cada sistema (valores amostrais). ....	104
Figura 47 - Boxplot dos volumes desaguados com ou sem polímero em cada sistema (valores ajustados). ....	105
Figura 48 - Boxplot dos Sólidos Totais na torta seca do lodo com ou sem condicionamento químico. ....	106
Figura 49 - Médias e valores máximos e mínimos dos teores de sólidos da torta seca nos sistemas com ou sem polímero (valores ajustados). ....	107



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de lodo de esgoto no Brasil. ....	13
Tabela 2 - Métodos utilizados na análise do lodo.....	34
Tabela 3 - Organização dos sistemas. ....	41
Tabela 4 - Avaliação dos sistemas.....	44
Tabela 5 - Comparação entre dados encontrados na literatura e na presente pesquisa. .....	48
Tabela 6 - Dosagens testadas dos polímeros utilizados na pesquisa. ....	52
Tabela 7 - Resultados obtidos no CST nas dosagens de polímero testadas. ....	53
Tabela 8 - Temperatura, evaporação e duração das séries. ....	56
Tabela 9 - Resultados do desaguamento do lodo de esgoto de tanque séptico. ....	58
Tabela 10 - Desaguamento do lodo de esgoto nos sistemas - Hipótese I. ....	74
Tabela 11 - Teor de sólidos da torta seca – comparação com a Hipótese I.....	78
Tabela 12 - Taxa de infiltração dos pavimentos. ....	96
Tabela 13 - Taxa de infiltração dos sistemas: pavimento com adição de areia e convencional. ....	98



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

CV – Coeficiente de Variação

EPS - Substâncias Poliméricas Extracelulares

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde

LABPRO – Laboratório de Protótipos

LABREUSO – Laboratório de Reuso

LABSAN – Laboratório de Saneamento

LES - Laboratórios de Estrutura

LMC - Materiais da Construção

PLANASA – Plano Nacional de Saneamento

PNAD – Pesquisa Nacional por Amostras em Domicílios

PNRH – Política Nacional de Recursos Hídricos

PNSB – Política Nacional de Saneamento Básico

PV – Pavimento

SST – Sólidos Suspensos Totais

SSF – Sólidos Suspensos Fixos

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis

ST – Sólidos Totais

STF – Sólidos Totais Fixos

STV – Sólidos Totais Voláteis



## 1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico é um direito garantido pela constituição federal brasileira. No entanto, diversos municípios não têm acesso adequado a este serviço no país, principalmente quando se trata da coleta e tratamento de esgoto. Neste contexto, as regiões de baixa densidade demográfica como as zonas rurais, são as que mais carecem do esgotamento sanitário. No Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2010), cerca de 30 milhões de pessoas vivem na zona rural, ou seja, há necessidade de realização de pesquisas que atendam às demandas dessas comunidades, sendo uma delas o saneamento básico.

Contudo, a Pesquisa Nacional de Amostras por Domicílios (PNAD) de 2011 revela que, entre os domicílios sem rede coletora de esgoto, os tanques sépticos representam a principal alternativa para o lançamento do esgoto doméstico e, estão presentes em 22% dos domicílios no país (IBGE, 2012).

A disposição em tanques sépticos, segundo Andreoli *et al* (2009), ainda que longe do desejável, pode reduzir cerca de 30% do potencial poluidor, sendo responsáveis por uma redução de carga orgânica de no mínimo 1,3 milhão de kg de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) por dia, fato que ameniza os impactos ambientais decorrentes da falta da rede coletora de esgoto.

Considerando que mais de 23 milhões de domicílios possuem tanques sépticos ou fossas rudimentares no Brasil, pode-se estimar que a produção de lodo digerido, que possui de 94 a 97% de umidade, ultrapasse 8 milhões de m<sup>3</sup> por ano – observando-se o valor indicado pela NBR 7229/1993 para o coeficiente de redução de volume por digestão (ABNT, 1993).

Desta forma, há necessidade de realizar-se adequadamente o gerenciamento deste lodo, etapa comumente negligenciada no tratamento de esgoto, caso contrário o benefício ambiental gerado pelo tratamento estará comprometido. Dentro deste gerenciamento, o desaguamento por processos naturais são os mais adequados às comunidades rurais, por serem métodos simplificados e de baixo custo.

Tendo em vista um aumento da eficiência deste processo, vislumbrou-se a possibilidade de utilização de polímeros que atuam como condicionantes de lodo. Os polímeros podem ser sintéticos ou naturais. Os primeiros são produzidos industrialmente e podem oferecer riscos à saúde humana, além de impactos ambientais. A utilização de polímeros naturais permitiria a redução destes riscos e impactos, além de apresentarem menor custo, constituindo-se como melhor alternativa às comunidades rurais.

Além disso, a reconfiguração dos leitos de secagem tradicionais utilizando-se pavimentos permeáveis, poderia aumentar a taxa da drenagem da água presente no lodo. Essa combinação entre polímeros naturais e leito de secagem permitiria a redução do tempo de formação e remoção da torta seca e da área do leito de secagem, já que estes apresentam diversos inconvenientes como a demanda por grandes áreas e longos períodos para o desaguamento.

Portanto, a busca por alternativas adequadas à ETE de pequeno porte, localizadas em comunidades isoladas e/ou rurais, historicamente negligenciadas pelo Estado brasileiro, constitui-se como medida efetiva de promoção de saúde e melhoria na qualidade do ambiente, uma vez que o acesso ao saneamento integra o conjunto de medidas da medicina preventiva e reduz o impacto ambiental em corpos hídricos e contaminação do solo e lençóis freáticos.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo do projeto foi comparar a eficiência de desaguamento da porção de água livre contida no lodo de tanque séptico com o emprego de leito de secagem convencional e leito de secagem composto por pavimento permeável e, avaliar a utilização de polímeros naturais oriundos: da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), moringa (*Moringa oleifera*) e quiabo (*Abelmoschus esculentus*) e um sintético como auxiliares do processo.

### 2.1. Objetivos específicos

- Comparar o desaguamento da porção de água livre contida no lodo de tanque séptico entre:
  - a) leito de secagem convencional;
  - b) leito de secagem composto por pavimento permeável e uma camada de areia de 0,01m;
  - c) leito de secagem composto somente com pavimento permeável.
- Avaliar a influência da utilização dos polímeros na eficiência do desaguamento. Sendo estes: oriundos da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), moringa (*Moringa oleifera*) e quiabo (*Abelmoschus esculentus*) e um sintético;
- Comparar a eficiência entre a utilização dos polímeros naturais e sintético.



### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Breve histórico do saneamento básico na zona rural no Brasil**

O saneamento na zona rural sempre foi negligenciado por parte do Estado. Tendo se tornado uma preocupação para o poder público somente no início do século XX após trabalho realizado pela Liga Pró-Saneamento do Brasil, que foi um movimento nacionalista formado por médicos, cientistas, antropólogos e funcionários dos serviços federais. Este movimento realizou um relatório sobre o saneamento na zona rural através de diversas incursões pelos “sertões” e encontraram uma população doente e miserável. A ausência de políticas sociais e a grande pobreza decorrente da grande concentração de terras e a exploração a que boa parte desta população era submetida, a tornava enfraquecida por doenças decorrentes da falta de saneamento básico e impossibilitada de ter melhores condições de vida (GRECO, 1999; NEVES, 2009). Esse grupo criticava a ausência do poder público nestes locais e acreditava ser possível reverter este quadro promovendo ações integradas de saúde e saneamento, baseando-se no conceito de sociabilidade das doenças (REZENDE & HÉLLER, 2008).

No entanto, não consideravam os aspectos de subdesenvolvimento e desigualdade social que contribuíam para tal situação (GRECO, 1999; NEVES, 2009; REZENDE & HÉLLER, 2008). Como se o personagem “Jeca Tatu” de Monteiro Lobato, assolado pela ancilostomíase pudesse tornar-se vigoroso capitalista somente tendo acesso à saúde. Portanto, o projeto de “saneamento dos sertões”, através da exclusiva promoção de saúde, buscava defender a “vocação agrícola” do país e integrar a população rural à economia nacional. Contudo, foi a partir deste movimento que se lançou as bases para uma reforma que unificou e centralizou as ações de saúde e saneamento no país (REZENDE & HÉLLER, 2008).

Com a intensificação do êxodo rural a partir da década de 1940 pela industrialização do país, causando intensa urbanização, deslocou-se recursos a serem destinados a zona rural, que viviam em condições precárias de saúde, saneamento, educação e moradia. A partir da década de 1970 houve um distanciamento das ações de saúde e saneamento e a criação do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA),

que investiu em abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto (REZENDE & HÉLLER, 2008).

Em 2007, com a criação da Lei Nacional de Saneamento Básico (LNSB) e sua respectiva política, entendeu-se a grande vinculação que deve existir entre as políticas de saneamento básico, as políticas nacionais e regionais de recursos hídricos e as políticas regionais e locais de desenvolvimento urbano e saúde pública. A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) já tem certa integração com a LNSB, como exemplificado pelas ações da Agência Nacional de Águas (ANA). Porém, a saúde pública é uma grande ausente na LNSB, exceto pela imposição de que os planos de saneamento básico devam partir de um diagnóstico baseado em indicadores sanitários e epidemiológicos (CUNHA, 2011).

A Política Nacional de Saneamento Básico (PNSB) determinou a elaboração dos programas de saneamento básico integrado, saneamento estruturante e saneamento rural. Sendo este último, responsabilidade do Ministério da Saúde por meio da Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) que tem coordenado o Programa Nacional de Saneamento Rural, visando integrar as políticas públicas de meio ambiente, recursos hídricos, saúde, habitação e igualdade racial (FUNASA, 2012).

Entretanto, ainda hoje, de acordo com a PNAD 2011, a zona rural é marginalizada quanto ao acesso aos serviços de saneamento. Somente 33% dos domicílios tem ligação a rede de abastecimento de água e o acesso é ainda mais baixo quando se trata de esgoto: apenas 5% estão ligados a rede coletora e 28% utilizam o tanque séptico como unidade de destinação do esgoto, mas a grande parte da população ainda faz uso de fossa rudimentar, lançamento em corpos d'água e no solo a céu aberto (IBGE, 2012).

Do ponto de vista ambiental, um projeto de saneamento deve estar apto a responder não só as questões sanitárias, mas também as fontes de perturbação da qualidade ambiental no ambiente, como a implicação dos usos do efluente gerado e seus subprodutos (PHILIPPI *et al*, 1999).

Dentre as técnicas de tratamento utilizadas nas zonas rurais, o tratamento anaeróbio oferece algumas vantagens em relação ao aeróbio, tais como: projeto relativamente simples e baixo custo, baixa produção de lodo, baixo consumo de energia e de demanda de nutrientes, com capacidade de receber altas cargas orgânicas e sendo potencialmente gerador de energia (MOUSSAVI, KAZEMBEIGI & FARZADKIA, 2010).

### **3.2. Tanque Séptico**

É a forma de tratamento anaeróbia mais difundida e mais antiga no mundo, há registros de seu uso no século XIX (BITTON, 2005) e ainda se constitui como a principal alternativa de tratamento de esgoto em comunidades isoladas e/ou rurais em países de economia periférica, por ser uma forma de tratamento descentralizado (MOUSSAVI, KAZEMBEIGI & FARZADKIA, 2010). Desde que seja projetado, situado e mantido corretamente, é considerado um tratamento de esgoto eficiente em áreas rurais (WITHERS, JARVIE & STOATE, 2011).

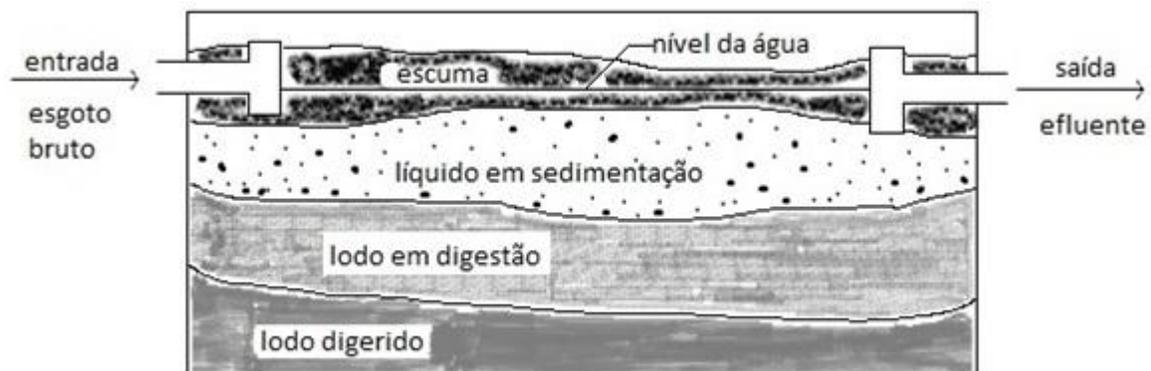
Os tanques sépticos podem ser definidos como uma unidade cilíndrica ou prismática retangular de fluxo horizontal usada para tratamento de esgotos por processos de sedimentação, flotação e digestão (ABNT, 1993). Podem ser de câmara única, de câmaras em série ou de câmaras sobrepostas (ANDREOLI, 2009) e sua constituição pode ser de concreto, metal ou fibra de vidro (BITTON, 2005).

Os sólidos sedimentáveis presentes no esgoto formam a camada de lodo na parte inferior do tanque. Óleos, graxas e outros materiais leves flutam na superfície, formando uma camada de espuma. A matéria orgânica retida no fundo do tanque sofre decomposição facultativa e anaeróbia, sendo convertida a compostos mais estáveis e a gases como gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e a remoção de Sólidos Suspensos Totais (SST) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é geralmente de 70 a 80% e de 65 a 80%, respectivamente, podendo alcançar em climas quentes remoção

de 80% de SST e 90% de DBO (METCALF & EDDY, 2009; BITTON, 2005). Contudo, é pouco eficiente na remoção de organismos patogênicos (BITTON, 2005).

O tempo em que o esgoto permanece no tanque para que seja tratado, Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) varia de 24 a 72 h (BITTON, 2005). Na Figura 1 está representado um esquema de funcionamento de um tanque séptico de câmara única:

Figura 1 - Esquema do funcionamento de tanque séptico de câmara única.



Apesar deste sistema de tratamento ser extremamente antigo, ainda é objeto de pesquisa em diversos países e se constitui como a principal forma de tratamento de esgotos em comunidades rurais. Entretanto, a forma de operação, as unidades que precedem ou sucedem os tanques sépticos e a destinação final do efluente e do lodo, sofreram modificações qualitativas ao longo do tempo. Fato que não só comprova a relevância das pesquisas sobre este sistema como impacta positivamente a saúde pública e o ambiente de modo geral.

Moussavi, Kazembeigi & Farzadkia (2010) estudaram um modelo diferente de tanque séptico em escala piloto, onde o fluxo de esgoto é vertical, assemelhando-se aos Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (RAFA). Os pesquisadores constataram a remoção de 86% de SST, 85% Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e, 77% da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO) quando o TDH foi de 24h.

Em seguida, testaram a eficiência de remoção desses indicadores com TDH de 12 e 6 h e notaram que esse decréscimo também ocasionou o decréscimo da remoção de SST, de 67 para 33%, respectivamente. O mesmo ocorreu para os parâmetros de DBO e DQO, em que o período de 12h houve remoção de 71 e 77% e no período de 6 h remoção de 33 e 31%, respectivamente, constatando que neste caso não é possível reduzir o tempo de detenção hidráulica dentro da unidade de tratamento sem comprometer a eficiência de remoção da carga orgânica.

Os autores concluíram que a modificação do fluxo de esgoto se revelou eficiente no tratamento de esgotos domésticos e pode propiciar menor geração de lodo, implicando em uma manutenção mais simplificada comparada às unidades convencionais e conseqüentemente, em menores custos.

Uma pesquisa semelhante foi realizada em escala real em El Tel El Sagheer, uma pequena comunidade localizada à 120 km de Cairo, Egito. O tanque séptico modificado proposto por Sabry (2010) constitui-se por dois compartimentos. O primeiro, cujo fluxo do efluente era vertical, possuía uma série de chapas inclinadas a 60°, conhecidas como decantadores por colmeia, que separavam a fase sólida da líquida, minimizando a quantidade de sólidos que escapavam para o compartimento seguinte e retinham a espuma. O primeiro tanque exercia a função de digerir anaeróbiamente a matéria orgânica, sedimentando os sólidos suspensos no fundo que formam o lodo, tendo também uma saída para o biogás formado.

O segundo compartimento era dividido em dois e servia como uma unidade de polimento, degradando a matéria orgânica residual, através da filtração que ocorria o com cascalho no fundo do tanque, retendo os sólidos biológicos por um longo período. Para tal, o sistema exigia a utilização de duas bombas submersas, uma em cada tanque, com vazão de  $0,003 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . O TDH dos dois compartimentos era de 20 h, velocidade ascensional na vazão máxima diária de  $0,125 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$  e carga orgânica média no segundo compartimento de  $0,42 \text{ kg DBO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}$ . Além disso, uma unidade de

desinfecção foi instalada para injetar uma solução de hipoclorito de sódio no efluente tratado, com vistas a adequação a legislação local.

Durante quase um ano de operação e monitoramento, o sistema removeu 81% da DBO, 84% do DQO e 89% dos SST, enquanto a remoção em um sistema de tanque séptico seguido de filtro anaeróbio citado pelo pesquisador foi de 56% para DBO, 52% para DQO e 54% para SST. O sistema também se mostrou de fácil reprodutibilidade e baixo custo, provando-se uma alternativa promissora para o tratamento de esgotos em comunidades rurais em regiões em situação análoga ao Egito.

Os tanques sépticos também podem ser integrados a outros processos de tratamento, como demonstrado por Philippi *et al* (1999) numa pesquisa realizada no Brasil, no estado de Santa Catarina. Os pesquisadores verificaram a eficiência de uma zona de raízes (também conhecida pelo seu termo em inglês *wetland*) que recebia efluente de um tanque séptico. Proveniente de uma indústria alimentícia, continha soro de queijo, gordura, sangue, alimentos enlatados, carne suína e esgoto sanitário, sendo que parte desse material ficava na caixa de gordura situada após o tanque séptico, que foi construído em escala real de acordo com a NBR 7223/1993.

Após a caixa de gordura, o efluente entrava na parte inferior da zona de raízes e passava por camadas de areia, feno de arroz e argila, chegando as raízes da *Zizaniopsis bonariensis*, espécie de planta aquática típica da região sul do país. Os pontos de monitoramento foram nas saídas do tanque séptico (P1) e da zona de raízes (P2) e os resultados mostraram que a redução do P1 para DBO e DQO foi de 32 e 33%, de 29 e 36% para ST e STV, de 5 e 40% para Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK) e nitratos e de 13% para o fósforo total (PT), respectivamente. Enquanto que para o P2 a redução foi de 69% para DBO, 71 % para a DQO, para ST e STV de 61 e 75%, para NTK e nitratos e PT de 78 e 40, 72%, respectivamente. Destaca-se que a pesquisa estuda uma das possibilidades de pós-tratamento de efluente de tanques sépticos, porém existem diversas formas indicadas pela NBR 13969/1997 como: vala de infiltração, o poço absorvente, escoamento superficial e canteiro de infiltração e evapotranspiração.

Os resultados da pesquisa revelam bom desempenho da associação dos sistemas de tratamento e alta remoção de N e P em decorrência da desnitrificação na zona de raízes e, após o período de maturação do sistema, começou a produzir efluente em acordo com a legislação local, sendo o sistema integrado uma boa alternativa para o tratamento efluentes sanitários e para indústrias que tenham efluentes semelhantes aos da pesquisa (PHILIPPI *et al*, 1999).

Contudo, a operação incorreta e a destinação inadequada do efluente e do lodo gerado pelos tanques sépticos em zonas rurais podem contribuir para a eutrofização de nascentes de corpos hídricos. Withers, Jarvie & Stoate (2011) monitoraram o impacto dos tanques sépticos na concentração de nutrientes em uma comunidade rural na Inglaterra. Os pesquisadores verificaram altas concentrações de nitrogênio, fósforo, sódio, potássio e amônia, além de concentrações de nitrato consideradas nocivas aos peixes, tipicamente associados à digestão anaeróbia de tanques sépticos, tanto nas valas de infiltração quanto à jusante do corpo hídrico situado próximo aos tanques sépticos.

Portanto, além de melhorias nas tecnologias simplificadas de tratamento de esgoto, é necessário o correto gerenciamento do lodo gerado, caso contrário, o benefício ambiental gerado pelo tratamento do efluente pode ser parcialmente comprometido.

### **3.3. Lodo de esgoto**

O lodo de esgoto é um subproduto do tratamento de esgoto e é gerado em várias etapas. Seu gerenciamento é complexo e por vezes ignorado nas ETE. Contraditoriamente, Campbell (2000) aponta que quanto mais efetivo o processo de remoção de contaminantes, maior a produção de lodo. Ou seja, a preocupação com o tratamento do efluente deve ser proporcional ao gerenciamento de seu subproduto.

Apesar disso, não representa mais que 2% do volume de esgoto tratado. Porém os custos variam de 20 a 60% do total gasto numa ETE no Brasil (ANDREOLI, VON SPERLING & FERNANDES, 2001). Essa realidade não é só brasileira, em outros

países também representa custos elevados e seu gerenciamento é por vezes negligenciado (RUIZ, KAOSOL, & WISNIEWSKI, 2010).

Uma fração significativa da expansão da infraestrutura está ocorrendo em países em desenvolvimento, dirigidas aos maiores centros urbanos do mundo, como é o caso da Cidade do México e São Paulo. Para ter estratégias mais apropriadas de gerenciamento de lodo, contudo, são necessárias informações históricas, pouco disponíveis nestas cidades, segundo afirma Campbell (2000).

Além disso, é imprescindível o conhecimento do lodo gerado, para que seu gerenciamento possa ser eficiente. Ainda que a NBR 10.004/2004 classifique o lodo de esgoto como um resíduo sólido não inerte (ABNT, 2004), aproximadamente 95% de sua constituição é água, sofrendo algumas variações devido as diferentes características dos esgotos e tratamentos. O lodo também pode ser classificado de acordo com a sua origem:

- Lodo primário: é aquele gerado em decantadores primários e tanques sépticos. É formado principalmente por sólidos sedimentáveis. Pode exalar odor forte caso fique retido por períodos elevados e em altas temperaturas. Nos tanques sépticos, sofre digestão anaeróbia;
- Lodo secundário: é formado nas etapas biológicas do tratamento, aeróbia e anaeróbia, podendo estar estabilizado ou não. Compreende a comunidade microbiana que realiza a degradação da matéria orgânica no sistema;
- Lodo químico: é originário de tratamentos que adicionam condicionantes químicos, como decantadores primários com precipitação química.

O Programa de Pesquisa em Saneamento Básico realizou um trabalho com lodo de esgoto em diferentes institutos de pesquisa no Brasil. Algumas características do lodo encontradas podem ser vistas na Tabela 1 utilizando-se o procedimento de coleta

de alíquotas dos resíduos descartados pelos caminhões limpa-fossa na entrada da ETE, ressalta-se que apesar da pesquisa focar em lodo de tanque séptico, nem todas as ETE coletaram desta unidade de tratamento, nem adotaram a mesma metodologia de coleta e os contribuintes do esgoto foram variados, como: restaurantes, domicílios, hospitais, entre outros e, são mantidos e operados de formas diferentes. Nota-se que todos os valores são elevados, indicando alta concentração de sólidos.

Tabela 1 - Características de lodo de esgoto séptico no Brasil.

Parâmetros	Lodo de esgoto			
	FAE/ SANEPAR Mediana	UFRN/ LARHISA Mediana	UNB/ CAESB Mediana	USP/ EESC Mediana
ST (mg.L <sup>-1</sup> )	8208	6508	10214	6508
STV (mg.L <sup>-1</sup> )	5612	4368	7368	3053
SST (mg.L <sup>-1</sup> )	5042	3891	6395	3257
DBO (mg.L <sup>-1</sup> )	2734	955	-	1524
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	11219	3434	1281	4491
pH	7,2	6,6	7,1	6,9

Adaptado de Andreoli (2009).

Diversos estudos têm buscado relações entre características físico-químicas do lodo e seu desaguamento. De acordo com Vesilind (1994) o tamanho e a superfície das partículas sólidas presentes no lodo são características importantes que podem determinar a receptividade ao espessamento ou desaguamento do lodo. A carga das partículas pode estabelecer ligações com as moléculas de água difíceis de serem quebradas, essas cargas superficiais alteram propriedades físicas da água: descongelamento à temperaturas abaixo do ponto de congelamento (-20°C) e a densidade pode ser reduzida a 0,965 g/cm<sup>3</sup>.

Neste mesmo trabalho, Vesilind (1994) investigou os tipos de água presentes no lodo e verificou que uma fração está ligada fisicamente à superfície das partículas presentes no lodo, através de pontes de hidrogênio, denominada água vicinal e pode ser removida pela diminuição da área superficial total das partículas sólidas a que está ligada, através da utilização de condicionantes químicos.

A remoção da água localizada nos interstícios dos flocos pode se dar por processos mecânicos, que conseguem destruir a estrutura do floco (RUIZ, KAOSOL, & WISNIEWSKI; 2010; VESILIND, 1994) A água de hidratação é aquela ligada quimicamente à superfície da partícula e é removida apenas com aumento da temperatura. Somente a fração denominada “água livre” é que não está associada e não sofre influência dos sólidos presentes no lodo. A drenagem, adensamento e desidratação mecânica e natural podem realizar a sua remoção (VESILIND, 1994).

O trabalho de Liao *et al* (2000) constatou forte relação entre o tamanho dos flocos e a quantidade de água ligada físico-quimicamente às partículas sólidas, quanto menor era o floco, maior a quantidade deste tipo de água encontrada no lodo. Mikkelsen & Keiding (2002), concluíram que Substâncias Poliméricas Extracelulares (EPS) são o parâmetro mais importante na estrutura do lodo e altas concentrações destas substâncias podem diminuir a tensão de cisalhamento e propiciar um menor grau de dispersão do lodo, pois agem na estabilidade da estrutura dos flocos, reduzindo desta forma, a resistência à filtração. Entretanto, altas concentrações de EPS diminuem o teor de sólidos na torta seca.

Jin, Wilén & Lant (2003) também investigaram a relação entre as EPS e o desaguamento no lodo de esgoto. Os pesquisadores observaram que altas concentrações de íons  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  proporcionam melhora significativa no desaguamento. Também concluíram que lodos que contem flocos compactos, grandes e com muitos filamentos tem grande quantidade de água ligada intersticial. Propriedades de flocculabilidade, hidrofobicidade, carga superficial e viscosidade são fatores que afetam significativamente a capacidade de ligação da água nos flocos de lodo, sendo que altos valores destas propriedades indicam grande quantidade de água ligada. Ademais, proteínas e carboidratos contribuem significativamente para a ligação da água nos flocos.

No espessamento por gravidade, a presença de água vicinal em volta das partículas menores no lodo (de 2 a 4  $\mu\text{m}$ , cerca de 6% do total de partículas presentes

no lodo digerido anaeróbiamente) melhoraria o processo, devido ao aumento do diâmetro efetivo das partículas, como resultado da baixa densidade encontrada na água vicinal e do aumento da viscosidade da água que circunda as partículas (VESILIND, 1994).

As alternativas para a disposição do lodo são variadas e têm sido desenvolvidas há várias décadas, Campbell (2000) as divide em três categorias, são elas: (i) aplicação no solo; (ii) disposição em aterro sanitário e; (iii) tecnologias de incineração. Para as duas primeiras - mais aplicadas no Brasil - torna-se indispensável a retirada de uma parcela de sua umidade, pois interfere na umidade ideal do solo quando aplicado na agricultura e sobrecarrega o tratamento do chorume nos aterros.

### **3.4. Desaguamento do lodo de esgoto**

De acordo com Andreoli, von Sperling & Fernandes (2001) o gerenciamento do lodo é uma atividade complexa e pode promover impactos ambientais negativos caso seja mal executada. Dentre as etapas envolvidas, o desaguamento é um dos desafios da engenharia ambiental e continua sendo um problema no tratamento de esgotos (VESILIND, 1988; VESILIND, 1994; CAMPBELL, 2000).

Metcalf & Eddy (1991) descrevem o desaguamento como uma operação física utilizada na redução de umidade contida no lodo. É necessário realizar esta operação por propiciar: (i) o manuseio mais fácil; (ii) a redução dos custos no transporte; (iii) a disposição em aterros sanitários, reduzindo a quantidade de chorume produzido; (iv) a melhora na etapa de compostagem do lodo; (v) a redução da atividade microbiana e, conseqüentemente, da produção de odores.

O desaguamento pode ser realizado por processos naturais ou mecanizados. A seleção dos mecanismos de desaguamento deve ser determinada pelo tipo de lodo a ser desaguado, características desejadas do lodo desaguado e espaço disponível. Os processos mecanizados são mais indicados para Estações de Tratamento de Esgotos (ETE) de grande porte e, onde haja restrição de área. Centrífugas, filtros a vácuo,

filtros-prensa, prensas desaguadoras e secagem térmica são exemplos de processos mecanizados mais utilizados em ETE.

Em estudo realizado por Ruiz, Kaosol, & Wisniewsk (2010) relacionou-se a quantidade de matéria orgânica presente no lodo e sua aptidão ao desaguamento mecânico, verificou-se que quanto maior essa quantidade (expressa pelo valor de Sólidos Totais Voláteis) menor era a resistência a filtração, mas maior sua compressibilidade (expressa pelo seu limite de plasticidade) e portanto, menor a eficiência do processo de desaguamento mecânico. Todavia, lodos com menor teor de matéria orgânica, isto é, mais estabilizados, também são mais indicados para os processos naturais de desaguamento (ANDREOLI, VON SPERLING & FERNANDES, 2001).

Verifica-se, no entanto, que poucas pesquisas têm se preocupado com o desaguamento por processos naturais, como os leitos de secagem e as lagoas de secagem, que estão mais presentes em ETE pequenas ou que não têm restrições quanto a área. O mecanismo de desaguamento nestes casos se dá pela evaporação e percolação da água presente no lodo. O desaguamento de lodos por leitos de secagem é adequado para comunidades de pequeno e médio porte, sendo indicado para lodos tipicamente encontrados em tanques sépticos (estabilizados).

Um leito de secagem convencional, conforme ilustram as Figuras 2 e 3, caracteriza-se por um tanque, com paredes e base de concreto. O fundo deve ser constituído por uma camada de areia, três camadas de brita e tijolos recozidos, ou outro material resistente à operação de remoção do lodo seco, com juntas de areia (ABNT, 1992).

Figura 2 - Planta de um leito de secagem convencional.

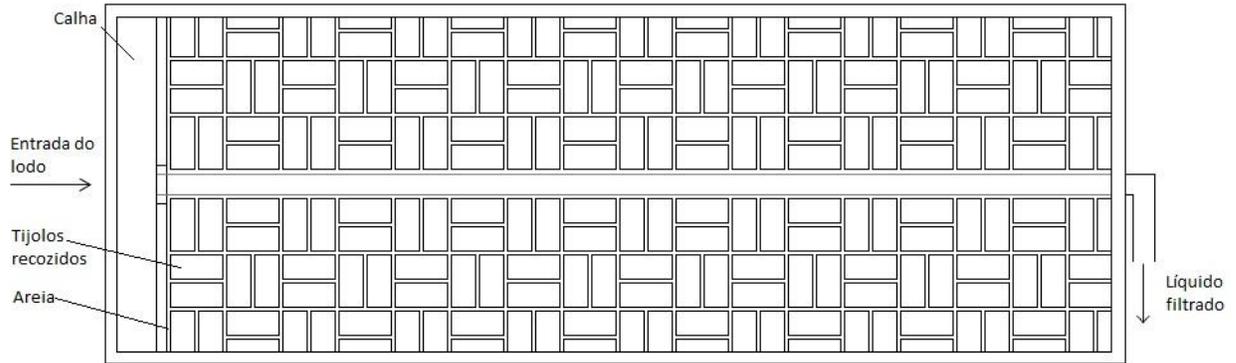
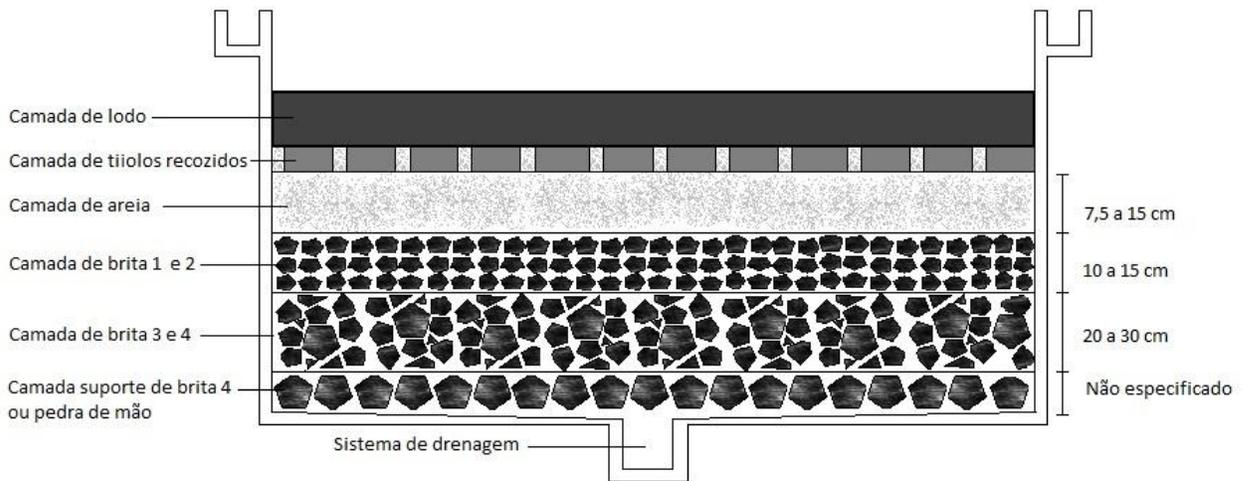


Figura 3 - Corte transversal de um leito de secagem convencional.



Van Haandel & Lettinga (1994) descrevem que o tempo total para um ciclo de secagem em leitos de secagem se compõe por quatro períodos. São eles:

$T_1$  = tempo de preparação do leito e descarga do lodo, que dependem do gerenciamento do leito, como número de trabalhadores e disponibilidade de equipamentos;

$T_2$  = tempo de percolação da água presente no lodo;

$T_3$  = tempo de evaporação para se atingir a fração desejada de sólidos, que assim como  $T_2$  varia em função de condições operacionais durante a secagem, condições meteorológicas (temperatura e pluviosidade) e a carga aplicada de sólidos;

$T_4$  = tempo de remoção dos sólidos secos.

Para amenizar as variáveis meteorológicas, os leitos de secagem podem ser instalados ao ar livre ou cobertos por proteção contra a influência das chuvas e de geadas.

De acordo com Metcalf & Eddy (1991), Andreoli, von Sperling & Fernandes (2001) e Andreoli (2009), em comparação aos processos mecanizados apresenta diversas vantagens, tais como:

- Simplicidade na instalação e operação;
- Baixa sensibilidade à qualidade do lodo;
- Não provoca ruídos e vibrações;
- Não demanda energia;
- Baixo custo;
- Baixo consumo de polímeros;
- A exposição prolongada ao sol pode promover a remoção de organismos patogênicos (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

Entretanto, também possui desvantagens, sendo elas:

- Demanda tempo elevado para remoção da torta seca;
- Necessitam de que o lodo esteja estabilizado;
- É sujeito às variações climáticas;
- A remoção do lodo é trabalhosa;
- Demanda grande área.

Considerando que a área específica requerida para leitos de secagem ( $A_e$ ) pode ser calculada em função<sup>1</sup>: da quantidade de lodo digerido produzido na ETE ( $Q$ ) - que é função da produção de lodo fresco ( $1 \text{ L. pessoa.dia}^{-1}$ ) e do coeficiente de redução de volume por digestão (0,25) ( $Q = 0,25$ ); da espessura da camada de lodo aplicado em cada ciclo ( $e = 0,45 \text{ m}$ ); e do número de ciclos de secagem por ano ( $n_c = 15 \text{ ciclos/ano}$ ).

---

<sup>1</sup> Valores sugeridos pela NBR 7229/1993.

Calculando-se pela formula:

$$A_e = \frac{Q \times 365}{e \times n_c}$$

Pode-se estimar uma área média de 0,014 m<sup>2</sup>.hab<sup>-1</sup> (para lodos anaeróbios de origem doméstica) (NBR 7229/1993; MORTARA, 2011).

Um dos poucos trabalhos que estudaram os leitos de secagem em bancada foi produzido por van Haandel & Lettinga (1994), que realizaram uma investigação experimental semelhante a presente pesquisa. No entanto, os resultados não são diretamente comparáveis, uma vez que os autores estudaram o tempo necessário para obtenção de uma determinada umidade para diferentes cargas de sólidos. Além disso, separou-se os processos de percolação e evaporação, de modo que o experimento foi feito em duas etapas: na primeira utilizaram tubos de PVC de 1,0 m de comprimento e 0,20 m de diâmetro, adicionando-se aos tubos camadas de cascalho estratificado de 1 a 1/8" (brita média) e areia média, ambas com espessura de 0,20 m cada. O lodo utilizado foi proveniente de RAFA e foi inserido nos tubos, sendo que estes foram cobertos para evitar a evaporação.

Após esta fase o lodo era removido dos tubos e colocado em anéis de 0,040 m de comprimento e 0,050 m de diâmetro, dispostos em colunas que ficavam ao ar livre para avaliar-se a evaporação, que era realizada por diferença de massa, observada diariamente até que se estabelecesse massa constante. A perda de massa era acompanhada por perda de volume de lodo e, para facilitar a evaporação, sempre que o lodo atingia nível mais baixo ao nível superior do tubo, o anel imediatamente acima era retirado, sendo a evaporação não limitada pela difusão de vapor de água no tubo. Também realizou-se testes de evaporação com água pura.

Os autores concluíram que a concentração inicial de ST no lodo não teve influência mensurável sobre o tempo necessário para a percolação da água ou sobre a concentração final de ST no lodo. Em contraste, cargas de sólidos diferentes tiveram tempos de percolação diferentes. Outrossim, grande parte da água no lodo é livre e é removida no período de percolação, que é relativamente curto. Entretanto, períodos elevados de evaporação são necessários para obtenção de altos valores de ST nas

tortas secas. Ademais, a produtividade do leito de secagem (massa de sólidos processados por unidade de área do leito e por unidade de tempo) é muito influenciada pela fração de sólidos que se deseja no lodo após a secagem. A produtividade para lodo com relativamente muito água (umidade de 60 a 70%) é mais que o dobro daquela para lodo com pouca água (umidade de 20 a 30%).

Cofie *et al* (2006) realizaram estudo com leito de secagem em escala real em Ghana e monitoraram oito ciclos de secagem por dez meses. O leito de secagem era composto por uma camada de 0,15 m de areia fina e duas camadas de brita, a primeira de tipo 1, tinha 0,10 m de espessura e a segunda, de tipo 2, tinha espessura de 0,15 m. O leito tinha área de 25 m<sup>2</sup> e capacidade de 15 m<sup>3</sup> de lodo com espessura de 0,30 m.

Um terço do lodo foi proveniente de sanitários públicos e o restante de tanques sépticos, tendo baixa concentração de sólidos, cerca de 3%. A carga aplicada de sólidos utilizada foi de 196 a 321 kg. m<sup>2</sup> e quando seco, era retirado manualmente. O teor de sólidos da torta seca foi em média de 30,45%, os STV de 71% e o tempo de desaguamento variou de 7 a 59 dias.

Os pesquisadores atribuem essa grande variação a alguns fatores: (i) ao incremento de água no lodo causado pela chuva; (ii) o entupimento da areia que diminuiu a capacidade de percolação da água livre do lodo e; (iii) ao tipo de lodo utilizado, que apesar da parcela oriunda de tanque séptico estar bem digerida, a porção proveniente de sanitários públicos apresentava grande quantidade de matéria orgânica, tornando esse lodo pouco digerido e impróprio para o desaguamento nesse tipo de leito.

Mortara (2011) estudou a utilização de leitos de drenagem como alternativa aos leitos de secagem. Estes primeiros se diferenciam por substituírem a camada de areia por uma com manta geossintética e terem reduzida a altura de camada de brita (que passa a ser somente uma camada de brita nº 1 ou 2 de 0,05 a 0,10 m de espessura). Essa mudança proporcionou aumento da taxa de retirada da água livre e, portanto, redução do tempo de drenagem. Além disso, o autor cita que a massa de lodo seco retirada foi menor, assim como o trabalho para sua retirada e a estrutura para

armazenar o material até sua disposição final foram menores quando comparados ao leito de secagem.

### **3.5. Condicionamento do lodo**

O condicionamento é um processo que melhora as características do lodo com vistas a processá-lo de forma mais eficiente e mais rápida, já que o lodo geralmente não é facilmente manipulável. Faz-se então necessário seu condicionamento para facilitar o espessamento, desaguamento e secagem. O condicionamento do lodo pode se dar por diversos métodos: que vão desde a separação de partículas sólidas das moléculas de água (processos físicos) até a oxidação de matéria orgânica (processos químicos) (AMUDA *et al*, 2008).

Alguns exemplos de processos físicos empregados são: o congelamento do lodo, que proporciona a separação de parte da água presente das partículas sólidas (AMUDA *et al*, 2008); a hidrólise térmica que permite a liberação da água ligada físico-quimicamente em temperaturas acima de 100°C; o tratamento ultrassônico que também pode ser químico, que em ambos os casos causa ruptura da estrutura celular e dos flocos de micro-organismos através do uso de baixas ou altas frequências, por processo de cavitação ou de reações químicas (CARRÈRE *et al*, 2010). A eletrodesidratação, também conhecida como desidratação assistida por campo elétrico, consiste na aplicação de um campo elétrico que atrai as partículas de água eletricamente carregadas, rompendo as ligações com as partículas sólidas do lodo (MAHMOUD *et al*, 2010).

Um outro exemplo de condicionamento é a destruição biológica celular, através da aplicação de fortes oxidantes químicos, promove a desintegração biológica da matéria orgânica do lodo a CO<sub>2</sub> e água e, conseqüentemente, reduz o volume do lodo (AMUDA *et al*, 2008).

A alternativa de condicionamento mais comum nas ETE é a utilização sais inorgânicos e de polímeros orgânicos. São empregados tradicionalmente produtos já

utilizados no tratamento de água e esgoto, condicionantes inorgânicos como cloreto férrico, sulfato de alumínio e a cal (AMUDA *et al*, 2008; METCALF & EDDY, 1991). A desvantagem na utilização destes é o aumento do teor de sólidos de 20 a 30% no lodo, enquanto que a utilização de polímeros orgânicos não aumenta significativamente (METCALF & EDDY, 1991). A escolha e utilização de condicionantes inorgânicos ou orgânicos deve ser baseada em estudos técnicos e econômicos (MORTARA, 2011).

Os condicionantes orgânicos atuam como coagulantes, formando pontes químicas entre o polímero e as partículas coloidais presentes no lodo, que são adsorvidas pelas diversas cadeias de monômeros do polímero, agregando-se em flocos densos passíveis de serem removidos por filtração, sedimentação ou flotação (LIBÂNIO, 2005). Sua aplicação em dosagem correta acelera o processo de desaguamento e aumenta o teor de sólidos da torta seca (WPCFM 1988).

A adição de polímeros ocorre antes da etapa de desaguamento e podem reduzir a umidade de entrada de 90 a 99% para 65 a 85%, dependendo das características dos sólidos a serem tratados (METCALF & EDDY, 1991; WPCFM, 1988).

Os polímeros podem ser classificados de acordo com a sua carga elétrica em catiônicos, aniônicos, não-iônicos e anfóteros e, quanto a sua origem: sintética ou natural. Libânio (2005) destaca duas vantagens no uso específico de polímeros catiônicos de menor peso molecular que se aplicam ao tratamento de lodo de esgoto. São elas: (i) redução do volume do lodo gerado; (ii) maior facilidade de desidratação do lodo gerado comparada aos sais de ferro e alumínio.

Mortara (2011) realizou ensaios com polímeros sintéticos em lodo de ETE, analisou 18 polímeros catiônicos, 15 sólidos e 3 em emulsão, associados a um leito de drenagem no condicionamento do lodo anaeróbio. Através de testes em laboratório e em escala piloto, constatou que quase todos os polímeros sólidos testados produziram lodos mais facilmente desaguáveis com dosagens relativamente baixas, cerca de 2 g.kg de ST<sup>-1</sup> enquanto que os polímeros em emulsão tinham dosagens ótimas maiores,

cerca de 6 g.kg<sup>-1</sup>. Também se verificou que o condicionamento químico propiciou maior drenagem da água, quando comparado ao lodo não condicionado. Entretanto, não influenciou a evaporação e conseqüentemente, os tempos de ciclo de secagem, uma vez que o teor de sólidos do lodo sem condicionamento apresentou evolução semelhante a dos lodos condicionados ao longo do período de secagem.

Contudo, segundo Abreu Lima (2007) os polímeros sintéticos podem ser contaminados no processo de produção, ou ainda gerar subprodutos (monômeros) de risco à saúde dos consumidores. Uma alternativa a esses condicionantes seria o emprego de polímeros oriundos de fontes naturais, como as plantas e substâncias retiradas de animais.

Ainda que estes riscos preocupem mais as Estações de Tratamento de Água (ETA), já que afetam diretamente a água captada para abastecimento humano, a atenção deve-se dar no tratamento de esgoto e no gerenciamento do lodo também. Considerando que a água drenada do lodo retorna ao sistema de tratamento e que esse efluente tratado é lançado em um corpo hídrico, que posteriormente pode servir como manancial.

Diversos estudos têm utilizado polímeros naturais como auxiliares da floculação no tratamento de água e esgoto. Visto que não apresentam riscos à saúde a longo prazo e por serem fonte de alimentação humana, em sua maioria. De acordo com Di Bernardo (2005) a utilização destes polímeros permite um aumento da velocidade de sedimentação dos flocos, redução da ação das forças de cisalhamento nos flocos durante a veiculação da água floculada e uma dosagem menor do coagulante primário, quando estes são sais de alumínio ou ferro.

Borba (2001), Arantes, Ribeiro & Paterniani (2012) e Di Bernardo (2005) citam como exemplo de fonte destes compostos a mandioca (*Manihot esculenta*), a batata (*Solanum tuberosum L.*), a quitosana, o tanino, o quiabo (*Abelmoschus esculentus*), o milho (*Zea mays*) e a moringa (*Moringa oleífera*).

Dentre os polímeros naturais, os mais utilizados são os amidos (DI BERNARDO, 2005; LIBÂNIO, 2005). O milho, a batata, a mandioca e o trigo são os alimentos produzidos em larga escala que mais possuem amido, podendo variar a quantidade em função da idade, do solo, da variedade da espécie e do clima.

A facilidade de obtenção do polímero, o custo e a simplicidade metodológica do preparo são fatores importantes para a seleção em trabalhos direcionados às comunidades rurais. Dos polímeros pesquisados, os originários da mandioca, moringa e quiabo foram os que mais se adequaram a estes critérios baseando-se em Dantas & Di Bernardo (2000), Muyibi *et al* (2001) e Abreu Lima (2007).

A mandioca (*Manihot esculenta*) é originária da América do Sul e é comum nas regiões tropicais da África e Ásia, sendo uma importante fonte de alimentação da população mais pobre e é rica em amido. Dantas & Di Bernardo (2000) estudaram o potencial do amido catiônico da mandioca como auxiliar de floculação no tratamento de águas para abastecimento. Os resultados obtidos indicaram que este polímero natural pode ser utilizado em substituição dos polímeros sintéticos auxiliares de floculação. Não foram encontradas referências sobre a utilização de amido de mandioca em tratamento de esgoto ou condicionamento de lodo de esgoto.

A moringa (*Moringa oleifera*) é provavelmente o polímero natural mais conhecido no mundo, é nativa do continente africano, presente também nas Américas e Ásia. Mais utilizada no tratamento de água como coagulante, também são encontradas aplicações no tratamento de esgoto, incluindo efluentes industriais, e no lodo de esgoto.

Bhuptawat, Folkard & Chaudhari (2006), verificaram o potencial de aplicação da moringa no tratamento de esgoto doméstico, em escala piloto, na Índia e obtiveram 64% de remoção de DQO combinando 100 mg.L<sup>-1</sup> de *Moringa oleifera* e 10 mg.L<sup>-1</sup> de sulfato de alumínio.

No tocante à utilização de moringa no lodo, pesquisas realizadas por Muyibi *et al* (2001) na Índia e Ademiluyi (1988), Nigéria, indicaram seu potencial como

condicionante químico do lodo de esgoto, diminuindo a resistência à filtração. Muyibi *et al* (2001) testaram: a solução da semente de moringa sem casca, o pó seco da semente sem casca e o óleo da semente de moringa em lodo proveniente de uma estação de tratamento de esgoto. A dosagem foi determinada por dois métodos: (i) redução de volume do lodo em teste de jarros (após 30 min de sedimentação) e; (ii) resistência específica do lodo.

No primeiro método, as dosagens ótimas encontradas foram de 4750, 4000 e 6000 mg.L<sup>-1</sup> para a solução de moringa sem casca, óleo e pó seco, respectivamente. Chegando a redução máxima de 2,6, 1,9 e 2,6 vezes o volume inicial do lodo, para a solução de moringa sem casca, óleo e pó seco, respectivamente. Esses resultados indicam o potencial da moringa em decantadores ou outras unidades de tratamento que retenham lodo por certo tempo.

No segundo teste realizado, empregou-se somente a solução de moringa sem casca e o óleo e, a solução com óleo teve melhor resultado, com dosagem de 4000 mg.L<sup>-1</sup> enquanto que para a solução de moringa sem casca foi de 4500 mg.L<sup>-1</sup>. A razão para esses resultados ligeiramente controversos ainda é desconhecida, mas os pesquisadores acreditam que a remoção do óleo da semente possa produzir flocos mais leves, o que favoreceria a filtração. Além disso, por ter baixo peso molecular e ser um polímero catiônico, os flocos formados são leves, pequenos e retém menos a fração de água ligada físico-quimicamente às partículas sólidas do lodo, indicando a possibilidade da redução da área dos leitos de secagem convencionais. Porém, ainda são necessárias pesquisas aprofundadas sobre a questão.

O uso de moringa no lodo foi comparado aos sais de alumínio e ferro por Ademiluyi (1988). A amostra de lodo utilizada foi coletada no tanque de sedimentação da ETE da Universidade da Nigéria, que trata esgoto doméstico. A sensibilidade relativa do lodo aos polímeros mostrou que o lodo proveniente de esgoto doméstico tem menor sensibilidade a moringa do que ao sulfato de alumínio e cloreto férrico. Além disso, a concentração de moringa foi menor no líquido filtrado do que os sais metálicos, o que

pode ser vantajoso em Estações de Tratamento de Esgoto. Porém, as dosagens ótimas encontradas foram mais altas para a moringa do que para os sais metálicos: 21,5; 1,7 e 17 g.L<sup>-1</sup> para a moringa, sulfato de alumínio e cloreto férrico, respectivamente. Entretanto, o baixo custo e o fato da moringa ser um polímero natural, a tornam aplicável como condicionante do lodo.

Outro polímero natural potencialmente condicionante do lodo é o quiabo, (*Abelmoschus esculentus*) que tem origem na África, mas é produzido em todo o globo, sendo conhecido por suas propriedades nutritivas.

Anastasakis, Kalderis & Diamadopoulos (2009) estudaram o quiabo como floculante no tratamento de esgoto, utilizando como coagulante o sulfato de alumínio. Foi realizada a mucilagem do quiabo para a extração do óleo e a dosagem ótima foi obtida através do teste de jarros. Como amostras de esgoto foram utilizadas esgoto sintético e um efluente biologicamente tratado. O estudo comprovou as propriedades floculantes do quiabo. No esgoto sintético, em sua dosagem ótima de 0,005 g. L<sup>-1</sup> removeu 93, 96 e 97% de turbidez depois de 10, 20 e 30 minutos do tempo de sedimentação, respectivamente. Isso representou uma adição de 25, 9 e 10% de remoção da turbidez quando se utilizou somente sulfato de alumínio em 10, 20 e 30 minutos, respectivamente.

No efluente biologicamente tratado, a dosagem ótima para 10 minutos foi de 0,020 g.L<sup>-1</sup>, com remoção 70% da turbidez. Para os tempos de sedimentação de 20 e 30 minutos, a dosagem foi menor (0,0025 g.L<sup>-1</sup>) alcançando a redução de 71 e 74% de turbidez. Incrementando em 19, 10 e 10% a remoção de turbidez utilizando-se somente de sulfato de alumínio.

Abreu Lima (2007) realizou testes com o quiabo verde e maduro e constatou que o fruto maduro possui melhores propriedades coagulantes que o fruto verde, fato positivo, já que o quiabo maduro é rejeitado pelo consumidor e torna-se um resíduo. O autor também comparou as técnicas de aplicação do polímero: a utilização do óleo extraído

através da mucilagem e a pulverização após a moagem do quiabo. Concluindo que a segunda técnica, a forma mais simples de aplicação, proporcionou resultados positivos no tratamento de água e esgoto.

### **3.6. Pavimento permeável**

Além da aplicação de polímeros, a utilização de pisos drenantes, como constituintes do leito de secagem, pode otimizar o desaguamento do lodo de esgoto. Constitui-se em alternativa simples e de baixo custo para ETE de pequeno porte, localizadas em comunidades rurais. Além disso, a utilização de polímeros naturais melhoraria a qualidade da torta seca, em termos de nutrientes, aspecto positivo para a aplicação de lodo na agricultura, como alternativa à adubação química.

Os pavimentos permeáveis são utilizados há mais de três décadas nos Estados Unidos da América e na Inglaterra e Alemanha (PRISMA, 2013), como controle estrutural alternativo de drenagem urbana e fazem parte do conjunto de técnicas intitulado de *Best management practices* (BMP) pela agência ambiental norte-americana Environmental Protection Agency (USEPA) criado na década de 1980, que tem como objetivo resolver os problemas de drenagem na própria bacia.

Essas técnicas incluem construção de estruturas físicas para armazenamento e infiltração do escoamento, como reservatórios, trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis na tentativa de compensar os impactos negativos da grande impermeabilização do solo causada pela urbanização (CRUZ, SOUZA & TUCCI, 2007).

Estes últimos por possuírem espaços livres na sua estrutura, permitem que água e ar o atravessem e são geralmente empregados em via de pedestres e veículos e estacionamentos, para auxiliar na drenagem urbana (MARCHIONI & SILVA, 2010).

No Brasil estes pavimentos foram introduzidos recentemente e, em 2006 a Prefeitura Municipal de Porto Alegre publicou o Decreto Nº15.371/2006, que regulamenta as medidas de controle de drenagem urbana, aponta como alternativa

para redução de áreas impermeáveis em terrenos com áreas inferiores a 100 ha a utilização de pavimentos permeáveis, abatendo 50% da área impermeável do terreno (CRUZ, SOUZA & TUCCI, 2007). A Figura 4 mostra a sua utilização no Brasil.

Figura 4 - Exemplo de aplicação de pavimento permeável em estacionamento.



FONTE: MARCHIONI & SILVA (2010).

Estes pavimentos podem ser fabricados com areia, pedregulho, argila expandida, fibra de coco, cimento e pó de pedra e está em curso a normatização pela Associação Brasileira de Normas Técnicas para a fabricação destes pisos. A produção deste tipo de piso está se disseminando no país e sua utilização poderia permitir a redução da área do leito. Uma vez que o lodo pode ser drenado em cerca de metade da área superficial enquanto que ao se empregar o leito de secagem tradicionalmente sugerido pela NBR 12209/1992, a infiltração somente ocorre entre os vãos dos tijolos, onde está presente a areia (ABNT, 1992).

## 4. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Estrutura (LES), Materiais da Construção (LMC), Protótipos (LABPRO), Reuso (LABREUSO) e Saneamento (LABSAN) pertencentes à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

### 4.1. Pavimento permeável

O pavimento permeável foi fornecido pela empresa Villa Stone Comércio e Indústria de Materiais Básicos para Construção Limitada, localizada no distrito de Barão Geraldo, Campinas (SP).

Os pavimentos permeáveis utilizados na pesquisa são compostos de pedrisco de basalto e cimento, na proporção de 80 e 20%, respectivamente. As amostras utilizadas têm aproximadamente 0,06 m de altura e foram cortados em diâmetro igual a 0,10 m com o emprego de uma extratora de corpo de prova, como mostram as Figuras 5 e 6.

Figura 5 - Pavimento permeável utilizado no projeto.



Figura 6 - Extratora de corpo de prova utilizada para o corte do pavimento utilizado na pesquisa.



A caracterização destes pisos drenantes foi realizada com a determinação das dimensões, massa, volume de vazios e taxa de infiltração, conforme apresentados a seguir:

Dimensões e massa: As dimensões foram mensuradas com o uso de paquímetro e a massa com uso de balança semi analítica. A altura, diâmetro e massa média das peças de pavimento cortadas foi de 0,006 m, 0,1 m e 0,695 kg, respectivamente.

Índice de vazios: A metodologia adotada baseou-se na norma NBR NM 53/2009 de Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água de agregados graúdos e na norma NBR 10838/1988 de Solo - Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego de balança hidrostática - Método de ensaio. O índice de vazios médio foi de 0,43 e a porosidade de 29,75%.

Taxa de infiltração: A forma de determinação será apresentada no subitem 4.5.

## **4.2. Lodo**

Coletou-se aproximadamente 200 L de lodo de tanques sépticos. Cerca de 70 L de lodo utilizado foram coletados no mês de abril de 2013, provenientes de um tanque séptico operado pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Sendo um tanque séptico de câmara única, com capacidade de aproximadamente 40 m<sup>3</sup> e atende cerca de 500 famílias no município de São Miguel Arcanjo – SP. Ao longo dos 20 anos de operação desta pequena estação nunca havia sido feita a retirada de lodo.

Devido a dificuldades com o transporte e a distância entre este tanque séptico e a universidade, não foi possível coletar a quantidade necessária utilizada no projeto. A quantidade restante foi então fornecida pela Sociedade de Abastecimento de Água e Esgoto S/A (SANASA). O lodo foi retirado do tanque séptico da Estação de Tratamento de Esgoto Bandeirantes situada no município de Campinas, cujo tratamento se dá por tanques sépticos seguidos de filtro anaeróbio. A coleta de lodo foi realizada no mês de maio de 2013. Ao contrário do lodo disponibilizado pela SABESP, o montante de lodo retirado desta ETE ainda não estava estabilizado, por ter pouca idade e ter sido realizada uma grande retirada do lodo do tanque cerca de um mês antes da data da coleta. Desde então, as alíquotas de lodo coletadas foram misturadas e armazenadas numa caixa d'água de 500 L no Laboratório de Protótipos.

A caracterização do lodo foi feita no Laboratório de Saneamento (LABSAN), sendo baseada nos seguintes parâmetros: tempo de sucção capilar, sólidos totais, sólidos suspensos totais, sólidos suspensos fixos e voláteis, pH e alcalinidade. Essa caracterização foi realizada anteriormente a execução de cada uma das séries.

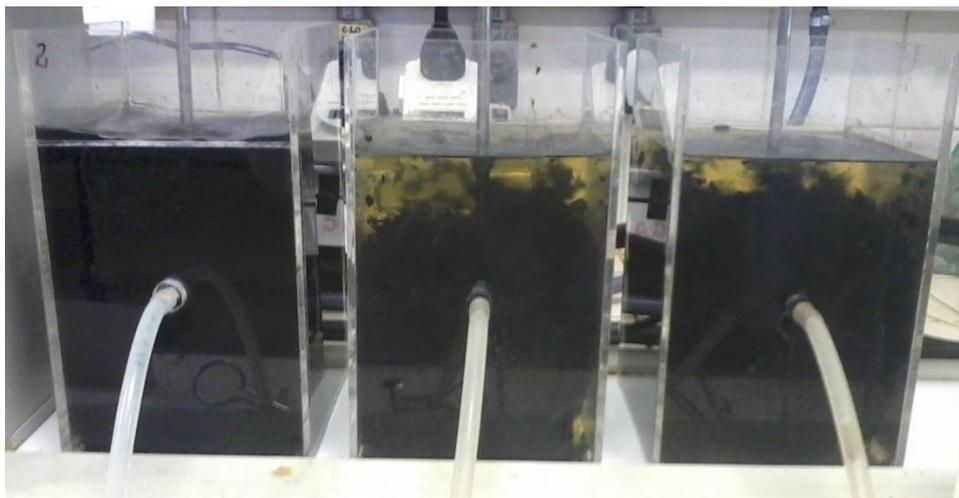
Para a dosagem dos polímeros, Metcalf & Eddy (1991) relatam que deve ser realizada em laboratório, considerando a origem do lodo, a sua idade, o pH, a alcalinidade e a concentração de sólidos, bem como o método de desaguamento a ser utilizado e, recomenda a utilização do teste de filtração a vácuo para cálculo da dosagem.

Todas as análises para caracterização do lodo foram baseadas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

Para a análise do teor de sólidos da torta seca dos sistemas, homogeneizou-se inicialmente a torta obtida de cada sistema, utilizando-se uma alíquota de aproximadamente 0,005 kg, que foi pesada em balança analítica já na cápsula. A amostra então foi deixada por no mínimo 12h em estufa a 100°C para obtenção dos Sólidos Totais. Para os Sólidos Totais Fixos e Voláteis a metodologia foi adaptada para evitar emissão de fumaça, devido à alta fração de matéria orgânica presente no lodo. Para isso, a amostra não foi colocada na mufla diretamente a 550°C. A temperatura foi escalonada, mantendo-se inicialmente a 200°C por 30 minutos, elevando-se a temperatura para 300°C por mais 30 minutos e então, elevando-se a temperatura para 550°C por mais 1 hora. Também evitou-se colocar na mufla massas maiores que 0,015 kg de lodo seco, pois acima desta quantidade, verificou-se emissão de fumaça.

Teste de Jarros: Embora não forneça dados quantitativos sobre a capacidade dos polímeros no condicionamento do lodo, produz informação qualitativa (quanto a formação de flocos) de forma rápida (WPCFM, 1988). Por esta razão, o teste foi utilizado para preparo da solução estoque dos polímeros e para o condicionamento do lodo para a análise das dosagens ótimas (WPCFM, 1988; MORTARA, 2011). A Figura 7 ilustra a utilização deste método no condicionamento do lodo.

Figura 7 - Teste de jarros para dosagem ótima de polímero.



Tempo de Sucção Capilar: conhecido como CST - sua sigla na língua inglesa para *Capillary Suction Time* - é um dos métodos mais utilizados em pesquisas sobre o desaguamento do lodo. É um teste empírico que auxilia na determinação da dosagem ótima de polímeros, sendo indicado por Vesilind (1988), WPCFM (1988), Metcalf & Eddy (1991), Andreoli, von Sperling & Fernandes (2001); Andreoli (2009) e APHA *et al* (2012). Apesar do inconveniente de trabalhar com pequenos volumes, acarretando na seleção de uma fase do efluente clarificado e de flocos quando o lodo é condicionado organicamente. Ruiz, Kaosol, & Wisniewsk (2010) afirmam que o teste ainda está entre as técnicas mais utilizadas para definição da filtrabilidade do lodo. Algumas destas razões é a rapidez e simplicidade na realização, pois determina, em segundos, quanto tempo a água presente no lodo leva para percorrer um meio poroso através de um equipamento, utilizando-se uma pequena quantidade de amostra.

Jin, Wilén & Lant (2003) verificaram uma boa relação estatística entre os valores de CST e EPS e relacionaram altos valores de flocculabilidade, hidrofobicidade, cargas negativas das superfícies e viscosidade à grande quantidade de água físico-quimicamente ligada e longos CST. Contudo, constataram que as características morfológicas determinadas, como: o tamanho dos flocos, dimensão fractal e índice de

filamento têm estatisticamente fracas correlações com a quantidade de água ligada físico-quimicamente e o tempo do CST.

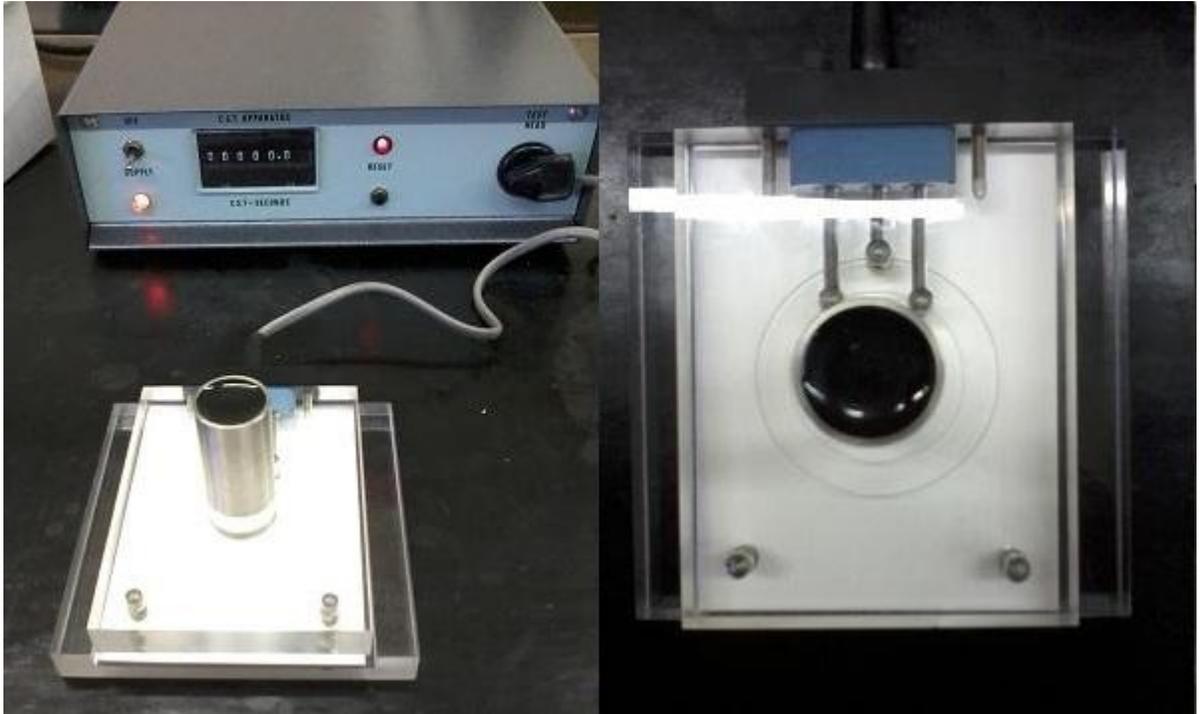
Como ilustra a Figura 8, o teste é realizado em um aparelho denominado CST (*Capillary Sucção Time*) que consiste em duas placas de acrílico, um cilindro metálico, um filtro de papel, três contatos elétricos fixados em dois círculos concêntricos que circundam uma abertura circular no meio da placa e, um cronômetro.

O papel é colocado entre as duas placas de acrílico e o cilindro metálico é encaixado na abertura circular. O teste é feito com 6,8 mL de lodo, colocado dentro do cilindro. A água contida no lodo atravessa o filtro de papel cromatográfico (Whatman n. 17, tamanho 7 x 9 cm). Após percorrer 0,8 cm a água chega ao círculo interno que contém dois dos contatos elétricos, dispara-se o cronômetro, quando a água percorre mais 0,7 cm chegando ao círculo externo, o terceiro contato elétrico para a contagem do tempo (VESILIND, 1988). A Tabela 2 indica os métodos utilizados para análise do lodo:

Tabela 2 - Métodos utilizados na análise do lodo.

Parâmetro	Método
Sólidos Totais	Standard Methods 20 2540
Sólidos Suspensos Totais	Standard Methods 20 2540
Alcalinidade	Standard Methods 20 2320 B
pH	Standard Methods 20 4500 B
Teste de Sucção Capilar	Standard Methods 20 2710 G

Figura 8 - Aparelho utilizado para aferir o Tempo de Sucção Capilar (Capillary Suction Time).



### 4.3. Polímeros

Na pesquisa estudou-se o efeito do uso de diferentes polímeros naturais (moringa, mandioca e quiabo) e um sintético, no desaguamento do lodo. Ressalva-se que foram elegidas metodologias simplificadas e de baixo custo, cuja produção e preparo podem se dar em ETE de pequeno porte, localizadas em comunidades rurais e/ou isoladas. Os polímeros: sintético e os naturais oriundos da mandioca e do quiabo foram aplicados em solução aquosa e o polímero da moringa foi aplicado em pó diretamente sobre o lodo. As sementes de moringa foram obtidas do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP e da Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI) de Pederneiras e Marília, ambas localizadas no estado de São Paulo. O amido de mandioca é extraído das partes comestíveis da mandioca, sendo conhecido comercialmente por fécula ou polvilho doce. O quiabo também é disponível comercialmente e foi obtido na Central de Abastecimento S/A

(CEASA) de Campinas e o polímero sintético utilizado, Superfloc® 8394, foi doado pela empresa Kemira. Os polímeros foram preparados obedecendo os critérios de simplicidade e baixo custo utilizando as metodologias abaixo:

Superfloc® 8394: É uma poliacrilamida catiônica de baixo peso molecular e pode ser utilizada nas etapas de desaguamento de lodos e clarificação das águas numa ampla variedade de indústrias. O preparo da solução estoque foi feito na concentração máxima indicada pela empresa, 0,5%, no teste de jarros com agitação de aproximadamente 250 rpm - gradiente de velocidade<sup>2</sup> ( $G \approx 160 \text{ s}^{-1}$ ) - por 60 minutos, com o objetivo de homogeneizar totalmente a solução (KEMIRA [s.d.]). A solução foi aplicada no lodo em teste de jarros com agitação inicial de 250 rpm por 10 s, diminuindo-se a velocidade para 100 rpm ( $G \approx 64 \text{ s}^{-1}$ ) por mais 5 min.

Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz): Para obtenção do polímero da mandioca, seguiu-se as orientações de Dantas & Di Bernardo (2000), que utilizaram amido de mandioca catiônico waxy (um tipo de amido modificado). Segundo Di Bernardo (2005) os grânulos de amido são insolúveis em água abaixo de 50°C. Para torná-los solúveis, portanto, é preciso aquecer a suspensão de amido na água além da temperatura crítica, para que os grânulos absorvam a água e intumescam, formando uma pasta gelatinosa. Para obtenção deste amido, a fécula da mandioca foi aquecida à temperatura de  $80 \pm 5^\circ\text{C}$ , com agitação constante até a formação da pasta gelatinosa, como ilustrado na Figura 9. Preparou-se solução estoque de  $10 \text{ g.L}^{-1}$  e adicionou-se ao lodo em teste de jarros com agitação inicial de 250 rpm por 10 s, diminuindo-se para 100 rpm por mais 5 min.

---

<sup>2</sup> Gradiente de velocidade calculado considerando a mesma viscosidade da água.

Figura 9 - Preparo da solução de polímero produzida a partir da mandioca.



Moringa (*Moringa oleifera*): Ilustrada na Figura 10 é um polímero catiônico e sua metodologia foi realizada adaptando-se a metodologia de Muyibi *et al* (2001) e Arantes, Ribeiro & Paterniani (2012). Primeiramente, as sementes foram descascadas e moídas para obtenção de um pó, sendo posteriormente homogeneizadas em peneira com abertura de 0,125 mm. O pó obtido foi utilizado diretamente sobre o lodo em teste de jarros com agitação inicial de 250 rpm por 10 s, diminuindo-se a velocidade para 100 rpm por mais 5 min.

Figura 10 - Semente de *Moringa oleífera*.



FONTE: FEAGRI (2004).

Quiabo (*Abelmoschus esculentus*): É um polímero aniônico e adaptou-se a metodologia apresentada por Abreu Lima (2007), que consiste no uso do fruto do quiabo maduro e seco (rejeitado pelo consumidor). O processo consistiu na lavagem do quiabo para remoção de resíduos provenientes do solo, exposição ao sol até a total secagem dos frutos e moagem em um moedor elétrico. Adicionou-se água destilada ao pó que foi obtido nas peneiras de 0,841 mm e 0,149 mm, nas concentrações de 50 e 45 g.L<sup>-1</sup>, respectivamente, homogeneizando as soluções em teste de jarros a 250 rpm até total dissolução (cerca de 15 min para a primeira e 2h para a segunda). A primeira solução, que possuía partículas maiores do quiabo, foi peneirada em funil de Büchner, para utilização somente da “baba” formada. Essa prática não foi necessária para a segunda solução. As duas soluções foram adicionadas ao lodo em teste de jarros com agitação inicial de 250 rpm por 10 s, diminuindo-se para 100 rpm por mais 5 min, como ilustra a Figura 11.

Figura 11 - Preparo da solução de polímero produzida a partir do quiabo.

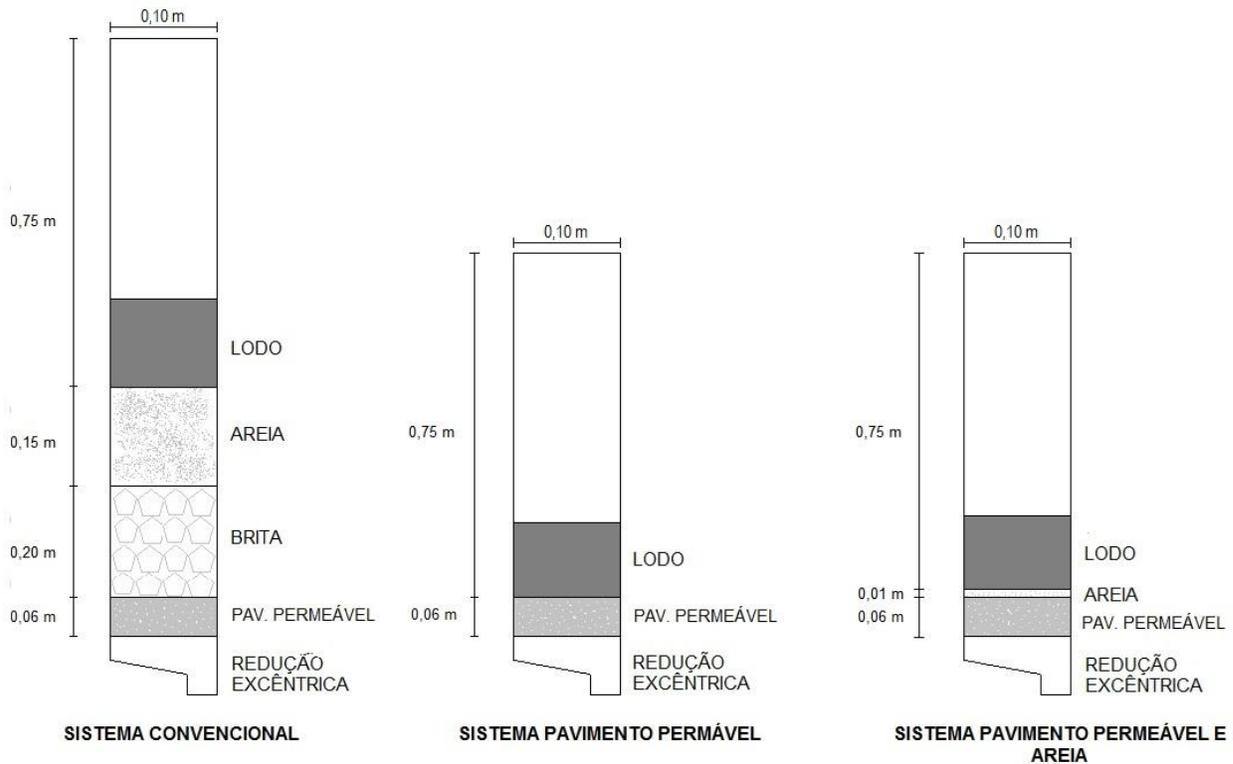


#### **4.4. Montagem dos leitos de secagem**

Os sistemas foram montados em escala de bancada, sendo que cada leito de secagem a ser testado foi composto por um tubo de PVC com diâmetro de 0,10 m. Os tubos foram acoplados através de uma luva a uma redução excêntrica de 100 x 50 mm, cujo objetivo é facilitar o escoamento da água percolada, minimizando possíveis perdas. O pavimento permeável foi fixado na parte interna do tubo de PVC e impermeabilizado no perímetro com veda calha, impedindo a passagem de água ou sólidos entre o pavimento e o tubo.

Conforme pode ser visualizado na Figura 12, foram construídas três diferentes composições para o leito de secagem. Com o objetivo de evitar diferenças na influência da evaporação nos sistemas, há uma mesma altura livre de 0,75 m na parte superior de cada tubo.

Figura 12 - Sistema de bancada de leito de secagem utilizado na pesquisa.



- a) Sistema convencional: foi construído baseado nas orientações da NBR12209/1992. Sobre o pavimento permeável, foram adicionadas camadas de aproximadamente 0,20 m de brita e 0,15 m de areia. A norma prevê a utilização de tijolos sobre a camada de brita, entretanto, desconsiderou-se o uso dos mesmos, devido ao fato de que a infiltração somente ocorrer entre os vãos dos tijolos, onde está presente a areia. Neste caso, o pavimento permeável cumpriu unicamente a função de sustentar o sistema, impedindo o arraste da brita e da areia para fora do conjunto, não interferindo na capacidade drenante do leito.
- b) Pavimento permeável: O sistema foi composto somente com o pavimento permeável.
- c) Pavimento permeável acrescido de camada de areia: Sobre pavimento permeável foi adicionada uma camada de 0,01 m de areia. Neste conjunto foi

possível avaliar se a colocação de fina camada de areia impediu o entupimento dos poros do pavimento permeável pelo lodo.

A areia utilizada foi classificada como média pelo procedimento da NBR NM 248/2003. Possuindo diâmetro efetivo D10: 0,18mm, coeficiente de desuniformidade  $C_D$ : 3,18 e porosidade de 48%.

Foram construídos quinze sistemas, para a aplicação do lodo com adição dos polímeros separadamente. A Tabela 3 ilustra os pavimentos equivalentes aos sistemas: pavimento permeável (P), pavimento permeável com adição de areia (P+A) e convencional (C).

Tabela 3 - Organização dos sistemas.

Pavimentos	Sistemas	Polímeros
1	P (1)	Sem polímero
2	P+A (1)	Sem polímero
3	C (1)	Sem polímero
4	P (2)	Sintético
5	P+A (2)	Sintético
6	C (2)	Sintético
7	P (3)	Mandioca
8	P+A (3)	Mandioca
9	C (3)	Mandioca
10	P (4)	Moringa
11	P+A (4)	Moringa
12	C (4)	Moringa
13	P (5)	Quiabo
14	P+A (5)	Quiabo
15	C (5)	Quiabo

Com o objetivo de evitar influência da precipitação, os sistemas foram dispostos em local coberto por telhas e cobertura plástica que foi fixada atrás da bancada. Abaixo, as Figuras 13 e 14 mostram a bancada de experimentação:

Figura 13 - Bancada experimental localizada no Laboratório de Protótipos.



Figura 14 - Detalhe dos sistemas em utilização na bancada experimental.



#### **4.5. Taxa de infiltração**

A taxa de infiltração foi determinada a partir de testes realizados com cada sistema. O teste consistiu na manutenção de uma altura de coluna de água constante sobre os leitos em estudo e com a coleta e medição do volume de água percolada através do pavimento a cada 5 segundos<sup>3</sup>. Este teste foi feito em quintuplicata, tendo-se em vista a obtenção de um conjunto confiável de dados.

Com o objetivo de avaliar a viabilidade da reutilização dos pavimentos, após a sua primeira utilização estes foram limpos com lavadora de alta pressão, para retirar partículas residuais de lodo que restaram nos sistemas. Depois da limpeza, os pavimentos foram submetidos a um novo teste de infiltração. Quando estes apresentaram resultados significativamente inferiores ao primeiro teste, foram mergulhados em água com solução detergente por uma semana, com o propósito de dissolver óleos e graxas possivelmente aderidos aos pavimentos. Descartaram-se aqueles que apresentaram taxas de infiltração discrepantes, para isso foi utilizado o método estatístico de normalidade.

Posteriormente, foram calculadas as taxas de infiltração dos sistemas convencional e pavimento permeável acrescido de camada de areia, obedecendo-se os mesmos critérios de validação estatística.

#### **4.6. Avaliação dos sistemas quanto ao desaguamento do lodo**

Para análise da eficiência do desaguamento nos sistemas, foi comparado o volume de lodo aplicado sobre os leitos e a água percolada de cada sistema, ao longo do tempo. Para mensuração do volume de água percolado, colocou-se abaixo de cada sistema um béquer que armazenou a água percolada. No primeiro dia, realizou-se um monitoramento por 12 h, sendo que o intervalo de tempo entre as coletas foi significativamente menor nas primeiras horas, devido ao desaguamento mais intenso.

---

<sup>3</sup> O tempo foi determinado em função da capacidade de aferição da vazão infiltrada, de modo que tempos maiores teriam infiltrações além da capacidade de medida dos instrumentos utilizados no experimento.

A avaliação do desaguamento do lodo seria realizada na seguinte ordem: Série 1: Sem adição de polímero; Série 2: Adição de polímero sintético; Série 3: Adição de polímero extraído da Mandioca; Série 4: Adição de polímero extraído da Moringa; Série 5: Adição de polímero extraído do Quiabo, como ilustrado na Tabela 4. As séries foram realizadas em triplicata.

Tabela 4 - Avaliação dos sistemas.

<b>Série</b>	<b>Polímero</b>	<b>Sistema</b>
Série 1	Sem adição de polímero	Pavimento permeável
		Pavimento permeável + areia
		Convencional
Série 2	Polímero sintético	Pavimento permeável
		Pavimento permeável + areia
		Convencional
Série 3	Mandioca	Pavimento permeável
		Pavimento permeável + areia
		Convencional
Série 4	Moringa	Pavimento permeável
		Pavimento permeável + areia
		Convencional
Série 5	Quiabo	Pavimento permeável
		Pavimento permeável + areia
		Convencional

#### **4.6.1. Avaliação do desaguamento sem adição de polímero (Série 1)**

Para a disposição nos leitos de secagem utilizou-se volume de 2,0 L de lodo para cada sistema, em todas as séries.

#### **4.6.2. Avaliação do desaguamento com adição de polímeros (Séries 2 a 5)**

Para as amostras de lodo que tiveram adição de polímero foi utilizado o Teste de Jarros para preparo da solução estoque e condicionamento do lodo para a avaliação da dosagem e formação de flocos. Através do CST determinou-se a dosagem ótima dos polímeros (Item 4.2). Após esta etapa, obedeceu-se a mesma metodologia empregada na dosagem, isto é, primeiramente o lodo foi condicionado com polímero, sendo então aplicado nos sistemas.

#### **4.6.3. Sistema controle**

Além dos sistemas com lodo, utilizou-se um controle, para aferir a quantidade de água sujeita a evaporação no local. Este controle consistiu em uma coluna d'água feita de tubo de PVC, do mesmo modo em que o utilizado nos sistemas de desaguamento, permitindo a comparação entre o volume de água inicial (2 L) e o restante após o tempo despendido pelo desaguamento. Para isso, utilizou-se o princípio dos vasos comunicantes ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Coluna d'água utilizada como controle na bancada experimental.



#### 4.6.4. Avaliação do Lodo Desaguado

As amostras de torta seca foram retiradas quando os desaguamentos dos sistemas cessaram. Analisou-se o teor de umidade obtido em cada sistema, expresso pela análise de Sólidos Totais.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Taxa de infiltração dos sistemas

O teste para determinação da taxa de infiltração foi realizado em todos os pavimentos e nos sistemas: de pavimento com adição de areia e convencional. Primeiramente, realizou-se os testes nos quinze pavimentos. A média encontrada foi de 1144 mL  $\pm$  62,29 e CV 0,05 (em 5 segundos de infiltração). Verificou-se que as taxas de infiltração de água dos mesmos tinham indícios de normalidade<sup>4</sup>, em seguida fez-se o boxplot (Figura 34, Apêndice B) e verificou-se a existência de dois valores atípicos (768 e 852 mL), por fim, buscou-se confirmar se estes pontos apontados eram taxas de infiltração fora do padrão apresentado pelos demais pavimentos. Observa-se que estes dois pavimentos (2 e 14) foram utilizados em testes preliminares, com o objetivo de verificar a viabilidade do projeto. Como seriam avaliados também o pavimento permeável com adição de areia, utilizou-se esses pavimentos nestes sistemas, pois a taxa de infiltração neste caso é menor, devido a esta camada de areia, possibilitando seu uso para este fim.

A taxa de infiltração dos sistemas: pavimento permeável acrescido de areia e convencional foram calculados do mesmo modo. A média destes foi de 182 mL  $\pm$  20,9 e CV 0,1 para o primeiro e de 52,6 mL  $\pm$  14,33 e CV 0,27 para o segundo.

### 5.2. Caracterização do lodo bruto

Realizou-se caracterização do lodo durante o período de agosto a fevereiro de 2014. Observou-se que o lodo sofreu perda de água deste período devido às condições de acondicionamento, uma vez que recebeu forte insolação e o recipiente em que estava não possuía condições ideais de vedação, tendo possivelmente uma perda de água livre por evaporação, elevando o valor de sólidos. Para caracterização deste lodo, no entanto, os valores obtidos de Sólidos Totais foram considerados respeitando-se o

---

<sup>4</sup> Isto é, que tem indícios de uma distribuição de probabilidade normal.

intervalo de confiança, conforme o Boxplot da Figura 30, Apêndice A. Todavia, o pH e a alcalinidade não sofreram interferência com estas condições. A Tabela 5 mostra que o lodo utilizado foi mais concentrado que usualmente encontrado na literatura (tendo em média 77634 mg.L<sup>-1</sup> de ST ± 6690,03 e CV 0,09), mas como citado por Andreoli (2009) o lodo de tanque séptico possui grande variabilidade e, dependendo da forma em que é retirado pode apresentar-se mais ou menos concentrado.

Tabela 5 - Comparação entre dados encontrados na literatura e na presente pesquisa.

Parâmetros	PHILIPPI <i>et al</i> (1999)	Withers, Jarvie & Stoate (2011)	Moussavi, Kazembeigi & Farzadkia (2010)	Neste trabalho		
	Média	Média	Média	Média	±	CV
ST (mg.L <sup>-1</sup> )	1083	-	1070	77634	6690,0	0,09
STV (mg.L <sup>-1</sup> )	673	-	-	35164	2312,7	0,07
pH	6,6	7,3	7,3	7,0	0,2	0,03
Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup> )	-	6085	480	2300	343,8	0,15

Os Sólidos Totais e Sólidos Suspensos Totais fazem parte do conjunto de parâmetros mais importantes do lodo e são dependentes do tipo de processo de tratamento de esgoto e do tratamento do lodo. Típicas concentrações de ST estão na faixa de 2 a 12% no lodo bruto e 12 a 30% no lodo desaguado. No lodo seco ou compostado esses valores podem alcançar 50% (SHAMMAS & WANG, 2008).

Outro importante parâmetro é a relação entre os Sólidos Totais Voláteis e Sólidos Totais (STV/ST) que, de acordo com Metcalf & Eddy (1991), Shammass & Wang (2008) e Andreoli (2009) é uma boa indicação da fração orgânica dos sólidos e de seu nível de digestão. A relação encontrada neste trabalho foi em média de 0,46 sendo valores próximos aos encontrados por Andreoli *et al* (2009) em RAFA de 0,55.

A relação média de SSV/SST neste trabalho foi de  $0,47 \pm 0,01$  e CV 0,02, semelhante à encontrada para STV/ST. Moussavi, Kazembeigi & Farzadkia (2010) correlacionaram os valores de SSV/SST também em tanque séptico, com o mesmo objetivo e essa relação foi de 0,57, classificando o lodo como estabilizado.

É necessário observar que a relação entre STV/ST típica de um lodo primário é de 0,75 a 0,80, própria de lodos não digeridos (METCALF & EDDY, 1991; ANDREOLI, VON SPERLING & FERNANDES, 2001; ANDREOLI *et al*, 2009). O lodo proveniente de tanques sépticos é classificado como lodo primário, como o gerado em decantadores primários. Contudo, diferentemente deste último, o lodo de tanques sépticos sofre digestão anaeróbia.

Os lodos digeridos têm valores entre 0,60 e 0,65 (ANDREOLI, VON SPERLING & FERNANDES, 2001). Apesar disso, a Resolução CONAMA 375/06 afirma que os lodos de esgoto que apresentem relação (STV/ST) inferiores a 0,70 já são considerados estáveis, para fins de utilização agrícola (BRASIL, 2006).

Entretanto, lodos que se adequam a essa relação podem conter quantidades significativas de areia e outros componentes inorgânicos, que contribuem para o aumento de sólidos fixos. A baixa relação entre sólidos voláteis e sólidos totais pode não ser a mais adequada para indicação do nível de mineralização do lodo e de seu impacto no solo. A NBR 12209/1992 conceitua lodo estabilizado como aquele não sujeito a putrefação, porém a quantificação de STV não é um indicador direto deste

fenômeno. Existem algumas metodologias que fornecem essa indicação como a determinação do potencial de mineralização do carbono e nitrogênio e de fósforo, através da quantificação de: CO<sub>2</sub>, nitrogênio na forma de amônio e nitrogênio na forma de nitrato (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e extração de fósforo, como realizado por Tognetti *et al* (2008).

Outro método relativamente simples e amplamente utilizado é a respirometria de Bartha, que quantifica a produção de CO<sub>2</sub> produzida pela microbiota quando em contato com um composto não presente naturalmente no solo, medindo, de maneira indireta, sua atividade metabólica para degradação destes compostos, que mesmo sendo orgânicos podem ser recalcitrantes. Essa técnica pode ser utilizada na análise da biodegradabilidade do lodo para fins de utilização agrícola por medir o impacto de sua aplicação no solo (CLARKE, TAYLOR & COSSINS, 2007).

Em relação à alcalinidade e ao pH, pode-se afirmar que são os parâmetros mais importantes, entre as análises químicas simples, que verificam a qualidade do lodo. Visto que o pH determina as espécies coagulantes que serão utilizadas no condicionamento, bem como a natureza das cargas superficiais dos colóides (WPCF, 1988). Além disso, concentrações elevadas de íons de cálcio contribuem para melhora do desaguamento do lodo (JIN, WILÉN & LANT, 2003). Contudo, no uso de condicionantes inorgânicos, a alta alcalinidade associada a lodos digeridos anaeróbiamente pode levar a altas doses desses coagulantes, pois se comportam como ácidos quando são adicionados a água, isto é, reduzem o pH da mistura gerada (WPCF, 1988).

### **5.3. Dosagem ótima dos polímeros**

A avaliação das dosagens dos polímeros baseou-se primeiramente na formação de flocos no teste de jarros. Nas dosagens onde houve essa formação, realizou-se o tempo de sucção capilar (CST), comparando-se com os resultados do lodo sem polímero. Segundo WPCF (1988) valores típicos para o Tempo de Sucção Capilar (CST) de lodo não condicionado são de aproximadamente 200 segundos. O lodo em

estudo teve uma média de  $233,8 \pm 17,23$  segundos, demonstrando que seu desaguamento ideal é ligeiramente mais lento do que lodos usualmente encontrados. Um dos fatores que influencia longos tempos de CST é a concentração de sólidos. Por isso, analisou-se esse parâmetro nas alíquotas de lodo utilizadas em cada teste. Apesar da concentração de sólidos no lodo estudado ser alta, pode não ser a única responsável por estes resultados, como já mencionado, outros fatores podem interferir no desaguamento, como o tipo de água encontrada no lodo e a alcalinidade (VESILIND, 1988; WPCF, 1988; VESILIND,1994).

Para a dosagem ótima dos polímeros, o critério utilizado foi de acordo com WPCF (1988), que indica que um lodo bem condicionado não deve ultrapassar 10 segundos no teste CST. Sendo assim, escolheu-se a menor dosagem dentre as que tiveram resultados inferiores a 10 segundos. As dosagens dos polímeros que foram testadas podem ser vistas na Tabela 6 e nos subitens 5.3.1, 5.3.2, 5.3.3 e 5.3.4.

Tabela 6 - Dosagens testadas dos polímeros utilizados na pesquisa.

	Polímeros			
	Kemira 8394 ®	Mandioca	Moringa	Quiabo
	0,05	2,00	6,00	10,00
	0,10	2,50	8,00	15,00
	0,20	3,00	10,00	20,00
	0,40		12,00	10,00
	0,50		14,00	15,00
	0,60		16,00	20,00
			18,00	
			20,00	
			22,00	
			24,00	
			26,00	
			28,00	
			30,00	
Dosagens			32,00	
testadas			34,00	
(g.L <sup>-1</sup> )			36,00	
			38,00	
			40,00	
			42,00	
			44,00	
			46,00	
			48,00	
			50,00	
			60,00	
			70,00	
			90,00	
			120,00	

### 5.3.1. Polímero Sintético

Foram realizados dois testes de dosagem para o polímero sintético, uma em agosto de 2013 e outra em fevereiro de 2014, devido ao intervalo relativamente grande entre a primeira e a segunda série de desaguamento. No primeiro teste as dosagens

analisadas foram de: 0,05, 0,10, 0,20 e 0,40 g.L<sup>-1</sup>, sendo encontrada a dosagem ideal de 0,20 g. L<sup>-1</sup>. Calculando a dosagem em função da concentração de sólidos do lodo, obtém-se que a dosagem ideal foi de 6,8 g. kg ST<sup>-1</sup>, ressalta-se que o cálculo foi realizado em função dos ST e não como o indicado por Andreoli, von Sperlin, Fernandes (2001), que fazem em função de SST, devido ao fato do condicionamento químico não agir somente nos SST mas também em partículas coloidais e dissolvidas presentes no lodo (LIBÂNIO, 2005). Uma vez obtida a relação ideal entre polímero e ST, adicionou-se ao lodo em todas as séries a mesma dosagem.

No segundo teste, foram utilizadas as seguintes dosagens: 0,40; 0,50 e; 0,60 g.L<sup>-1</sup>. A dosagem ideal obtida no teste foi de 0,50 g. L<sup>-1</sup>. Os tempos registrados no CST podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados obtidos no CST nas dosagens de polímero testadas.

Polímero Sintético			
Dosagem (g.L <sup>-1</sup> )	Média	±	CV
0,05 <sup>5</sup>	-	-	-
0,10	10,6	1,4	0,1
0,20	7,4	1,5	0,2
0,40	11,07	1,4	0,1
0,40	10,9	4,5	0,4
0,50	6,4	2,1	0,3
0,60	9,25	0,7	0,1

### 5.3.2. Mandioca

Preparou-se solução estoque de 10 g.L<sup>-1</sup>. A concentração esteve em função do limite de saturação da mistura da água com a fécula de mandioca, visto que acima desta concentração a solução não se solubilizava por completo. Apesar da concentração da solução ser muito superior a testes realizados em água por Dantas &

<sup>5</sup> Como citado na literatura, o CST foi feito somente nas dosagens em que houve formação de flocos.

Di Bernardo (2000) de  $1,0 \text{ g.L}^{-1}$ , não foi possível testar grandes dosagens, já que isso implicaria em um grande volume de polímero, superior inclusive ao volume de lodo utilizado, o que inviabilizaria sua aplicação. As dosagens testadas foram de 2,0, 2,5 e  $3,0 \text{ g.L}^{-1}$ , sendo que em nenhuma delas houve a formação de flocos. Ressalva-se que foi possível realizar essas dosagens utilizando-se volumes de lodo menores que os de polímero, mantendo-se assim, o volume total de 2 L no teste de jarros.

Os testes mostraram que pela metodologia empregada no presente projeto, não foi possível utilizar o polímero obtido a partir da mandioca como condicionante de lodo de esgoto, não sendo realizados testes de desaguamento nos sistemas. Possivelmente, seriam necessárias dosagens extremamente elevadas deste polímero para a obtenção de resultados positivos no lodo, que foi utilizado como auxiliar de coagulação no tratamento de água por Di Bernardo (2000).

### **5.3.3. Moringa**

As concentrações testadas iniciaram em  $6,0 \text{ g.L}^{-1}$  - dosagem ótima de pó seco obtida por Muyibi *et al* (2001). As demais dosagens foram de: 8,0; 10,0; 12,0; 14,0; 16,0; 18,0; 20,0; 22,0; 24,0; 26,0; 28,0; 30,0; 32,0; 34,0; 36,0; 38,0; 40,0; 42,0; 44,0; 46,0; 48,0; 50,0; 60,0; 70,0; 90,0;  $120,0 \text{ g. L}^{-1}$ . Não houve formação de flocos em nenhuma dosagem. Ressalva-se que o teste foi limitado pela quantidade pó obtido pelo descascamento, seleção, moagem e peneiramento das sementes de moringa.

Existem diversos fatores que podem contribuir para a não correlação de resultados obtidos no presente estudo e os relatados na literatura. Dentre eles, nota-se que apesar de Muyibi *et al* (2001) terem conseguido obter resultados positivos no condicionamento do lodo pela moringa, os testes realizados para tal não são os mesmos realizados nesta pesquisa, os pesquisadores utilizaram teste de resistência específica e de redução de volume do lodo em teste de jarros. Além disso, o método de preparo do pó seco utilizado no experimento não é detalhado, podendo sofrer variações importantes que podem interferir nos resultados. Outro fator importante é a concentração de sólidos do lodo utilizado no trabalho, que em momento algum é fornecida pelos autores, apenas

afirmam que o lodo é proveniente de uma ETE. Como há uma correlação positiva entre a concentração de sólidos do lodo e a dosagem de condicionantes, caso este lodo seja menos concentrado que o lodo utilizado no presente projeto, provavelmente as dosagens dos condicionantes empregados serão menores.

#### **5.3.4. Quiabo**

Para os testes com o quiabo, foram empregadas duas metodologias, que se diferem somente na abertura das peneiras utilizadas. Na primeira o peneiramento foi de 0,841 mm e na segunda o peneiramento foi de 0,149 mm. Ambos tiveram solução estoque com concentração de 50 g. L<sup>-1</sup> (limite de saturação) e as mesmas dosagens testadas, de: 10,0; 15,0 e 20,0 g. L<sup>-1</sup>. Ressalta-se que as dosagens foram limitadas pela quantidade de pó obtido no processo: para se obter aproximadamente 0,1 kg do pó mais fino, utilizou-se 15 kg de quiabo, já que grande parte desta massa é água e é necessário secá-lo, moê-lo e peneirá-lo. Em todas as dosagens testadas não se verificou a formação de flocos. Um dos fatores que pode ter contribuído para a não formação de flocos é o fato do polímero ser aniônico, conforme apontado por Abreu Lima (2007).

#### **5.3.5. Avaliação geral da dosagem dos polímeros**

Não foram encontradas dosagens ótimas para o condicionamento do lodo de esgoto de tanque séptico quando utilizou-se os polímeros naturais oriundos da mandioca, moringa e quiabo. Destaca-se que foram avaliadas somente algumas metodologias simplificadas, adequadas a ETE de pequeno porte, localizadas em comunidades isoladas e/ou rurais. É possível que existam resultados positivos caso empregue-se outras metodologias mais complexas, que aumentem a concentração dos polímeros em volumes viáveis para aplicação no lodo de esgoto, uma vez que outras pesquisas relataram sua eficiência no tratamento de água, esgoto e condicionamento do lodo.

Em relação ao polímero orgânico sintético, a dosagem ótima encontrada é viável para aplicação. Porém, é importante considerar que a utilização de polímeros orgânicos

sintéticos incrementa custos significativos à operação da ETE, bem como mão-de-obra especializada para sua manipulação e aplicação.

#### 5.4. Desaguamento do lodo nos sistemas

Como explicado anteriormente as séries são as replicatas da análise de desaguamento do lodo ao longo do tempo na escala de bancada. Para cada série utilizou-se 2 L de lodo de esgoto, a carga média aplicada no projeto foi de 18,80 kgST.m<sup>-2</sup>, com  $\pm 2,63$  e CV 0,14, ou seja, tem-se indícios estatísticos de que a média é representativa. Em todas as séries, considerou-se o término do desaguamento quando a percolação parou nos sistemas, ou seja quando o volume coletado foi de 0 mL. É importante observar que as condições climáticas variaram consideravelmente no período em que as séries foram realizadas, deste modo, verifica-se que a influência da temperatura e da evaporação foram diferentes em cada uma das séries. Na Tabela 8 são apresentadas as condições relativas a cada uma das séries. No Apêndice B, as Figura 41, 42, 43, 44 e 45 exibem as temperaturas diárias registradas e a evaporação da coluna d'água (Sistema controle item 4.6.3.).

Tabela 8 - Temperatura, evaporação e duração das séries.

	Sem polímero			Polímero Sintético			
	Série I	Série II	Série III	Série I	Série II	Série III	Série IV
T°C Máx	34,1	35,7	37,1	27,1	37,0	34,3	34,3
T°C Min	9,6	13,2	16,0	6,5	20,3	16,0	16,0
Evaporação coluna d'água (%)	18,0	20,0	32,0	1,5	16,0	4,0	4,0
Início	03/09/13	29/10/13	28/01/14	28/09/13	06/02/14	18/02/14	18/02/14
Duração (dias)	35,0	39,0	28,0	4,0	8,0	5,0	5,0

Em que: T°C Máx: Temperatura Máxima; T°C Min: Temperatura Mínima.

Na Tabela 9 são apresentados os volumes desaguados, os teores de sólidos das tortas secas resultantes dos sistemas de bancada, a média amostral e a média ajustada<sup>6</sup> de cada sistema. Esta última é decorrente de um ajuste de um modelo linear

<sup>6</sup> A média ajustada decorre da média geral das categorias tomadas como sendo iguais, incluindo um erro aleatório.

normal. Desta forma, é possível verificar se há diferenças significativas entre os valores amostrais. Os boxplot dos volumes amostrais e dos ajustados podem ser visualizados nas Figura 46 e 47 (Apêndice B).

No que se refere ao volume desaguado, há indícios estatísticos de que tanto nas séries sem adição de polímero e com adição de polímero, nos sistemas: pavimento permeável e pavimento permeável acrescido de areia as médias não têm diferença significativa, como observado na Figura 47. Todavia, comparando-se estes sistemas ao convencional a diferença é significativa, segundo a análise de variância.

No tocante ao teor de sólidos da torta seca, comparando-se o condicionamento ou não do lodo, verificou-se que o lodo sem polímero produziu tortas com igual umidade que o lodo condicionado, visto que quando se comparou os valores de ST nos sistemas com ou sem polímero, não se verificou diferença significativa. Examinando-se o desempenho dos sistemas, notou-se que não há diferença significativa de ST entre pavimento permeável e pavimento permeável e areia. Todavia, há diferença entre estes e o convencional, segundo a análise de variância, verificado nos boxplot da Figura 48 (Apêndice B). Ademais, como realizado no volume desaguado, ajustou-se um modelo linear em que calculou-se uma média ajustada para cada sistema, como pode ser visto na Figura 49 do Apêndice B.

Tabela 9 - Resultados do desaguamento do lodo de esgoto de tanque séptico.

Séries	Sem polímero						Polímero Sintético					
	P		P+A		C		P		P+A		C	
	ST Torta Seca (%)	Volume desaguado (mL)	ST Torta Seca (%)	Volume desaguado (mL)	ST Torta Seca (%)	Volume desaguado (mL)	ST Torta Seca (%)	Volume desaguado (mL)	ST Torta Seca (%)	Volume desaguado (mL)	ST Torta Seca (%)	Volume desaguado (mL)
I	19,60	540	22,08	578	28,24	561	24,12	1484	26,45	1413	29,80	1232
II	27,77	665	29,67	675	32,79	492	25,03	1411	26,2	1377	27,53	1145
III	24,87	628	28,24	609	28,72	587	23,27	1481	24,73	1513	28,43	1265
IV	-	-	-	-	-	-	23,36	1479	-	-	-	-
Média	24,08	611	26,67	621	29,92	547	23,95	1464	25,19	1434	28,59	1214
±	4,14	64,21	4,03	49,54	2,50	49,10	0,88	41,31	0,93	70,47	1,14	61,99
CV	17,20	10,51	15,12	7,98	8,36	8,98	3,68	2,82	3,69	4,91	4,00	5,11
Média ajustada <sup>7</sup>	25,03	644,51	25,03	644,51	29,25	489,31	25,03	1426,56	25,03	1426,56	29,25	1271,36

Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia; C: Convencional; ST: Sólidos Totais; ±: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação.

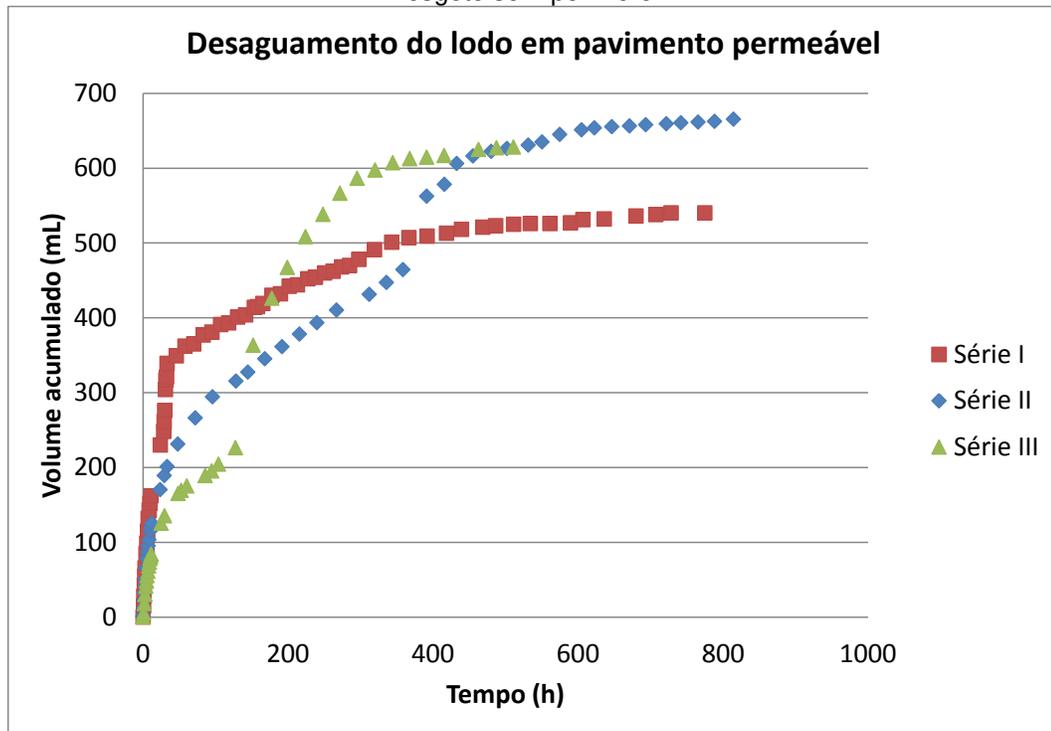
<sup>7</sup> A média ajustada demonstra que, estatisticamente, certos valores são iguais.

### 5.4.1. Sistema composto por Pavimento Permeável

#### a) Lodo não condicionado

Para o lodo sem adição de polímero desaguado em pavimento permeável, o desaguamento foi respectivamente de 540, 665 e 628 mL nas séries I, II e III. Nota-se que houve pequenas variações nas três séries, justificadas em parte pela variabilidade das condições climáticas e em parte pela variabilidade normal na reprodução dos experimentos. Contudo, é possível notar um comportamento geral das séries, onde o desaguamento é mais intenso nas primeiras 70 horas e mais ameno nas restantes. A Figura 16 mostra a evolução do desaguamento no sistema composto por pavimento permeável.

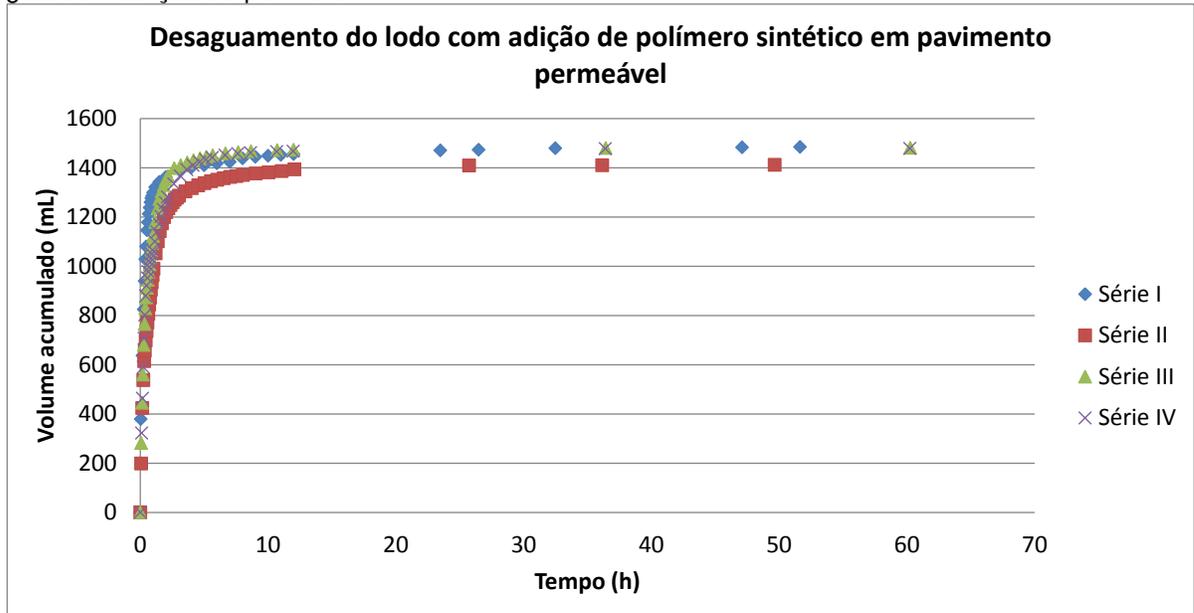
Figura 16 - Hidrograma do desaguamento do sistema composto por pavimento permeável com lodo de esgoto sem polímero.



## **b) Lodo condicionado**

Para o lodo com adição de polímero, o desaguamento foi realizado em quatro séries e o volume percolado foi de 1484, 1411, 1481 e 1479 mL, nas séries I, II, III e IV, respectivamente. A série IV foi realizada somente para verificar se haveria diferença no desaguamento do pavimento permeável em decorrência do aumento da taxa de infiltração ocasionada na segunda lavagem dos sistemas, como será exposto no item 5.9. Realizou-se o desaguamento concomitantemente com a terceira série do lodo condicionado. Observa-se um comportamento geral nas séries semelhante ao lodo sem condicionamento: intensidade de desaguamento maior nas primeiras horas e menor nas demais. Contudo, diferentemente do lodo não condicionado, o desaguamento foi mais intenso nas primeiras 3 h quando adicionou-se o polímero. Estes resultados evidenciam que o condicionamento do lodo com polímeros aumenta radicalmente não só a taxa de desaguamento, mas também o volume de água percolado, chegando a ser em média 58,03% maior que nas séries sem polímero utilizando-se o mesmo sistema. Tanto a rápida percolação quanto o maior volume devem-se às pontes químicas formadas entre o polímero e aos sólidos presentes no lodo, que agregam-se em flocos, facilitando a sua separação da água livre (LIBÂNIO, 2005; WPCFM, 1988). O hidrograma gerado pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Hidrograma do desaguamento do sistema composto por pavimento permeável com lodo de esgoto com adição de polímero.

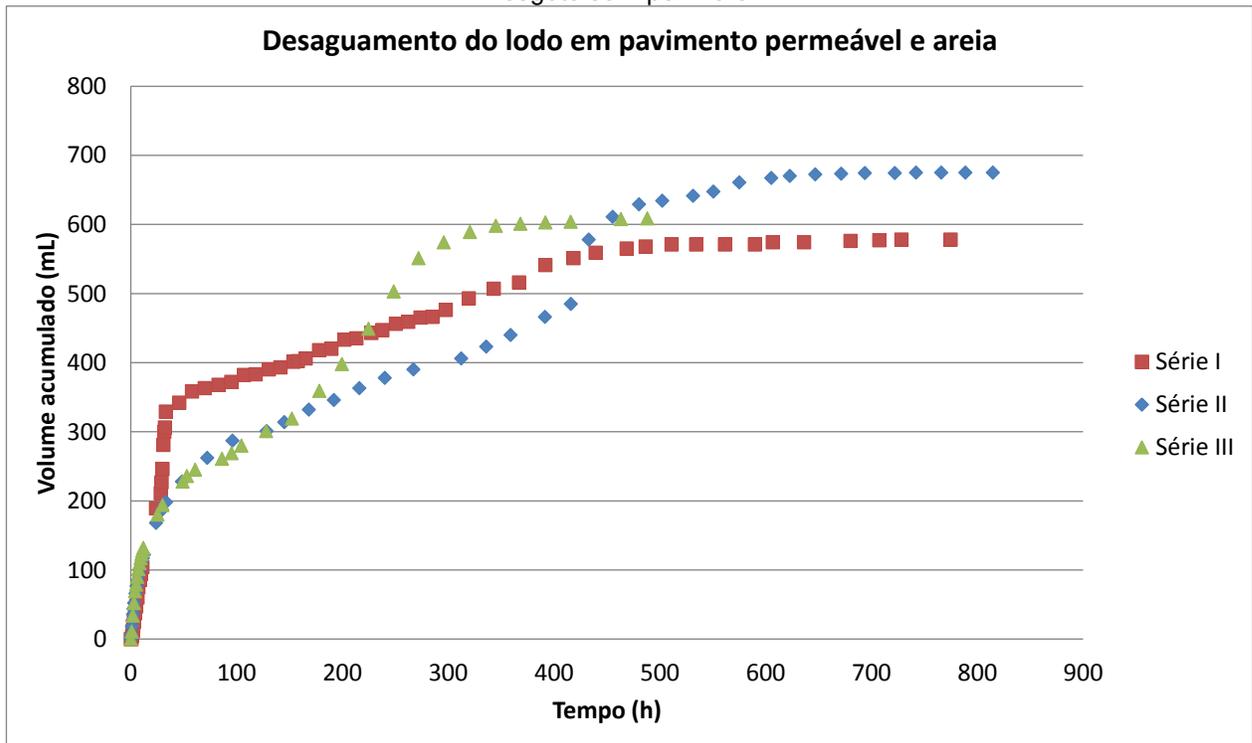


#### 5.4.2. Sistema composto por Pavimento Permeável e areia

##### a) Lodo não condicionado

O sistema composto por pavimento permeável com adição de areia não teve diferenças significativas em relação ao composto somente por pavimento permeável, tendo comportamento semelhante a este e desaguando 578, 675 e 609 mL, respectivamente, nas séries I, II e III, como observado na Figura 18.

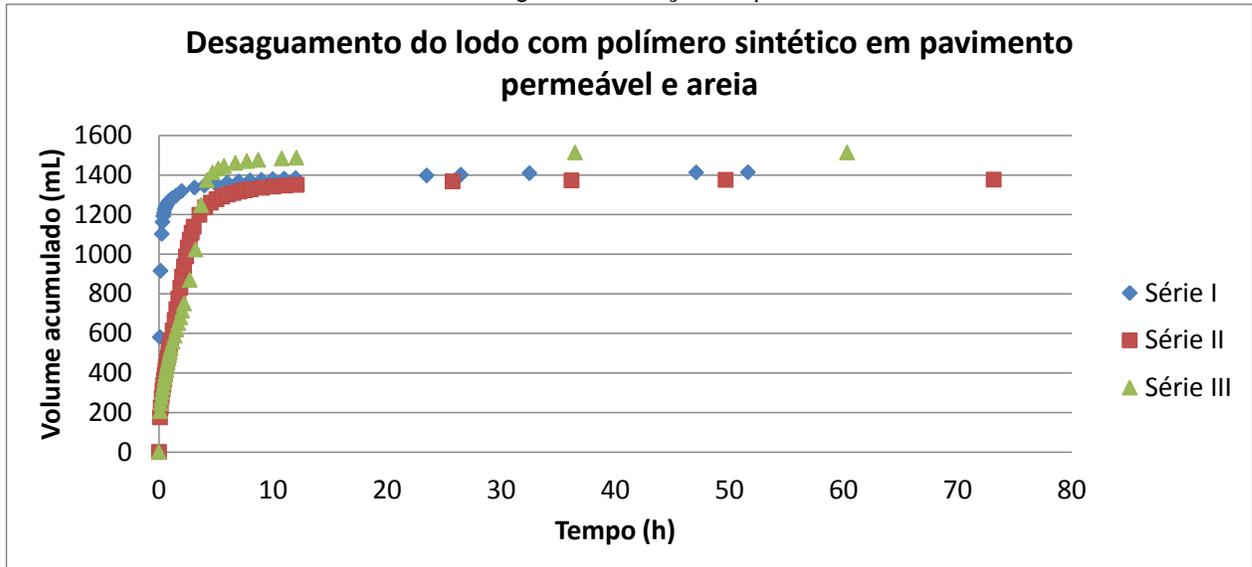
Figura 18 - Hidrograma do desaguamento do sistema composto por pavimento permeável com lodo de esgoto sem polímero.



### a) Lodo condicionado

Como os sistemas anteriores, o lodo com adição de polímero sintético teve desempenho superior ao sem condicionamento, com 1413, 1377 e 1513 mL de desaguamento, nas séries I, II e III, respectivamente. O hidrograma deste sistema pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 - Hidrograma do desaguamento do sistema composto por pavimento permeável e areia com lodo de esgoto com adição de polímero.



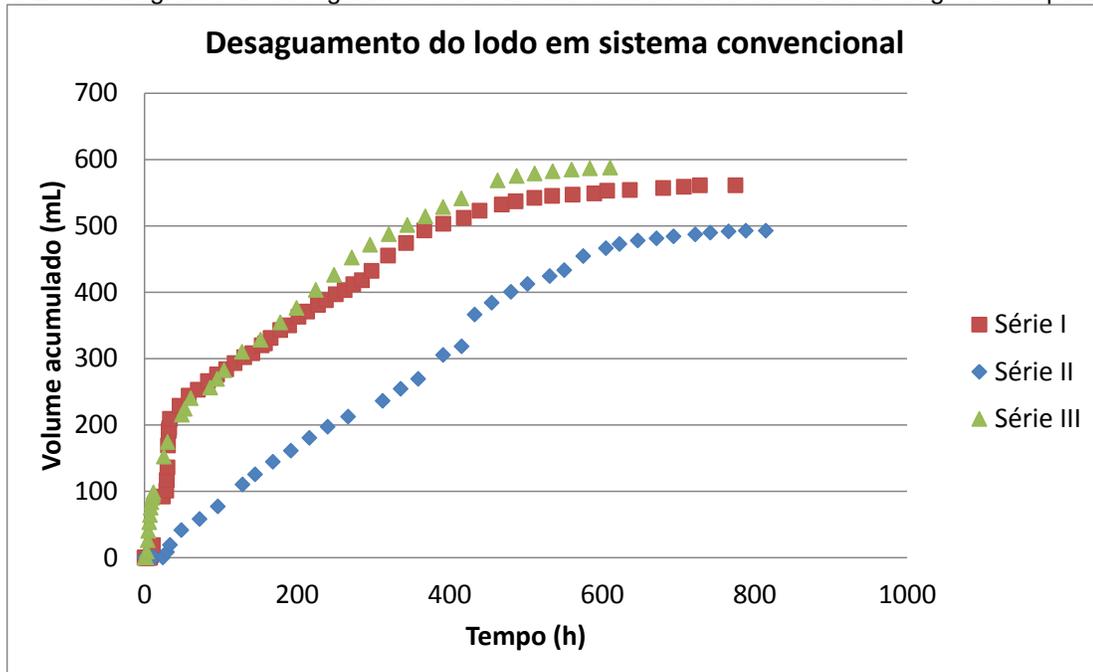
### 5.4.3. Sistema Convencional

#### a) Lodo não condicionado

Para o lodo sem adição de polímero desaguado em sistema convencional o volume percolado foi de 561, 492 e 587 mL, respectivamente, nas séries I, II e III. Apesar da série II ter um desaguamento menor e mais lento que as séries I e II, essa diferença não é estatisticamente relevante como observado no boxplot da Figura 46 no Apêndice B. Nota-se também, que o desaguamento na Série III foi mais rápido, uma das razões apontadas pode ser a alta temperatura e evaporação registradas neste período, sendo este comportamento observado nos sistemas compostos por pavimento permeável e pavimento permeável com camada de areia.

Ainda que verifiquem-se algumas diferenças entre as séries, é possível constatar o mesmo comportamento geral registrado nos sistemas anteriores: onde o desaguamento foi mais intenso nas primeiras horas e mais lento nas demais, conforme hidrograma exposto na Figura 20.

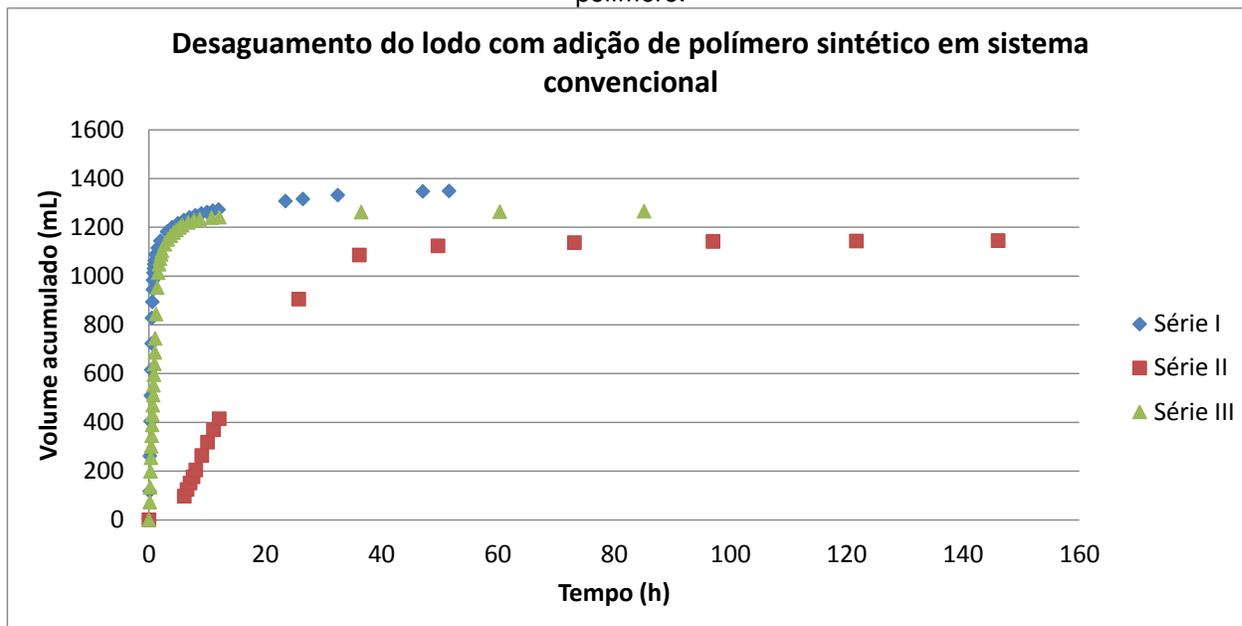
Figura 20 - Hidrograma do desaguamento do sistema convencional com lodo de esgoto sem polímero.



### b) Lodo condicionado

Para o lodo condicionado com polímero, o volume desaguado foi maior e, grande parte foi percolado nos primeiros minutos, comportamento observado em todas as séries. O sistema convencional desaguou nas séries I, II e III, 1232, 1145 e 1265 mL, respectivamente, volumes menores que os demais sistemas. Devido ao rápido desaguamento deste lodo, pode-se afirmar que a evaporação exerce pouca influência neste processo, sendo a drenagem o principal mecanismo. Apesar da evidente discrepância de volume e tempo de desaguamento na série II, não houve diferença estatística entre as demais séries, como comprovado pelo boxplot da Figura 46 no Apêndice B. A Figura 21 mostra o hidrograma deste desaguamento.

Figura 21 - Hidrograma do desaguamento do sistema convencional com lodo de esgoto com adição de polímero.



### 5.5. Teor de sólidos das tortas secas

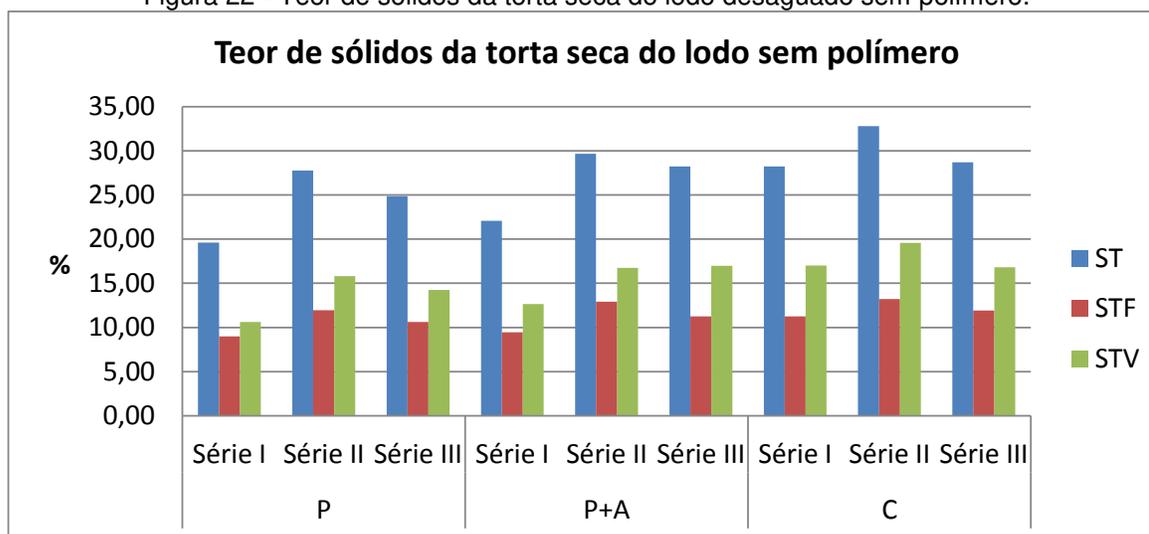
Analisou-se também os teores de sólidos nas tortas secas obtidos em cada sistema. Nota-se que apesar da maior percolação dos sistemas compostos por pavimento permeável e pavimento permeável com areia, os melhores valores foram do sistema convencional, tanto para o lodo sem condicionamento quanto para o lodo condicionado. Esses resultados provavelmente decorrem da retenção de parte da água percolada pela camada de areia do sistema, fazendo com que o volume total percolado não consiga atravessar toda a camada de areia e a camada de brita do sistema, até ser coletado no recipiente.

Constatou-se que não houve diferença significativa na utilização ou não de polímero, ou seja, os sistemas produziram tortas secas de semelhante teor quando não adicionou-se polímero e quando adicionou-se. Também não houve diferença significativa entre os sistemas: pavimento permeável e pavimento permeável acrescido de areia. Porém, houve entre os mesmos e sistema convencional, como mostra a Figura 49 no Apêndice B. O teor de sólidos no sistema pavimento permeável sem

condicionamento foi em média de  $24,08 \pm 4,14$  enquanto que o lodo condicionado a média foi de  $23,95 \pm 0,88$ . No sistema pavimento permeável e areia a média foi de  $26,67 \pm 4,03$  para o lodo sem polímero e de  $25,19 \pm 0,93$  para o lodo com adição de polímero. Para o sistema convencional a média de ST foi de  $29,92 \pm 2,50$  e  $28,59 \pm 1,14$  no lodo não condicionado e no condicionado, respectivamente.

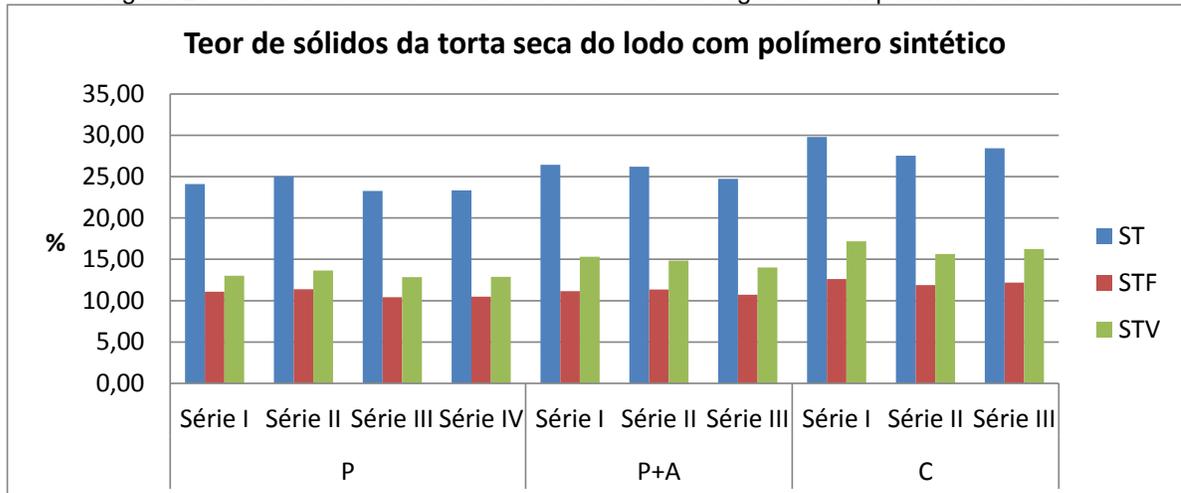
Contudo, é possível notar comportamentos distintos no lodo condicionado e não condicionado: enquanto o lodo não condicionado perdeu mais umidade quando a temperatura foi mais alta (nas séries), o lodo condicionado parece não ter sofrido influência significativa desta variável ambiental, esse fato deve-se ao seu rápido desaguamento, já mencionado anteriormente. Ademais, observa-se que as concentrações de STV são maiores que as de STF, uma hipótese é que a matéria inorgânica dissolvida pode ter sido percolada juntamente com a água drenada do lodo. As Figura 22 e 23 ilustram a os valores de Sólidos Totais, Sólidos Totais Fixos e Sólidos Totais Voláteis das tortas secas dos lodos desaguados sem e com adição de polímero, respectivamente.

Figura 22 - Teor de sólidos da torta seca do lodo desaguado sem polímero.



Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia; C: Convencional; Sólidos Totais; STF: Sólidos Totais Fixos e STV: Sólidos Totais Voláteis.

Figura 23 - Teor de sólidos da torta seca do lodo desaguado com polímero sintético.

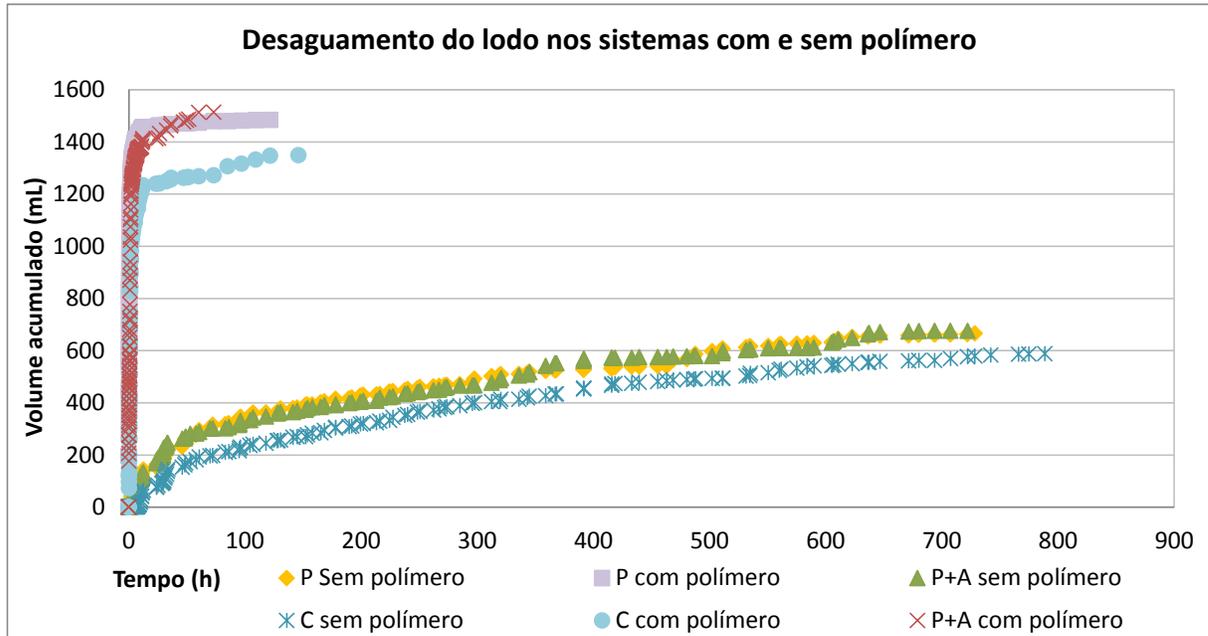


Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia; C: Convencional; Sólidos Totais; STF: Sólidos Totais Fixos e STV: Sólidos Totais Voláteis.

## 5.6. Análise geral dos sistemas

O lodo com ou sem polímero mostrou comportamento semelhante ao percolar uma fração significativa de seu volume nas primeiras horas do desaguamento e posteriormente assumiu uma taxa de infiltração mais lenta, a diferença verificada foi no menor tempo necessário e na maior quantidade de água desaguada do lodo condicionado, como observado na Figura 24. Os pontos no gráfico tratam-se das médias das séries nos sistemas. Neste gráfico, foram inclusos todos os pontos de todas as séries em ordem cronológica, sendo possível assim observar um comportamento em cada sistema estudado.

Figura 24 - Hidrograma do desaguamento do lodo em todos os sistemas no lodo não condicionado e condicionado.



Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia e; C: Convencional.

Esta rápida percolação pode ser justificada pela interação do polímero com as partículas do lodo ocorrer quase imediatamente após a sua aplicação (WPCFM, 1988). Isso ocorre porque os polímeros atuam como coagulantes, formando pontes químicas entre o polímero e as partículas coloidais presentes no lodo, que são adsorvidas pelas diversas cadeias de monômeros do polímero, agregando-se em flocos densos passíveis de serem removidos por filtração, sedimentação ou flotação (LIBÂNIO, 2005).

Portanto, tempos menores de desaguamento implicariam em maior quantidade de ciclos de secagem em leitos em escala real, podendo ocasionar um impacto considerável no cálculo da área necessária para o leito.

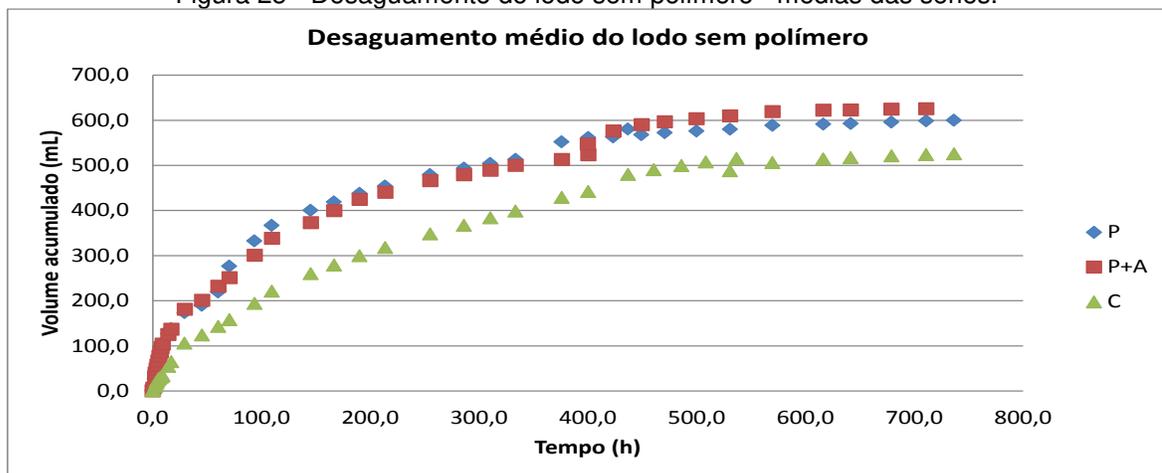
Apesar disso, os valores de ST nas séries com adição de polímero podem ser considerados iguais aos do lodo sem condicionamento. Certamente, pelo período de desaguamento do lodo sem polímero ter sido muito superior ao do lodo condicionado (em torno de 35 e 6 dias, respectivamente) houve maior evaporação da água presente no lodo nestes sistemas (por volta de 23 e 6%, de modo respectivo) que compensou o

menor volume drenado. Isso decorre de que em leitos de secagem há necessidade de tempos relativamente longos de evaporação (van Haandel & Lettinga, 1994).

Pode-se considerar que a evaporação é uma grande contribuinte no desaguamento em escala real e, conseqüentemente, na obtenção de teores maiores de ST nas tortas secas. Porém em escala de bancada os sistemas sofreram menor influência da evaporação devido a menor influência dos fatores climáticos responsáveis pela evaporação, tendo então, seus valores de ST subestimados.

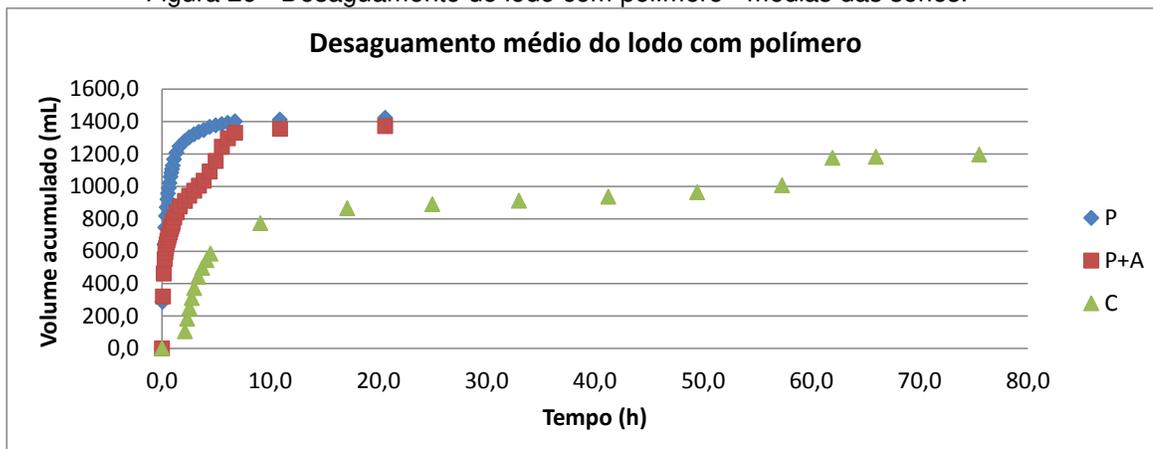
Analisando-se os sistemas, verifica-se que de maneira geral, pelas Figuras 25 e 26, que o sistema convencional foi significativamente mais lento que os sistemas alternativos e os volumes desaguados foram menores do que nos sistemas: pavimento permeável e pavimento e areia. No lodo sem condicionamento, enquanto 56,3% do volume inicial foi percolado nas 30 primeiras horas no sistema composto por pavimento permeável, o sistema pavimento permeável e areia foi ligeiramente mais lento, desaguando neste período 48,6% de seu volume e no sistema convencional somente 30,1%. Para o lodo condicionado nas primeiras 3 h o pavimento permeável, pavimento permeável acrescido de areia e convencional desaguaram 69,0, 48,7 e 18,5% de seu volume.

Figura 25 - Desaguamento do lodo sem polímero - médias das séries.



Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia e; C: Convencional.

Figura 26 - Desaguamento do lodo com polímero - médias das séries.



Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia e; C: Convencional.

Todavia, o sistema convencional produziu tortas secas com menor umidade. Como já explicado anteriormente, esses resultados podem ser justificados pela existência de uma camada maior de areia, em que parte da água percolada tenha ficado ali retida. A adição da camada de areia de 0,01 m ao pavimento permeável não mostrou aumento significativo tanto no volume desaguado quanto na torta seca, produzindo valores de ST semelhantes aos do sistema composto somente por pavimento permeável.

Além do sistema composto por pavimento permeável obter maior volume de água percolada do que o sistema convencional, pode-se considerar que este último tem uma pequena área de drenagem (2 a 3 cm de camada de areia entre os tijolos recozidos) em escala real como ilustra a Figura 27.

Figura 27 - Detalhe da constituição do leito de secagem convencional.



A NBR 12209/1992 considera que a área ocupada pela areia não pode ser inferior a 15% da área total do leito. Desta forma, considerando os valores das médias ajustadas, o lodo: sem polímero e com polímero desaguariam, respectivamente: 52,98 e 137,62 L.m<sup>-2</sup> no sistema convencional. Enquanto que o pavimento permeável e pavimento permeável acrescido de areia desaguariam 82,10 e 181,73 L.m<sup>-2</sup> para o lodo sem adição de polímero e com adição de polímero, respectivamente<sup>8</sup>.

Por esse motivo, como a percolação da água é fator importante no teor de umidade final da torta seca, é importante balizar que da mesma forma que no processo de drenagem, o teor de sólidos da torta seca do sistema convencional é superestimado na escala de bancada, ou seja, em escala real, é provável que estes valores sejam significativamente menores ou que demande-se mais tempo para obtenção da mesma umidade na torta seca.

Nota-se também que os valores de Sólidos Totais Voláteis (STV) são superiores aos Sólidos Totais Fixos (STF), com a relação média de STV/ST de 0,58, superior a do lodo bruto de 0,46, como já citado, uma das razões pode ser a percolação de matéria inorgânica dissolvida. Segundo Andreoli, von Sperling & Fernandes (2001) a relação

---

<sup>8</sup> Para a obtenção destes valores, utilizou-se a média dos volumes desaguados dos sistemas para calcular-se o volume desaguado por m<sup>2</sup>. Considerou-se que a percolação ocorre em toda a área do leito nos sistemas: pavimento permeável e pavimento permeável e areia. No sistema convencional considerou-se que a percolação somente ocorre na área do onde há areia, portanto, estes valores foram multiplicados por 15%.

entre SV/ST típica do é lodo desidratado é de 0,60 a 0,65. Porém, a relação encontrada por Andreoli *et al* (2009) foi de 0,22, indicando a grande variabilidade do lodo.

Como já mencionado, Ruiz, Kaosol, & Wisniewsk (2010) relacionaram a quantidade de matéria orgânica presente no lodo e sua aptidão ao desaguamento mecânico, estabelecendo a relação inversamente proporcional entre matéria orgânica e eficiência do processo de desaguamento mecânico. Andreoli, von Sperling & Fernandes (2001) também afirmam que lodos com menor teor de matéria orgânica também são mais indicados para o desaguamento por processos naturais. Esses resultados apontam que o lodo utilizado na pesquisa tem aptidão ao desaguamento por ter sofrido digestão.

Além disso, é necessário atentar que diferentemente dos resultados obtidos por van Haandel & Lettinga (1994), a concentração de sólidos influenciou o desaguamento do lodo, uma vez que o volume aplicado sobre os leitos foi o mesmo, sendo que a carga aplicada alterou-se em função da concentração de sólidos, que se alterou durante a pesquisa.

Observa-se também que van Haandel & Lettinga (1994) utilizaram lodos com ST entre 4 e 10% finalizando o desaguamento com fração de sólidos de aproximadamente 20% nos leitos de secagem convencional. Os valores obtidos na presente pesquisa para o leito de secagem convencional são superiores aos encontrados pelos pesquisadores, variando de 28 a 33%.

Com o objetivo de estimar a influência da evaporação nos sistemas, elaborou-se duas hipóteses: a primeira considera a quantidade de água evaporada como percolada pelos sistemas e a segunda trata-se de calcular a umidade do lodo caso não houvesse a evaporação nos sistemas. Ambas baseiam-se nas perdas de água por evaporação registradas pelo sistema controle.

### **5.7. Hipótese I – Água evaporada do lodo sendo percolada**

Com o intuito de explicar a diferença de volume desaguado no lodo sem e com condicionamento, a primeira hipótese assume a ausência de evaporação considerando que a porção de água que foi evaporada da coluna d'água foi percolada nos sistemas, respeitando-se a quantidade e tempo em que ocorreu a evaporação no sistema controle. Para tanto, faz-se necessárias algumas ponderações:

A evaporação de um líquido tem relação estreita com sua tensão superficial, quanto mais baixa esta é, maior será a evaporação. Sabe-se que a água naturalmente presente na natureza tem alta tensão superficial e, existem substâncias que contêm moléculas anfifílicas, como detergente e sabão, que diminuem a tensão superficial da água e, conseqüentemente, acabam facilitando a evaporação da água. O lodo de esgoto é uma matriz complexa, isto é, tem composição diversificada e provavelmente tem quantidade considerável de moléculas anfifílicas, podendo deixar a tensão superficial mais baixa e, portanto, facilitando a evaporação da água livre presente no lodo. Para fins de melhor aplicabilidade desta hipótese, seria necessário mensurar a tensão superficial do lodo (MYERS, 1999). Além disso, a área superficial de água que entra em contato com a atmosfera é muito maior no lodo do que na coluna d'água, colaborando para maior evaporação do primeiro.

Para tanto, admitiu-se que a evaporação da água “comum” é a mesma que a da água livre presente no lodo e que esta é predominante em relação aos demais tipos de água presente (van Haandel & Lettinga, 1994; VESILIND, 1994). As estimativas dos volumes percolados em todas as séries podem ser visualizadas na Tabela 10. Ressalva-se que as Séries II e III do lodo com adição de polímero foram iniciadas durante a Série III do lodo sem adição de polímero, fazendo com que o sistema controle para estas séries não tenha sido iniciado com 2000 mL de água, pois já havia certa perda pela Série III sem adição de polímero. O volume presente na coluna d'água quando Séries II e III iniciaram era de: 1747,3 e 1407,9 mL, respectivamente. Sendo os volumes estimados calculados a partir destes volumes.

Tabela 10 - Desaguamento do lodo de esgoto nos sistemas - Hipótese I.

		Sem Polímero						
Sistemas	Séries	I	II	III	IV	Média	±	CV
P	VE (mL)	355	408	643	-	469	153,3	32,7
	V (mL)	540	665	628	-	611	64,2	10,5
	V' (mL)	895	814	1271	-	993	243,9	24,5
P+A	V (mL)	578	675	609	-	621	49,5	8,0
	V' (mL)	933	1083	1251	-	1089	159,1	14,6
C	V (mL)	561	492	587	-	547	49,1	9,0
	V' (mL)	916	901	1227	-	1015	184,0	18,1
		Com polímero						
P	VE (mL)	29	282	48	48	120	140,7	117,7
	V (mL)	1484	1411	1481	1479	1459	41,3	2,8
	V' (mL)	1513	1693	1532	1493	1579	98,9	6,3
P+A	V (mL)	1413	1377	1513	-	1434	70,5	4,9
	V' (mL)	1442	1658	1564	-	1611	66,5	4,1
C	V (mL)	1232	1145	1265	-	1214	62,0	5,1
	V' (mL)	1378	1426	1316	-	1426	55,2	3,9

Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia; C: Convencional; VE: Volume evaporado no sistema controle; V: Volume real e; V': Volume estimado na Hipótese I.

Para o sistema composto por pavimento permeável com lodo sem polímero os volumes aumentariam em 65,74, 22,40 e 102,29% o volume real percolado, nas séries I, II e III, respectivamente. No mesmo sistema o lodo condicionado, os volumes incrementados nas séries I, II e III seriam muito pequenos, de 1,95, 19,99, 3,44 e 0,95% no volume desaguado. Como dito anteriormente, a série II foi a mais influenciada pela evaporação, devido às altas temperaturas e maior período de percolação.

O desaguamento do lodo sem condicionamento no sistema pavimento permeável e areia, os volumes desaguados nas séries I, II e III acresceriam em 61,42, 60,44 e 105,42%, respectivamente. No lodo condicionado no mesmo sistema, o desaguamento nas séries I, II e III receberiam um incremento de 2,05, 20,41 e 3,37%, respectivamente, no volume percolado pelos sistemas.

Já no sistema convencional, a inserção do volume evaporado à água percolada acrescentaria 63,28, 83,13 e 109,03% aos volumes desaguados nas séries I, II e III, respectivamente. Para as séries em que o lodo foi condicionado com polímero sintético, a percolação nas séries I, II e III representariam um aumento de 11,85, 24,54 e 4,03% em relação ao volume desaguado real.

Esperava-se que esta hipótese pudesse explicar a grande diferença de volume desaguado entre o lodo sem polímero e com polímero, com os volumes deste primeiro aproximando-se deste último. Conquanto, isso não foi verificado, visto que a diferença foi em torno de 400 mL. No entanto, é necessário fazer uma ressalva quanto ao volume desaguado no lodo condicionado ser ainda muito maior que no lodo não condicionado: a evaporação mensurada provavelmente é subestimada, pois a evaporação da água em matrizes complexas como o lodo de esgoto é provavelmente facilitada pela menor tensão superficial, o que poderia compensar parte desta discrepância entre maior volume percolado pelo lodo com polímero e tortas secas de umidade iguais as do lodo sem polímero.

Não obstante, os volumes foram maiores nas séries que ocorreram em períodos mais quentes, assim como nas séries em que se avaliou o desaguamento natural do lodo, verificou-se que a influência da evaporação foi maior, devido ao maior período de exposição.

## 5.8. Hipótese II – Ausência de evaporação nos sistemas

Para fins de análise da eficiência do pavimento permeável de forma isolada, calculou-se qual seria o teor de sólidos da torta seca se não houvesse evaporação. Sabendo que a densidade do lodo é próxima à da água, bem como sua massa específica (ANDREOLI, VON SPERLING & FERNANDES, 2001):

- Considerou-se que a água comum tem comportamento igual ao da água livre do lodo e, portanto, que um 1 mL de água é igual a 1 mg de água;
- Assumiu-se que o volume de água evaporada no sistema controle foi evaporada também pelos sistemas com lodo. Buscou-se então, verificar a contribuição dessa evaporação para a constituição das tortas secas, estimando o teor de sólidos secos descontando sua contribuição.

A estimativa do valor de sólidos totais sem contribuição da evaporação ( $ST_{se}$ ) pode ser expressa pela seguinte equação:

$$ST_{se} = \frac{S}{M_t} \times 100$$

Em que:

$S$  = Parcela de sólidos

$M_t$  = Massa total

Onde a parcela de sólidos pode ser definida como:

$$S = [(V_{lb} - V_p) - V_{ld}]$$

$V_{lb}$  = Volume do lodo bruto

$V_p$  = Volume da água percolada pelo sistema

$V_{ld}$  = Volume da água no lodo desaguado

E o volume da água no lodo desaguado pode ser calculado por:

$$V_{ld} = \left[ (V_{lb} - V_p) \times \left( \frac{A_{ld}}{100} \right) \right]$$

Onde:

$A_{ld}$  = Teor de umidade do lodo desaguado

$A_e$  = Volume de água evaporada

E por fim, a massa total será:

$$M_t = V_{ld} + A_e + S$$

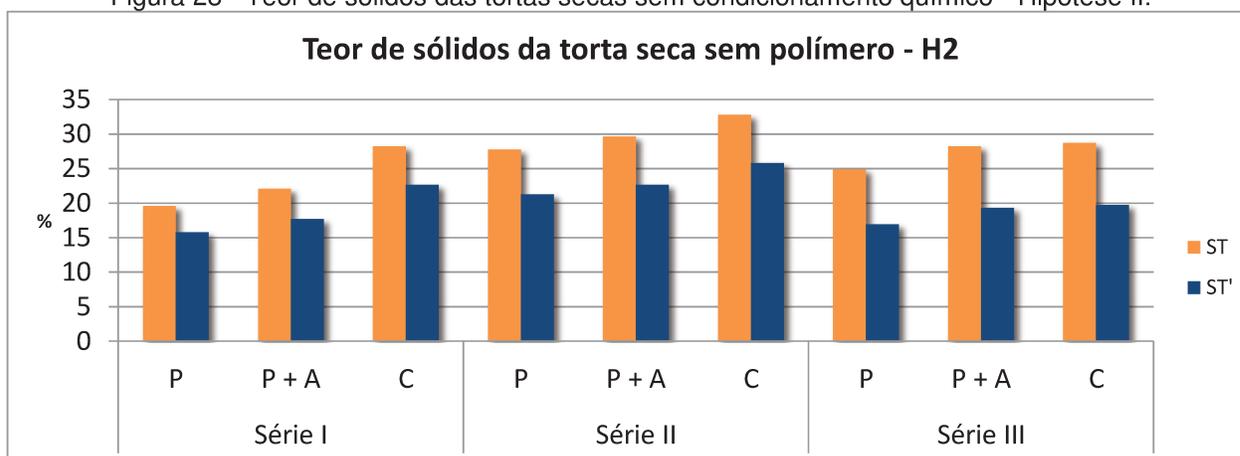
Nas séries sem condicionamento químico, as séries I, II e III, tiveram uma diferença de média entre os teores de sólidos de 4,60, 6,83 e 8,61%, respectivamente, sendo que a temperatura foi crescente nas séries. Quanto às séries com adição de polímero, a diferença média foi de 1,28, 7,69, 2,09% nas séries I, II, III, respectivamente. A série IV não foi possível aferir média e a diferença foi de 2,06%. Os valores dos Sólidos Totais reais (ST) e Sólidos Totais estimados na Hipótese II (ST') podem ser vistos na Tabela 11 e as Figuras 28 e 29.

Tabela 11 - Teor de sólidos da torta seca – comparação com a Hipótese II.

Sistemas	Séries	Sem Polímero				Média	±	CV
		I	II	III	IV			
P	ST (%)	19,6	27,77	24,87	-	24,08	4,14	17,20
	ST' (%)	15,77	21,27	16,94	-	17,99	2,90	16,10
P+A	ST (%)	22,08	29,67	28,24	-	26,66	4,03	15,13
	ST' (%)	17,68	22,68	19,32	-	19,89	2,55	12,81
C	ST (%)	28,24	32,79	28,72	-	29,92	2,50	8,36
	ST' (%)	22,65	25,8	19,74	-	22,73	3,03	13,33
Com polímero								
P	ST (%)	24,12	25,03	23,27	23,36	23,95	0,82	3,41
	ST' (%)	22,82	16,93	21,21	21,29	20,56	2,53	12,32
P+A	ST (%)	26,45	26,2	24,73	-	25,79	0,92	3,60
	ST' (%)	25,19	18,05	22,41	-	21,88	3,60	16,45
C	ST (%)	29,80	27,53	28,43	-	28,59	1,14	4,00
	ST' (%)	28,51	20,71	26,60	-	25,27	4,07	16,09

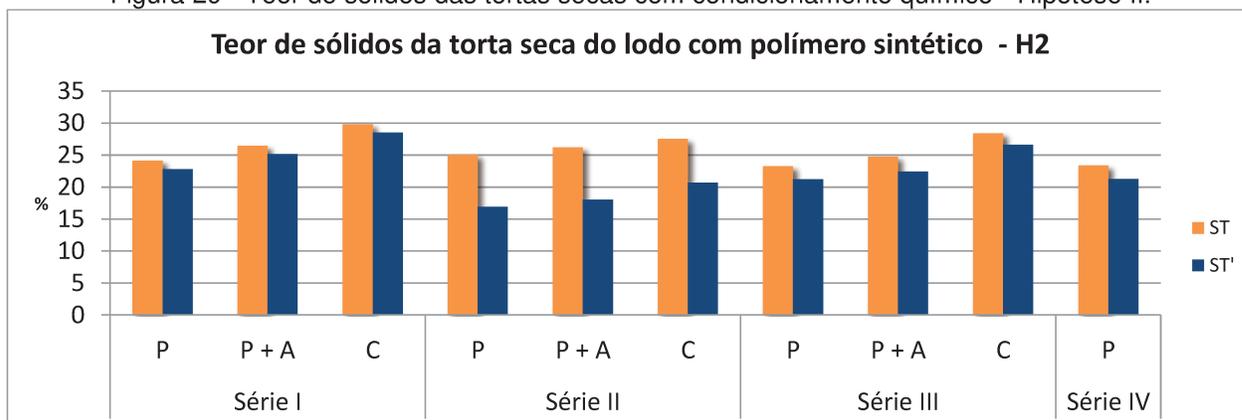
Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia; C: Convencional; ST: Sólidos Totais real e; ST': Sólidos Totais estimado na Hipótese II.

Figura 28 - Teor de sólidos das tortas secas sem condicionamento químico - Hipótese II.



Em que ST: Sólidos Totais real e; ST': Sólidos Totais estimado na Hipótese II.

Figura 29 - Teor de sólidos das tortas secas com condicionamento químico - Hipótese II.



Em que ST: Sólidos Totais real e; ST': Sólidos Totais estimado na Hipótese II.

Realizando esses cálculos observa-se que a evaporação teve importante contribuição nas tortas secas especialmente nas séries em que o lodo não foi condicionado com polímero sintético, devido ao tempo de percolação ser muito maior, aumentando a exposição do lodo ao ambiente. Nota-se também que altas temperaturas e baixa umidade do ar<sup>9</sup> favorecem a evaporação da água presente no lodo, já que nas séries em que a evaporação foi mais intensa ocorreu no período de forte calor e baixa precipitação (Série III do lodo sem polímero e Série II do lodo com polímero).

A partir dos dados observados, podem-se realizar algumas ponderações, são elas:

- No lodo sem condicionamento orgânico a evaporação foi mais significativa na série III. Nota-se que os volumes percolados dobrariam, caso a água evaporada fosse incorporada aos mesmos. Como citado anteriormente, o período em que se realizou esta série foi marcado por altas temperaturas e quase nenhuma precipitação;

<sup>9</sup> Não foi possível obter dados da umidade relativa do ar.

- No lodo condicionado, a série II foi a de maior evaporação, também devido às altas temperaturas e baixa precipitação registrada no período em que a série foi realizada;
- O aumento médio das séries sem condicionamento com polímero foi de 62,57, 75,45 e 85,48%, para os sistemas: pavimento permeável, pavimento permeável acrescido de areia e convencional, respectivamente. Quanto às séries com adição de polímero, esse aumento foi bem menor, sendo de: 6,42% no pavimento permeável, 8,39% no pavimento permeável acrescido de areia e 13,12% no convencional.
- Enquanto o lodo com polímero tem a maior perda de umidade decorrente da maior percolação, gerada pela interação entre polímero e sólidos presentes no lodo, o lodo sem utilização de polímero tem a evaporação como maior contribuinte para a perda de umidade e, por isso, produzem tortas secas de igual teor.

A partir do desaguamento real e das hipóteses formuladas observa-se que o desaguamento do lodo em leitos de secagem ocorre em duas fases distintas: a primeira é a percolação, preponderante nos primeiros dias das séries e quando esta diminui, o processo de evaporação torna-se o maior responsável pela perda de umidade no restante do período. Fazem-se necessários estudos em escalas maiores onde se possa mensurar a diferença de volume, bem como a influência da evaporação nos leitos de secagem alternativos e convencional.

### **5.9. Manutenção dos pavimentos**

Após a utilização de doze pavimentos, realizou-se o segundo teste de infiltração em meados de janeiro, onde PV 2 foi descartado, pois sua taxa esteve bem abaixo da média dos outros (infiltrando 164 mL enquanto a média dos demais foi de 1000 mL) não possibilitando seu uso nos sistemas com camada de areia. Ressalva-se que no segundo e terceiro teste, os pavimentos 10, 11 e 12 até então não tinham sido utilizados, com o objetivo de garantir que tanto o lodo condicionado quanto o não

condicionado tivessem duas de suas séries desaguadas em pavimentos ainda não utilizados e somente uma delas em pavimentos reutilizados.

Para tanto, todos os pavimentos foram limpos com lavadora de alta pressão anteriormente ao teste, com o objetivo de retirar o lodo que permaneceu aderido ao pavimento e ao tubo do sistema. Contudo, o valor obtido dos demais pavimentos também não foi satisfatório, pois tiveram taxa de infiltração em média  $12,6\% \pm 84,90$  e CV 0,09 abaixo do primeiro teste, tendo em vista a possível existência de óleos e graxas presentes em partículas de lodo que ainda podem ter permanecido nos pavimentos. Sendo assim, para obtenção de taxas mais altas, utilizou-se solução detergente, deixando os sistemas mergulhados por uma semana. Porém, a taxa de infiltração encontrada foi de 1421 mL, 24,2% em média superior a do primeiro teste. Estes resultados podem ser explicados pela lavagem com alta pressão ter movido alguns grãos de basalto e areia presentes no pavimento, de modo que os espaços vazios tornaram-se maiores a ponto de aumentarem a taxa.

No que diz respeito aos sistemas: pavimento permeável e areia e convencional, a taxa de infiltração do teste 2 só foi aferida depois do terceiro teste dos pavimentos, sendo em média de  $361,3 \pm 198,17$  e CV 0,55 e  $78,8 \text{ mL} \pm 4,71$  e CV 0,06, respectivamente, representando um aumento de 198,58 e 49,56% na taxa de infiltração em relação ao teste 1. De acordo com as considerações expostas, a média da taxa de infiltração é muito influenciada pela reutilização dos pavimentos, como mostra a Figura 35 no Apêndice B.

A partir dos testes realizados é importante fazer algumas ponderações, como: os pavimentos podem sofrer variações no volume de espaços vazios, que podem influenciar a taxa de infiltração de maneira significativa; a reutilização dos pavimentos mostrou-se possível, porém apresenta algumas limitações, como: a necessidade de realizar lavagem dos pavimentos, implicando em uso considerável de água. Conquanto, esse processo é trabalhoso, visto que a simples lavagem com água não garante sua limpeza, necessitando do emprego de algo que friccione a superfície do pavimento para

que este seja limpo. Para isso, foi preciso utilizar uma lavadora de alta pressão na limpeza dos sistemas. Mesmo assim, dependendo das características do lodo, pode não ser suficiente para remover totalmente os resíduos, sendo necessário o uso de soluções detergentes ou análogas.

## 6. CONCLUSÃO

As metodologias utilizadas para condicionamento do lodo de tanque séptico com polímeros naturais não se mostraram eficazes no condicionamento do lodo de esgoto de tanque séptico.

Todavia, o uso de polímero orgânico sintético mostrou-se eficiente. Evidenciando melhores resultados que o lodo sem condicionamento, pela maior quantidade de volume percolado e menor tempo de desaguamento, que possibilitam a realização de mais ciclos de secagem por ano e possivelmente a redução da área do leito. Todavia, os teores de sólidos da torta seca foram semelhantes aos obtidos no lodo sem aplicação de polímero.

Quanto à utilização de leito de secagem alternativo, tanto o pavimento permeável quanto o pavimento permeável com adição de areia não tiveram diferença significativa entre o volume desaguado e a umidade na torta seca, o que dispensaria o acréscimo de areia ao pavimento. Comparando-se ao leito de secagem convencional, verifica-se que as duas formas de leito de secagem alternativo foram melhores nos quesitos: volume desaguado e tempo. Contudo, pela camada de areia maior, a torta seca produzida pelo leito convencional teve menor umidade, apresentando melhor resultado na escala de bancada. Porém, em escala real, esta camada de areia ocuparia uma pequena parte da área do leito, diminuindo consideravelmente a percolação e aumentando o tempo do ciclo de secagem. A reutilização do pavimento mostrou-se possível, porém trabalhosa e pode interferir na sua taxa de infiltração.



## 7. RECOMENDAÇÕES

No decorrer da pesquisa, pela limitação de tempo, do delineamento experimental e de outros fatores, muitas possibilidades de aprofundamento do estudo não foram possíveis. Porém, caso realizadas, seriam interessantes contribuições no campo das pesquisas em saneamento rural, além de serem necessárias para complementação da presente pesquisa.

Apesar dos resultados não terem sido positivos na aplicação de polímeros naturais no lodo de tanque séptico, estes ainda podem ser uma alternativa promissora aos polímeros sintéticos. Para tanto, sugere-se que sejam estudadas outras dosagens, visto que estas foram limitadas no estudo, especialmente no caso do polímero oriundo do quiabo. Ademais, é possível que existam resultados positivos caso empregue-se metodologias diferentes, mas ainda simplificadas. Além disso, ainda que possivelmente não atendam a essa premissa, o emprego de métodos mais complexos, que aumentem a concentração dos polímeros em volumes viáveis para aplicação no lodo de esgoto, também pode gerar resultados positivos, uma vez que diversas pesquisas relataram sua eficiência no tratamento de água e esgoto. Também seria interessante a análise de custos *versus* benefícios no emprego de polímeros naturais e sintéticos e a sua comparação.

No que diz respeito a utilização do pavimento permeável como leito de secagem alternativo, fazem-se necessários estudos em escalas maiores onde se possa mensurar a diferença de volume desaguado, bem como a influência da evaporação nos leitos de secagem alternativos e convencional para verificar a sua viabilidade. Também é necessário verificar se a limpeza destes leitos seria factível nestas escalas.

Portanto, a otimização da etapa de desaguamento de lodo de tanque séptico, tanto a utilização de polímeros naturais quanto a simplificação dos leitos de secagem, constituem-se objetos de estudo valiosos para buscar alternativas necessárias para o gerenciamento de lodo de lodo de esgoto e contribuem, em último caso, para a melhoria dos serviços de saneamento, especialmente o saneamento rural.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU LIMA, G. J. DE. **Uso de Polímero Natural do Quiabo como Auxiliar de Floculação e Filtração em Tratamento de Água e Esgoto**. Dissertação de Mestrado Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. 113p.

ADEMILUYI, J. O. Sludge conditioning with Moringa seed. **Environment International** Vol. 14, N<sup>o</sup>1, 1988, Pp. 59-63.

AMUDA, O.S., DENG, A., ALADE, A.O. E HUNG, Y-T. "Conversion of sewage sludge to biosolids". In: Wang, L. K., Shammass, N. K., Hung, Y. T. **Biosolids Engineering and Management**. Humana Press, 1<sup>a</sup> Ed. Vol. 7, 2008, 800p.

ANDREOLI, C.V. **Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001, 482p.

APHA/AWWA/WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21<sup>a</sup> ed. Washington: American Public Health Association, 2012, 1082p.

ARANTES, C. C.; RIBEIRO, T. A. P., PATERNIANI, J. E. S. Processamento de sementes de Moringa oleifera utilizando-se diferentes equipamentos para obtenção de solução coagulante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. [online]. 2012, vol.16, n.6, pp. 661-666.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12209: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro, 1992. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos**. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR NM 248: **Agregados – Determinação da Composição Granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR NM 53/2009 de **Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água de agregados graúdos**. Rio de Janeiro, 2009.

BHUPTAWAT, H., FOLKARD, G. K., CHAUDHARI, S. Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating *Moringa oleifera* seed coagulant. **Journal of Hazardous Materials**, (2007) Vol. 142, pp. 477–482.

BITTON, G. **Wastewater microbiology**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 3ª Ed. New Jersey, 2005. 765p.

BORBA, L. R. **Viabilidade do uso da Moringa oleifera lam no tratamento simplificado de água para pequenas comunidades**. Dissertação Mestrado Universidade Federal da Paraíba: João Pessoa, 2001. 96p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução (CONAMA). **Resolução 375, de 29 de agosto de 2006**. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf> Data de acesso: 23/04/2014.

CAMPBELL, H.W. Sludge management – futures issues and trends (2000). **Water Science and Technology**, (2000) Vol 41 No 8 Pp. 1–8.

CARRÈRE, H., DUMAS, C., BATTIMELLI, A., BATSTONE, D.J., DELGENÈS, J.P., STEYER, J.P., FERRER, I. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. **Journal of Hazardous Materials**, (2010) Vol. 183 N° 1-3 pp. 1–15.

CEPAGRI. (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura/Universidade Estadual de Campinas). **Banco de Dados: Temperaturas mínimas e máximas registradas no campus Zeferino Vaz entre agosto/2013 e fevereiro/2014**. Campinas, [s.d.].

CLARKE, W. P., TAYLOR, M., COSSINS, R., Evaluation by respirometry of the loading capacity of a high rate vermicompost bed for treating sewage sludge. **Bioresource Technology** (2007) N° 98, Vol. 13 Pp. 2611–2618.

COFIE, O.O., AGBOTTAH, S., STRAUSSC, M., ESSEKU, H., MONTANGERO, A., AWUAH, E., KONE, D. Solid–liquid separation of faecal sludge using drying beds in Ghana: Implications for nutrient recycling in urban agriculture. **Water Research**, (2006) Vol. 40 pp.75 – 82.

CRUZ, M. A. S.; SOUZA, C. F.; TUCCI, C. E. M. Controle da drenagem urbana no Brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007, São Paulo. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007.

CUNHA, A. dos S. **Saneamento Básico No Brasil: Desenho Institucional e Desafios Federativos**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2011, 25p.

DANTAS, A. D. B.; BERNARDO, L. D. Uso de Amido de Mandioca Catiônico como Auxiliar de Floculação. In: **XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental** (2000) Porto Alegre. Memórias Eletrônicas.

DI BERNARDO, L. E DI BERNARDO. A. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. Vol. 1. São Carlos, Editora Rima, 2ª. ed, 2005, 784p.

FEAGRI (FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA/UNICAMP). **Moringa oleífera** (2004). Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/moringa>. Data de acesso: 13/05/2014.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Saneamento Rural** (2012). Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/site/engenharia-de-saude-publica-2/saneamento-rural/>. Data de acesso: 13/05/2014.

GRECO, D. B. Ética, Saúde e Pobreza – As Doenças Emergentes no Século XXI. **Bioética**. (1999), Vol.7 Nº2. Pp. 189-198.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostras de Domicílios 2011**. Rio de Janeiro, 2012.

KEMIRA. **Información técnica Superfloc® Serie 8000 HMW PAMs catiónica seca** [s.d.] Disponível em: [http://www.aniq.org.mx/pqta/pdf/Serie%208000HMW%20\(L\).pdf](http://www.aniq.org.mx/pqta/pdf/Serie%208000HMW%20(L).pdf) Data de acesso: 25/08/2013.

LIAO, B. Q., ALLEN, D. G., DROPPA, I. G., LEPPARD, G. G., LISS, S. N. Bound water content of activated sludge and this relationship to solids retention time, floc structure, and surface properties. **Water Environment Research** (2000) Vol. 72, No 6, Pp. 722 – 730.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas – SP: Editora Átomo, 2005. 444p.

MAHMOUD, A., OLIVIER, J., VAXELAIRE, J., HOADLEY, A. F.A. Electrical field: A historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering. **Water research** (2010) Vol. 44 pp. 238 –2407.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas**. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2010. 24p.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. New York, NY: McGraw-Hill, Ed. 3ªed, 1991, 1334p.

MIKKELSEN, L. H., KEIDING, K. Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering. **Water Research** (2002). Vol. 36, No. 10, Pp. 2451–2462.

MORTARA, F. C. **Utilização de leitos de drenagem no desaguamento de lodos anaeróbios**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. 241p.

MOUSSAVI, G., KAZEMBEIGI, F., & FARZADKIA, M. **Process Safety and Environmental Protection** (2010). Pp. 47–52.

MUYIBI, S. A., NOOR, M. J. M. M., ONG, D. T., KAI, K. W. Moringa oleifera seeds as a flocculant in waste sludge treatment. **International Journal of Environmental Studies** (2001). Vol.58, N<sup>o</sup>2, Pp. 185-195

MYERS, D. **Surfaces, interfaces and colloids** New York: Editora Wiley – VHC, 2<sup>a</sup> Ed., 1999, 501p.

NDABIGENGESERE, A., NARASIAH, K.S. Use of *Moringa oleifera* seeds as a primary coagulant in wastewater treatment. **Environmental Technology** (1998), Vol. 19, No.8, Pp. 789–800.

NEVES, D. P. **Parasitologia Dinâmica**. São Paulo: Atheneu, 2009, 592p.

PHILIPPI, L. S., COSTA, R. H. R. da, SEZERINO, P. H. Domestic effluente treatment through integrated system of septic tank and root zone. **Water Science and Technology** (1999). Vol. 40, N<sup>o</sup> 3, Pp. 125-131.

PRISMA. **Solução Sustentável para Combater Enchentes**. Disponível em: <http://www.revistaprisma.com.br/novosite/noticia.asp?cod=3080> Data de acesso: 08/08/2013.

REZENDE, S. C. & HELLER, L. **O saneamento no Brasil: políticas e interfaces**. 2<sup>a</sup> ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008, 387p.

RUIZ, T.; KAOSOL, T. WISNIEWSKI, C. Dewatering of urban residual sludges: Filterability and hydro-textural characteristics of conditioned sludge. **Separation and Purification Technology**, (2010) Vol 72, Pp. 275–281.

SABRY, T. Evaluation of decentralized treatment of sewage employing Upflow Septic Tank/Baffled Reactor (USBR) in developing countries. **Journal of Hazardous Materials**, (2010) Vol. 174, No. 1-3, Pp.500-505.

SILVA Jr., A. P. da; ISSAC, R. de L. **Adensamento por gravidade de lodo gerado em ETA em decantador convencional e decantador laminar**. In: XXVIII Congresso

Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002, Cancún. Anais do XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Cancún: AIDIS, 2002.

The R Project for Statistical Computing. Disponível em: <http://www.rproject.org>.

TOGNETTI C. MAZZARINO, M.J., LAOS, F. Compost of municipal organic waste: Effects of different management practices on degradability and nutrient release capacity. **Soil Biology & Biochemistry** (2008) N° 40. Pp. 2290–2296.

VESILIND, P. A. Capillary Suction Time as a Fundamental Measure of Sludge Dewaterability. **Journal Water Pollution Control Federation**, (1988) Vol. 60, No. 2, Pp. 215-220

VESILIND, P. A. The Role of Water in Sludge Dewatering. **Water Environment Research**, (1994) Vol. 66, No. 1, Pp. 4-11.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª Edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005, 452p.

WITHERS, P.J.A., JARVIE, H.P., STOATE, C. Quantifying the impact of septic tank systems on eutrophication risk in rural headwaters. **Environment International**, 2011, Vol. 37, No. 3, Pp. 644-653

WPCFM (Water Pollution Control Federation Manual). **Sludge conditioning Manual of Practice** (1988) N° FD-14, 144p.



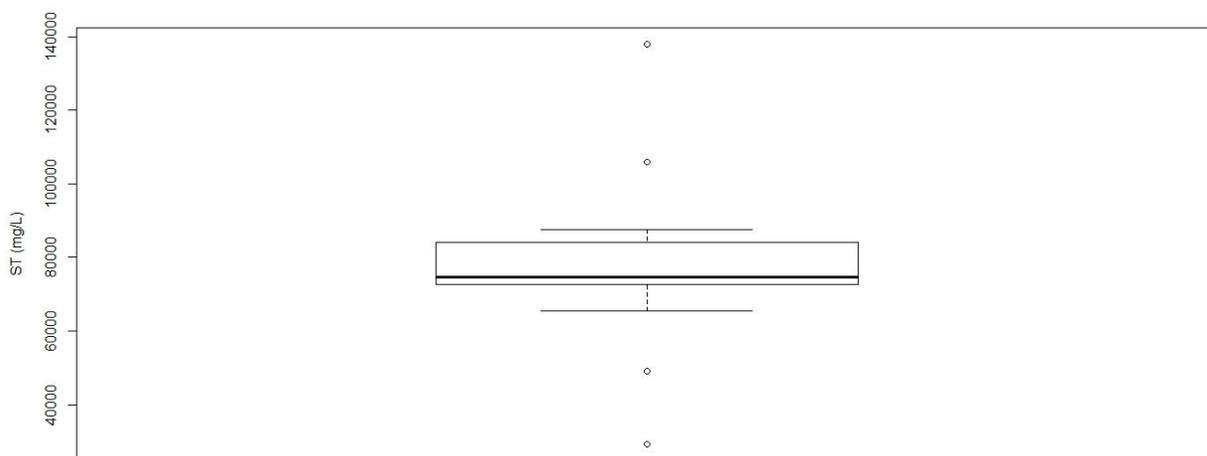
## APÊNDICES

### APÊNDICE A: Alcalinidade, pH e concentração de Sólidos do lodo bruto

Para cálculo da média dos valores obtidos, é importante esclarecer que só foram realizados estes cálculos para ST, SST, pH e alcalinidade, haja visto que os STF, STV e SSF e SSV são valores dependentes dos primeiros parâmetros citados, calculando-se a média, desvio padrão e coeficiente de variação somente das análises validadas destes. Deste modo, verificou-se primeiramente se as observações tinham indício de normalidade, como todas as variáveis se adequavam a essa condição, fez-se um intervalo de confiança, calculando-se dois desvios acima da média e dois abaixo, cobrindo-se assim 98% da distribuição dos dados. Como a média é altamente influenciada por valores extremos, excluiu-se os valores indicados pelo intervalo de confiança para seu cálculo, plotando gráficos boxplot, obtém-se o mesmo resultado.

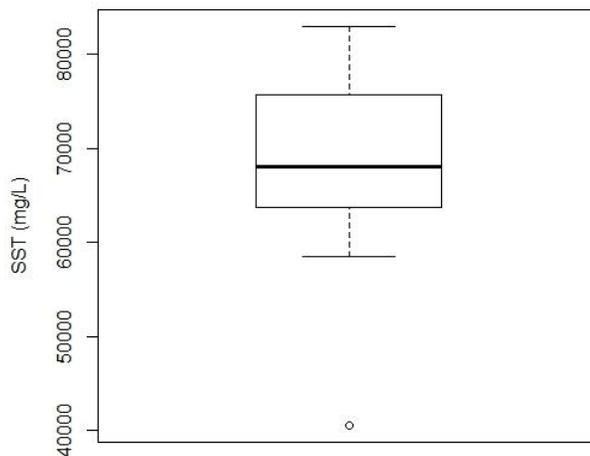
Para a análise de ST o intervalo de confiança foi de 64698,74 a 91261,26 mg.L<sup>-1</sup>. Como pode ser observado na Figura 30 para ST, foram excluídos quatro valores por não se encaixarem neste critério e que podem ser fruto de erros laboratoriais.

Figura 30 - Boxplot dos Sólidos Totais encontrados no lodo bruto.



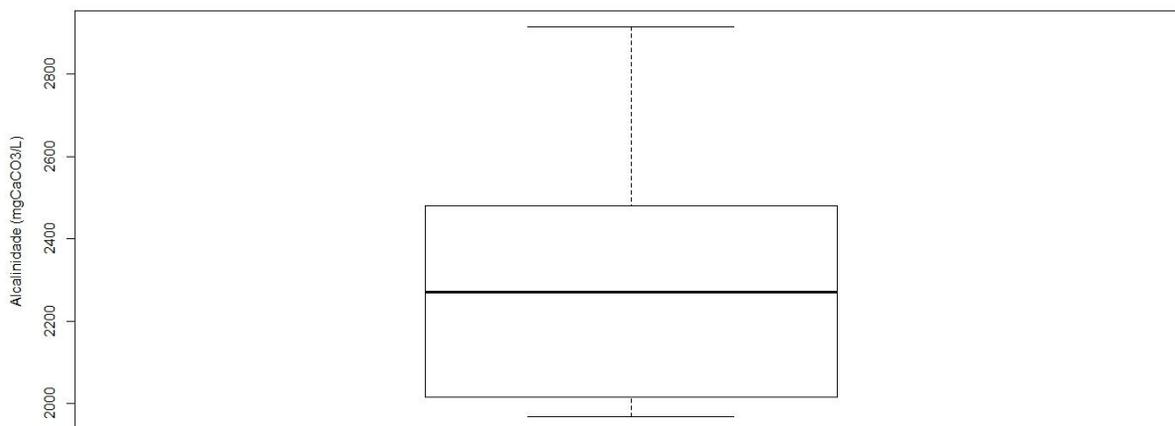
No caso dos SST, somente um valor foi descartado e o intervalo de confiança foi de 61624,86 a 73752, 14 mg.L<sup>-1</sup> . A Figura 31 mostra o boxplot gerado.

Figura 31 - Boxplot dos Sólidos Suspensos Totais encontrados no lodo bruto.



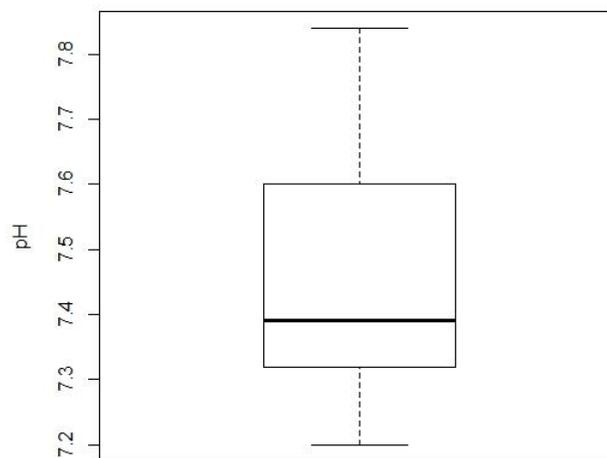
A alcalinidade não teve nenhum valor descartado e o intervalo de confiança foi de 2146,656 a 2483,784 mg CaCO<sub>3</sub>. L<sup>-1</sup>, o boxplot pode ser visualizado na Figura 32.

Figura 32 - Boxplot da Alcalinidade encontrada no lodo bruto.



O pH também teve o mesmo comportamento da alcalinidade é o intervalo de confiança mostra que o verdadeiro valor da média de pH está entre 7,36 a 7,59, como evidencia o boxplot da Figura 33.

Figura 33 - Boxplot do pH encontrado no lodo bruto.



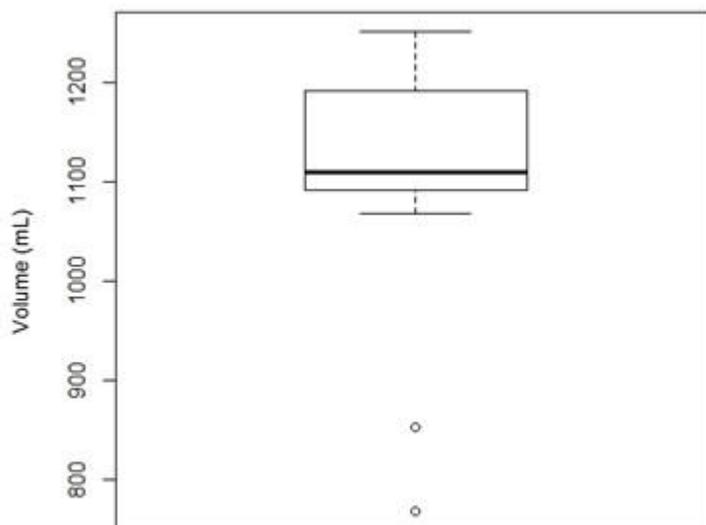
**APÊNDICE B: Infiltração dos sistemas, volume desaguado e tortas secas dos sistemas, temperatura registradas, duração, evaporação das séries**

**Infiltração**

Tabela 12 - Taxa de infiltração dos pavimentos.

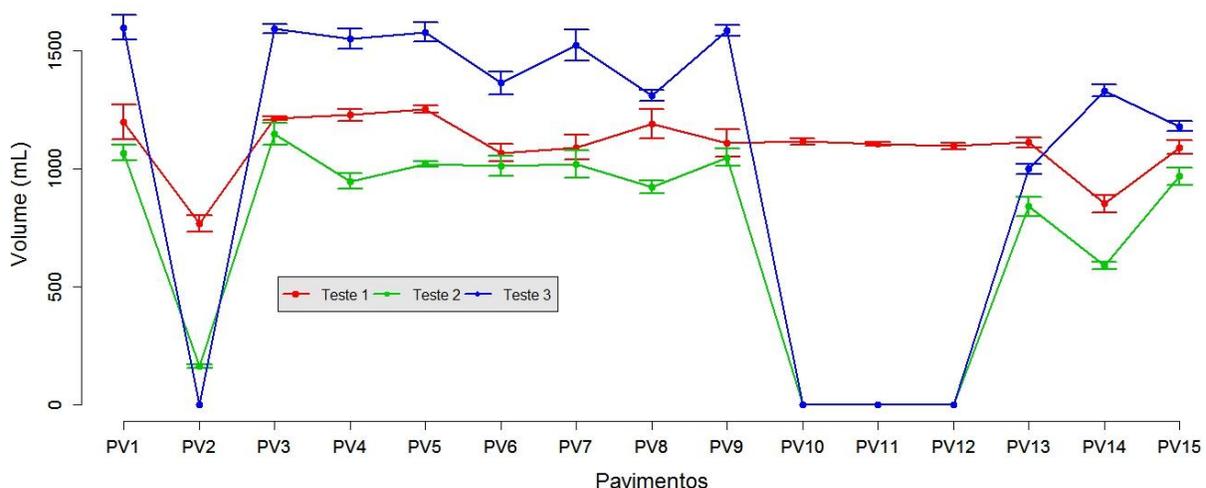
P	Taxa de Infiltração		
	Teste I Volume (mL)	Teste II Volume (mL)	Teste III Volume (mL)
1	1192	1068	1600
2	768	164	-
3	1216	1148	1596
4	1228	948	1552
5	1252	1020	1580
6	1068	1012	1364
7	1092	1020	1524
8	1192	924	1312
9	1110	1048	1588
10	1116	-	-
11	1104	-	-
12	1096	-	-
13	1112	840	1000
14	852	588	1332
15	1092	968	1180

Figura 34 - Boxplot da taxa de infiltração dos pavimentos no Teste 1.



Na Figura 35 os valores de PV10, PV11 e PV12 são considerados como 0 no gráfico por não terem sido incluído no cálculo, porque até então não tinham sido utilizados, não sendo considerados nas médias dos testes 2 e 3. Em cada ponto são mostrados o intervalo de confiança aproximado das taxas de infiltração utilizando a suposição de normalidade dos dados. As linhas auxiliam na visualização geral dos valores nos diferentes testes.

Figura 35 - Taxa de infiltração dos pavimentos permeáveis nos testes 1 (sem utilização), 2 (lavagem) e 3 (lavagem com solução detergente).



Em que: PV: Pavimentos. PV10, PV11 E PV12 não foram incluídos nos testes 2 e 3.

Na Tabela 13 encontram-se os valores da taxa de infiltração para os sistemas: pavimento com adição de areia e convencional. Como já citado, o pavimento 11 (equivalente ao sistema 4 em P+A) não tinha sido utilizado até a realização do segundo teste. Com exceção do primeiro sistema P+A (equivalente ao pavimento 2) todos os sistemas tiveram suas taxas de infiltração bastante elevadas no segundo teste.

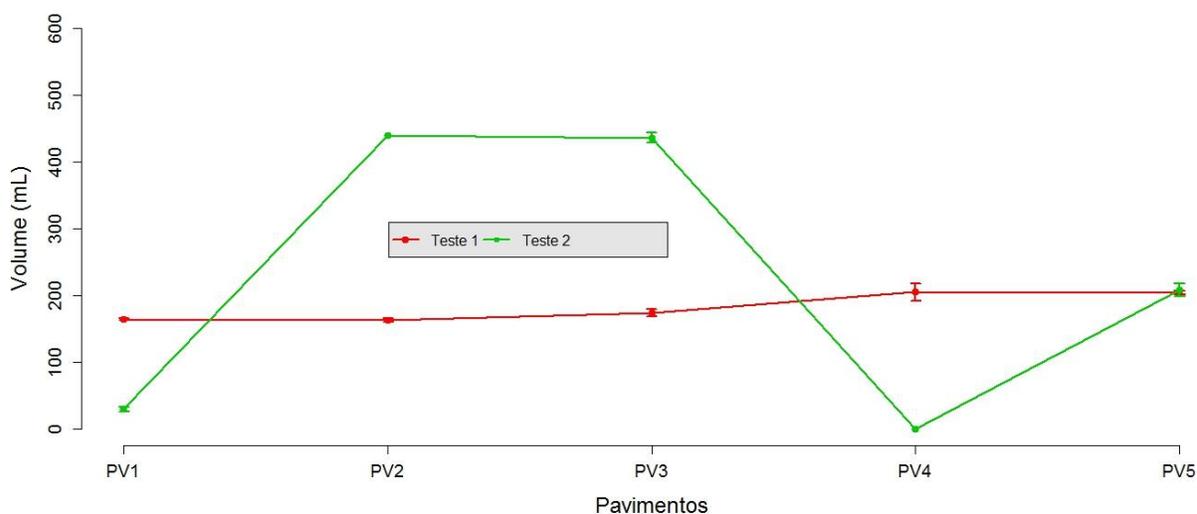
Tabela 13 - Taxa de infiltração dos sistemas: pavimento com adição de areia e convencional.

P+A	Taxa de Infiltração				
	Teste I Volume (mL)	Teste II Volume (mL)	C	Teste I Volume (mL)	Teste II Volume (mL)
1	64,6	29,6	1	43,0	73,8
2	62,6	440	2	49,0	79,2
3	73,8	436	3	76,0	75,4
4	204,8	-	4	61,6	94,0
5	204,0	208	5	42,4	84,4

P+A: Pavimento e Areia e; C: Convencional.

Na Figura 36 visualiza-se os testes 1 e 2 de infiltração nos sistemas compostos por pavimento permeável e camada de areia. Da mesma forma que o gráfico observado na Figura 39, os sistemas considerados com valor igual a 0 não foram inclusos cálculo, neste caso por motivos distintos: PV1 foi descartado antes do teste 2 e PV4 até então não tinha sido utilizado. Em cada ponto são mostrados o intervalo de confiança aproximado das taxas de infiltração utilizando a suposição de normalidade dos dados. As linhas têm a função de auxiliar a visualização dos valores nos dois testes.

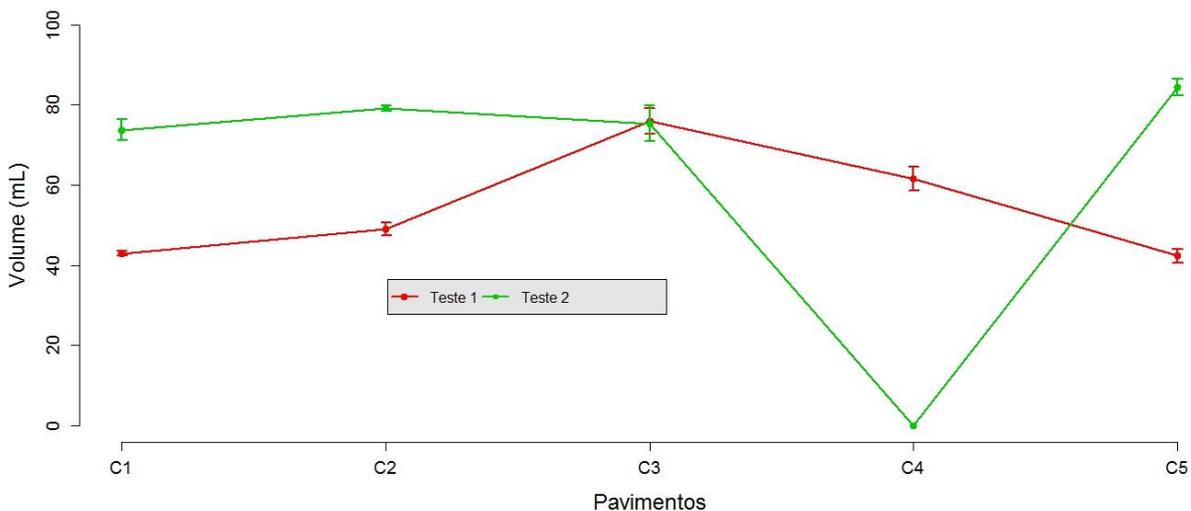
Figura 36 - Taxa de infiltração dos sistemas compostos por pavimento permeável e areia nos testes 1 (sem utilização) e 2 (após lavagem dos pavimentos com solução detergente).



Em que: PV: Pavimento permeável e areia. PV1 e PV4 foram considerados como 0 por não participarem do teste 2.

A Figura 37 trata dos testes de infiltração 1 e 2 do sistema convencional. Da mesma forma que nas duas figuras anteriores o sistema com valor igual a 0 não foi incluso cálculo por até então não ter sido utilizado. São mostrados o intervalo de confiança aproximado das taxas de infiltração em cada ponto, utilizando a suposição de normalidade dos dados. Foram traçadas linhas para auxiliar a visualização dos valores nos testes.

Figura 37 - Taxa de infiltração dos sistemas convencionais nos testes 1 (sem utilização) e 2 (após lavagem dos pavimentos com solução detergente).

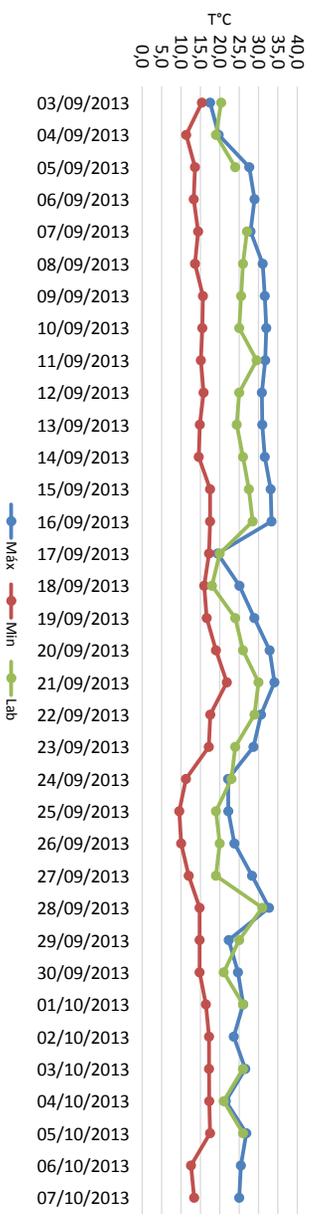


Em que: C: Sistema Convencional. C4 foi considerado como 0 no gráfico por não participar do teste 2.

## Temperaturas

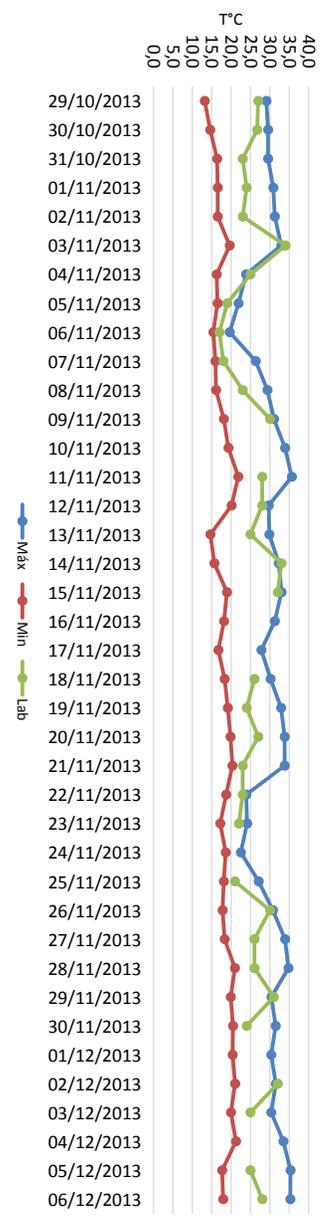
As temperaturas máximas, mínimas do dia foram fornecidas pelo Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura da Universidade Estadual de Campinas (CEPAGRI/UNICAMP). Também houve monitoramento da temperatura no Laboratório de Protótipos, contudo, esse monitoramento se deu nos momentos em que houve coleta de volume drenado dos sistemas, realizando-se a média dos valores nos dias em que houve mais de uma coleta. As temperaturas podem ser observadas nas Figuras 38, 39, 40, 41, 41 e 43.

Figura 38 - Temperaturas registradas na Série I sem polímero.  
 Temperatura da Série I - Sem Polímero



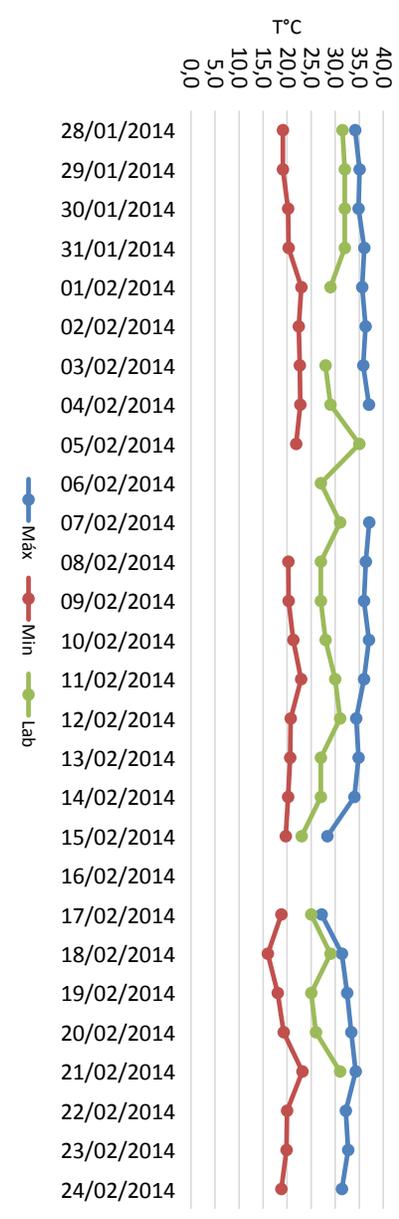
Em que: Máx: Temperatura Máxima; Min: Temperatura Mínima e Lab: Temperatura no Laboratório.

Figura 39 - Temperaturas registradas na Série II sem polímero.  
 Temperatura na Série II - Sem Polímero



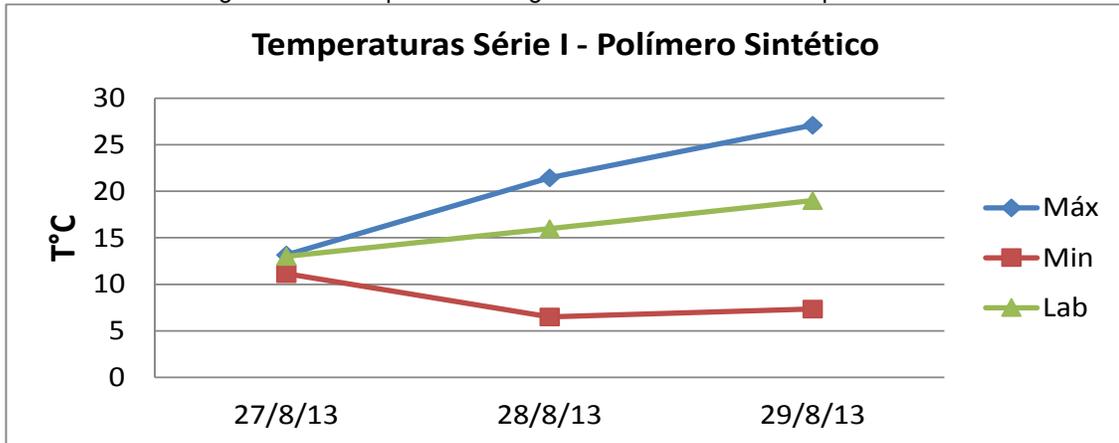
Em que: Máx: Temperatura Máxima; Min: Temperatura Mínima e Lab: Temperatura no Laboratório.

Figura 40 - Temperaturas registradas na Série III sem polímero.  
 Temperatura na Série III - Sem Polímero



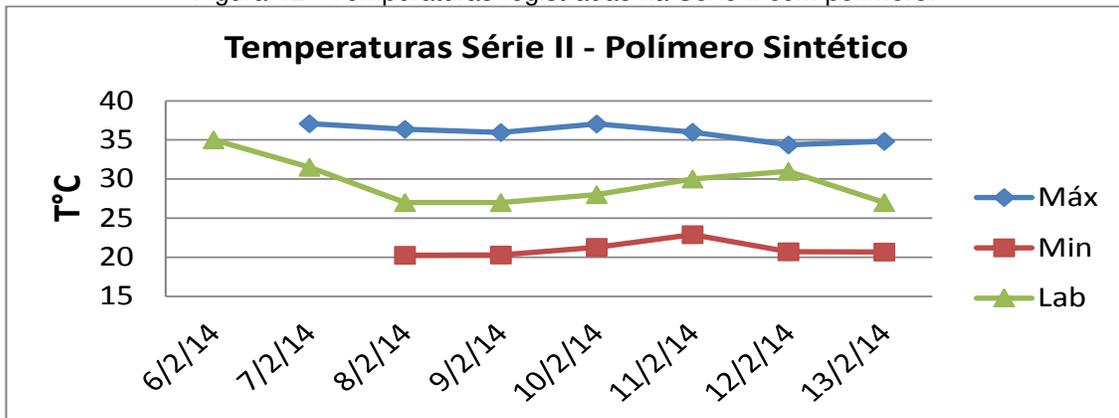
Em que: Máx: Temperatura Máxima; Min: Temperatura Mínima e Lab: Temperatura no Laboratório.

Figura 41 - Temperaturas registradas na Série I com polímero.



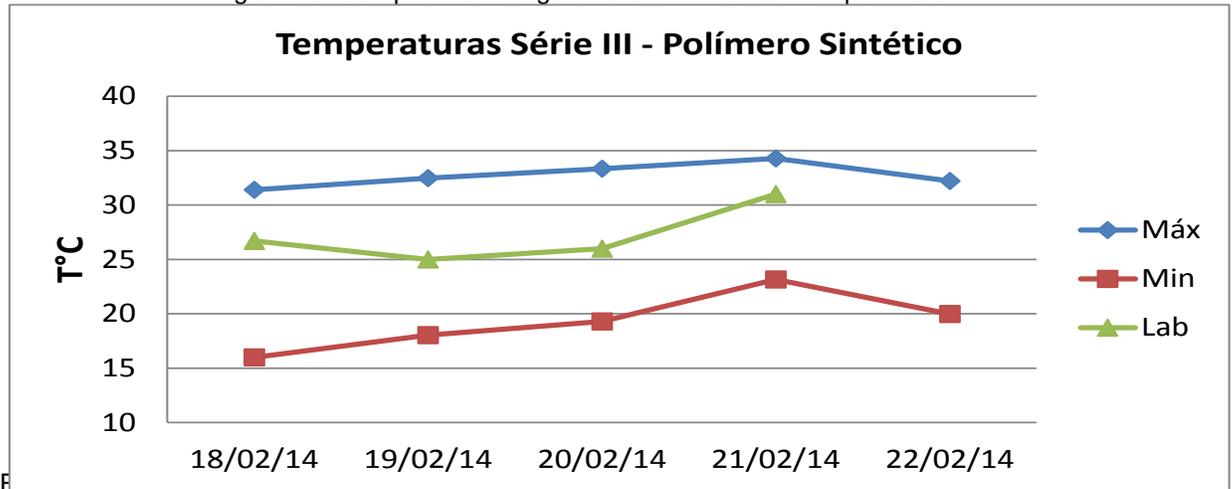
Em que: Máx: Temperatura Máxima; Min: Temperatura Mínima e Lab: Temperatura no Laboratório.

Figura 42 - Temperaturas registradas na Série II com polímero.



Em que: Máx: Temperatura Máxima; Min: Temperatura Mínima e Lab: Temperatura no Laboratório.

Figura 43 - Temperaturas registradas na Série III sem polímero.



### Evaporação

Figura 44 - Evaporação da coluna d'água nas séries sem adição de polímero.

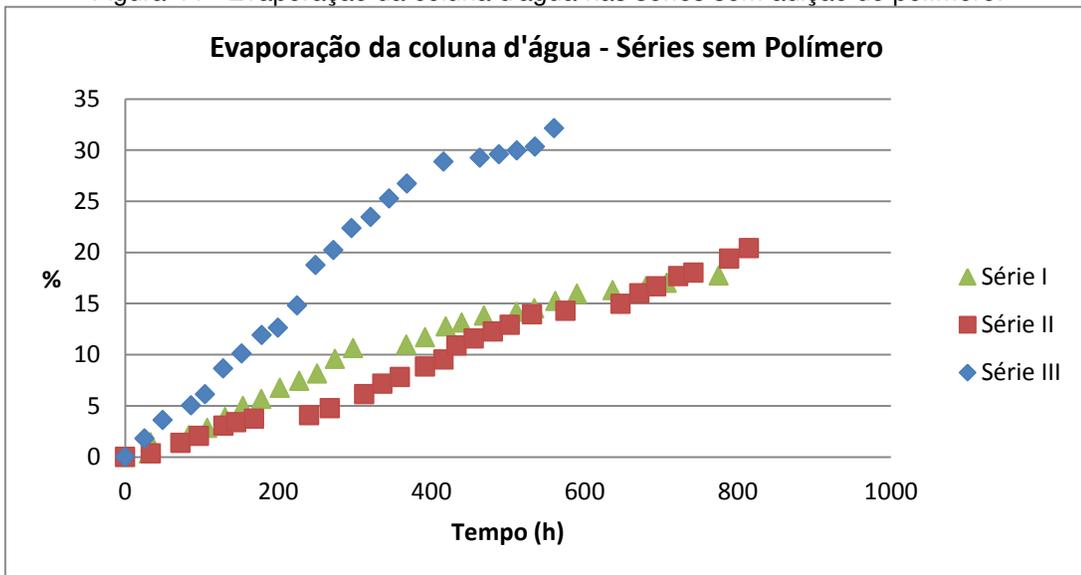
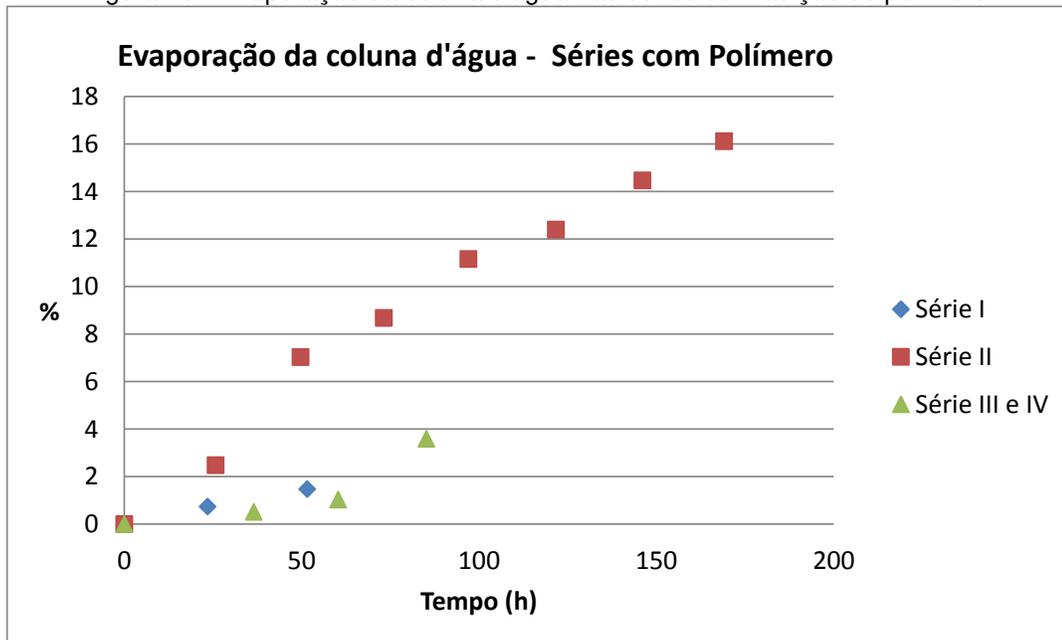
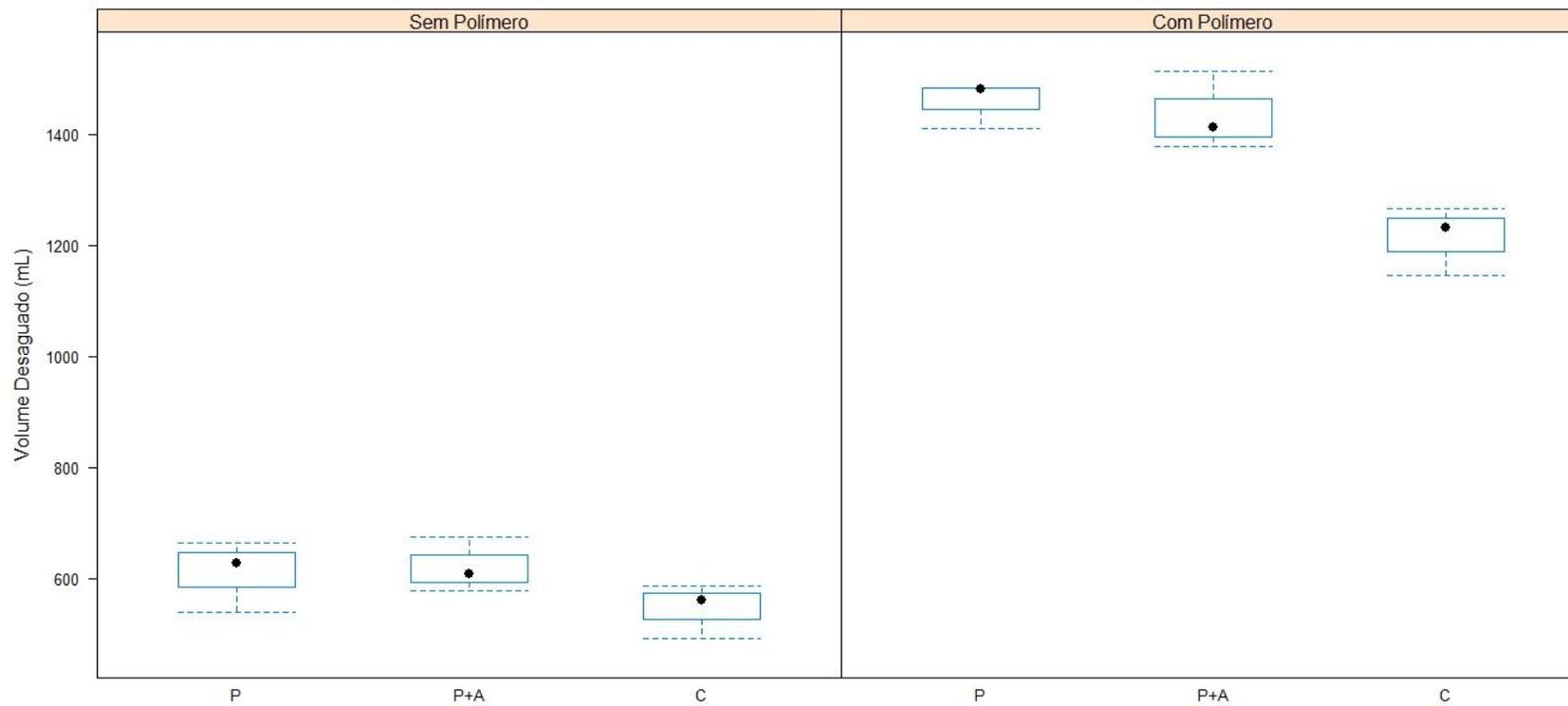


Figura 45 - Evaporação da coluna d'água nas séries com adição de polímero.



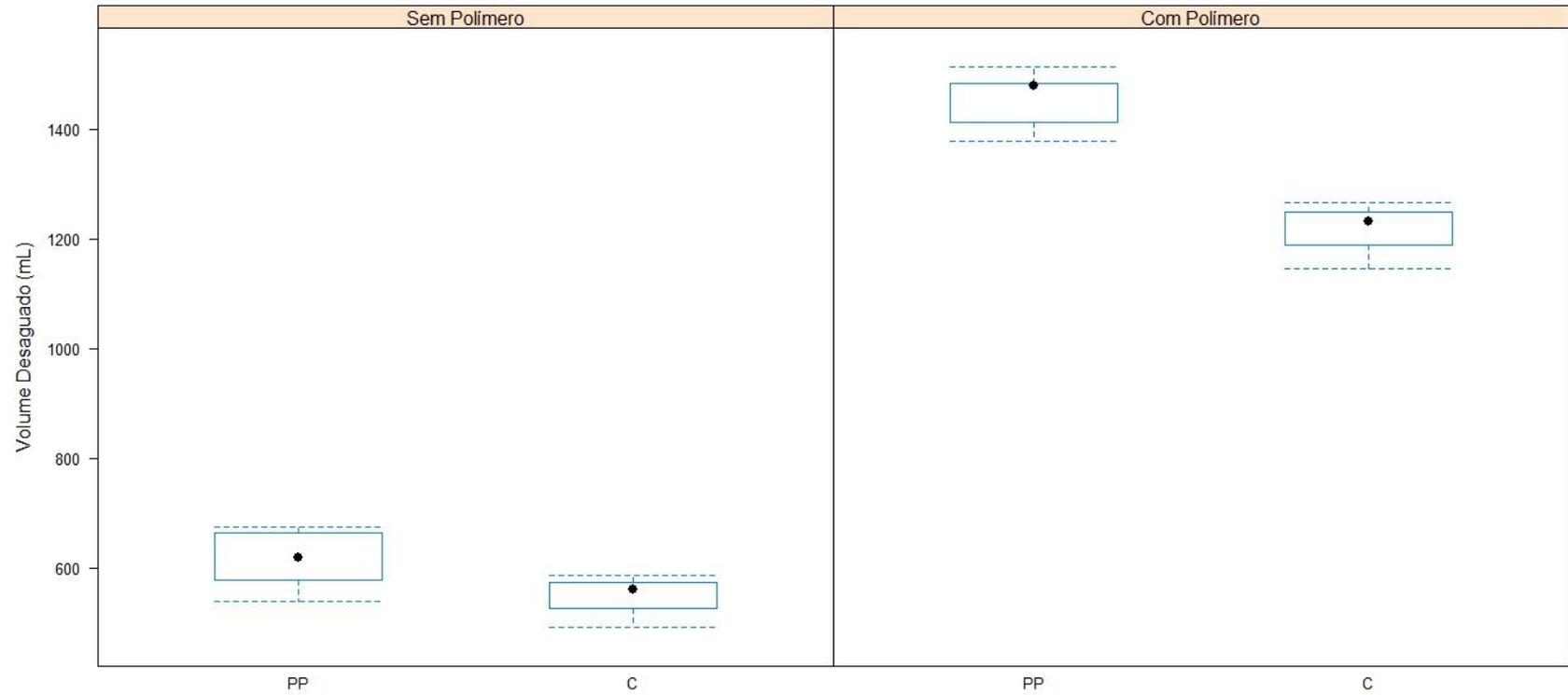
## Volume desaguado

Figura 46 - Boxplot do volume desaguado com ou sem polímero em cada sistema (valores amostrais).



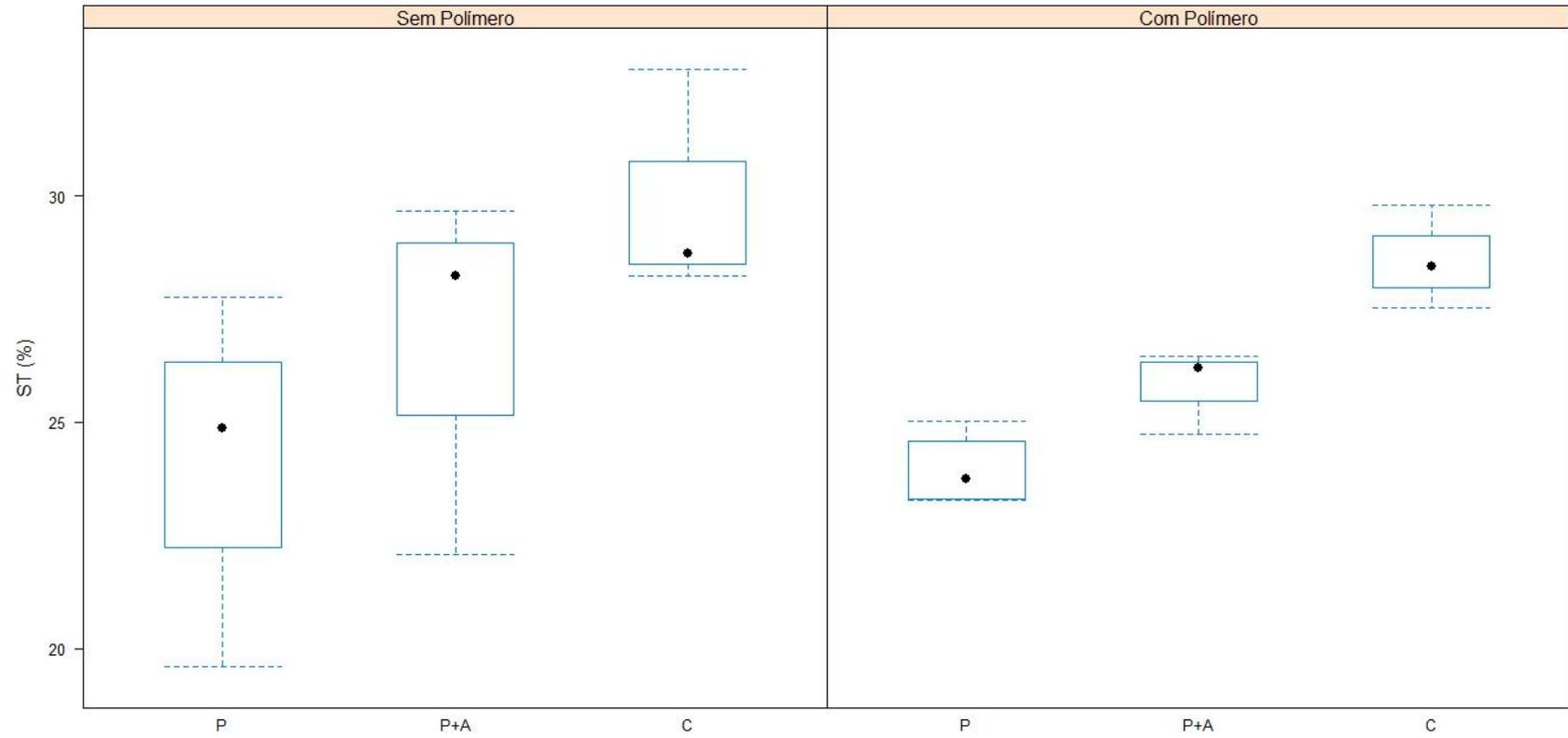
Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia e; C: Convencional.

Figura 47 - Boxplot dos volumes desaguados com ou sem polímero em cada sistema (valores ajustados).



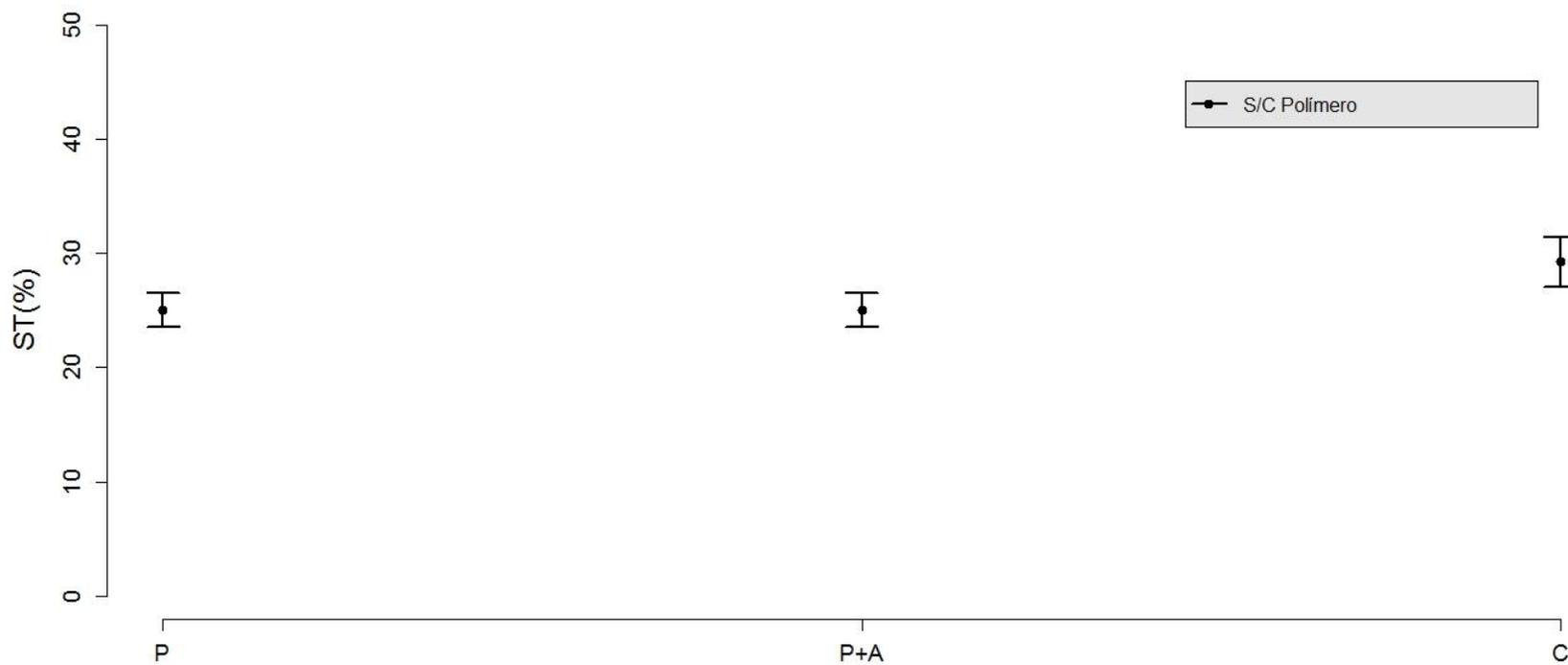
Em que: PP: Sistemas: Pavimento permeável e Pavimento com adição de Areia e; C: Sistema Convencional.

Figura 48 - Boxplot dos Sólidos Totais na torta seca do lodo com ou sem condicionamento químico.



Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia e; C: Convencional.

Figura 49 - Médias e valores máximos e mínimos dos teores de sólidos da torta seca nos sistemas com ou sem polímero (valores ajustados).



Em que P: Pavimento Permeável; P+A: Pavimento Permeável e Areia e; C: Convencional.