

# Trabalho de Conclusão de Curso

## Higienização do Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto para Utilização como Material de Cobertura de Aterro Sanitário

Joana Meller Silva

Orientador: Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Jr.  
Co-orientador: Eng. Francisco José Guedes Pimentel

2013/2





Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

**HIGIENIZAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO  
DE ESGOTO PARA UTILIZAÇÃO COMO MATERIAL DE  
COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO**

**JOANA MELLER SILVA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Programa de  
Graduação em Engenharia Sanitária  
e Ambiental da Universidade Federal  
de Santa Catarina para a obtenção do  
Grau de Engenheiro em Engenharia  
Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Armando  
Borges de Castilhos Júnior.

Coorientador: Francisco José Guedes  
Pimentel.

Florianópolis, SC  
2013

**SILVA, J. M. Higienização do lodo de estação de tratamento de esgoto para utilização como material de cobertura de aterro sanitário.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2013. 96 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC

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

HIGIENIZAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO  
DE ESGOTO PARA UTILIZAÇÃO COMO MATERIAL DE  
COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO

JOANA MELLER SILVA

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

BANCA EXAMINADORA:



---

Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Jr.  
(Orientador)



---

Prof. Dr. Elvete Carmem Clemente Prim  
(Membro da banca)



---

Marlon Capanema  
(Membro da Banca)



*Dedico este trabalho aos meus pais, Laércio e Magna, amores da minha vida. Sem vocês, nada disso seria possível.*



## AGRADECIMENTOS

*“Sonho que se sonha só, é só um sonho que se sonha só, mas sonho que se sonha junto é realidade”.* (Raul Seixas)

Hoje vivo uma realidade que mais parece um sonho. Chega ao fim uma etapa muito importante da minha vida. Mas, para chegar até aqui foi necessário o apoio de muitos e muita dedicação, perseverança e esforço. Etapa esta que me fez crescer como profissional e contribuiu indubitavelmente para meu desenvolvimento como ser humano.

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar saúde e me guiar por caminhos certos, me ajudando sempre a concluir com êxito, mesmo passando por muitas dificuldades, todas as tarefas necessárias para a minha formação como Engenheira Sanitarista e Ambiental.

Aos meus pais, Laércio e Magna, meus eternos exemplos, que sempre me mostraram o caminho do bem e passaram valores de vida que me tornaram a pessoa que sou hoje. Pela confiança e pelo amor que me fortalece a cada dia.

Ao meu namorado Augusto, por ter vivenciado comigo passo a passo deste trabalho, por ser meu melhor amigo e companheiro de todos os dias, por me apoiar nos momentos difíceis durante toda essa caminhada e principalmente por tornar a minha vida cada dia mais feliz.

À Claudete e Nilton, por todo amor, por me acolherem como uma filha e proporcionarem todo apoio necessário para que os trabalhos de faculdade ficassem menos maçantes.

À toda minha família, tias, tios, avós, primos, por sempre confiarem em mim.

Aos meus amigos da faculdade, por sempre me mostrarem que “relaxa, está bom” e que “poderia ser muito pior”. Levarei vocês por toda a vida.

Às minhas amigas Ana Paula, Mônica, Macielli, Dandara e até àquelas que desertaram o curso, Daniela e Bruna, por tornarem os anos de estudos muito mais divertidos.

Às minhas amigas, Sabrina, Sofia e Luiza, presentes que Deus colocou em minha vida, por todo o companheirismo durante a vida inteira, e por todas palavras de incentivo que me fizeram seguir em frente.

Ao Professor Armando, que desde o início da faculdade me deu oportunidades de trabalho no LARESO, e orientou meu trabalho. Ao Francisco e Elivete pelos ensinamentos e companheirismo nas “piores” análises. À todos os professores que se fizeram presente na minha vida acadêmica por passarem um pouco de seus conhecimentos para que possamos nos tornar colegas de profissão.

Muito obrigada a todos que, mesmo não estando citados aqui, tanto contribuíram para a conclusão desta etapa e para a Joana que sou hoje.

Encerro meus agradecimentos citando Winston Churchill: “Este não é o fim. Não é sequer o começo do fim. Mas é, talvez, o fim do começo.”



“Que os vossos esforços desafiem as  
impossibilidades, lembrai-vos de que as  
grandes coisas do homem foram

conquistadas do que parecia impossível.”  
(Charles Chaplin)

## RESUMO

O crescimento populacional exige cada vez mais que as cidades dotem-se de infraestrutura necessária para atender de forma digna e adequada seus cidadãos. Dessa forma, são crescentes as criações e instalações de estações de tratamento de esgotos (ETE). Estas geram um resíduo sólido denominado lodo de esgoto. O lodo, apesar de ser composto por alguns microorganismos patogênicos e metais pesados, é um resíduo rico em matéria orgânica e nutrientes. Atualmente, esse resíduo é depositado diretamente em aterros sanitários, acarretando uma alta despesa para a empresa responsável pelo tratamento, bem como contribuindo para a diminuição da vida útil do aterro. Dentro desse contexto, o presente trabalho possui o objetivo de caracterizar o lodo de esgoto gerado na ETE Insular - operada pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) no município de Florianópolis, Santa Catarina – e estudar a adição de cal ao resíduo, ou seja, higienizá-lo, para viabilizar sua utilização em camadas de coberturas, diárias e intermediárias, de aterros sanitários. O procedimento metodológico deu-se pela adição de diferentes porcentagens de cal (15%, 30% e 45%) à massa de lodo e monitoramento de alguns parâmetros dessas amostras criadas, em dois ciclos, cada um com 90 dias de duração. O objetivo foi atingir um lodo padrão Classe B estabelecido pela Resolução CONAMA nº 375/06. Verificou-se, por intermédio das análises realizadas, que, tratando-se apenas do critério de adição de cal o lodo, as amostras enquadraram-se dentro dos requisitos necessários e atingiram o padrão Classe B. Porém, é válido ressaltar que para a aplicação do lodo em camadas de cobertura de aterros sanitários, além de necessária a higienização do mesmo, é imprescindível a realização de outras análises, como estudo de viabilidade econômica e análises geotécnicas das misturas geradas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lodo de esgoto, Cal, estufa agrícola, leitões de secagem, camadas de cobertura de aterros sanitários.



## ABSTRACT

Increasing population growth requires proper infrastructure development in cities so that to provide life quality to its citizens. Thus, Wastewater Treatment Plants (WWTP) installations have increasingly been implemented. The treatment generates a solid residue known as sewage sludge. Despite of being composed by several pathogenic microorganisms and heavy metals, the sludge is rich in organic matter and nutrients. Currently, this residue is directly deposited in sanitary landfills, resulting in high costs to the company responsible for the processing, as well as contributing in reducing the lifetime of the landfill. In this context, the present work has the objective to characterize the sewage sludge generated in ETE Insular - operated by Companhia Catarinense de Águas e Saneamento Company of Water and Sanitation Catarina (CASAN) in Florianopolis, Santa Catarina - and study the addition of lime to the residue, to allow its use as daily or intermediate covering material in landfills. The methodological procedure consisted in adding different percentages of lime (15%, 30% and 45%) to the sludge and monitoring some parameters of the resulting samples in two cycles of 90 day duration each. The aim was to achieve a Class B sludge standard established by CONAMA Resolution nº 375/06. It was found through the analyses, that concerning only the criterion of the addition of lime in sludge, the samples were able to reach Class B quality. However, for sludge application in coating layers of landfill, apart from the addition of lime, it is essential to carry out further analysis, such as economic feasibility study and geotechnical analysis of mixtures generated.

**KEYWORDS:** Sewage Sludge, Lime, Greenhouse, drying beds, Cover layer of sanitary landfill.





## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Etapas de Tratamento de Lodo .....	34
<b>Figura 2:</b> Principais processos de estabilização de lodo de esgoto. ....	35
<b>Figura 3:</b> Exemplo de estufa agrícola.....	40
<b>Figura 4:</b> Etapas de implantação de um aterro sanitário .....	46
<b>Figura 5:</b> Estrutura de um aterro sanitário.....	49
<b>Figura 6:</b> (a) Descarga na frente de serviço; (b) e (c) Espalhamento de compactação dos resíduos em rampa 3:1, indicando o sentido do avanço da rampa; (d) Cobertura periódica dos resíduos compactados. ....	51
<b>Figura 7:</b> Composição da Camada de Cobertura Final. ....	53
<b>Figura 8:</b> (a) Descarregamento do lodo de esgoto na área desejada; (b) Mistura do lodo com aditivo em área designada; (c) Aplicação da mistura em cobertura de aterro. ....	56
<b>Figura 9:</b> Fluxograma da metodologia. ....	61
<b>Figura 10:</b> Esquema da etapa 2 - Higienização e secagem em estufa. .	65
<b>Figura 11:</b> Argamassadeira com lodo e cal antes da mistura. ....	67
<b>Figura 12:</b> Estufa agrícola. ....	68
<b>Figura 13:</b> Baias para secagem das misturas de lodo e cal.....	68
<b>Figura 14:</b> Caracterização Básica - pH .....	71
<b>Figura 15:</b> Caracterização Básica - Umidade e SV/ST .....	72
<b>Figura 16:</b> Mês Novembro - Temperatura .....	75
<b>Figura 17:</b> Mês Julho - Temperatura.....	76
<b>Figura 18:</b> Monitoramento umidade - Ciclo 1.....	77
<b>Figura 19:</b> Monitoramento umidade - Ciclo 2.....	77
<b>Figura 20:</b> Monitoramento pH - Ciclo 1 .....	79
<b>Figura 21:</b> Monitoramento pH - Ciclo 2 .....	79
<b>Figura 22:</b> Monitoramento ST - Ciclo 1.....	80
<b>Figura 23:</b> Monitoramento ST - Ciclo 2.....	80
<b>Figura 24:</b> Monitoramento SV/ST - Ciclo 1 .....	81
<b>Figura 25:</b> Monitoramento SV/ST - Ciclo 2 .....	81
<b>Figura 26:</b> Monitoramento <i>E. Coli</i> - Ciclo 1.....	83
<b>Figura 27:</b> Monitoramento <i>E. Coli</i> - Ciclo 2.....	84



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Relação entre teor de sólidos e umidade do lodo. ....	32
<b>Tabela 2:</b> Tecnologias de estabilização e métodos de disposição final.	36
<b>Tabela 3:</b> Classes de lodo de esgoto e requisitos do CONAMA .....	43
<b>Tabela 4:</b> Concentrações máximas de substâncias inorgânicas segundo CONAMA. ....	44
<b>Tabela 5:</b> Materiais típicos utilizados em camada de cobertura final...	54
<b>Tabela 6:</b> Parâmetros analisados e metodologias aplicadas. ....	63
<b>Tabela 7:</b> Classes de lodo de esgoto ou produto derivado - Agentes patogênicos.....	64
<b>Tabela 8:</b> Parâmetros de análise. ....	69
<b>Tabela 9:</b> Caracterização detalhada do lodo in natura.....	73
<b>Tabela 10:</b> Temperatura das misturas.....	74
<b>Tabela 11:</b> Relação entre dias (t) e altura (h) de lodo na baía de secagem para atingir umidade igual a 50%. ....	78
<b>Tabela 12:</b> Análise Completa - Ciclo 1 .....	84
<b>Tabela 13:</b> Resultados iniciais e finais - Ciclo 1 e 2. ....	86



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
2	OBJETIVOS.....	28
2.1	Objetivo Geral.....	28
2.2	Objetivos Específicos.....	28
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	30
3.1	LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO.....	30
3.1.1	Características do Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto.....	31
3.1.2	Principais contaminantes do lodo de esgoto .....	32
3.1.3	Tratamento do lodo de esgoto .....	33
3.1.4	Higienização e secagem do lodo em estufa agrícola.....	39
3.1.5	Eficiência da Higienização relacionada à temperatura.....	41
3.1.6	Disposição Final do Lodo de Esgoto .....	41
3.1.7	Aspectos Legais .....	42
3.2	ATERRO SANITÁRIO .....	44
3.2.1	Lixiviado de Aterro Sanitário.....	47
3.2.2	Camadas de cobertura de Aterro Sanitário.....	48
3.3	UTILIZAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMO CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO.....	54
3.3.1	Estudos realizados com lodo de esgoto tratado com cal para camada de cobertura de aterro.....	57
4	METODOLOGIA .....	59
4.1	DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM ESTUDO .....	59

4.1.1	Sistema de Tratamento da ETE Insular.....	59
4.1.2	Parte Experimental.....	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	71
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO .....	71
5.1.1	Caracterização Básica .....	71
5.1.2	Caracterização Detalhada.....	72
5.2	ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DO LODO DE ESGOTO E SECAGEM EM ESTUFA AGRÍCOLA .....	74
5.2.1	Descrição do Processo Realizado de Estabilização Alcalina do Lodo de Esgoto.....	74
5.2.2	Secagem do Lodo de Esgoto em Estufa Agrícola .....	75
5.2.3	Monitoramento da Secagem do Lodo Caleado em Estufa Agrícola.....	76
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	88
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	90

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional traz à tona uma questão que tem se tornado pauta de muitas discussões: os resíduos sólidos. Estes, quando coletados e tratados de forma inadequada, provocam efeitos negativos diretos e indiretos na saúde da população e contribuem para a degradação do ambiente. A desatenção à infraestrutura ambiental aliada a um alto crescimento das cidades tem contribuído para o aumento dos problemas ambientais. Projetos e estudos têm sido implantados em todo o mundo para expor a importância da consciência ambiental e como esta pode ser inserida dentro da cultura das populações.

A sociedade tem exigido melhores condições do ambiente, repercutindo então em um acréscimo na demanda do saneamento, fazendo com que as empresas públicas e privadas responsáveis pelo tratamento de esgoto adotem políticas ambientais mais avançadas e eficientes. Portanto, são crescentes as instalações de Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs). Este tratamento gera um resíduo sólido, que varia segundo o tipo de esgoto e o sistema de tratamento adotado, chamado lodo de esgoto (ANDREOLI, 2001).

O lodo geralmente apresenta-se em quantidades e qualidades variáveis. Este é rico em nutrientes e matéria orgânica, porém verifica-se também a presença de componentes indesejáveis, como microorganismos patogênicos e metais pesados. Esses componentes podem provocar impactos ambientais negativos que possivelmente anulariam os benefícios gerados com a coleta e o tratamento do esgoto (LIMA, 2010).

Em vários países foram realizados levantamentos e constatou-se que o volume de lodo produzido em uma ETE representa aproximadamente de 1% a 2% do volume de esgoto tratado, porém seu tratamento e disposição final chega a atingir cerca de 30% a 50% do custo operacional da ETE (ANDREOLI, 2001).

A destinação final do lodo varia, principalmente, de acordo com os recursos técnicos disponíveis no local. Geralmente a disposição mais comum do lodo é improdutiva, este é disposto em aterros sanitários, superficialmente no solo ou incinerado (COSTA, 2012). Entretanto, este cenário vem mudando, e o desenvolvimento de novas pesquisas valorizando a reutilização do lodo de esgoto tem ganhado espaço. Uma das possibilidades de reutilização do lodo de esgoto dá-se pela mistura do mesmo com solo para aplicação em camada de cobertura de aterro sanitário. A reutilização do lodo dessa forma gera alguns benefícios ao

aterro: acelera a decomposição dos resíduos aterrados, melhora a qualidade do lixiviado, aumenta a produção de metano (situação interessante para aterros que comercializam crédito de carbono ou geração de energia) e fornece nutrientes necessários para o crescimento da vegetação de cobertura, evitando erosão e geração de lixiviado (GRIFFIN *et al.*, 1998; RHEW; BARLAZ, 1995 *apud* PIMENTEL, 2012).

O emprego do lodo de esgoto em coberturas de aterros já é uma atividade recorrente em vários países: Estados Unidos, Canadá, Itália, Noruega, China, Austrália e África do Sul, e é adotado principalmente quando o biossólido não consegue atingir qualidade suficiente para usos mais nobres, como na agricultura, por exemplo (LeBLANC; MATTHEWS; RICHARD, 2008 *apud* PIMENTEL, 2012).

Jazidas de solo são exploradas para suprir a demanda das camadas de coberturas intermediárias e finais dos aterros sanitários, acarretando a utilização de um bem não renovável e gerando um passivo ambiental. Quando se aplica a técnica da reutilização do lodo de esgoto em camadas de cobertura de aterros sanitários, há um ganho na parte ambiental, uma vez que as jazidas de solo, um recurso natural não renovável, estarão sendo preservadas, bem como na parte econômica, pois a empresa geradora do lodo evita o gasto com a disposição do material no aterro.

Para diminuir os efeitos nocivos à saúde, o lodo pode passar por um processo complementar de estabilização, denominado higienização. O objetivo principal do processo é eliminar ou reduzir significativamente a densidade de microorganismos patogênicos, tornando o produto final biologicamente seguro para diferentes aplicações desejadas (PASSAMANI *et al.*, 2002).

Nesse contexto está inserido o conteúdo a ser tratado e desenvolvido no presente trabalho. A fim de aprimorar os estudos na área de reaproveitamento do lodo de esgoto, a Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN) em parceria com a Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e com o Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos (LARESO), pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), desenvolveu um abrangente projeto de pesquisas que se trata de *Estudos sobre Gerenciamentos de Lodos Produzidos na Estação de Tratamento de Esgotos Insular*.

Dentro deste abrangente projeto, encontra-se este trabalho de conclusão de curso, que visa à análise da utilização do lodo de esgoto estabilizado e higienizado para camada de cobertura de aterro sanitário.

## **2 OBJETIVOS**

Inserido no contexto explicitado na introdução deste trabalho, a principal pergunta referente a esta pesquisa é: É viável a reutilização do lodo de esgoto, após sua higienização, como camada de cobertura de aterros sanitários?

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar a higienização do lodo de esgoto para a aplicação em camada de cobertura de aterro sanitário.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Definir o percentual de adição de cal mais satisfatório para a estabilização e higienização alcalina do lodo de esgoto em estufa agrícola.
- Avaliar a influência da temperatura na higienização do lodo de esgoto.
- Verificar o atendimento dos padrões das legislações ambientais vigentes relativas à higienização e uso do lodo.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é apresentar um levantamento de bibliografias para servir como base de estruturação do presente trabalho, conferindo validação acadêmica aos resultados encontrados. São descritas algumas considerações sobre lodo de esgoto, higienização do lodo de esgoto e estufa agrícola para secagem do lodo.

#### 3.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Quando em quantidade adequada, a própria natureza possui a capacidade de decompor a matéria orgânica presente nos rios, lagos e mar. Porém, quando se tratam de efluentes, essa concentração é muito superior à capacidade de assimilação do meio ambiente, exigindo que seja realizado um tratamento eficaz para a remoção dessa matéria antes que o efluente seja despejado em corpos d'água.

As estações de tratamento de esgotos (ETEs) são unidades operacionais, que através de processos físicos, químicos ou biológicos, removem as cargas poluentes do efluente, devolvendo as águas servidas em conformidade com os padrões exigidos pela legislação ambiental para os corpos hídricos.

De acordo com Lima (2010), os subprodutos sólidos geralmente gerados com o processo de tratamento físico-químico e biológico de esgotos são: sólidos grosseiros e a areia (retidos na etapa preliminar, comum a todos os sistemas), a espuma (caracterizada por materiais flutuantes como graxa, óleos e gorduras), o lodo primário (sólidos sedimentáveis oriundos da etapa de decantação primária), o lodo biológico ou secundário (proveniente de decantadores secundários) e o lodo químico (produzido em estações que possuem processo físico-químico). Apesar da maior parte do lodo ser constituída de água, considera-se este produto em fase sólida para ser diferenciado do tratamento da fase líquida do esgoto (PIMENTEL, 2012).

Muitas vezes, os projetos de estação de tratamento de esgotos ignoram a forma de destino final do lodo de esgoto, subproduto de maior volume em massa gerado no tratamento, que acaba sendo gerenciado, de forma inadequada, com altos custos financeiros e ambientais (PROSAB, 2001; TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003).

### 3.1.1 Características do Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto

As características químicas, físicas e microbiológicas do lodo são variáveis, uma vez que dependem da sua origem (efluente doméstico ou industrial), da operação e manutenção da estação e do sistema de tratamento adotado.

De maneira geral, o lodo de estação de tratamento de esgoto pode ser caracterizado como um material bastante rico em matéria orgânica, com alto teor de umidade e alta concentração de nitrogênio e outros minerais (PRIM, 2011).

É possível caracterizar seis tipos de lodos:

a) *Lodo primário*: Oriundo das estações que possuem tratamento primário e é composto por sólidos sedimentáveis (SS) do esgoto bruto. Podem exalar forte odor, principalmente quando retido elevado período de tempo nos decantadores primários (VON SPERLING, 2001);

b) *Lodo secundário/biológico*: É proveniente de todos os processos de tratamento biológico e pode ser classificado de três formas, conforme o tratamento adotado.

1. Lodo biológico aeróbio (não estabilizado): Pode ser proveniente de tratamento por lodo ativado convencional ou por reatores aeróbios com biofilmes com alta carga. Esse lodo compreende a biomassa de microorganismos aeróbios gerada às custas da remoção da matéria orgânica dos esgotos. Estes sólidos não se encontram estabilizados (VON SPERLING, 2001).
2. Lodo biológico aeróbio (estabilizado): É originado através do sistema de tratamento de lodos ativados com aeração prolongada ou por reatores aeróbios com biofilmes de baixa carga. O lodo é principalmente composto por microorganismos aeróbios que se multiplicam às custas da matéria orgânica do esgoto bruto, porém a disponibilidade de alimento é menor, ficando retido por um período maior de tempo e resultando num lodo com maior teor de sólidos inorgânicos, dessa forma não é necessária qualquer etapa posterior de digestão (VON SPERLING, 2001)
3. Lodo biológico anaeróbio (estabilizado): Proveniente de lagoas de estabilização e reatores anaeróbios. Há um longo período de retenção da biomassa anaeróbia para a facilitação da digestão do próprio material celular, por isso não é

necessário uma digestão posterior a esta etapa (VON SPERLING, 2001).

- c) *Lodo químico*: É resultado do tratamento em decantadores primários com precipitação química ou de lodos ativados com precipitação química de fósforo. É usualmente resultante de precipitação química com sais metálicos ou cal (VON SPERLING, 2001).
- d) *Lodo misto*: Lodo resultante da mistura do lodo primário com o lodo secundário (ou biológico) para posterior tratamento em conjunto (VON SPERLING, 2001).

A umidade do lodo implica diretamente nas propriedades mecânicas do mesmo. Essas propriedades influenciam no tipo de manuseio a ser aplicado no lodo e na sua disposição final. Segundo Van Hendeel e Lettinga (1994 *apud* VON SPERLING, 2001), a relação entre a umidade e as propriedades mecânicas dá-se da seguinte forma (tabela 1):

**Tabela 1:** Relação entre teor de sólidos e umidade do lodo.

<i>Teor de sólidos secos (%)</i>	<i>Umidade (%)</i>	<i>Consistência do Lodo</i>
0 a 25	75 a 100	Lodo fluido
25 a 35	65 a 75	Torta semi-sólida
35 a 60	40 a 65	Sólido duro
60 a 85	15 a 40	Lodo em grânulos
85 a 100	0 a 15	Lodo desintegrado em pó fino

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2001).

Da mesma maneira que o lodo de estação de tratamento de esgoto possui alguns componentes que lhe atribuem boas características, como alguns componentes minerais e orgânicos, existem outros que atribuem características negativas do ponto de vista sanitário e ambiental, denominados, pelo ramo, de poluentes ou contaminantes.

### 3.1.2 Principais contaminantes do lodo de esgoto

O lodo de esgoto pode apresentar componentes indesejáveis e prejudiciais à fauna e a flora, bem como à saúde humana. A presença de agentes patogênicos no esgoto é inevitável, e varia de acordo com os hábitos e saúde da população atendida pelo sistema de esgotamento

sanitário, de tal forma que uma população mais saudável produzirá um esgoto com menor concentração de patógenos do que outra população mais doente (PIMENTEL, 2012).

Os componentes indesejáveis contidos no lodo podem ser genericamente enquadrados em três grupos: Metais pesados, poluentes orgânicos variados e microorganismos patogênicos.

Os elementos contaminantes podem ser separados por dois grupos: contaminantes químicos e contaminantes biológicos (BETTIOL; CAMARGO, 2000).

Em muitas cidades brasileiras, o esgoto industrial é despejado na rede coletora de esgotos domésticos, o que aumenta a probabilidade da presença de metais pesados no efluente.

Os contaminantes químicos se apresentam como o maior grupo, podendo apresentar-se na forma de compostos inorgânicos (metais pesados) ou orgânicos. No Brasil, as análises desses compostos não fazem parte da rotina de monitoramento, ressaltando que a NBR 9.800, referente a critérios para lançamentos de efluentes líquidos industriais no sistema de coletor público de esgoto sanitário, exige apenas a garantia da segurança e bom funcionamento da rede coletora e do sistema de tratamento de esgoto, não levando em conta a qualidade do lodo produzido.

A minimização desses poluentes pode ser feita pela implantação de novos procedimentos no processo industrial ou com pré-tratamento antes do lançamento do efluente no sistema de esgotamento sanitário (PIMENTEL, 2012).

Tratando-se de um resíduo do tratamento de esgoto sanitário proveniente da atividade humana, diversos patógenos podem ser encontrados no lodo, dentre esses, destacam-se cinco grupos: helmintos, protozoários, fungos, vírus e bactérias. A origem dos patogênicos podem ter procedência humana, animal (muitas vezes dejetos de cães e gatos são eliminados através da rede de esgoto), ou pela presença de roedores na rede de esgoto (PRIM, 2011; VON SPERLING, 2001).

Segundo Von Sperling (2001), a população de patógenos varia de acordo com as condições socioeconômicas da população, condições sanitárias, região geográfica, presença de indústrias agroalimentares e, principalmente, ao tipo de tratamento que o lodo foi submetido.

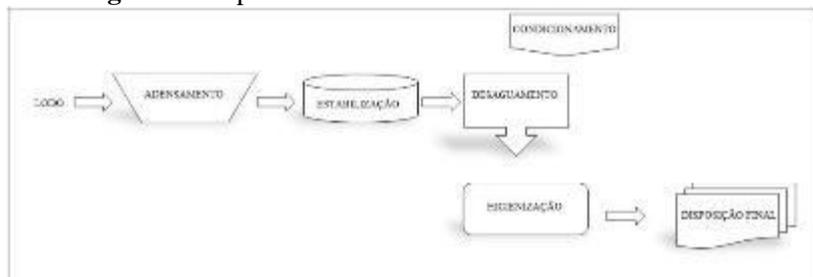
### **3.1.3 Tratamento do lodo de esgoto**

Principalmente, o que define as etapas específicas de tratamento são as características e a destinação final do lodo. As principais e mais

comuns etapas do gerenciamento do lodo, segundo Lima (2010) e Von Sperling (2001), são:

- Adensamento: Dá-se pela remoção da umidade, por consequência obtém-se uma redução de volume;
- Estabilização: Ocorre a remoção da matéria orgânica – redução dos sólidos voláteis;
- Condicionamento: É a etapa de preparação para a desidratação;
- Desaguamento: Etapa destinada à remoção de umidade – e, novamente, redução do volume;
- Higienização: Remoção de organismos patogênicos;
- Disposição final: Destinação dada aos subprodutos do tratamento.

**Figura 1:** Etapas de Tratamento de Lodo



Fonte: Adaptado de Lima (2010)

O adensamento e o desaguamento são fases que removem a umidade e reduzem o volume, fazendo com que o lodo tenha um comportamento mais parecido com o de um sólido, e gerando uma significativa redução de custos com transporte e destinação final.

As etapas de redução da umidade de lodo podem ser realizadas por processos físicos ou mecânicos, sendo os principais: Adensamento por gravidade, adensamento por flotação, centrífugas, leitos de secagem, prensas desaguadoras, filtros prensa (COSTA, 2012).

Dependendo do destino final adotado para o lodo de esgoto, ele precisará ou não passar pelas etapas de estabilização e higienização, estas garantem a estabilidade do lodo com redução de maus odores e patógenos, conseqüente redução de vetores e de elementos tóxicos de origem orgânica ou mineral.

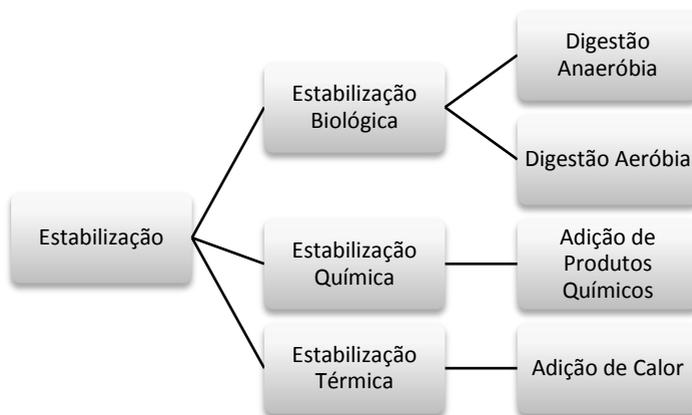
### 3.1.3.1 Estabilização de Lodo de Esgoto

O processo de estabilização tem como principal objetivo melhorar o lodo em dois aspectos principais: reduzir o odor e eliminar o conteúdo de patógenos (ANDREOLI, 2001).

O grau de estabilização do lodo ao deixar um sistema de tratamento depende da tecnologia de tratamento aplicada. As tecnologias mais recentes que utilizam reatores anaeróbios de fluxo ascendente tipo UASB (*upflow anaerobic sludge blanket*), retém o lodo no reator por volta de 2 a 3 meses, realizando dessa maneira a estabilização (ANDREOLI, 2001).

Os processos de estabilização podem ser divididos em: estabilização biológica, química e térmica (figura 2). Na primeira são utilizadas bactérias específicas na estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica, na segunda há a adição de produto químico para promover a oxidação química da matéria orgânica, e por fim, a térmica é obtida com ação do calor sobre a fração volátil do lodo (US EPA, 2003 *apud* LIMA, 2010).

**Figura 2:** Principais processos de estabilização de lodo de esgoto.



Fonte: Adaptado de Von Sperling (2001)

O procedimento mais comum dos três citados acima é a estabilização biológica, podendo ocorrer por processos biológicos de digestão anaeróbia ou aeróbia, em condições ambientais favoráveis (BOROWSKI; SZOPA, 2007). O lodo é considerado digerido quando

passa por redução de 40% ou mais de sólidos voláteis (SV) em biodigestores anaeróbios ou aeróbios e conseqüentemente não possui odor ofensivo (FERNANDES, 1999).

Segundo Von Sperling (2001) as principais tecnologias de estabilização de lodo e métodos de disposição final estão contidos na tabela a seguir.

**Tabela 2:** Tecnologias de estabilização e métodos de disposição final.

<i>Processo de Tratamento</i>	<i>Uso ou método de disposição final</i>
<b>Digestão anaeróbia/aeróbia</b>	Produz biossólido apto para ser utilizado com restrições na agricultura, como condicionador de solo e fertilizante orgânico. Necessita de pós-tratamento por higienização para seu uso irrestrito na agricultura.
<b>Tratamento químico (alcalinização)</b>	Utilizado na agricultura ou na cobertura diária de aterro sanitário.
<b>Compostagem</b>	Produto tipo terra vegetal apropriado para utilização em viveiros, horticultura e paisagismo. Adotado após o desaguamento do lodo.
<b>Secagem térmica</b>	Produto com elevado teor de sólidos, significativa concentração de nitrogênio e livre de patógenos. Indicado para uso irrestrito na agricultura.

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2001).

### 3.1.3.2 Higienização do Lodo de Esgoto

Os processos de estabilização reduzem significativamente os níveis de patogenicidade do lodo, porém muitos parasitas intestinais e seus ovos não são destruídos apenas nesse processo, sendo necessária então uma etapa de higienização (VON SPERLING, 2001). O processo de higienização busca reduzir a patogenicidade a níveis que não venham a causar riscos à saúde da população, aos trabalhadores que irão manusear o material, bem como reduzir danos ao meio ambiente, de acordo com as exigências sanitárias para cada uso a ser dado ao lodo de esgoto (PINTO, 2001).

Os principais mecanismos adotados para a higienização do lodo de esgoto são:

- Via térmica: Ocorre a elevação da temperatura acima de 50 graus Celsius, por tempo suficiente para redução de microorganismos patogênicos.
- Via biológica: Dá-se pela inativação de patogênicos por metabolismo de minhocas em condições específicas (minhocultura ou compostagem). Porém, para Pinto (2001), a via biológica ainda carece de maiores experiências e de dados mais consistentes para garantir melhores condições de reprodutibilidade e aceitação científica.
- Via Radiação: Realizado com a inativação de patogênicos através da emissão de raios Beta e Gama e também pela radiação solar, alterando as estruturas coloidais das células dos microorganismos.
- Via química: São utilizados produtos alcalinizantes com intuito de elevar o pH do lodo a níveis que inviabilizem as condições de sobrevivência dos microorganismos.

A adição de produtos alcalinos possui efeito estabilizante na massa de lodo. A cal virgem (CaO), por ser um produto barato e eficiente devido a seu poder calorífico e alta capacidade de destruição de patógenos, é um dos produtos mais utilizados no saneamento. Ela eleva o pH nos digestores, remove o fósforo nos tratamentos avançados de efluentes, condiciona o lodo para o desaguamento mecânico e o estabiliza quimicamente (ANDREOLI, 2001; EPA, 2000).

A cal virgem é o produto mais indicado quando aplicado em lodos já na fase sólida, devido à sua capacidade de reagir com a umidade e liberar calor (VON SPERLING, 2001). As dosagens de CaO entre 30% a 50% da massa seca de lodo são capazes de alcançar as características necessárias para a produção de biossólido com concentração de microorganismos patogênicos abaixo dos limites de detecção (OORSCHOT et al., 2000; ANDREOLI et al., 1999; EPA, 1992 *apud* VON SPERLING, 2001).

A desinfecção do lodo no processo alcalino é possível basicamente devido a três fatores:

- a) Pela elevação da temperatura em função da reação exotérmica entre CaO e a água (processo denominado de extinção da cal virgem): a reação exotérmica entre o óxido de cálcio com a água que pode elevar a temperatura a 50 graus

Celsius ou mais, ocorrendo inativação de ovos de vermes e agentes patogênicos resistentes (ANDREOLI *et al.*, 2001; TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003);

- b) Pelo aumento do pH, devido a formação de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), produto da hidratação da cal virgem. Quando atinge valores próximos a 12, é criado um ambiente impróprio para os microorganismos patogênicos, pois alteram seu protoplasma celular de forma letal. A caleação ainda reduz a exalação de odores e fixa os metais pesados (ANDREOLI *et al.*, 2001; FERNANDES *et al.*, 2001);
- c) Pela ação da amônia que será formada a partir do nitrogênio do lodo em condições de temperatura e pH elevados (ANDREOLI *et al.*, 2001). Esse processo é chamado “stripping” da amônia, que dá-se pela transferência da amônia na fase líquida (íon amônio –  $\text{NH}_4^+$ ) para fase gasosa (amônia livre –  $\text{NH}_3^+$ ) (PIMENTEL, 2012), ou seja, a volatilização da mesma.

Segundo Fernandes e Souza (2001), uma pesquisa realizada pelo Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB) comentou sobre a eficiência da caleação como um método de desinfecção do lodo, onde se testaram doses de 30%, 40% e 50% de cal em relação ao peso seco do lodo. Os resultados obtidos indicam que a estabilização e a higienização com cal são bastante satisfatórios na eliminação de patógenos e indicadores, atendendo a regra de que, quanto maior a porcentagem de cal adicionada, maior a desinfecção na massa de lodo.

Outro fator relevante para a higienização é o tempo de contato da cal com o lodo, uma vez que o efeito desinfectante da cal não é imediato, tendo também influencia no dimensionamento das instalações, uma vez feita a mistura, esta precisa ser estocada (FEDRIZZI, 2012). Segundo Fernandes e Souza (2001) o tempo necessário para que a cal aja de maneira satisfatória e eficiente na massa de lodo é de três meses.

É importante ressaltar que lodos com baixa umidade resultam em uma pequena variação de temperatura ao ser misturado com cal virgem, dessa maneira, recomenda-se que a aplicação da cal na massa de lodo seja feita quando a umidade deste esteja no mínimo na faixa de 65% a 75%, permitindo uma mistura adequada (VON SPERLING, 2001).

O lodo estabilizado com cal pode ser usado em diversos casos: paisagismo, agricultura, recuperação de áreas degradadas e como material de cobertura de aterros, sendo neste último caso, misturado

com solo a fim de atingir uma consistência adequada de material de cobertura de aterros (EPA, 2000).

Os estudos realizados por Prim (2011), com uma adição de 15% de cal virgem e armazenamento da mistura com o lodo em estufa agrícola, demonstraram resultados satisfatórios e eficiência da técnica para o tratamento do resíduo.

### **3.1.4 Higienização e secagem do lodo em estufa agrícola**

Dentre as formas de secagem e higienização do lodo de esgoto, destaca-se a utilização de estufas plásticas, denominadas tecnicamente como estufas agrícolas, muito eficientes principalmente em climas quentes e subtropicais, como no sul do Brasil.

Os principais benefícios dos processos térmicos são: redução significativa do volume de lodo, preservação de suas propriedades agrícolas, redução no custo de transporte e estocagem, e um produto final praticamente livre de patógenos (FERNANDES e SOUZA, 2001). Nesse processo, a cobertura plástica tem a finalidade de proteger o lodo de chuvas e geadas ocorridas em climas frios, e maximizar a energia solar recebida (ANDREOLI *et al.*, 2001; LETTINGA, 1994).

Segundo Pinto (2001), na fase inicial do tratamento térmico, que geralmente ocorre com a presença de leitos de secagem, é de extrema importância que o lodo esteja estabilizado e desaguado, atingindo uma concentração de sólidos entre 30% e 35%, a fim de uma redução de custos de seu tratamento posterior. Conforme Yager e O'Brien (1983 *apud* COMPARINI, 2001), a eliminação de organismos patogênicos é obtida com o teor de umidade menor que 10%, ou seja, um teor de 90% de sólidos totais (ST).

O Brasil ainda encontra-se obsoleto quando se trata de pesquisas nesta área. Andreoli, Ferreira e Chernicharo (2003), desenvolveram no Brasil um estudo no qual incorporaram no processo natural de desaguamento de lodo por leito de secagem, uma cobertura plástica (tecnicamente conhecida como estufa agrícola), com o principal objetivo de impedir o contato da chuva com o lodo e assim acelerar o processo de secagem do mesmo. Associada a essa técnica, utilizaram tubulações de cobre situadas no fundo do leito de secagem com circulação de óleo aquecido por biogás proveniente de reator. Apesar de um acréscimo artificial de calor no sistema, a estufa possibilitou a otimização do leito de secagem com a aceleração da perda de umidade.

Outra pesquisa realizada no ramo foi feita por Comparini (2001), onde o mesmo pretendeu reduzir a densidade de microorganismos no

lodo com a utilização de uma estufa agrícola para a secagem e higienização do material disposto. Seus resultados foram positivos, e o autor constatou uma boa eficiência do método que adotou.

Com algumas constatações positivas da técnica em literaturas, Prim (2011) e Pimentel (2012) adotaram a estufa agrícola como processo de secagem e higienização do lodo em seus experimentos contribuindo para um avanço na pesquisa científica nessa área.

Há algumas empresas que já desenvolvem estufas plásticas para esse fim. A PARKSON CORPORATION desenvolveu um sistema denominado THERMO-SYSTEM Solar Dryer. Este sistema recebe o lodo líquido, denso ou desaguado com teor de sólidos próximo a 75%. O sistema é composto basicamente por uma estufa com material translúcido, com sensores que monitoram as condições atmosféricas, sistema de ventilação, equipamento que distribui e revolve o lodo e um microprocessador que controla o processo de secagem. A única fonte de energia utilizada é a radiação solar. No final do processo, o lodo biologicamente estabilizado, obtém um teor de sólidos acima de 90% e volume significativamente inferior ao inicial, reduzindo dessa forma, os custos com a disposição final (LIMA, 2010).

Outras duas empresas que também desenvolvem esse tipo de estufa são a HUBER TECHNOLOGY e a VAN DER HOEVEN. Estas realizam secagem e higienização do lodo proveniente de estação de tratamento de esgoto e estação de tratamento de água em pequenas e grandes escalas (COSTA, 2012).

**Figura 3:** Exemplo de estufa agrícola



Fonte: VAN DER HOEVEN (2013)

### **3.1.5 Eficiência da Higienização relacionada à temperatura**

Processos de tratamento que tenham efeito de temperatura associado com tempo são os melhores no combate a agentes patogênicos, sendo que existe uma relação direta entre o aumento de temperatura e a diminuição do tempo de sobrevivência dos patógenos (BETTIOL *et al.*, 2000).

A elevação da temperatura acima de 55°C é ideal para um satisfatório teor de eliminação de patógenos, sendo que acima de 60°C a eliminação de coliformes fecais é seis vezes mais rápida que quando a 55°C. A temperatura de 60°C alia boa eficiência de eliminação de patógenos à alta taxa de biodegradação da matéria orgânica (PIANA, 2009).

### **3.1.6 Disposição Final do Lodo de Esgoto**

Uma das preocupações expressadas pela Agenda 21 é a disposição final do lodo de esgoto. Na gestão adequada de resíduos existem alguns princípios a serem seguidos, são eles: para todo tipo de resíduos devem ser buscados meios de minimização da produção, maximização do reuso e da reciclagem, e a promoção da disposição e tratamento ambientalmente adequados (VON SPERLING, 2001).

A disposição final do lodo de esgoto deve ser parte do planejamento e do projeto de uma unidade de estação de tratamento de esgotos. Para a garantia da melhor forma de disposição, a definição do sistema a ser adotado deverá levar em consideração os aspectos técnicos, econômicos, operacionais, ambientais, e principalmente as características do lodo a ser tratado.

Nesse contexto, é imprescindível que exista uma avaliação de riscos e impactos ambientais antes de adotar qualquer técnica. Dessa forma há uma garantia da saúde humana e do meio ambiente, procurando-se alternativas de controle para os impactos negativos e valorizando os positivos.

Segundo Prim (2011), como destino final para o lodo de estação de tratamento de esgotos, tem-se: aplicação em áreas degradadas, disposição em aterros sanitários, incineração, disposição no mar e aplicação na agricultura e em florestas.

Como citado, o lodo pode ser eliminado através de incineração industrial, processo que consiste na secagem e combustão do material. Além da emissão de gases e material particulado, o processo ocasiona a liberação de uma quantidade de cinzas consideradas relativamente

inertes. Como vantagens do processo pode-se citar a redução do volume e redução ou destruição dos compostos orgânicos tóxicos (EPA, 1986).

Para a aplicação do lodo no solo, deve-se considerar uma série de fatores como: tipo de solo, tipo de cultura agrícola, metais pesados no solo e no lodo, contaminantes químicos presentes no lodo, contaminantes biológicos presentes no lodo (PRIM, 2010).

A disposição de lodo em aterros sanitários é adotada quando a qualidade do lodo ou a viabilidade econômica não é compatível com a reciclagem.

É de grande importância ressaltar que toda empresa geradora de resíduo deve ser responsável pelo seu destino, sendo este seguro e adequado. Logo, é de responsabilidade das empresas de saneamento, o gerenciamento do lodo gerado.

### **3.1.7 Aspectos Legais**

Considerando o crescimento da população e a constante instalação de estações de tratamento de esgotos, é de fundamental importância o cumprimento das exigências legais. Há um consenso mundial quanto ao princípio do poluído pagador, ou seja, o produtor do resíduo é o responsável pela sua destinação final, de maneira adequada.

A NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação, define como *resíduos sólidos*:

“Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Enquadra-se então, dessa forma, o lodo de esgoto como um resíduo sólido. Segundo a mesma norma, o lodo é classificado como

resíduo classe IIA – não inerte - possuem propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Apesar da periculosidade sanitária do lodo de esgoto, a norma define que os resíduos gerados nas estações de tratamento de esgotos domésticos não são classificados segundo os critérios de patogenicidade (PIMENTEL, 2012).

A Resolução nº375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de agosto de 2006 (BRASIL, 2006) define critérios e procedimentos para o uso agrícola do lodo e dá outras providências. No escopo geral da resolução, o lodo é tratado como um produto que, em virtude dos seus riscos, deve ser gerenciado adequadamente para que seus constituintes atendam a padrões específicos, a fim de que esses riscos sejam minimizados e até mesmo eliminados (LIMA, 2010 *apud* FEDRIZZI, 2012). A resolução ainda enquadra o lodo de esgoto ou produto derivado em duas classes distintas: Classe A ou Classe B, sendo que a principal característica que diferencia as classes é a concentração de patógenos presentes no biossólido (conforme tabela 3). Para cada classe de lodo, há restritos tipos de cultura permitido para a aplicação desse lodo de esgoto.

No processo de estabilização alcalina, a mesma resolução exige que a quantidade de produto alcalinizante adicionada, deve ser suficiente para elevar o pH a valores próximos a 12 por um período mínimo de 2 horas, e manter acima de 11,5 por mais 22 horas, sem que seja feita uma aplicação adicional de cal. Enquadra-se então o lodo de esgoto como Classe B. Para que se eleve a qualidade do lodo pra Classe A, é necessário que este passe por mais uma redução de patógenos.

**Tabela 3:** Classes de lodo de esgoto e requisitos do CONAMA

Patógeno	Tipo de lodo de Esgoto	
	Classe A	Classe B
<b>Coliformes Termotolerantes</b>	<10 <sup>3</sup> NMP / g de ST	<10 <sup>6</sup> NMP / g de ST
<b>Ovos viáveis de helmintos</b>	<0,25 ovo / g de ST	<10 ovos / g de ST
<b>Salmonella sp.</b>	Ausência em 10g de ST	-
<b>Vírus Entéricos</b>	<0,25 UFP ou UFF / g de ST	-

Nota: NMP: Número Mais Provável; ST: Sólidos Totais; UFF: Unidade Formadora de Foco; UFP: Unidade Formadora de Placa.

**Fonte:** Brasil, 2006.

Ainda, para o lodo ser considerado estável e ser próprio para uso agrônômico, é necessário que o teor de sólidos voláteis com relação aos sólidos totais (SV/ST) seja menor que 0,7. Porém, para utilização do lodo em cobertura de aterros sanitários, é necessário como máximo desejável um percentual de 40% de SV/ST, conforme valores típicos citados por literaturas (GRANATO, 2011; SIMMONS, 2003; PIETZ *et al.*, 1996 *apud* PIMENTEL, 2012). Da mesma maneira, para o uso do lodo na agricultura ser permitido, os limites máximos de substâncias inorgânicas potencialmente tóxicas, definidos também pelo CONAMA, devem ser respeitados e seguem na tabela 4.

**Tabela 4:** Concentrações máximas de substâncias inorgânicas segundo CONAMA.

<b>Parâmetros Inorgânicos</b>	<b>Concentração máxima permitida (mg/Kg, base seca)</b>
<b>Arsênio</b>	41
<b>Bário</b>	1.300
<b>Cádmio</b>	39
<b>Chumbo</b>	300
<b>Cobre</b>	1.500
<b>Cromo</b>	1.000
<b>Mercúrio</b>	17
<b>Molibdênio</b>	50
<b>Níquel</b>	420
<b>Selênio</b>	100
<b>Zinco</b>	280

**Fonte:** Adaptado de Brasil (2006).

### 3.2 ATERRO SANITÁRIO

Os resíduos sólidos são gerados de forma contínua e sua disposição de maneira adequada torna-se necessária. Dessa maneira, os aterros tem sido o método mais aceito em termos econômicos e ambientais (TCHOBANOGLIOUS, THEISEN; VIGIL, 1993 *apud* FERREIRA, 2010).

Segundo Prim (2011), o aterro é uma forma de disposição dos resíduos no solo que, fundamentada em critérios de energia e normas operacionais específicas, garante um confinamento seguro em termos de poluição ambiental e proteção à saúde pública.

Conder (2010) cita que o aterro sanitário trata-se de um equipamento projetado para receber os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) produzidos pelos habitantes de uma cidade, com base em estudos de engenharia, para reduzir ao máximo os impactos causados ao meio ambiente (CONDER, 2010).

A NBR 8419 de 1992 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1992, p.1) define aterro sanitário de RSU como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma cama de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores se necessário.

Ainda, segundo a mesma norma, os resíduos sólido urbanos são os “resíduos sólidos gerados em um aglomerado urbano, excetuando os resíduos industriais perigosos<sup>1</sup>, hospitalares sépticos<sup>2</sup> e de aeroportos e portos<sup>3</sup>”.

O aterro sanitário deve possuir uma localização adequada, elaboração de projeto criteriosa, implantação de infraestrutura de apoio, implantação de obras de controle de poluição e adoção de regras operacionais específicas.

---

<sup>1</sup>Todos os resíduos sólido, semi-sólidos e os líquidos não passíveis de tratamento convencional, resultantes da atividade industrial e do tratamento de seus efluentes que, por suas características, apresentam periculosidade efetiva ou potencial à saúde humana ou ao meio ambiente, requerendo cuidados especiais quanto ao acondicionamento, coleta, transporte, armazenamento, tratamento e disposição (ABNT, 1992, p.2).

<sup>2</sup>Resíduos sólidos de serviços de saúde que requerem condições especiais quanto ao acondicionamento, coleta, transporte e destinação final por apresentarem periculosidade real ou potencial à saúde humana (ABNT 1992, p.2).

<sup>3</sup>Resíduo proveniente de navios e portos (ABNT 1992, p.2).

Atualmente, o aterro é o método de tratamento de resíduos sólidos urbanos de menor custo e maior utilização (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2003).

Consideram-se passíveis de disposição em aterros os resíduos cujos líquidos lixiviados gerados possam sofrer alguma forma de atenuação no solo, podendo ser por processos de degradação e/ou retenção (filtração, troca iônica, etc) (PIMENTEL, 2012).

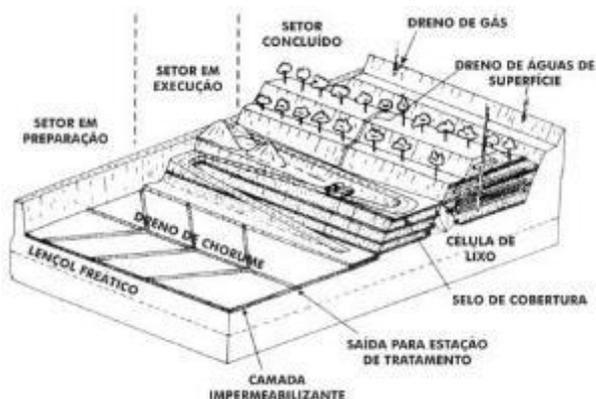
É imprescindível que o aterro seja constituído, entre outras estruturas, por dispositivos de sistemas de drenagem superficial, sistema de drenagem e tratamento de lixiviados, impermeabilização superior e inferior e tratamento de gases (PESSIN *et al.*, 2002). A figura 4 representa as etapas de implantação de um aterro sanitário.

A digestão anaeróbia da matéria aterrada gera o biogás, este varia conforme a composição dos resíduos que foram aterrados bem como o estágio de decomposição dos mesmos. Um dos gases gerados em grande quantidade nos aterros sanitários, e responsável também pelo agravamento do efeito estufa, é o gás metano ( $\text{CH}_4$ ), inodoro, insípido e não tóxico, porém com um alto poder calorífico e possuindo um potencial 21 vezes maior de aprisionamento de calor na atmosfera que o dióxido de

Carbono ( $\text{CO}_2$ ) (MCT, 2010). Devido à outros gases causarem mausodores e com o objetivo de evitar a migração pelos poros do solo, é necessário que o aterro possua uma canalização de drenagem para o biogás. O controle desses gases é fundamental para garantir a estabilidade física dos maciços de resíduos e impedir a formação de bolsões em seu interior, evitando explosões (GOMES; MARTINS, 2003 *apud* PIMENTEL, 2012).

A queima dos gases é uma prática habitual nos aterros e visa a redução do metano em dióxido de carbono na eliminação na atmosfera.

**Figura 4:** Etapas de implantação de um aterro sanitário



Fonte: D’Almeida e Vilhena (2000)

### 3.2.1 Lixiviado de Aterro Sanitário

O processo de percolação em aterros sanitários é definido como a quantidade de água que excede a capacidade de retenção da umidade do material alterado representado pelos resíduos sólidos (TCHOBANOGLIOUS *et al.* 1993, *apud* CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2003).

Ainda segundo Castilhos Juniores *et al.* (2003), os lixiviados podem ser provenientes de três fontes principais: da umidade natural dos resíduos sólidos, da água de constituição dos diferentes materiais que sobram durante o processo de decomposição e do líquido proveniente de materiais orgânicos pelas bactérias.

As características físicas químicas e biológicas dos lixiviados, variam com o tipo de resíduo aterrado, grau de decomposição do mesmo, clima e estação do ano, idade do aterro, a profundidade na qual o resíduo encontra-se aterrado, entre outros (JUCÁ *et al.*, 2006).

O aterro possui, praticamente, 5 fases de decomposição dos resíduos sólidos (POHLAND; HARPER, 1985 *apud* CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2003; SOUTO, 2009; REICHERT, 2007):

*Fase I – Ajustamento inicial:* Os resíduos são aterrados na célula acontecendo o acúmulo inicial de umidade. Predomina a degradação aeróbia, pois há oxigênio suficiente disponível logo após a deposição do resíduo. A duração dessa fase é curta, por que depois de aterrado o suprimento de oxigênio fica limitado.

*Fase II – Transição:* Com a ultrapassagem da capacidade de retenção de água na massa dos resíduos, formam-se os lixiviados. É onde acontece a transição da fase aeróbia para a anaeróbia. O pH varia em torno de 5,5 a 6,5.

*Fase III – Formação ácida:* Os microorganismos consomem o nitrogênio e fósforo presentes e a influência do hidrogênio é detectada na natureza dos produtos intermediários em formação. A concentração de íons metálicos aumentam no lixiviado devido às condições ácidas do meio, o pH fica em torno de 4 ou um pouco menos.

*Fase IV – Fermentação metanogênica:* Os produtos que apareceram na fase ácida são transformados em metano e dióxido de carbono em excesso. Há um aumento da produção de biogás e redução da carga orgânica do lixiviado. O pH se eleva e fica entre 7 e 8.

*Fase V – Maturação Final:* Ocorre a estabilização dos componentes orgânicos. A atividade biológica se reduz consideravelmente devido a diminuição de substratos e nutrientes disponíveis. O oxigênio reaparece. Moléculas orgânicas dificilmente biodegradáveis se transformam em moléculas como ácidos húmicos.

É necessário que se conheça o volume de lixiviado gerado em aterros sanitários, para que dessa maneira sejam definidos processos de implantação de sistemas de tratamento dos lixiviados e destinação, sistema de coleta e remoção dos mesmos. Os volumes são determinados conforme a precipitação na área do aterro, da evapotranspiração, da declividade e tipo de solo de cobertura utilizado no aterro, da capacidade da camada superficial de reter água, da capacidade de absorção em água dos resíduos sólidos dispostos em aterro sanitário (ROCCA et al., 1993).

Os aterros sanitários podem ser classificados como novos, médios ou velhos, onde possuem, respectivamente, menos que 5 anos, de 5 a 10 anos e 12 anos ou mais (REICHERT, 2007). Os lixiviados “novos” diferenciam-se dos “velhos” pela alta concentração de matéria orgânica facilmente biodegradável e pH ácido (SOUTO, 2009 *apud* MABOTE, 2012).

Segundo Gandola et al., (1995), os parâmetros mais importantes a serem analisados em lixiviados são: pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, relação DBO<sub>5</sub>/DQO, metais, nitrogênio e ácidos orgânicos.

### **3.2.2 Camadas de cobertura de Aterro Sanitário**

Dentre os procedimentos operacionais de um aterro sanitário, encontra-se a execução de camadas de coberturas intermediárias e finais.

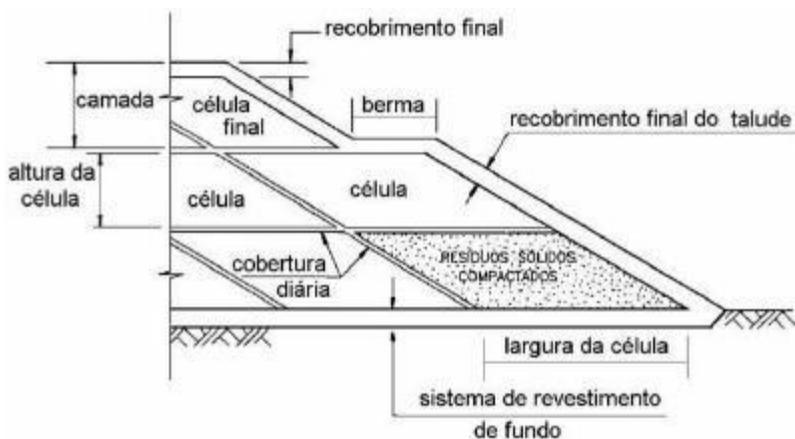
O sistema de cobertura tem, basicamente, a função de proteger a superfície das células de resíduos, minimizando os impactos ao meio ambiente e controlando infiltrações diminuindo a taxa de formação de percolados, prevenindo a migração de gás para fora do aterro, reduzindo a exalação de odores, eliminando a proliferação de vetores de doenças, bem como facilitando a recomposição da paisagem, tratando-se de cobertura final (MARINHO, 2006; CASTILHOS JUNIOR, 2006; REICHERT, 2007; PRIM, 2011).

As camadas devem também apresentar boa resistência física e mecânica, principalmente devido ao contato com as intempéries meteorológicas que podem vir a causar erosão (PRIM, 2011).

As camadas de cobertura executadas ao longo do processo de enchimento de um aterro são chamadas de cobertura diária ou intermediária, e as efetuadas na finalização do aterramento são denominadas camada de cobertura final (LANGE et al., 2006).

A estrutura das camadas de um aterro sanitário segue na figura 5.

**Figura 5:** Estrutura de um aterro sanitário.



Fonte: Reichert (2007)

### 3.2.2.1 Camada de cobertura diária e intermediária

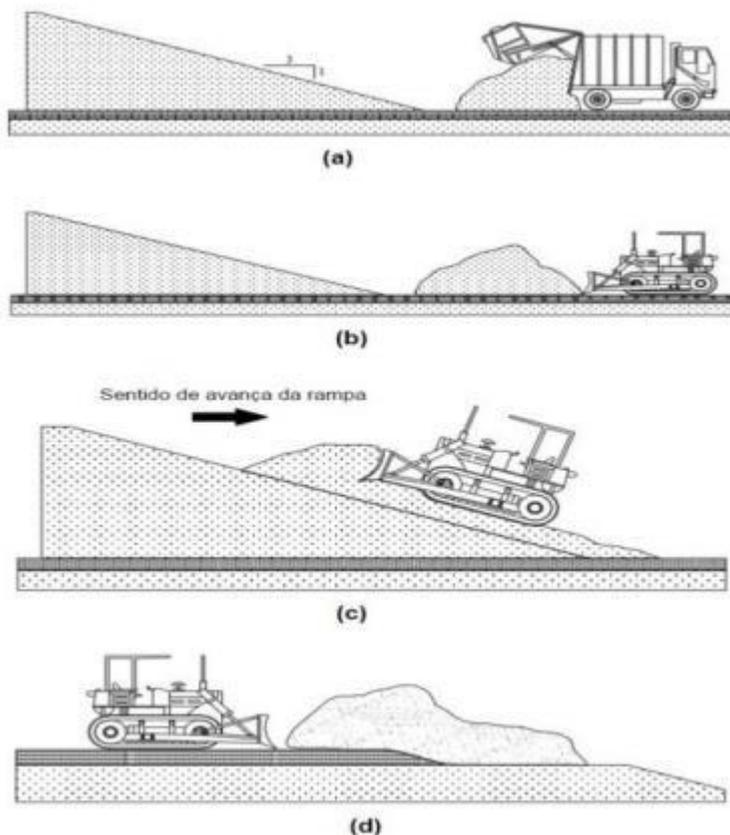
A cobertura diária é realizada ao final de cada jornada de trabalho ou de acordo com a necessidade local, e possui como principais funções (Mc BEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995): Diminuir a infiltração de água pluvial no maciço de resíduos; evitar a dispersão e o espalhamento dos resíduos pela ação dos ventos; ajudar a reduzir a emanação de odores; limitar o contato de aves e vetores de doenças com os resíduos;

permitir a operação e o acesso de veículos à frente de serviço; ajudar a prevenir incêndios e minimizar o impacto visual. Diferente da cobertura diária, a cobertura intermediária é necessária nos locais onde a superfície de disposição ficará inativa por mais tempo, aguardando, por exemplo, a conclusão de um patamar para início do seguinte (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2006).

O tipo do material de cobertura influencia de forma significativa no acúmulo de umidade. É importante que se conheça as propriedades do material devido à sua influência durante a operação do aterro (MAHLER, 2006 *apud* MABOTE, 2012). Em aterros sem recirculação do lixiviado, deverão ser aplicadas camadas intermediárias que permitem a entrada e o espalhamento do líquido percolado pela massa dos sólidos (MORAES; GOMES; BOFF, 2007). A compactação e o espalhamento do material geralmente são realizados com trator-deesteira (figura 6), porém em pequenos aterros utiliza-se retroescavadeira ou cobertura manual.

A perda de espaço devido ao recobrimento diário dos resíduos chega a ocupar até 20% do volume total do aterro, significando de 20% a 30% do custo da obra (CARVALHO, 1999 *apud* PIMENTEL, 2012).

**Figura 6:** (a) Descarga na frente de serviço; (b) e (c) Espalhamento e compactação dos resíduos em rampa 3:1, indicando o sentido do avanço da rampa; (d) Cobertura periódica dos resíduos compactados.



Fonte: Adaptado de Reichert (2007).

É de grande valia destacar a questão da origem do material das camadas de coberturas e os custos envolvidos com seu transporte e material. O ideal seria que o material de cobertura fosse obtido do próprio aterro sanitário, uma vez que o mesmo possui uma elevada demanda de material em sua vida útil. Entretanto, na maioria das vezes o material disponível na própria área do aterro não é suficiente, de modo que se torne necessário a alimentação por fontes externas, podendo ser

ou jazidas de solos, que são recursos não renováveis da natureza, ou materiais alternativos permitidos por legislação para aplicação em camadas de aterro.

Segundo Lange et al. (2006), os principais motivos para reutilização de um material alternativo em camadas de coberturas de aterros são:

- Aumento contínuo do incentivo da reciclagem dos materiais;
- Minimização dos impactos ambientais associados a esta prática;
- Busca por redução de custos com gerenciamento dos resíduos.

Como material alternativo de camada de cobertura pode-se utilizar o lodo de esgoto. Estes são utilizados quando estabilizados e possuem uma umidade menor que 50% (GRIFFIN *et al.*, 1998).

#### 3.2.2.2 Camada de Cobertura Final

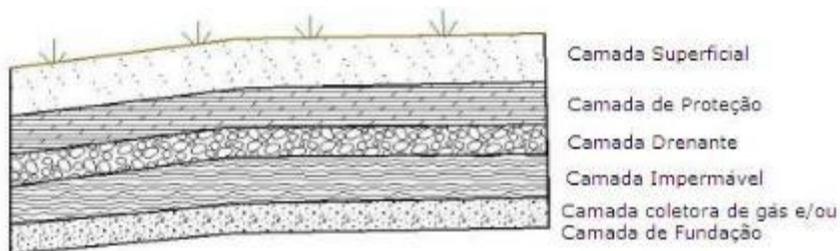
A camada de cobertura final possui como objetivo evitar a infiltração de águas pluviais, para impedir a geração de lixiviados, atração de vetores e saída de gases para a atmosfera, melhorar a drenagem superficial e oferecer suporte à revegetação (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2006; REICHERT, 2007). Devem possuir baixa permeabilidade à água e durabilidade ao longo do tempo, devido ao fato que ficam suscetíveis à intempéries, escavações por animais, erosão, recalques da massa de resíduos, etc (MARIANO, 2008; REICHERT 2006). Esta camada favorece também a recuperação final da área e o crescimento de vegetação (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2006).

É importante ressaltar que o coeficiente de permeabilidade da camada final deve ser inferior ao solo natural do aterro, ser suficientemente flexível, não estar sujeito à erosão e acomodar assentamento sem fratura pelos seguintes motivos: por ser suscetível a erosão, ao ressecamento da argila, à escavação por animais, à penetração de raízes e a grandes adensamentos diferenciais (REICHERT, 2006; QUISSINI, 2009 *apud* COSTA, 2012).

Geralmente a cobertura final possui uma inclinação que varia de 3% a 5% e uma espessura mínima de 60 centímetros (QASIM; CHIANG, 1994).

Os componentes da camada de cobertura final do aterro são demonstrados na figura 7.

**Figura 7:** Composição da Camada de Cobertura Final.



Fonte: LANGE *et al.*, 2006.

*Camada superficial:* Possui como função primária providenciar separação entre os componentes abaixo da cobertura e à superfície do ambiente. É composta por raízes de plantas que protegem o sistema de cobertura dos ventos, chuvas, evitando processos erosivos (MAGALHÃES, 2005). Deve ter pelo menos 15 centímetros e ser feita de solo fértil, onde se estabelecem gramas ou algumas plantas herbáceas com raízes rasas.

*Camada de proteção:* Esta é projetada com o intuito de proteger as camadas do sistema de cobertura que se encontram abaixo dela, armazenando a água que percola através da camada de superfície (PRIM, 2011). A espessura mínima dependerá de fatores específicos do local, relacionados com os possíveis problemas já citados que podem afetar a camada impermeável (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002).

*Camada Drenante:* Serve para remover a água que penetra no interior do sistema de cobertura, evitando pressões que causam a instabilidade dos taludes da camada de cobertura (MAGALHÃES, 2005). Segundo Koerner e Daniel (1997) a espessura mínima deve ser de 30cm com uma inclinação mínima de 3%. Deve ainda possuir uma condutividade hidráulica maior que  $1 \times 10^{-2}$  cm/s.

*Camada Impermeável:* Controla a entrada de líquidos e saída de gases. Maximiza a captação dos gases evitando o escapamento dos mesmos para a atmosfera (QUISSINI, 2009). Deve possuir um mínimo de 45 cm de espessura e alguns requisitos geotécnicos (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002).

*Camada coletora de gás e/ou Camada de Fundação:* Conduz os gases produzidos pela decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos para a atmosfera (LANGE *et al.*, 2006). Além disso, regulariza a superfície de suporte da camada impermeável.

Os materiais tipicamente usados nas camadas que compõem a camada de cobertura final do aterro estão apresentados na tabela 5.

**Tabela 5:** Materiais típicos utilizados em camada de cobertura final.

<b>Componentes</b>	<b>Tipo de Material Utilizado</b>
Camada superficial	Solo; blocos rochosos; camada geossintética de controle de erosão.
Camada de proteção	Solo; blocos rochosos; material residual recuperado ou reciclado.
Camada drenante	Areia ou cascalho; georrede ou geocompósitos
Camada impermeável	Argila compactada; geomembrana; argila geossintética; rejeitos.
Camada de fundação e/ou coletora de gás	Areia ou cascalho; georrede ou geotêxtil; solo; material residual recuperado ou reciclado.

Fonte: Adaptado de D'Almeida e Vilhena (2010).

Entretanto, segundo QUISSINI (2009), na prática pode ser construída de uma maneira mais simples que as composições acima citadas, podendo, muitas vezes, não possuir todas as camadas descritas.

A composição final, portanto, depende do tipo de aterro, de seu tamanho, do processo operacional adotado, das características locais e de materiais que são dispostos (COSTA, 2012).

### 3.3 UTILIZAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMO CAMADA DE COBERTURA DE ATERRO SANITÁRIO

Segundo Lima (2010), a disposição do lodo em aterro sanitário vem se mostrando cada vez mais impraticável devido, principalmente, a questões técnicas e operacionais. Por isso, surgem cada vez mais estudos de alternativas que possam minimizar a geração de resíduos sólidos e realizar o máximo possível de reciclagem dos mesmos, visando principalmente a redução da exploração de reservas naturais. Muitos desses estudos dizem respeito ao reaproveitamento do lodo de esgoto como camadas de cobertura de aterro.

As coberturas alternativas que podem ser utilizadas em aterros sanitários se diferenciam dos modelos convencionais por apresentarem novas opções de materiais, com um menor custo (PRIM, 2011). Outra variante é o número de camadas e suas espessuras, uma vez que pode existir diferença nas características de um material para outro.

O lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto já é empregado como camada de cobertura em alguns lugares do mundo como Estados Unidos, Canadá, Itália, Noruega, China, Austrália e África do sul (LEBLANC; MATTHEWS; RICHARD, 2008). Geralmente aplica-se esse material em camadas quando o biossólido não atinge qualidade suficiente para uso em agricultura. Além disso, é muito importante que se mantenha um leque de opções para a disposição final do lodo de esgoto para sua gestão estratégica e para a gestão de risco desta atividade.

O lodo pode ser utilizado tanto nas camadas diárias e intermediárias quanto nas camadas finais. Porém, quando utilizado na camada final de cobertura do aterro é necessário que seja misturado com solo, aparas de madeira, ou cinzas. A proporção da mistura é definida de acordo com a qualidade do solo e com os parâmetros geotécnicos e agrônômicos requisitados (GRIFFIN et al., 1998).

Hart *et al.* (1993) realizaram estudos onde testaram misturas de lodo higienizado com cal com diferentes percentuais de solos argilosos. Os resultados da pesquisa indicaram que o material misturado com o solo argiloso pode ter diversas finalidades, principalmente onde a baixa permeabilidade é requerida, podendo, dessa maneira, ser aplicado em camadas de cobertura diárias de aterros.

O uso do lodo de esgoto como camada de cobertura de aterro sanitário requer a realização de alguns processos imprescindíveis, como a redução da umidade e relação SV/ST. Segundo Pimentel (2012) a mistura a ser feita de lodo com solo, não só melhora as características geotécnicas do lodo, como também facilita sua trabalhabilidade pelos operadores do aterro.

A figura 8 demonstra a mistura do lodo com o aditivo na camada final de um aterro sanitário.

Alguns autores citam diversas vantagens do uso do lodo de esgoto como camada de cobertura de aterro sanitário (Mc BEAN et al., 1995; GRIFFIN et al., 1998; RHEW; BARLAZ, 1995):

- Capacidade de melhorar a qualidade do lixiviado;
- Reduz o potencial de contaminação do solo;

- Reduz a emissão de odores;
- Auxilia no controle de vetores;
- Aumenta a geração de metano, possibilitando dessa maneira a comercialização de créditos de carbono ou geração de energia;
- Aumento da decomposição dos resíduos.

**Figura 8:** (a) Descarregamento do lodo de esgoto na área desejada; (b) Mistura do lodo com aditivo em área designada; (c) Aplicação da mistura em cobertura de aterro.



Fonte: Reinhart *et al.* (2007) *apud* Pimentel (2012).

Segundo Salim (2011), coberturas de solo e lodo estabilizado com 30% de cal (em relação ao peso seco), na proporção de 1:1, possuem bom potencial de oxidar emissões fugitivas de metano que escapam pelas coberturas do aterro. Seus resultados demonstram que a taxa de oxidação máxima obtida pela mistura foi de 55,9 g/m<sup>2</sup>.d, enquanto a taxa de oxidação apenas do solo argiloso possui um valor

máximo de 19,83 g/m<sup>2</sup>.d, ou seja, a mistura alcança uma taxa de oxidação aproximadamente 2,8 vezes maior que o solo puro.

É importante ressaltar que no Brasil há uma carência referente à legislações aplicáveis para o uso de lodo em coberturas de aterros sanitários.

### **3.3.1 Estudos realizados com lodo de esgoto tratado com cal para camada de cobertura de aterro**

Em Greenville (Carolina do Sul – EUA), a cidade optou pela utilização de lodo de esgoto na cobertura diária, pois o material diminui a concentração de metais no lixiviado e reduz odor no aterro. No caso citado, o lodo foi misturado com o solo na proporção 1:1 e posteriormente adicionou-se também resíduos de poda e capina, mudando a proporção para 1:1:1 (PAPIN; WEST, 1999 *apud* PIMENTEL, 2012). Segundo Leffler et al. (2000), houveram problemas na emissão de amônia de biossólidos digeridos anaerobiamente e alcalinamente estabilizado em sua estocagem e durante o espalhamento nas coberturas do aterro.

Em um estudo feito por Jamal, Norieh e Farzadkia (2011) para comparar a estabilização aeróbia do lodo de esgoto com sua estabilização alcalina, concluiu-se que a estabilização alcalina de lodo é o melhor método tanto em questão higiênica quanto em questão financeira. Na pesquisa, após 30 dias da aplicação de 40% de cal em relação ao peso seco do lodo, produziu-se um biossólido com características satisfatórias para aplicação em camada de cobertura em aterro.

Outro experimento realizado na área foi feito por Rhew e Barlaz (1995). Os testes foram realizados em pequenos reatores que simulavam células de aterros. O experimento constituiu-se por 12 reatores preenchidos com 3,2 L de resíduos sólidos urbanos picotados e cobertos com uma camada de 0,8L. Totalizou-se 4 camadas distintas, ou seja, a cada 3 reatores era aplicado uma camada com característica individual. Dentre as 4 camadas: uma possuía 100% de solo, outra 100% lodo com cal, a terceira com 70% de lodo tratado com cal e 30% de solo, e a última com 40% de lodo tratado com cal e 60% de solo. A decomposição dos resíduos foi acelerada com a recirculação do lixiviado e um aquecimento de 40°C nos reatores. Constatou-se, ao fim do estudo, que o lodo tratado com cal acelera a decomposição dos resíduos e melhora a qualidade do lixiviado.

Prim (2011) também realizou estudo parecido, onde testou diferentes proporções de lodo (de tratamento de esgoto e água) com solo para aplicá-las em cobertura de aterro. Dentre as composições estudadas, a proporção 1:0,425:0,425:0,15 (sendo Solo: LETE: LETA: CaO) foi a constatada viável economicamente, ambientalmente e geotecnicamente.

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo descrever e detalhar a metodologia utilizada no presente trabalho para a incorporação de lodo de esgoto como camada de cobertura de aterro. A mesma foi dividida basicamente em duas principais etapas. A primeira etapa é composta pela caracterização (básica e detalhada) do lodo de esgoto a ser utilizado na pesquisa, e a segunda parte é composta pela higienização do lodo e secagem em estufa por 90 dias, com análise de viabilidade de aplicação do mesmo em camada de cobertura de aterro através dos resultados obtidos dos parâmetros de análise e legislação.

### 4.1 DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM ESTUDO

A Estação de Tratamento de Esgoto Insular situa-se na área central da cidade de Florianópolis (SC), no aterro da Baía Sul, próxima à ponte Pedro Ivo Campos. A ETE é operada e mantida pela Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN). Foi inaugurada no dia 3 de Outubro de 1997 e projetada inicialmente para atender uma população de 150.000 habitantes com uma vazão média de projeto de 248 litros por segundo.

As regiões atendidas atualmente pela ETE Insular abrangem o Centro, Costeira do Pirajubaé, Saco dos Limões, parte da Carvoeira, parte da Trindade, parte do Parque São Jorge, parte do Córrego Grande e Agronômica.

O volume de lodo gerado varia com a época do ano e o controle operacional do sistema.

Nos próximos tópicos serão explicitados e detalhados: o sistema de tratamento adotado na ETE insular, a caracterização do lodo gerado e o processo de higienização do lodo em questão.

#### 4.1.1 Sistema de Tratamento da ETE Insular

O sistema de tratamento do esgoto da estação Insular é o de lodos ativados com aeração prolongada e possui uma eficiência de aproximadamente 98% de remoção de DBO e 90% de remoção de coliformes (CASAN, 2013).

O sistema de tratamento da fase líquida compreende um pré-tratamento composto por gradeamento e um desarenador gravimétrico, seguido pelo tratamento secundário com as unidades de seletor biológico, câmara de desnitrificação, tanques de aeração, decantador secundário e desinfecção. Já a parte que trata a fase sólida é composto por adensadores de lodo e centrífuga.

Os sólidos grosseiros e a areia que são retirados na etapa do pré-tratamento são encaminhados diretamente para aterro sanitário. Já os sólidos formados no decantador secundário, conhecidos como lodo biológico, retornam ao tanque de aeração para inoculá-lo com microorganismos estabilizadores da matéria orgânica. Porém, parte desse lodo (a parcela excedente) é retirada para que se mantenha um equilíbrio no sistema e encaminhada para as unidades de adensamento e desidratação. Após o lodo passar por essas etapas é transformado em um torta de lodo com aproximadamente 13% de teor de sólidos, sendo então disposto em aterro (PIMENTEL, 2012).

#### **4.1.2 Parte Experimental**

A parte experimental do trabalho será desenvolvida em duas etapas. O objetivo principal é avaliar, através de análises laboratoriais, as características do lodo a ser utilizado na pesquisa, bem como o comportamento do mesmo com adição de cal e disposição para secagem em estufa agrícola. O fluxograma da metodologia pode ser verificado na figura 9.

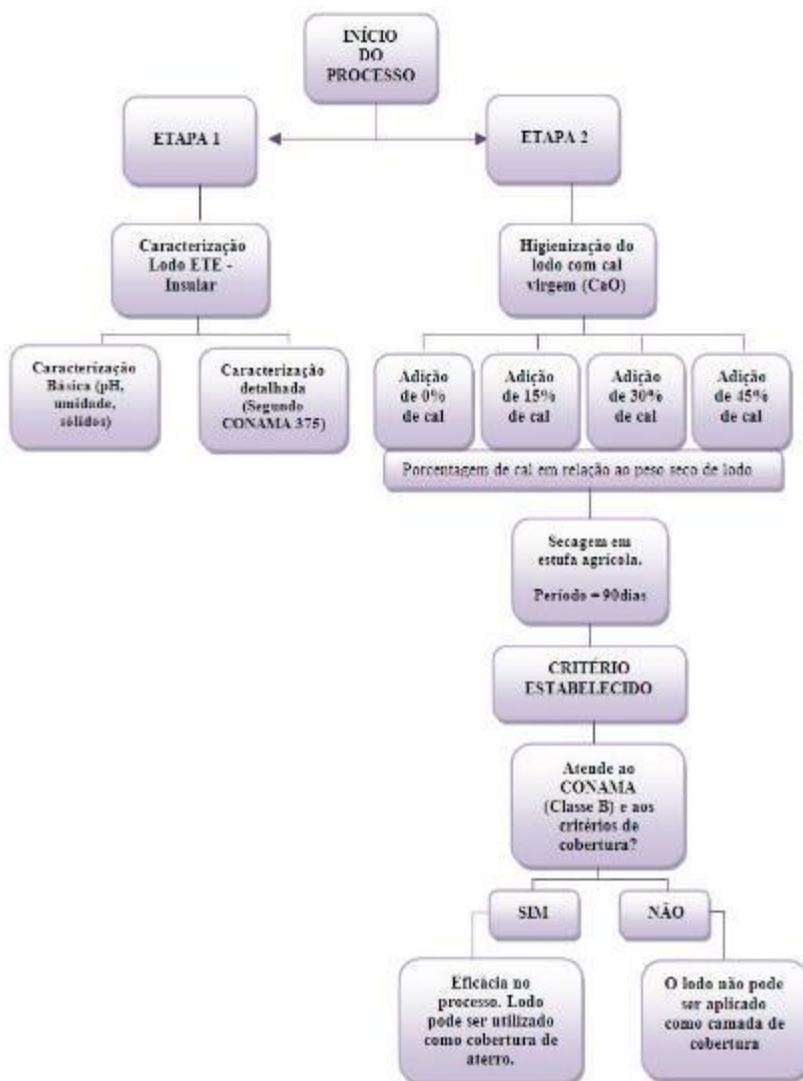
##### **4.1.2.1 Etapa 1**

A primeira etapa do estudo objetiva a caracterização do lodo de esgoto gerado na estação de tratamento de esgotos Insular.

A primeira caracterização realizada foi intitulada de *básica*, considerando alguns poucos parâmetros físicos, porém, a partir dela, verificou-se a variabilidade das propriedades do lodo ao longo do tempo.

A segunda caracterização foi nomeada de *detalhada*, onde foram analisados parâmetros físico-químicos e bacteriológicos. Para isso, tomou-se como base a Resolução CONAMA nº 375/06 que diz respeito ao uso do lodo na agricultura.

**Figura 9:** Fluxograma da metodologia.



Como no Brasil não existe nenhuma legislação que trate especificamente da utilização do lodo de esgoto na camada de cobertura de aterro, adotou-se como base a CONAMA n° 375, pelo fato de o lodo

exercer a função da camada de suporte vegetativa quando empregado em camadas finais, exercendo assim uma função agrônômica.

- Caracterização básica do lodo da ETE Insular

Nessa caracterização considerou-se apenas parâmetros básicos como pH, umidade e sólidos (totais, voláteis e fixos). O principal objetivo da caracterização básica foi verificar os principais parâmetros do lodo de uma forma representativa. As análises foram realizadas no Laboratório Integrado de Meio Ambiente, pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

- Caracterização detalhada do lodo da ETE Insular

Segundo a Resolução nº 375 do CONAMA, quando se trata de lodo de esgoto ou produto derivado digerido, para parâmetros inorgânicos, é necessário a coleta de quatro amostras compostas coletadas com defasagem mínima de 7 dias.

Obedecendo a defasagem de 7 dias, no presente estudo decidiu-se por coletas sazonais, uma a cada estação do ano, totalizando 4 amostras. Uma quinta coleta foi realizada a fim de fazer as análises microbiológicas do lodo.

Para a caracterização microbiológica e parasitológica do lodo, segundo a mesma resolução, seria necessária a coleta de 15 amostras em um período de 3 meses, porém, devido a indisponibilidade de tempo para todas as coletas, coletaram-se apenas 10 amostras nesse período.

As coletas realizadas na ETE foram ministradas por Francisco José Guedes Pimentel, Franciele Fedrizzi, Augusto Ehlers Souza e pela autora do presente trabalho. Estas foram feitas de maneira a fazer uma composição bem completa da amostra de lodo, retirando de partes distintas da caçamba pequenas amostras e misturando todas no final formando um todo representativo com aproximadamente 1 kg, este foi alocado em uma caixa de isopor com temperatura interna de 4°C para posterior envio para as entidades que realizaram as análises.

Os parâmetros físicos químicos e biológicos foram analisados pelos laboratórios da Universidade de Extremo Sul Catarinense (UNESC) situada em Criciúma e pela ECONSULTING Laboratório e Gestão Ambiental. Os parâmetros da caracterização físico-química e biológica encontram-se na tabela 6.

**Tabela 6:** Parâmetros analisados e metodologias aplicadas.

<b>Parâmetro Físico-Químico</b>	<b>Metodologia Utilizada</b>
pH em água 1:5	Potenciométrico*
pH em CaCl <sub>2</sub>	Potenciométrico*
Teor de Sólidos Totais	Gravimétrico*
Teor de Sólidos Fixos	Gravimétrico*
Teor de Sólidos Voláteis	Gravimétrico*
Carbono Orgânico Total	Oxidação – K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O*
Matéria orgânica	Oxidação – K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O*
Cálcio (Ca)	Espectrofotometria de Absorção Atômica*
Magnésio (Mg)	Espectrofotometria de Absorção Atômica*
Zinco (Zn)	Espectrofotometria de Absorção Atômica**
Ferro (Fe)	Espectrofotometria de Absorção Atômica**
Cobre (Cu)	Espectrofotometria de Absorção Atômica**
Bário (Ba)	Espectrofotometria de Absorção Atômica**
Níquel (Ni)	Espectrofotometria de Absorção Atômica**
Cádmio (Cd)	Espectrofotometria de Absorção Atômica**
Cromo (Cr)	Espectrofotometria de Absorção Atômica**
Selênio (Se)	Forno Grafite**
Molibdênio (Mo)	Forno Grafite**
Arsênio (As)	Forno Grafite**
Mercúrio (Hg)	Vapor Frio**
Umidade a 105 ± 5°C	Gravimétrico*
Densidade	Gravimétrico*
Nitrogênio Total	Kjeldahl titulométrico *
Nitrogênio Amoniacal	Kjeldahl titulométrico *
Teor de Cinzas a 850 °C	Gravimétrico*
Ortofosfato	Espectrofotométrico*
Coliformes Totais	Tubos Múltiplos (APHA, 2005)
<i>Escherichia Coli</i>	Tubos Múltiplos (APHA, 2005)
Ovos de Helmintos viáveis	Detecção, enumeração, viabilidade (EPA, 2003)

\*I.N. n° 28 de julho de 2007 (BRASIL, 2007); \*\*EPA 3050B - U.S.EPA (1996)

**Fonte:** Adaptado de Pimentel (2012)

## 4.1.2.2 Etapa 2

Segundo Fernandes (1999) o tratamento do lodo é fundamental para minimizar os riscos de contaminação pela presença de organismos patogênicos, reduzir os odores e promover a remoção da umidade.

Na etapa 2, foi definido o processo de higienização a ser utilizado no estudo. Adotou-se a aplicação de cal virgem (CaO) na massa do lodo e uma secagem posterior em estufa agrícola. Técnicas similares a essas foram desenvolvidas na pesquisa de Prim (2011) e Lima (2010).

O presente método apresenta grande vantagem, e a secagem e higienização do biossólido ocorrem basicamente por:

- Elevação da temperatura devido a reação exotérmica da cal com a água presente no biossólido;
- Aumento do pH a valores próximos a 12;
- Formação de amônia gasosa;
- Redução da umidade.

O ciclo de tratamento do lodo foi realizado em dois ciclos, ambos com a higienização alcalina do lodo seguido por secagem em estufa agrícola. O motivo de dois ciclos foi adquirir maior número de dados para análise, bem como verificar o comportamento dessa mistura em diferentes estações do ano. Segundo Prim (2011), o ideal para cada ciclo é um período de 90 dias, portanto, assim seguiu-se no presente trabalho.

De acordo com a Resolução nº 375 do CONAMA, existem duas classes de lodo ou produto derivado: Classe A ou B. A tabela 7 explicita a concentração de patógenos permitido para cada classe.

**Tabela 7:** Classes de lodo de esgoto ou produto derivado - Agentes patogênicos

Tipo de lodo ou produto derivado	Concentração de patógenos
Classe A	Coliformes Termotolerantes <math>10^3</math> NMP/g de ST; Ovos viáveis de helmintos <math>0,25</math> ovo/g de ST; Salmonella ausência em 10g de ST; Virus <math>0,25</math> UFP ou UFF/g de ST.
Classe B	Coliformes Termotolerantes <math>10^6</math> NMP/g de ST; Ovos viáveis de helmintos <math>10</math> ovos/g de ST.

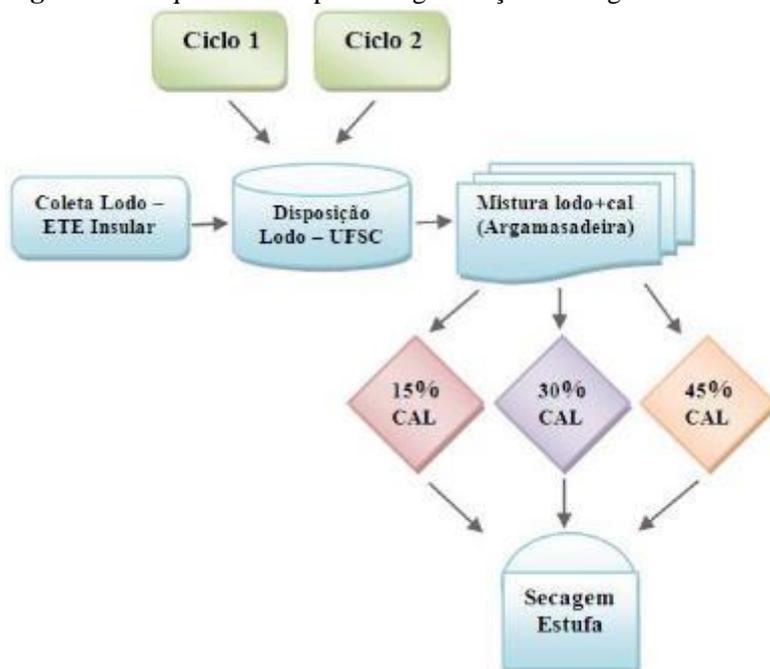
**Fonte:** Adaptado de BRASIL (2006).

Definiu-se como objetivo no presente estudo, obter um lodo de esgoto que se enquadre como Classe B segundo a CONAMA n° 375, higienizando o mesmo com cal virgem e encaminhando para posterior secagem em estufa. Definiu-se também como objetivo o enquadramento do lodo nos padrões de umidade e estabilidade requeridos em cobertura de aterros, ou seja, pelo menos 50% de ST (GRIFFIN et al., 1998) e um teor de SV/ST abaixo de 40% (GRANATO, 2011; SIMMONS, 2003; PIETZ et al., 1996).

Os percentuais de adição de cal indicados para higienização do lodo variam de 15% a 70% quando o objetivo é utilização agrícola (FERNANDES, 1999; VON SPERLING, 2001; LIMA, 2010). Então, a partir da bibliografia consultada, definiram-se os percentuais de cal virgem a serem aplicados na massa de lodo de esgoto, como explicado a seguir.

O processo deu-se basicamente da maneira explicitada na figura 10.

**Figura 10:** Esquema da etapa 2 - Higienização e secagem em estufa.



- Higienização com cal virgem (CaO)

No anexo 1 da Resolução nº 375 do CONAMA (BRASIL, 2006) constam os possíveis processos para a redução significativa de patógenos no lodo de esgoto. Quando o lodo for estabilizado, a porcentagem de cal adicionada em relação aos ST do lodo, deve ser tal que mantenha o pH da mistura igual a 12 por pelo menos duas horas e 11,5 por mais 22 horas, desta maneira monitorou-se no experimento.

Adicionou-se na massa de lodo, as porcentagens de 0% (controle/“branco”), 15%, 30% e 45% de cal. Feita a mistura em uma argamassadeira mecânica de eixo horizontal de 110L de volume (Figura 11), mediu-se a temperatura da mistura com um termômetro graduado de 0°C a 60°C. O pHmêtro utilizado para a medição do pH era digital.

Caso alguma das misturas não atingisse o requisito mínimo citado anteriormente, seria automaticamente descartada do processo e não seguiria para a secagem na estufa agrícola.

A cal virgem utilizada no processo possuía, segundo dados do fabricante, 55% de pureza e algumas outras características físico-químicas como: 35% de óxido de magnésio (MgO), 3% de sílica e resíduo insolúvel (SiO<sub>2</sub> + RI), 8,30% de carbonato residual, 6,50% de Anidrido Carbônico (CO<sub>2</sub>), 9,80% de perda ao fogo (PF), 3,30% de água combinada, 1,70% de granulometria #18 (1mm), 18,20% de granulometria #50 (0,30mm) e 0,60% de umidade.

Foi necessário definir um cálculo para obter um percentual de cal sensato para a adição na massa amostral de lodo. Neste cálculo considerou-se o grau de pureza, como segue em fórmula (Equação 1):

$$M_{cal} = \frac{[(M_{lodo} \times (1-h)) \times p]}{P} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

M<sub>cal</sub> = massa de cal impura a ser adicionada (kg);

M<sub>lodo</sub> = massa de lodo amostral (kg);

h = umidade (relação entre massa de água e massa total de lodo);

p = Percentual de cal em relação ao peso seco desejado;

P = Grau de pureza da cal (relação entre massa de CaO e a massa total de cal).

**Figura 11:** Argamassadeira com lodo e cal antes da mistura.



Além da argamassadeira utilizou-se para pesagem do lodo e cal uma balança com capacidade de 200kg.

Cada mistura ficou na argamassadeira por aproximadamente 10 minutos, tempo este considerado suficiente para criar uma mistura homogênea. Após esta etapa a mistura seguiu para os leitos de secagem em estufa agrícola.

- Secagem da mistura de lodo e cal em estufa agrícola

Para a secagem do lodo construiu-se uma estufa agrícola nas proximidades do laboratório de Hidráulica da UFSC com dimensões de 5,0 m de largura, 8,0 m de comprimento e 2,0 m de altura (Figura 12). Nas laterais da estufa foi fixada uma tela possibilitando a ventilação e evitando a atração de vetores. Externamente à tela, nas laterais da estufa, implantaram-se lonas translúcidas que ficavam enroladas e erguidas no momento do reviramento do lodo, e fechadas o resto do tempo. A cobertura foi revestida também com lona plástica translúcida, possibilitando a penetração da radiação solar e evitando a entrada de chuva.

**Figura 12:** Estufa agrícola.



A estufa foi dividida em 8 módulos, cada um de 2 m x 2 m, onde alocaram-se as baias de madeira revestidas com lona para a secagem da mistura (Figura 13).

**Figura 13:** Baias para secagem das misturas de lodo e cal.



O controle da temperatura interior e exterior da estufa foi realizado por meio de um sensor de temperatura, dotado de um *data logger*, da marca AKSO e com faixa de medição de -4°C a 85°C.

Durante os dois ciclos de estabilização realizados (o primeiro com início em Setembro de 2010, e o segundo em Março de 2011) não registrou-se a temperatura interior e exterior à estufa devido a problemas logísticos e de recebimento do aparelho. Porém a medição da temperatura foi realizada entre Julho e Dezembro e foi possível observar e entender o comportamento da temperatura no interior e exterior da estufa.

As alturas das baias de madeira variaram de 13 a 20 cm. As misturas eram revolvidas 3 vezes por semana, sendo que cada mistura (0% de cal, 15% de cal, 30% de cal e 45% de cal) possuía uma enxada própria para revolvimento, para, dessa forma, evitar contaminações.

Todas as misturas e o lodo *in natura* (0% de adição de cal), durante o período de secagem, foram submetidas a análises laboratoriais, realizadas no LARESO e no LIMA, ambos pertencentes ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

Na tabela 8 estão descritos os parâmetros analisados, metodologia aplicada, referência e a frequência das análises.

**Tabela 8:** Parâmetros de análise.

Parâmetro analisado	Metodologia Utilizada	Frequência de análise	Referência
<i>Escherichia Coli</i>	Colilert – 9223B	Quinzenal	APHA (2005)
Ovos viáveis de helmintos	Deteção, enumeração, viabilidade	Início e final de cada ciclo	EPA (2003)
Metais Pesados	Absorção Atômica	Início e final de cada ciclo	U.S.EPA (1996)
Sólidos Totais	Gravimétrico	Quinzenal	SANEPAR (2000)
Sólido Fixos	Gravimétrico	Quinzenal	SANEPAR (2000)
Sólidos Voláteis	Gravimétrico	Quinzenal	SANEPAR (2000)
pH	Potenciométrico	Semanal	SANEPAR (2000)
Umidade - 105 ± 5°C	Gravimétrico	Semanal	SANEPAR (2000)

No final de cada ciclo de 90 dias, realizaram-se as análises citadas anteriormente na tabela 6. Os resultados das análises foram comparados com as bibliografias estudadas e com a Resolução nº375 do CONAMA.

Todas as análises da tabela 8 foram realizadas em triplicata exceto ovos viáveis de helmintos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

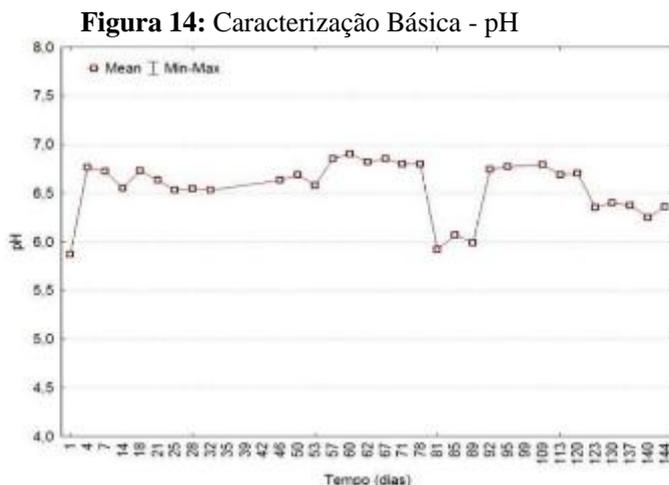
Neste capítulo serão apresentados os resultados bem como as discussões pertinentes às análises realizadas nas etapas de caleação e monitoramento do lodo de esgoto.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO

Na caracterização básica, o material utilizado foi o lodo adensado. E na caracterização detalhada o material utilizado foi o lodo de esgoto pós-prensa hidráulica, este utilizado em todas as misturas.

#### 5.1.1 Caracterização Básica

A caracterização básica do lodo de esgoto *in natura* englobou apenas medições de pH, umidade e relação SV/ST. Os resultados das análises de pH e umidade foram obtidos pelas análises realizadas no laboratório LARESO, e os resultados de SV/ST foram retirados mestrado de Leite (2011). As análises de pH e umidade iniciaram-se no dia 03 de Setembro de 2010, e SV/ST dia 19 de agosto de 2010.

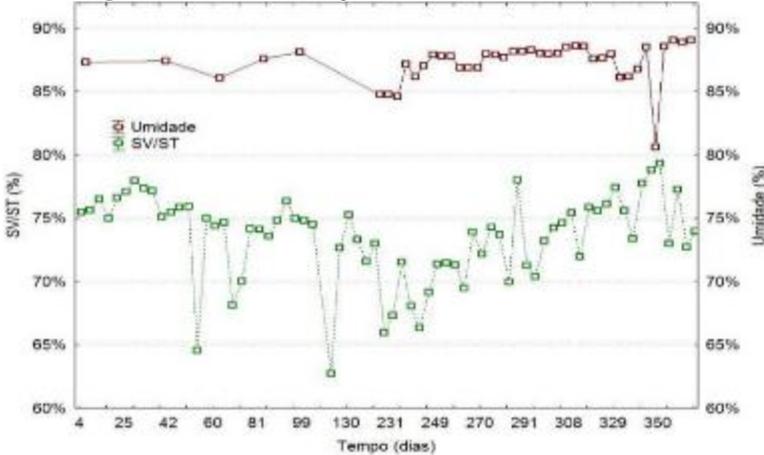


Fonte: Pimentel (2012)

A média geral do pH obtida do lodo *in natura* no período de 144 dias foi de 6,54. Esse valor se enquadra dentro de algumas literaturas

que tratam sobre lodo de esgoto (COMPARINI, 2011; LEITE 2011; LIMA, 2010).

**Figura 15:** Caracterização Básica - Umidade e SV/ST



Fonte: Pimentel (2012)

Segundo a Resolução CONAMA 375/06, para o lodo estar estabilizado ele precisa obter uma relação SV/ST < 70%. Também, segundo Von Sperling (2001), em estações de tratamento de esgotos onde o processo é feito através de lodos ativados com aeração prolongada, o lodo deveria sair com um teor de SV/ST entre 65% e 70%. A média geral obtida no monitoramento de SV/ST foi de 73,5%, ou seja, o lodo não se encontrava estabilizado. Como na ETE estudada esse teor sai acima de 70%, é necessário um pós tratamento para que este lodo se estabilize.

Para umidade em lodos ativados com aeração prolongada, Von Sperling (2001) define um intervalo entre 70% e 80%. A umidade média do lodo *in natura* no experimento foi de 87,3%, um pouco superior ao definido pela literatura.

### 5.1.2 Caracterização Detalhada

Para a caracterização detalhada do lodo *in natura* foram coletadas 5 amostras ao longo do ano para a análise dos parâmetros físico-químicos e 10 amostras para a análise dos parâmetros biológicos, exceto

*Salmonella sp.* e ovos viáveis de helmintos. Todos os parâmetros analisados e as médias dos resultados seguem na tabela 9.

Todos os resultados obtidos, exceto SV e *Escherichia Coli*, estão dentro dos parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 375/06. Os resultados de SV e *E. Coli* ultrapassaram os limites estabelecidos pela legislação devido ao fato explicitado no item 5.1.1, onde o lodo não se encontra estabilizado.

Como não há contribuição de efluentes industriais no efluente tratado pela ETE em estudo, as concentrações de metais pesados ficaram abaixo do limite estabelecido pela Resolução nº 375 do CONAMA.

**Tabela 9:** Caracterização detalhada do lodo *in natura*.

Parâmetros	Média	Desvio Padrão	CONAMA 375 – Classe B
pH em água 1:5	6,65	0,35	
pH em CaCl <sub>2</sub>	6,67	0,38	-
Sólidos Totais (%) (m/m)	12,70	0,50	-
Sólidos Fixos (%ST) (m/m)	23,52	2,94	-
Sólidos Voláteis (%ST) (m/m)	76,48	2,94	70
Carbono Orgânico (%) (m/m)	37,03	2,49	-
Matéria Orgânica (%) (m/m)	63,71	4,27	-
Cinzas a 550°C (m/m)	30,68	0,00	-
Nitrogênio Total (%) (m/m)	6,00	0,70	-
Nitrogênio Amoniacal (%) (m/m)	1,33	0,23	-
Fósforo (P) Total (%) (m/m)	2,28	0,34	-
Fósforo (PO <sub>4</sub> ) (%) (m/m)	2,48	1,21	-
Alumínio (Al) (%)	1,00	0,32	-
Cálcio (Ca) (%)	0,99	0,11	-
Magnésio (mg) (%)	0,56	0,08	-
Arsênio (As) (mg/kg)	3,73	1,96	41
Bário (Ba) (mg/kg)	147,75	21,63	1300
Merúrio (Hg) (mg/kg)	0,95	0,45	17
Molibdênio (Mo) (mg/kg)	13,80	10,80	50
Níquel (Ni) (mg/kg)	14,25	0,88	420
Selênio (Se) (mg/kg)	2,70	2,40	100
Ferro (Fe) (mg/kg)	12850,0	1350,0	-
Cobre (Cu) (mg/kg)	198,00	21,00	1500
Zinco (Zn) (mg/kg)	521,8	26,56	2800
Cádmio (Cd) (mg/kg)	0,70	0,13	39
Chumbo (Pb) (mg/kg)	22,64	2,49	300
Cromo (Cr) (mg/kg)	37,52	20,19	1000
Umidade a 65 ± 5°C (%)	86,34	0,81	-
Umidade a 105 ± 5°C (%)	87,30	0,50	-
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,93	0,54	-
Coliformes Totais (NMP/gST)	1,8E+09	4,92E+09	-
Coliformes Termotolerantes (NMP/gST)	1,9E+08	4,91E+08	1,0E+06
<i>Escherichia Coli</i> (NMP/gST)	1,9E+08	4,92E+08	-
Ovos Helmintos (viáveis ovo/g ST)	0,054	0,12	10
<i>Salmonella sp.</i> – Mini vidas	Ausente	-	-

## 5.2 ESTABILIZAÇÃO ALCALINA DO LODO DE ESGOTO E SECAGEM EM ESTUFA AGRÍCOLA

### 5.2.1 Descrição do Processo Realizado de Estabilização Alcalina do Lodo de Esgoto

Segundo a Resolução CONAMA nº 375, para que haja uma significativa diminuição de patógenos na massa do lodo, é necessário adicionar uma quantidade de cal suficiente para manter o pH da mistura igual a 12, por um período mínimo de 2 horas, e pH igual a 11,5 por um período mínimo de 24 horas.

No ciclo 1 do experimento, foram realizadas misturas com 15%, 30% e 45% de cal em relação ao peso seco de lodo. Apenas a amostra com 15% de cal adicionada não seguiu os padrões estabelecidos pela legislação acima citada. No ciclo 2, todas as misturas (15%, 30% e 45%) se comportaram seguindo a Resolução CONAMA nº 375.

No momento da mistura do lodo de esgoto com a cal, ocorre um processo exotérmico liberando calor e aumentando a temperatura da nova amostra. Segundo Von Sperling (2001), a temperatura ideal para uma redução adequada de microorganismos varia entre 55°C e 65°C, pois nesse intervalo a atividade bacteriana se reduz. No experimento, a temperatura inicial do lodo *in natura* era de 23°C, e, durante a mistura, a temperatura máxima atingida foi igual a 39°C na amostra com 45% de cal em relação ao peso seco do lodo.

A média das temperaturas, durante os dois ciclos, seguem na tabela 10.

**Tabela 10:** Temperatura das misturas.

Misturas	Temperatura Média (°C)
15%	29
30%	35
45%	38

São levantadas algumas hipóteses para que a temperatura durante o processo de mistura não tenha se elevado tanto: a cal pode ter adquirido umidade durante seu armazenamento; elevada umidade do lodo *in natura* e também pela baixa qualidade da cal adotada.

## 5.2.2 Secagem do Lodo de Esgoto em Estufa Agrícola

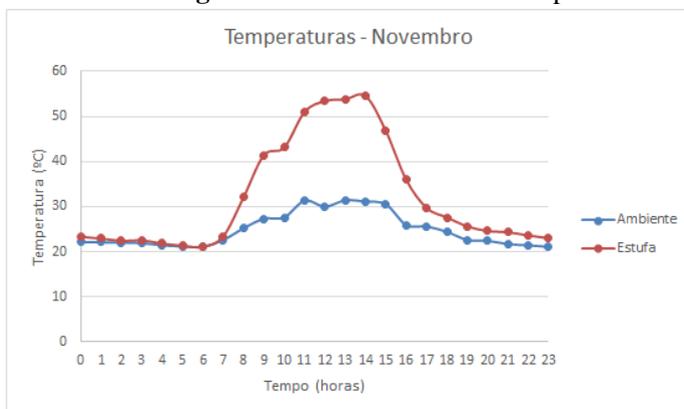
O primeiro ciclo de monitoramento deu-se entre os meses de Setembro e Dezembro de 2010, e o segundo entre Março e Junho de 2011. Dessa maneira observaram-se diferentes comportamentos das temperaturas em diferentes épocas do ano. Porém, devido à problemas de disponibilidade e entrega do termômetro para medição das temperaturas no interior e exterior da estufa, estas foram medidas de Julho a Dezembro após a conclusão dos dois ciclos de monitoramento.

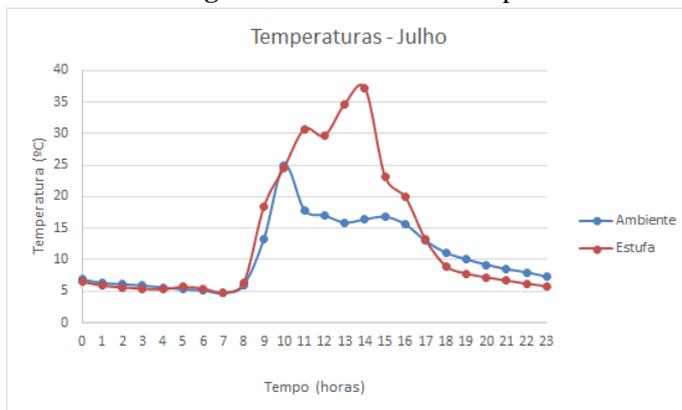
Compararam-se as médias diárias das temperaturas obtidas durante o monitoramento com as médias diárias de temperaturas obtidas no trabalho de Lima (2010), porém, como as pesquisas deram-se em lugares do Brasil com diferentes climas, os resultados obtidos em vários períodos do ano foram bem distintos.

O litoral de Santa Catarina possui um clima classificado como subtropical mesotérmico úmido. Já, o clima da cidade de Florianópolis é classificado também como mesotérmico úmido com verões quentes e invernos amenos, apresentando uma temperatura média anual de 20,4°C. O clima apresenta chuvas bem distribuídas ao longo do ano, com passagem de frentes frias polares, podendo ocasionar bruscas mudanças climáticas em qualquer estação do ano.

As figuras 16 e 17 exemplificam as médias diárias de temperatura no interior da estufa do mês de Novembro (primeiro ciclo) e Julho (segundo ciclo).

**Figura 16:** Mês Novembro - Temperatura



**Figura 17: Mês Julho - Temperatura**

### 5.2.3 Monitoramento da Secagem do Lodo Caleado em Estufa Agrícola

Todas as amostras atingiram os requisitos da Resolução nº 375 do CONAMA (manter o pH acima de 12 por duas horas e pelo menos 11,5 por 24 horas) exceto a amostra de 15% do primeiro ciclo. Porém, como a secagem do lodo em estufa também é considerado um processo térmico de higienização (quando considerado com níveis menores que 10% de umidade) e para fim de comparação com o ciclo 2, prosseguiu-se o monitoramento da mesma.

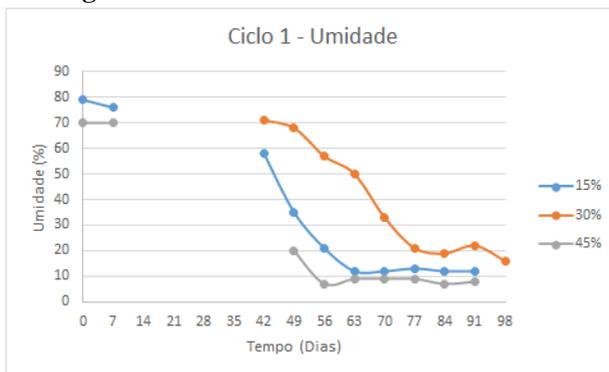
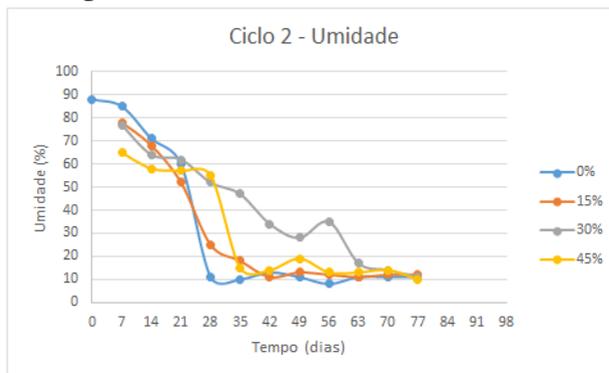
No monitoramento da secagem da mistura de lodo com cal, foram analisados vários parâmetros ao longo de 90 dias.

É importante ressaltar que no decorrer da primeira semana após realização das misturas e disposição das mesmas em baias para secagem em estufa agrícola, percebeu-se um forte odor de amônia originado pela elevação do pH em decorrência da adição de cal.

#### 5.2.3.1 Umidade

Monitorou-se, ao longo dos dois ciclos realizados, a umidade referente à mistura das amostras de lodo com cal.

Seguem na figura 18 os gráficos referentes ao monitoramento da umidade durante o ciclo 1, e na figura 19, durante o ciclo 2.

**Figura 18:** Monitoramento umidade - Ciclo 1**Figura 19:** Monitoramento umidade - Ciclo 2

No primeiro ciclo, devido à problemas logísticos perderam-se algumas datas de monitoramento da umidade. Nos primeiros dias de secagem há uma resistência na redução da umidade devido ao alto teor de água no lodo, porém, é possível perceber no primeiro ciclo que houve um rápido decaimento a partir do 42º dia de secagem, e no segundo a partir aproximadamente do 21º dia, provavelmente devido à porosidade do lodo, facilitando a evaporação da água. Lima (2010) também realizou um experimento de secagem de lodo em estufa agrícola e obteve resultados parecidos em relação ao comportamento da variação temporal da umidade do lodo, onde o período de maior remoção da umidade deu-se até aproximadamente o 40º dia. Após esse período os teores de umidade foram pouco alterados, basicamente quando as misturas atingiram uma umidade entre 10 e 15%.

Observa-se que no ciclo 1 as amostras levaram um tempo maior para a eliminação da umidade que no segundo ciclo. Esse fato explica-se pelas diferentes épocas de realização do experimento, uma vez que o primeiro ciclo foi realizado em Setembro, onde ocorreram temperaturas menores que no mês de Março, quando se iniciou o segundo ciclo.

Outro fator que influenciou na secagem das amostras foram as baias de madeiras. As alturas das mesmas variavam, dessa forma as alturas de lodo variaram entre 13 e 20 centímetros. Verificou-se uma eliminação da umidade relativamente mais rápida nas amostras alocadas nas baias com altura menor. Lima (2010), em sua pesquisa, verificou que a altura mais adequada para secagem das amostras é de 10 centímetros, e a mesma recomendou um tempo de secagem de 36 dias para atingir uma umidade de 25%, com um lodo padrão classe A.

No presente experimento, foi constatado que as caixas com alturas variando entre 13 e 15 cm foram as que obtiveram uma secagem da amostra muito mais rápida que as demais. Segundo Griffin *et al.* (1998) a umidade requerida para coberturas diárias é de 50%. Dessa forma, verificou-se quanto tempo, em cada ciclo, as amostras levaram para atingir tal teor de umidade.

**Tabela 11:** Relação entre dias (t) e altura (h) de lodo na baia de secagem para atingir umidade igual a 50%.

Ciclo	0%		15%		30%		45%	
	h lodo (cm)	t (dias)						
1	-	-	15	44	20	56	13	39
2	13	23	13	22	15	31	13	29

Como em diferentes ciclos, as amostras com mesma porcentagem de cal foram submetidas à secagem em baias com alturas diferentes, percebeu-se uma otimização da secagem quando a altura do lodo dentro da baia variava entre 13 e 15 centímetros.

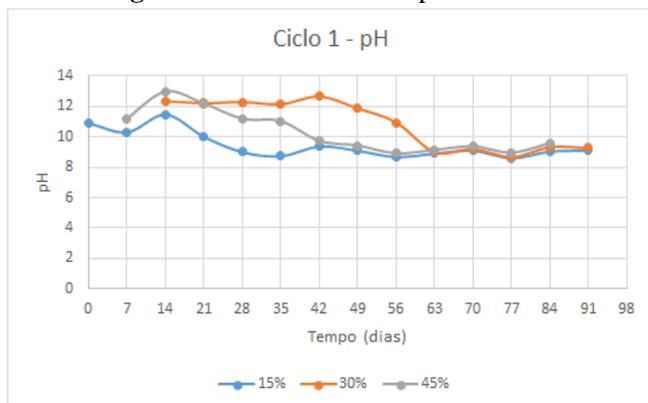
No segundo ciclo houve também o monitoramento do lodo *in natura*, a fim de comparar seu comportamento, em diversos parâmetros, com as outras misturas.

### 5.2.3.2 pH

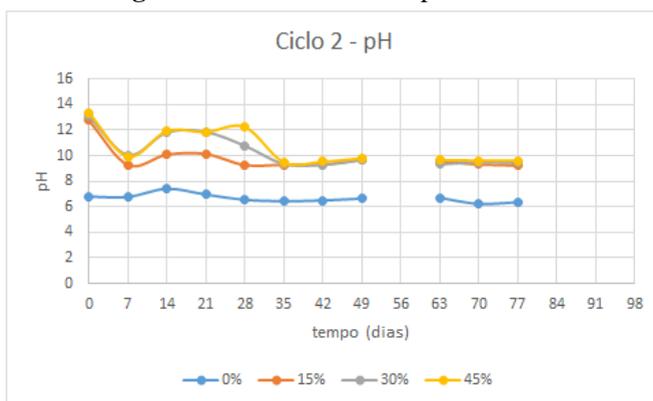
Os valores de pH foram observados durante todo o período de tratamento do experimento. Os primeiros registros foram realizados no momento da mistura do lodo com a cal, 2 e 24 horas após.

As figuras 20 e 21 apresentam os resultados das medições durante os ciclos 1 e 2.

**Figura 20:** Monitoramento pH - Ciclo 1



**Figura 21:** Monitoramento pH - Ciclo 2



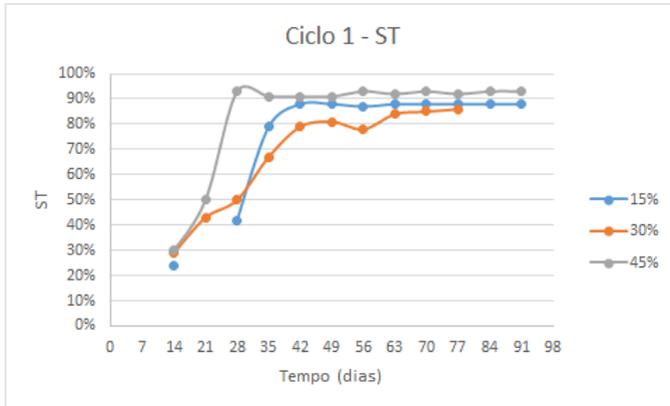
O pH das amostras de lodo em mistura com cal decresceram gradualmente, junto com a perda de umidade, e estabilizaram-se em valores entre 9,0 e 9,5. O pH do lodo in natura, monitorado durante o ciclo 2, manteve-se praticamente estável durante todo o período.

### 5.2.3.3 Sólidos (Fixos, Voláteis e Totais)

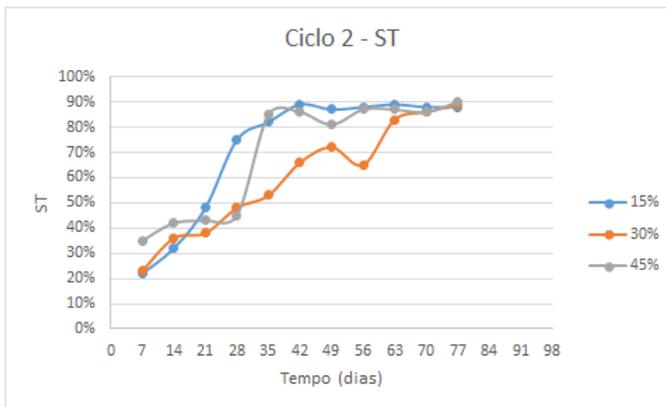
A proporção de ST ao longo do tempo aumentou conforme a umidade ia diminuindo.

As figura 22e 23 demonstram o comportamento dos sólidos totais no decorrer dos ciclos.

**Figura 22:** Monitoramento ST - Ciclo 1



**Figura 23:** Monitoramento ST - Ciclo 2

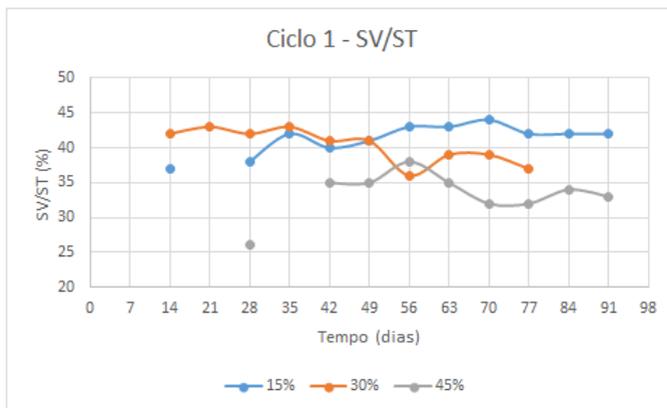


O lodo de esgoto estabilizado com um teor de sólidos de 50% ou mais apresenta muitas vantagens quando utilizado como camada diária de cobertura de aterros sanitários, podendo auxiliar no controle de

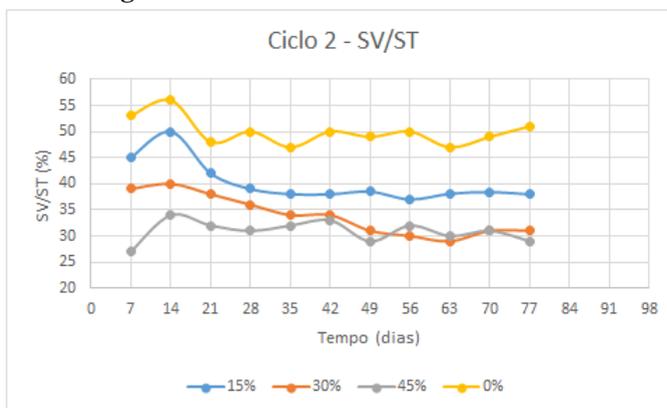
vetores, reduzir a emissão de odores, entre outros (GRIFFIN et al., 1998). Analisando os gráficos, percebe-se que todas as amostras atingiram um teor de ST maior que 50%, fato este que contribui, consideravelmente, para a aplicação do lodo em camada de cobertura.

Nas figuras 24 e 25 são apresentados os gráficos com as relações de SV/ST ao longo do tempo para as amostras analisadas.

**Figura 24:** Monitoramento SV/ST - Ciclo 1



**Figura 25:** Monitoramento SV/ST - Ciclo 2



A relação SV/ST dá uma boa indicação da fração orgânica de sólidos no lodo e também do nível de digestão do lodo. A relação entre

SV e ST para lodos não digeridos deve situar-se entre 0,75 e 0,80, e em lodos digeridos deve ser entre 0,60 e 0,65 (VON SPERLING, 2001).

Nota-se que quanto maior o percentual alcalinizante, menor o valor da relação SV/ST. No estudo de Lima (2010) observou-se que a adição de cal ao lodo de esgoto ocasionou uma diminuição na relação SV/ST devido ao aumento da fração de sólidos fixos em virtude da adição do alcalinizante.

Qasim (2000) descreve que a redução da concentração de sólidos voláteis em relação aos sólidos totais – variando de 10% a 30% - é causada pelo incremento de sólidos totais e efeito de diluição, onde a matéria orgânica não é destruída.

No ciclo 1, devido à problemas logísticos e disponibilidade de materiais, há uma defasagem de dados no início do monitoramento. Já no ciclo 2, observou-se uma tendência de decaimento de sólidos voláteis nas misturas de 15% e 30%. Na mistura com 45% de cal, nas duas primeiras análises esse teor subiu, e depois acompanhou a tendência de decaimento das outras misturas. Segundo Andreoli et. al (2001), a diminuição gradual dos sólidos voláteis dá-se em função da continuidade do processo de estabilização do lodo e à perda de orgânicos voláteis para atmosfera, podendo atingir níveis de até 35%.

Ao comparar a amostra que não obteve adição de cal, com as três outras que obtiveram, percebe-se um decaimento muito maior do teor de sólidos voláteis das amostras que foram misturadas com álcali do que da amostra *in natura*. Isso deve-se ao fato de que há uma diluição provocada pelo aumento da massa de sólidos totais, uma vez adicionada a cal ao lodo.

O CONAMA Nº 375/06 (BRASIL, 2006), estabelece que, para lodo estabilizado, o teor de SV/ST deve estar abaixo de 0,7. No experimento, todas as misturas obtiveram valores inferiores a 0,7, inclusive a amostra controle (sem adição de cal). Porém, outras literaturas (GRANATO, 2010; PIETZ et al, 1996) definem que para a utilização de lodo de esgoto como camada de cobertura de aterros sanitários é necessário que o teor SV/ST seja menor que 0,40. No experimento, a amostra de 45% ficou abaixo desse teor nos dois ciclos durante todo o período de monitoramento. No ciclo 1 a amostra de 30% ficou abaixo do teor de 40% após um período de aproximadamente 49 dias de monitoramento, e a amostra de 15%, a partir do 28º dia de monitoramento passou de 40%, porém manteve-se sempre igual a este valor ou muito próximo dele. No ciclo 2, a amostra de 30% a partir do 14º dia de monitoramento já se enquadrou dentro do padrão (relação abaixo de 40%) e a amostra de 15% enquadrou-se após 21 dias. A

amostra controle, ficou acima de 40% em todo o período do monitoramento.

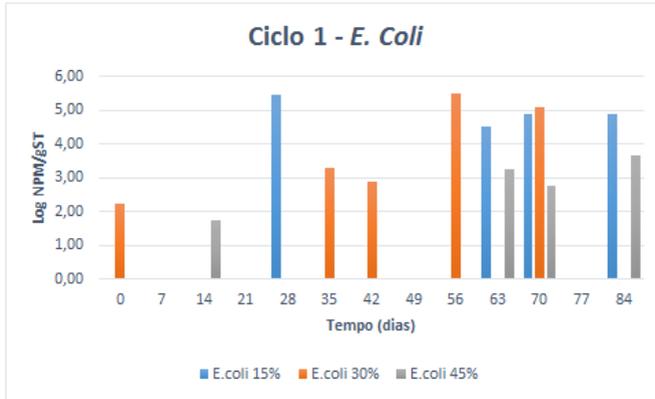
#### 5.2.3.4 *Escherichia Coli*

Monitorou-se também, ao longo do tempo de análise e secagem das misturas de lodo, a presença da bactéria *Escherichia Coli* nas amostras. As análises foram realizadas em triplicatas ao longo do período de estabilização alcalina para a verificação do atendimento à Resolução CONAMA 375/06, pois mesmo que objetivo do presente trabalho não seja o uso agrícola do lodo, buscou-se atendê-la para certificar-se de que a sua utilização não ocasionaria um aumento de patógenos no lixiviado, bem como riscos à saúde do operador do aterro.

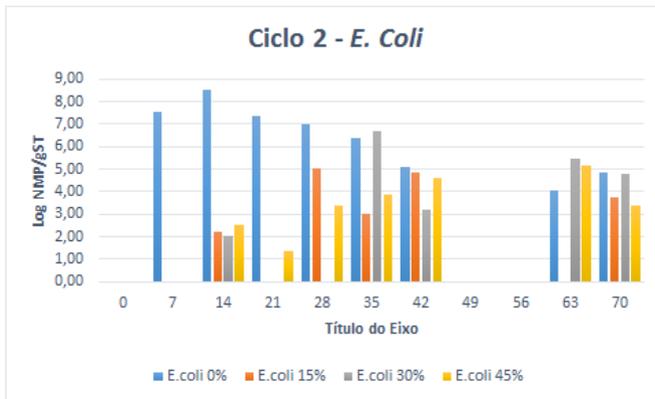
No início do ciclo as amostras caledas possuíam o parâmetro *Escherichia Coli* zerado (figura 26). Isso se deve ao aumento do pH nas horas iniciais de mistura. Porém, no decorrer dos dias, esse parâmetro aumentou, provavelmente devido ao decaimento do pH nas amostras, favorecendo o crescimento dessa bactéria. Além disso, outro fator relevante era o modo de reviramento das amostras para a homogeneização e aceleração da secagem. Cada amostra possuía uma enxada exclusiva para reviramento, porém, mesmo com a higiene mantida nas mesmas, pode ter existido algum modo de contaminação. É importante ressaltar que a estufa era alvo de vetores, como moscas e lagartos, podendo, esse fator, ter influenciado também na contaminação das amostras. Entretanto, no final do monitoramento a tendência retornou a ser o decaimento de *E. Coli*, provavelmente devido à redução da umidade e assim dificuldade de sobrevivência dos organismos.

No primeiro ciclo as amostras (durante todo o monitoramento) enquadraram-se, segundo a Resolução CONAMA 375/06, como Classe B. Já no ciclo 2, apenas a partir aproximadamente do 42º dia, que todas as amostras enquadraram-se na *Classe B*. Lima (2010) em seu estudo também constatou um recrescimento e diminuição do teor de *E. Coli* com o passar do tempo. Também em seu estudo atingiu um lodo Classe A com 36 dias de monitoramento.

**Figura 26:** Monitoramento *E. Coli* - Ciclo 1



**Figura 27:** Monitoramento E. Coli - Ciclo 2



### 5.2.3.5 Análise Completa do Lodo Seco e Higienizado – Ciclo 1

Após o término do primeiro monitoramento, coletaram-se quantidades de cada amostra de lodo higienizado (0%, 15%, 30% e 45%) e foram realizadas análises completas das mesmas, como segue na tabela 12.

O final do primeiro monitoramento deu-se no mês de Dezembro do ano de 2010, porém as amostras foram enviadas para análise no final do mês de Fevereiro do ano de 2011, ou seja, o lodo encontrava-se ainda mais estabilizado e higienizado.

**Tabela 12:** Análise Completa - Ciclo 1

Parâmetros	Lodo 0%	Lodo 15%	Lodo 30%	Lodo 45%	CONAMA Classe B
pH em água 1:5 (1)	6,00	9,40	9,80	10,00	-

<b>pH em CaCl2 (1)</b>	5,90	9,30	9,50	9,80	-
<b>Carbono Orgânico (%) (m/m)</b>	36,87	26,31	26,10	18,90	-
<b>Matéria Orgânica (%) (m/m)</b>	63,42	45,25	44,89	32,51	-
<b>Cinzas a 550°C (%) (m/m)</b>	25,57	45,39	51,66	60,94	-
<b>Nitrogênio Total (%) (m/m)</b>	5,90	3,10	2,60	2,50	-
<b>Nitrogênio Amoniacal (%) (m/m)</b>	1,00	0,60	0,30	0,20	-
<b>Fósforo (P) Total (%) (m/m)</b>	1,40	0,90	0,70	0,50	-
<b>Fósforo (PO4) (%) (m/m)</b>	4,30	2,80	2,10	1,50	-
<b>Alumínio (Al) (%)</b>	1,20	0,70	0,50	0,40	-
<b>Cálcio (Ca) (%)</b>	1,10	7,94	10,12	13,67	-
<b>Magnésio (Mg) (%)</b>	0,63	5,01	5,91	8,11	-
<b>Ferro (Fe) (mg/kg)</b>	12013,00	7828,00	4778,00	4168,00	-
<b>Cobre (Cu) (mg/kg)</b>	217,00	115,00	81,00	65,00	1500
<b>Zinco (Zn) (mg/kg)</b>	540,00	454,00	272,00	215,00	2800
<b>Cádmio (Cd) (mg/kg)</b>	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	39
<b>Chumbo (Pb) (mg/kg)</b>	29,10	11,40	22,70	7,40	300
<b>Cromo (Cr) (mg/kg)</b>	26,20	21,60	15,40	11,20	1000
<b>Umidade a 65 ± 5°C (%)</b>	5,82	5,36	5,50	4,23	-
<b>Umidade a 105 ± 5°C (%)</b>	8,50	9,90	9,56	6,85	-
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,81	0,72	0,67	0,89	-
<b>Coliformes Totais (NMP/gST)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	-
<b>Coliformes Fecais (NMP/gST)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	-
<b>Escherichia Coli (NMP/gST)</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	1,0E+06
<b>Ovos Helmintos (ovo viável/gST)</b>	0,37	0,33	0,30	0,08	10

Como esperado, ao aumentar o percentual de cal nas amostras, há um aumento no teor de cálcio e magnésio, constituintes em grandes quantidades da cal. Entretanto, a concentração dos outros metais, devido ao efeito de diluição (adição de sólidos no lodo), decaíram. Devido à baixa umidade no final do monitoramento, não foi verificada a presença de coliformes nas amostras. Quanto aos ovos viáveis de helmintos, as amostras de 0%, 15% e 30% enquadraram-se como *Classe B*, e a amostra de 45% atingiu o padrão *Classe A*. Devido à volatilização da amônia a concentração dos parâmetros agrônômicos decaíram.

## 5.2.3.6 Principais Resultados Compilados – Ciclo 1 e 2

Os resultados iniciais e finais obtidos pela pesquisa, são apresentados na tabela 13.

**Tabela 13:** Resultados iniciais e finais - Ciclo 1 e 2.

Amostras	pH		Umidade (%)		SV/ST (%)		E. Coli (NMP/gST)		Ovos Helmitos (ovos viáveis/gST)	
	I	F	I	F	I	F	I	F	I	F
C1 15%	10,9	9,1	80	12	39	42	0,0	4,88	-	0,33
C1 30%	12,3	-	75	16	44	39	2,24	5,08	-	0,30
C1 45%	12,9	9,5	71	8	24	34	0,0	3,64	-	0,08
C2 0%	6,8	6,4	88	12	68	56	7,53	4,84	0,054	0,035
C2 15%	12,7	9,2	78	12	45	38	0	3,75	-	0,003
C2 30%	13,1	9,4	77	11	39	32	0	4,78	-	0,004
C2 45%	13,4	9,6	65	11	27	30	0	3,37	-	0

\* I = inicial; F = final.

De uma maneira geral, os resultados encontrados são parecidos e encontram-se dentro da faixa encontrada por Lima (2010) e Prim (2011). Os únicos valores que se diferenciaram, consideravelmente, de Lima (2010) foram os valores iniciais de SV/ST (%), pois no ciclo 1 as primeiras análises foram realizadas 14 dias após a criação das misturas, e no trabalho de Lima (2010), os primeiros dias foram os quais ocorreu um maior decaimento desse teor. Entretanto, a tendência de decaimento para o lodo com e sem adição de cal foi praticamente igual apresentando uma continuidade da estabilização.

Os valores finais de E. Coli se diferenciaram de maneira grotesca dos valores obtidos pelas duas autoras. Fato este, que evidencia uma recontaminação das amostras, como comentado no item 5.2.3.4.

Como uma análise geral, todas as misturas, no final do ciclo, atenderam ao critério estabelecido pelo CONAMA para biossólidos Classe B.



## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho objetivou-se estudar a viabilidade do aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto para utilização em camada de cobertura de aterro sanitário. A proposta estudada, fica refletida nos seguintes resultados e conclusões:

- Todas as misturas realizadas (com teor de 15%, 30% e 45% de cal em relação ao peso seco do lodo) enquadraram-se como lodo Classe B da Resolução CONAMA nº 375/06. Apenas a mistura de 15% não atingiu os requisitos iniciais: pH igual a 12 por pelo menos 2 horas e pH igual a 11,5 por no mínimo 24 horas, mas prosseguiu-se com o monitoramento da mesma forma para estudar seu comportamento e compará-lo posteriormente com os dados do segundo ciclo de amostragem.

- No monitoramento da umidade de todas as amostras, obtiveram-se valores satisfatórios, resultando em uma umidade inferior a 50% em todas elas, sendo esse, segundo bibliografia estudada, o teor mínimo aceitável para aplicação em camadas de coberturas intermediárias e diárias de aterros sanitários.

- No primeiro ciclo, para que as misturas atingissem um teor abaixo de 50% de umidade, levou um tempo maior do que no segundo. Isso se deve à época do ano, onde as temperaturas médias no início do ciclo 1 eram inferiores que no início do ciclo 2.

- As alturas das baias de acondicionamento das amostras dentro da estufa variaram e isso influenciou diretamente na secagem das mesmas. Recomenda-se então uma altura máxima de 15 cm de lodo, considerando uma média de 3 vezes semanais de reviramento das amostras.

- Quanto ao teor de SV/ST nas amostras, conforme bibliografias estudadas e apresentadas anteriormente na revisão bibliográfica e metodologia, é recomendável que seja inferior ou igual a 0,4 para utilização em camadas de coberturas de aterros sanitários. Todas as amostras com adição de cal obtiveram esta eficiência nos dois ciclos realizados, porém, a amostra de 15% ficou bem próxima do limite em ambos os ciclos (aproximadamente 38 a 39%). Desta forma, não se recomenda a utilização do lodo com 15% de cal, uma vez que se encontra muito perto do limite aceitável para aplicação como camada de cobertura de aterro.

- Conforme a Resolução CONAMA nº 375/06, para lodos com secagem por aquecimento ou ao ar, é necessário que o teor do mesmo seja de no mínimo 90% de ST – sem mistura de qualquer aditivo - para

atingir um padrão Classe B. No experimento, a amostra controle (0% de adição de cal), atingiu o nível mínimo citado, enquadrando-se, desta forma, como lodo Classe B. Porém, para que possa ser utilizado em camadas de coberturas de aterros sanitários, faz-se necessária a mistura com cal para a redução de odores e para atingir a relação SV/ST requerida para tal fim.

Desta maneira, conclui-se que nos aspectos abordados e estudados - físico, químico e biológico -, as misturas atingiram o esperado se enquadrando como Classe B segundo a Resolução CONAMA 375/06. Porém, se tratando de higienização do lodo de esgoto para a utilização em camada de cobertura de aterro sanitário, seguindo como referencial teórico os autores Granatto (2010) e Pietz et. al (1996), as amostras devem possuir um teor SV/ST menor que 40%, sendo assim, apenas as amostras com adição de 30% e 45% de cal em relação ao peso seco do lodo obtiveram, sem dificuldades, um teor de sólidos propício para a aplicação para o fim.

Para que se conclua que é realmente viável a aplicação do lodo de esgoto em camadas de coberturas intermediárias e diárias de aterros sanitários, recomendam-se outros estudos importantes e imprescindíveis, como análise da viabilidade econômica, análise geotécnica do lodo caçado, testes de misturas de lodo com solo, bem como análise do lixiviado, o qual não pode ter a qualidade prejudicada devido à aplicação da camada de lodo como cobertura.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419:** Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos – Procedimentos. São Paulo, 1992. p. 1.

\_\_\_\_\_. **NBR 9800:** Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1987b.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004:** Resíduos Sólidos - classificação, 2º ed. Rio de Janeiro, 2004a. BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº375 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 derivados, e dá outras providências. Brasília, DF, 2006.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERUBINI, C.; TELES, C. R.; CARNEIRO, C.; FERNANDES, F. Higienização do Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. Cap. 4, p. 87 – 117.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C. CHERNICHARO, C. A. Secagem e higienização de lodos com aproveitamento do biogás. In: CASSINI, S. T. (Coord.) **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás.** Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2003. Cap 5, p. 121 – 165.

APHA – American Public Health Association; AWWA – American Water Works Association; WPCF – Water Pollution Control Federation & WEF – Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 21th ed., Washington, D.C., 2005.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A., ed. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 312p.

BOROWSKI S.; SZOPA, J. S. Experiences with the dual digestion of municipal sewage sludge. *Bioresource Technology*, v. 98, p.1999-1207, 2007.

BRASIL, 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. LEI Nº 12.305 de 2 de agosto de 2010.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 375 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 derivados, e dá outras providências. Brasília, DF, 2006.

CARVALHO, M. F. **Comportamento Mecânico dos Resíduos Sólidos**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. – Universidade de São Paulo – EESC-USP, 1999. 300 p.

CASAN – Companhia Catarinense de Água e Saneamento. **Estação de Tratamento de Esgoto**. Disponível em: <<http://www.casan.com.br/index.php?sys=138>>. Acesso em junho de 2013.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. *et al.* Principais Processos de Degradação de Resíduos Sólidos Urbanos. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. (Coord.). **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno porte**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2003. p. 19-50.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. Petrópolis-RJ: PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, 2006. 494 p.

COMPARINI, J. B. **Estudo do decaimento de patógenos em biossólidos estocados em valas e em biossólidos submetidos à secagem em estufa**. 2001. 278 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

CONDER, 2010. Companhia de desenvolvimento urbano do estado da Bahia. Manual de Operação de Aterros Sanitários. 28 p.

COSTA, N. B. **Análise da viabilidade econômica do uso do lodo de esgoto como material de cobertura de aterro sanitário.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2012. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado.** 2.ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000. 370p.

FERNANDES, F. (Coord.). **Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura.** Rio de Janeiro: PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. 1999. 98p..

FERNANDES, F; SOUZA, S. G. Estabilização de Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. Cap 2, p. 29-55.

FERREIRA, Adriana Gonçalves. **Estudo dos lixiviados das frações do aterro sanitário de São Carlos-SP por meio da caracterização físico-química.** 2010. 252 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

FLORIANÓPOLIS. Secretaria Municipal de Habitação e Saneamento. **PMISB, Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico.** Florianópolis, 2011. 11 v.

GRANATO, T. C. Biosolids land application by the metropolitan water reclamation district of greater Chicago: an overview of the program, its benefits, and environmental impacts. In: **Simpósio Interamericano de Biosólidos**, 7, 2010, Campinas. Palestra, Campinas, 2010.

GOMES, L. P.; MARTINS, F. B. Projeto, implantação e operação de aterros sustentáveis de resíduos sólidos urbanos para municípios de pequeno porte. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. (Coord.). **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para municípios de pequeno porte.** Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. p.51-105.

GOMES, L.P; **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras.** Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2009

GOMES, L. P.; MORAES, C. A. M.; BOFF, R. D. **Emprego de areia usada de fundição em coberturas intermediária e final de aterros sanitários de RSU.** Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 3, n. 4, p. 71-76, abr./jun., 2007.

GRIFFIN, R. A. *et al.* Municipal Sewage Sludge Management at Dedicated Land Disposal Sites and Landfills. In: LUE-HING, C.; ZENS, D. R.; TATA, P.; KUCHENRITHER, R.; MALINA, J. F.; SAWYER B. (Comp.). **Water Quality Management Library - Volume 4: Municipal Sewage Sludge Management: A Reference text on Processing, Utilization and Disposal.** 2. ed. Lancaster: Technomic Publishing Company Book, 1998. Cap. 7, p. 409-486.

HART, M. L.; SHAKOOR, A.; WILSON, T. P. Characterization of lime sludge for engineering applications. **Waste Management**, v. 13, p. 55-63, 1993.

JAMAL, A.; NORIEH, N.; FARZADKIA, M. Comparison of Aerobic and Lime Stabilization Methods for Evaluation of Sewage Sludge Reuse. **Journal of Environmental Science and Technology**, n.4, 2011. p. 182-190.

JUCÁ, J. F. T. *et al.* Processos e Monitoramento da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. (Coord.). **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários.** Petrópolis - RJ: PROSAB, 2006. cap. 3, p.65–108.

KOERNER, R. M.; DANIEL, D. E. **Final Covers for Solid Waste Landfills and Abandoned Dumps**, 1 ed. New York, ASCE PRESS, 1997.

LANGE; L. C. *et al.* Processos Construtivos de Aterros Sanitários: Ênfase no Estudo de Camadas de Cobertura como Mecanismo de Controle da Geração de Lixiviado. In: CASTILHOS JUNIOR, A. B. (Coord.). **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de**

**lixiviados de aterros sanitários.** Petrópolis - RJ: PROSAB, 2006. cap. 4, p.109–208.

LEBLANC, R. J.; MATTHEWS, P.; RICHARD, R. P. **Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management:** moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. Kenya: United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT), 2008. Disponível em: [http://esa.un.org/iys/docs/san\\_lib\\_docs/habitat2008.pdf](http://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/habitat2008.pdf). Acesso em: 12 de junho de 2013.

LEFFLER, D. *et al.* A novel alkaline biosolids products as alternative landfill cover. Proceedings of the Water Environment Federation, (WEF'00), **Residuals and Biosolids Management**, 2000. pp: 845-855. Disponível em: <<http://www.solidwaste.com/article.mvc/A-Novel-Alkaline-Biosolids-Product-as-Alternativa-0001>>. Acesso em setembro de 2011.

LEITE, W. R. M.; BELLI FILHO, P. **Digestão Anaeróbia de Lodo Adensado da ETE Insular.** Relatório parcial Subprojeto II. Florianópolis: Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina (FAPESC) e Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN); 2011.

LIMA, M. R. P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto.** Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 288 p.

MABOTE, T. T. S., **Influência do lodo de estação de tratamento de esgoto aplicado como material de cobertura de aterro sanitário na qualidade do lixiviado.** Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2012. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC

MAGALHÃES, A.F. **Avaliação do desempenho de técnicas de bioengenharia na proteção e conservação da cobertura final de taludes em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos:** Estudo de Caso para Aterro Sanitário de Belo Horizonte. Belo Horizonte. 2005. 169 f. Dissertação (mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MARIANO, O. H. M. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos.** Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. 232p.

MARINHO, F. A. M. **Cobertura de Aterro: requerimentos, definições e visão geral dos sistemas.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2006. Disponível em: <[http://www.sns.org.br/full\\_control/arquivos/full\\_control\\_usuario/P\\_ALESTRAS/Cobertura%20de%20Aterro%20%20Marinho.pdf](http://www.sns.org.br/full_control/arquivos/full_control_usuario/P_ALESTRAS/Cobertura%20de%20Aterro%20%20Marinho.pdf)>. Acesso em: 16 de junho de 2013.

Mc BEAN, W. A.; ROVERS, F. A.; FARQUHAR, G. J. **Solid Waste Landfill Engineering and Design.** Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, 1995. 521 p.

PAPIN, M.; WEST, R. Landfills: landfill covers itself with biosolids. Waste Age, 1999. FONTE: <[http://wasteage.com/mag/waste\\_landfills\\_landfill\\_covers/](http://wasteage.com/mag/waste_landfills_landfill_covers/)> Acesso em: 14 junho de 2013.

PARKSON CORPORATION, 2013. Disponível em: <<http://www.parkson.com/Page.aspx?PageID=270&FileName=Drying&CC=true>> Acesso em: 16 de junho de 2013.

PESSIN, N. *et al.* Concepção e implantação de células piloto de aterramento de resíduos sólidos. In: CASTILHOS JR, A. B; et al. (org.) **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades.** Rio de Janeiro: ABES, Rima, 2002. p. 13-17.

PIANA, M. G. **Higienização de lodo de estações de tratamento de esgoto por compostagem termofílica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia). Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

PIETZ, R.I *et al.* **Beneficial Use of Municipal Sludge as a Final Protective Vegetative Cover on Nonhazardous Waste Landfills.** Report N° 96-12 – Research and Development Department. Chicago, Illinois: Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago, 1996. 58p.

PIMENTEL, F. J. G. **Aproveitamento de Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto em Camada de Cobertura de Aterro Sanitário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. 217 p.

PINTO, M. T. Higienização de Lodos. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. v. 6, cap. 6, p. 261-297.

PRIM, E. C. C. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto sanitário como material de cobertura de aterro sanitário.** Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

QASIM, S.R., CHIANG, W. **Sanitary Landfill Leachate – generation, control and treatment.** Technomic Publishing Co., Inc, 1994.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. **Geotechnical Aspects of a Landfill Design and Construction.** Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc., 2002.

QUISSINI, Carina Soldera. **Aplicação de areia descartada de fundição como material alternativo para camada de cobertura de aterro de resíduos.** 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009.

REICHERT, G. A. **(Manual) Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários.** , 2007. 109 p.

RHEW, R. D.; BARLAZ, M. A. Effect of Lime-Stabilized Sludge as Landfill Cover on Refuse Decomposition. **Journal of environmental engineering.** North Carolina State University – USA. Vol. 121, n. 7, 1995, p. 499-506.

SALIM, K. G. **Oxidação passiva do metano em ensaios de coluna simulando camadas de cobertura de aterros sanitários.** Dissertação(Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina,

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2011. 92 f.

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. ANDREOLI, C. V. (Coord.); BONNET, B. R. P. (Coord.). **Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto**. 2º ed. rev. e ampl. Curitiba: Companhia de Saneamento do Paraná, 2000. 80 p.

SIMMONS, F. W. **Physical and moisture retention characteristics of biosolids and solid-biosolids mixtures**. Report nº 03-10. Prepared by Department of Natural Resources and Environmental Sciences University of Illinois Urbana-Champaign. Research and Development Department. Chicago, Illinois: Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago, 2003. 20 p.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. 4º ed. Metcalf & Eddy, Inc. New York: McGraw Hill, 2003. 1819p.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues**. 4ª ed. Metcalf & Eddy, Inc. New York: McGraw-Hill, 1993, 992p.

VAN DER HOEVEN. **Aplicações**. Disponível em: <<http://www.estufasagricolas.agr.br/aplicacoes.html>>. Acesso em: 10 de junho de 2013.

VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. (1994). Tratamento anaeróbio de esgoto – *Ummétodo experimental para o dimensionamento e otimização de leito de secagem*.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. v.1. 3.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 452p.

VON SPERLING, M.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos:**

**tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. v. 6, cap. 1, p. 13-14.