

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

Francisco José Guedes Pimentel

**APROVEITAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO EM CAMADA DE COBERTURA
DE ATERRO SANITÁRIO**

Florianópolis
2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

Francisco José Guedes Pimentel

**APROVEITAMENTO DE LODO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE ESGOTO EM CAMADA DE COBERTURA
DE ATERRO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Armando Borges de Castilhos Junior

Florianópolis
2012

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

P644a Pimentel, Francisco José Guedes

Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de esgoto em camada de cobertura de aterro sanitário [dissertação] / Francisco José Guedes Pimentel ; orientador, Armando Borges de Castilhos Junior. - Florianópolis, SC, 2012.

216 p.: grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia ambiental. 2. Aterro sanitário. 3. Lodo. 4. Esgotos. 5. Biossólido. I. Castilhos Junior, Armando Borges de. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

CDU 628.4

*Aos meus pais Francisco e Maria
Helena.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer às pessoas que de alguma forma contribuíram para elaboração deste trabalho:

À minha mulher Bianca pelo grande apoio, carinho e compreensão nos momentos de ausência.

A todos meus amigos e familiares, em especial meus pais e minha irmã, pelo amor, apoio incondicional e grande incentivo em meus estudos e empreitadas.

Ao professor Dr. Armando Borges de Castilhos Júnior pela oportunidade, orientação, amizade e grande apoio ao longo de todo o projeto.

Ao professor Dr. Paulo Belli Filho, coordenador do Projeto que deu origem a esta dissertação.

Aos funcionários da CASAN Alexandre Trevisan, Felipe Trennepohl, Anigeli Dal Mago, Lucas Barros e Pery Filho pela disponibilização de informações importantes para este trabalho.

Aos bolsistas Augusto Ehlers Souza, Catherine Diniz Santos, Morgana Decker e em especial à Joana Meller Silva, pela grande ajuda nos monitoramentos, realização de análises e montagem de experimentos.

À Franciele Fedrizzi (Mini-Fran) pela amizade e valoroso companheirismo nos perrengues para a execução da primeira e segunda etapa deste trabalho.

À equipe do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC, pelo apoio nos ensaios geotécnicos e ao Prof. Rafael Higashi.

Aos professores da pós-graduação, pelo empenho no ensino das disciplinas tão enriquecedoras à nossa formação profissional.

Ao Prof. Péricles por todas as informações disponibilizadas relativas ao piloto experimental.

Ao Tiago Guedes pela grande ajuda na montagem do piloto.

Ao José Barrios pelo apoio nas análises de metais do lixiviado.

A todos os colegas do LARESO: Naiara, Letícia, Isabela, Kalil, Fernando, Iracema, Karina, Cláudia, Diana, e em especial a Elivete, pelos diversos ensinamentos e amizade, e também a Heloísa pela ajuda na reta final deste trabalho.

Ao companheirismo e amizade de todos os outros colegas da pós-graduação, do LIMA e do departamento: Pilar, Jorge, Tiago(s), Rafael, Zanghelini, Edivan, Bruno, Camile, Rodrigo, Bárbara, Morgana, Morris, Ricardo, Francieli, Vítor, Eliane, Ariane, Tânia e Nathália.

Ao Wanderli Leite e ao LABEFLU pela análise de alguns parâmetros específicos do lodo “in natura” e do lodo para inóculo.

Ao Thomas Granato, Vice-Diretor de Monitoramento e Pesquisa da Companhia de Saneamento de Chicago, pelo envio de diversos materiais e informações de grande valia para esta pesquisa.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado, à FAPEU pela gestão dos recursos, à CASAN e à FAPESC pelo financiamento da pesquisa.

*O que quer que você possa fazer ou possa sonhar,
comece. A coragem tem força, poder e magia.*
Johann Wolfgang von Goethe

RESUMO

O presente trabalho objetiva avaliar o potencial de valorização do lodo proveniente de uma estação de tratamento de esgoto, localizada no município de Florianópolis (SC), através do seu emprego em camadas de cobertura de aterro sanitário. Esta prática ocorre principalmente quando o biossólido não atinge qualidade suficiente para usos mais nobres ou como alternativa estratégica. Além disso, aterros sanitários demandam grande quantidade de material de cobertura ao longo de toda sua vida útil. A metodologia experimental da pesquisa dividiu-se em quatro etapas: 1) caracterização do lodo de ETE; 2) estabilização alcalina do lodo com diferentes percentuais de cal virgem e posterior secagem em estufa agrícola; 3) avaliação geotécnica e micro-estrutural de traços de lodo com solo argiloso; 4) avaliação da influência do lodo de esgoto na qualidade do lixiviado, em um piloto experimental. Os resultados apontaram que o lodo de esgoto *in natura* possui em média umidade de 87%, pH de 6,5 e relação sólidos voláteis/ sólidos totais de 0,73. Para este lodo atingir padrão Classe B, segundo a Resolução CONAMA n°375 de 2006, além das condições requeridas em coberturas de aterro (umidade de 50% e o teor de SV/ST igual a 0,4), foi necessário adicionar 30% de cal virgem (em base seca) e deixar o lodo secar por aproximadamente 31 dias na estufa, considerando reviramento 3 vezes por semana e uma altura de disposição do lodo igual a 15 cm. O tempo de secagem, no entanto, muda conforme a época do ano e pode chegar até aproximadamente 44 dias entre o inverno e a primavera. A partir dos ensaios geotécnicos recomenda-se aplicar o traço de 1:1 (solo:lodo caleado em 30% - peso) em sistemas de coberturas finais como camadas superficiais (vegetativas) e/ou camadas de proteção. Não se recomenda, porém, sua aplicação em camadas drenantes ou camadas de fundação. Em camadas intermediárias ou diárias, traços 1:2,33 (solo:lodo 30%) seriam os mais recomendados. O lodo aplicado como cobertura pode influenciar no aumento da concentração de alguns parâmetros no lixiviado, nos primeiros dias após sua aplicação, como a DQO, a DBO, amônia, nitrito, fósforo e alguns metais, mas poucas semanas depois esses valores tendem a baixar e a ficar próximos de uma célula normal que não tivesse recebido lodo em sua cobertura. Contudo, em nenhum momento a concentração de qualquer um dos metais monitorados excedeu os limites da Resolução do CONAMA n° 430 de 2011.

Palavras-chave: Aterro Sanitário, Lodo de Esgoto, Utilização de Lodo, Camada de Cobertura.

ABSTRACT

This study aims to research an alternative way to recycle the sewage sludge from a wastewater treatment plant (WWTP), located in Florianópolis (SC), through its use as landfill cover. This practice is adopted mainly when the sludge does not possess enough quality to be used in nobler end or as a strategic alternative. Furthermore, landfill demand large amounts of soil cover throughout its useful life. The experimental methodology of the research was divided into four steps: 1) characterization of sewage sludge, 2) alkaline stabilization of sludge with different percentages of lime and drying in a greenhouse, 3) geotechnical assessment and micro-structural analysis of mixtures of sludge and clay soil, 4) evaluation of the influence of sewage sludge on the quality of the leachate. The results showed that the raw sewage has 13% of solid content, pH 6.5 and 73% of volatile solids, relative to the total solids (SV/ST). To treat the sludge until the Class B level, according to CONAMA n° 375 de 2006, and to reach the conditions required in landfill covers (50% moisture content and the SV / ST equal to 0.4), it was necessary to add 30% calcium oxide (on dry basis) and dry the sludge in a greenhouse during 31 days, considering revolving period of 3 times a week; form of sludge disposition with 15 cm height. The drying time, however, changes seasonally and between winter and spring can reach about 44 days. The geotechnical tests showed that the best mixture of soil and sludge (treated with 30% CaO) in final cover systems as surface layers (vegetative) and / or layers of protection is with the ratio 1:1 (weight). However, its application in drainage layers or foundation layers is not recommended. To the intermediate or daily cover, the proportion mixture 1:2,33 (soil: sludge 30%) would be most recommended. The sludge used as landfill cover may influence on the increase of the concentration of some parameters of the leachate in the first days after application, such as COD BOD, ammonia, nitrite, phosphorus and some metals. Nevertheless, a few weeks later these values tend to decrease and become close to a normal cell that had not received sludge in its coverage. Besides, at no time the concentration of any metals monitored exceeded the limits established by CONAMA n° 430 de 2011.

Keywords: Sanitary Landfill, Sewage Sludge, Use of Sludge, Landfill Cover.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais tópicos da revisão bibliográfica.	29
Figura 2. Etapas de tratamento do lodo.....	36
Figura 3. Estrutura de um aterro sanitário.....	49
Figura 4. (a) Descarga na frente de serviço; (b) e (c) Espalhamento de compactação dos resíduos em rampa 3:1, indicando o sentido de avanço da rampa; (d) Cobertura periódica dos resíduos compactados.....	55
Figura 5. Cobertura intermediária dos resíduos (ao fundo, retirada de material no próprio aterro) Aterro Metropolitano Santa Tecla, Gravataí, RS.	56
Figura 6. Camada de cobertura final de um aterro sanitário.	60
Figura 7. Utilização de biossólido em coberturas de aterro.	65
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.....	66
Figura 9. Variação da DQO do lixiviado de 4 configurações de reatores em triplicata.	70
Figura 10. Município de Florianópolis com localização aproximada da ETE Insular e ao lado a ETE.....	73
Figura 11. Torta de Lodo da ETE Insular.	75
Figura 12. Prensa desaguadora de lodo.....	76
Figura 13. Metodologia da etapa experimental e principais critérios considerados para execução das etapas.	77
Figura 14. Esquema da Etapa 2.....	82
Figura 15. Argamassadeira utilizada na mistura de lodo com cal.	84
Figura 16. Estufa agrícola.....	84
Figura 17. Planta baixa e vista frontal da estufa (unidades em metros).	85
Figura 18. Caixas de madeira utilizadas para acondicionar lodo.	86
Figura 19. Esquema da Etapa 3. (*) Qualquer uma das misturas lodo+cal selecionada na etapa 2.	89
Figura 20. Planta Baixa da instalação experimental. FONTE: Adaptado de Medeiros <i>et al.</i> (2002).....	92
Figura 21. Desenho esquemático em corte (A A') da instalação experimental.	94
Figura 22. Processo de inoculação e montagem das camadas de cobertura.	96
Figura 23. Variação do pH do lodo de esgoto <i>in natura</i> ao longo do tempo.	99
Figura 24. Variação da umidade e sólidos voláteis do lodo de esgoto <i>in natura</i> ao longo do tempo. FONTES: SV/ST cedido por Leite e Belli Filho (2011) e Umidade de Arquivos pessoais.....	100
Figura 25. Máximos e mínimos horários de temperaturas estufa e ambiente e médias das médias horárias.....	105
Figura 26. Umidade ao longo do tempo para o Ciclo 1 e o Ciclo 2.	106
Figura 27. Temperaturas médias mensais do ar ambiente (externo) durante os meses de monitoramento e máximas e mínimas.	107
Figura 28. Monitoramento do teor de SV/ST para o Ciclo 1 e o Ciclo 2.	108
Figura 29. Monitoramento do pH no tempo para o Ciclo 1 e o Ciclo 2.	110

Figura 30. Monitoramento de <i>Escherichia coli</i> Ciclo 1.....	111
Figura 31. Monitoramento de <i>Escherichia coli</i> Ciclo 2.....	111
Figura 32. Média da umidade para todas as amostras Ciclo 2 e IC 95%.	118
Figura 33. Curva granulométrica das misturas testadas.	120
Figura 34. Carta de Plasticidade.	121
Figura 35. Massa específica dos grãos.	123
Figura 36. Resultados dos ensaios de compactação das amostras.	124
Figura 37. Variação da umidade ótima com o conteúdo orgânico.	125
Figura 38. Permeabilidade das amostras em escala logarítmica inversa.....	127
Figura 39. Imagens de MEV do lodo <i>in natura</i> (a)(b), do lodo caleado a 30% (c)(d) e do traço 1:1 de solo e lodo 30% (e)(f).	130
Figura 40. Diagramas EDS do lodo <i>in natura</i> (a), do lodo caleado a 30% (b) e do traço 1:1 de solo com lodo 30% (c).	131
Figura 41. Variação do pH ao longo do tempo nas três células monitoradas. .	135
Figura 42. Box-plot do pH nas células experimentais.	135
Figura 43. Variação da alcalinidade ao longo do tempo nas três células.	136
Figura 44. Box-plot da alcalinidade nas células experimentais.	137
Figura 45. Variação DQO ao longo do tempo nas três células.	138
Figura 46. Box-plot da DQO nas células experimentais.....	139
Figura 47. Variação da DBO ₅ ao longo do tempo nas três células.....	141
Figura 48. Precipitações diárias ao longo do tempo.	141
Figura 49. Box-plot da DBO ₅ nas células experimentais.....	142
Figura 50. Média e erro padrão da relação DBO ₅ /DQO das células experimentais.....	142
Figura 51. Variação nitrogênio amoniacal no tempo das células experimentais. No detalhe, grande decaimento inicial de amônia nas células C1 e C2.	144
Figura 52. Box-plot de nitrogênio amoniacal nas células experimentais.	144
Figura 53. Variação de nitratos no tempo das células experimentais. No detalhe, grande aumento inicial de nitrato nas células C1 e C2.	145
Figura 54. Box-plot de nitrogênio na forma de nitratos nas células experimentais.....	146
Figura 55. Variação de nitritos no tempo das células experimentais. No detalhe, grande aumento inicial de nitrito nas células C1 e C2.	146
Figura 56. Variação de Fósforo Total ao longo do tempo nas células experimentais.....	148
Figura 57. Balanço de Sólidos Totais (a), Fixos (b) e Voláteis (c) ao longo do tempo.	150
Figura 58. Variação de cobre ao longo do tempo das células experimentais...	152
Figura 59. Variação de níquel ao longo do tempo das células experimentais..	152
Figura 60. Variação de chumbo ao longo do tempo das células experimentais.	153
Figura 61. Variação de zinco ao longo do tempo das células experimentais...	153
Figura 62. Box-Plot das concentrações de Cd, Pb e Cu.....	155
Figura 63. Box-Plot das concentrações de Ni e Zn.....	155

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Origem e descrição dos tipos de lodo biológico.....	31
Quadro 2. Materiais alternativos utilizados em coberturas diárias e intermediárias.	57
Quadro 3. Etapas de tratamento da ETE Insular.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físico-químicas médias do lodo de esgoto em geral...	33
Tabela 2. Concentrações de Microorganismos Patogênicos no Brasil.....	34
Tabela 3. Concentrações de metais encontradas no lodo de esgoto.....	35
Tabela 4. Parâmetros de qualidade do lodo antes e após secagem e higienização em estufas de referências consultadas.....	42
Tabela 5. Valores máximos e mínimos da temperatura de estufa e seu ambiente externo de referências consultadas.....	42
Tabela 6. Classes de Lodo de Esgoto e requisitos do CONAMA.....	45
Tabela 7. Concentrações Máximas Substâncias Inorgânicas segundo CONAMA e a US EPA.....	46
Tabela 8. Relação entre percentual de municípios brasileiros e respectivo destino final dos resíduos entre 1989 e 2008.....	48
Tabela 9. Variações das Concentrações de Lixiviados com a Idade do Aterro..	51
Tabela 10. Variação da composição do lixiviado gerado em aterros brasileiros	52
Tabela 11. Requisitos para cobertura de aterro sanitário de Referências.....	63
Tabela 12. Propriedades geotécnicas de solos de cobertura utilizados em Santa Catarina.....	64
Tabela 13. Requisitos para uso de lodo de esgoto como solo de cobertura em aterros sanitários.....	68
Tabela 14. Parâmetros para caracterização do Lodo da ETE.....	79
Tabela 15. Parâmetros microbiológicos analisados no lodo de esgoto in natura.....	80
Tabela 16. Características físico-químicas da cal.....	83
Tabela 17. Parâmetros monitorados na Etapa 2.....	86
Tabela 18. Ensaios Geotécnicos realizados na Etapa 3.....	90
Tabela 19. Características resumidas das células do piloto.....	93
Tabela 20. Composição Gravimétrica dos resíduos em 2006.....	94
Tabela 21. Parâmetros físico-químicos analisados no lixiviado.....	97
Tabela 22. Resultados da caracterização completa do lodo de esgoto.....	102
Tabela 23. Valores de pH para 0h, 2h e 24h nos Ciclos 1 e 2.....	103
Tabela 24. Comparação de temperaturas extremas ambiente e estufa.....	104
Tabela 25. Relação entre número de dias (t) para misturas atingirem umidade de 50% nos Ciclos com altura camada de lodo (h) nas caixas dentro da estufa. ..	108
Tabela 26. Número de dias para as misturas atingirem 40% SV/ST ou menos.....	110
Tabela 27. Resultado das análises realizadas após monitoramento na estufa no Ciclo 1.....	112
Tabela 28. Comparação de resultados com as principais pesquisas relacionadas.....	114
Tabela 29. Resultado da estatística descritiva para Ciclo 1.....	115
Tabela 30. Resultado da estatística descritiva para o Ciclo 2.....	115
Tabela 31. Resultado da análise de variância para a interceptação do dois experimentos monitorados.....	116

Tabela 32. Testes de Tukey par a par das amostras do Ciclo 2.....	117
Tabela 33. Classificação qualitativa do índice de plasticidade.	122
Tabela 34. Classificação do solo natural e das misturas.	122
Tabela 35. Permeabilidade das amostras estudadas.	126
Tabela 36. Parâmetros de resistência dos traços e do solo.....	127
Tabela 37. Comparação de Médias par a par (Teste de Tukey)	139
Tabela 38. Concentrações de Sólidos (mg/L) das células experimentais.....	149
Tabela 39. Estatística descritiva dos metais monitorados.....	151
Tabela 40. Valor-p do Teste de Tukey par a par entre as médias gerais das células experimentais.....	154
Tabela 41. Comparação de Médias com valores de literatura.....	157

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
CASAN	Companhia Catarinense de Água e Saneamento
CO ₂	Gás Carbônico
CH ₄	Gás Metano
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias a 20°C
DP	Desvio Padrão
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FAPESC	Fundação de Amparo à Pesquisa Científica e Tecnológica de Santa Catarina
H ₂ O	Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
k	Permeabilidade
kPa	Quilopascal
kV	Quilovolt
kg	Quilograma
L	Litro
LARESO	Laboratório de Pesquisa em Resíduos Sólidos
LE	Lodo de Esgoto
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente
LTC	Lodo de Esgoto Tratado com Cal
m ³	Metro cúbico
mg	Miligramma
MO	Matéria Orgânica
Nº	Número
NBR	Norma Brasileira
NH ₄	Nitrogênio Amoniacal
NH ₃	Amônia não ionizada
NO ₃	Nitrato
NO ₂	Nitrito
O ₂	Oxigênio
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PCB	Bifenilas Policloradas
POP	Poluentes Orgânicos Persistentes
pH	Potencial Hidrogeniônico
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico

SES	Sistema de Esgotamento Sanitário
SF	Sólidos Fixos Totais
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis Totais
Ton	Toneladas
TU	Teor de Umidade
U	Umidade
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo)
UGL	Unidade de Gerenciamento de Lodo
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V	Volume

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVOS	26
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	27
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	27
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1 LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS	29
2.1.1 <i>Características dos Lodos de Esgoto</i>	30
2.1.2 <i>Principais Poluentes</i>	33
2.1.3 <i>Tratamento de Lodo de Esgoto</i>	36
2.1.4 <i>Secagem e Higienização de Lodo em Estufa Agrícola</i>	39
2.1.5 <i>Aproveitamento e Disposição Final</i>	43
2.1.6 <i>Limites Normativos</i>	44
2.2 ATERROS SANITÁRIOS.....	46
2.2.1 <i>Biogás</i>	49
2.2.2 <i>Lixiviado</i>	50
2.2.3 <i>Camadas de Cobertura de Aterro</i>	53
2.3 UTILIZAÇÃO DE LODO EM CAMADA DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS	63
2.3.1 <i>Aspectos Legais sobre a aplicação de Lodo em Coberturas</i> ...	67
2.3.2 <i>Lodo tratado com cal para uso em coberturas de aterros</i>	68
3 MATERIAIS E MÉTODOS	73
3.1 DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS 73	
3.1.1 <i>Sistema de tratamento da ETE</i>	74
3.2 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	76
3.2.1 <i>ETAPA 1: Caracterização do Resíduo (lodo de esgoto)</i>	78
3.2.2 <i>ETAPA 2: Processo de Estabilização Alcalina em Estufa</i>	81
3.2.3 <i>ETAPA 3: Caracterização Geotécnica das Misturas Lodo/Solo</i> 88	
3.2.4 <i>ETAPA 4: Avaliação da Influência do Lodo no lixiviado</i>	91
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	99
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO	99
4.1.1 <i>Caracterização Básica do Lodo de Esgoto</i>	99
4.1.2 <i>Caracterização Detalhada do Lodo de Esgoto</i>	101
4.2 ESTABILIZAÇÃO ALCALINA EM ESTUFA	102
4.2.1 <i>Processo de Estabilização Alcalina</i>	103
4.2.2 <i>Secagem em Estufa Agrícola</i>	104
4.2.3 <i>Conclusões da Etapa de Estabilização Alcalina em Estufa</i> ..	118
4.3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA MISTURAS LODO/SOLO 119	
4.3.1 <i>Ensaio de Granulometria</i>	119

4.3.2	<i>Índices de Consistência</i>	120
4.3.3	<i>Classificação dos solos</i>	122
4.3.4	<i>Massa específica dos grãos</i>	123
4.3.5	<i>Compactação dos Solos</i>	124
4.3.6	<i>Permeabilidade</i>	126
4.3.7	<i>Resistência ao cisalhamento</i>	127
4.3.8	<i>Análise de MEV / EDS</i>	129
4.3.9	<i>Conclusão da etapa de avaliação geotécnica</i>	131
4.4	PILOTO EXPERIMENTAL	133
4.4.1	<i>pH e Alcalinidade</i>	134
4.4.2	<i>Demanda Química de Oxigênio (DQO)</i>	137
4.4.3	<i>DBO₅ e relação DBO₅/DQO</i>	140
4.4.4	<i>Amônia, Nitrito e Nitrato</i>	143
4.4.5	<i>Fósforo Total</i>	147
4.4.6	<i>Sólidos Fixos, Voláteis e Totais</i>	148
4.4.7	<i>Metais (Pb, Cu, Zn, Cd, Ni)</i>	150
4.4.8	<i>Conclusão etapa Piloto Experimental</i>	157
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	159
5.1	RECOMENDAÇÕES	160
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163
	APÊNDICES	184

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com as questões ambientais tem ganhado repercussão progressiva, desde a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo em 1972, seguida posteriormente de outras mais, como a Rio-92, a Cúpula de Joanesburgo (2002) e a 15ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, conhecida como COP 15 (2010). Essas mobilizações resultam da crescente atenção internacional para a preservação da natureza e da insatisfação de setores da sociedade com os impactos da poluição sobre a qualidade de vida.

Dentro deste mesmo contexto global, com o crescimento populacional aliado ao desenvolvimento baseado no consumo, aumentam também as preocupações a cerca de doenças, alterações climáticas, poluição ambiental e escassez de recursos naturais. Assim, é evidente a demanda pelo uso racional das matérias primas e da necessidade de se minimizar a geração de resíduos sólidos e valorizá-los, atribuindo a estes usos benéficos.

Os resíduos sólidos oriundos das estações de tratamento de esgotos são conhecidos como Lodo ou Biossólidos e suas características variam conforme os constituintes do efluente sanitário, a operação da ETE e o tipo de tratamento adotado (tanto ao efluente quanto ao lodo). Observa-se nestes materiais, contudo, a presença de matéria orgânica e componentes indesejáveis, como microorganismos patogênicos, eventualmente metais pesados e poluentes orgânicos e fármacos. Assim, a disposição inadequada deste resíduo pode colocar em risco a saúde pública e a qualidade do ambiente.

Em 2008 o Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos (UN-HABITAT) elaborou um documento¹, editado por LeBlanc, Matthews e Richard (2008), com o panorama geral da gestão de lodo de esgoto em diversos países. Nos Estados Unidos, por exemplo, a produção de lodo em 2004 foi de 7,18 milhões de toneladas em massa seca, enquanto que na Austrália a produção anual é de 360.000 ton/ano e na União Européia é aproximadamente 9 milhões ton/ano. Neste último caso é previsto um aumento de 50% para o ano de 2015 (MULLER *et al.*, 2007 *apud* LIMA, 2010).

No Brasil não há dados reais da produção de lodo, apenas estimativas. Machado (2001) estudou a produção de lodo em 275 ETEs

¹ Disponível em: <http://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/habitat2008.pdf>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2011.

responsáveis pelo tratamento do esgoto de 12.777.974 pessoas e calculou uma produção de 151.724 ton/ano de sólidos suspensos totais (SST) ou lodo em base seca. Com fundamento neste estudo e nos dados do SNIS² de 2005, Andreoli *et al.* (2008) estimaram uma produção de 372.000 ton SST/ano no Brasil. Atualmente este valor deve ser muito maior, principalmente em função das políticas implantadas pelo governo Federal através da Lei 11.445/2007, Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico e pelo Programa de Aceleração de Crescimento (PAC), que prevê investimentos vultuosos na área de saneamento.

Por outro lado, uma crescente parcela da sociedade consciente dos problemas que acarretam o inapropriado descarte de efluentes aliada às agências ambientais, tendem a pressionar cada vez mais as autoridades por melhores condições sanitárias e ambientais (PEGORINI; ANDREOLI, 2006). Esse cenário revela um grande potencial no incremento da quantidade de lodo a ser disposto nos próximos anos, principalmente em função do aumento do número de ETEs. Segundo Von Sperling e Andreoli (2001), apesar do lodo representar apenas 1% a 2% do volume de esgoto tratado, o seu gerenciamento é complexo e o custo desta atividade é estimado entre 20% e 60% do gasto operacional de uma ETE. A destinação final deste material varia de acordo com o contexto da ETE e dos recursos técnicos e econômicos disponíveis no local. Porém, em geral o lodo é disposto em aterros sanitários, incinerado (com recuperação ou não de energia), utilizado como fertilizante e condicionador de solo ou pode até mesmo ser aproveitado como matéria prima para a produção de tijolos, agregado leve, cimento e material de cobertura diária e final de aterros sanitários.

O emprego do lodo de esgoto em coberturas de aterro é atividade recorrente em diversos países como os Estados Unidos, o Canadá, Itália, Noruega, China, Austrália, África do Sul (LeBLANC; MATTHEWS; RICHARD, 2008) e adotado principalmente quando o biossólido não atinge qualidade suficiente para usos mais nobres ou como alternativa estratégica. Dentre as diversas vantagens do uso de lodo como camada de cobertura diária, destaca-se sua capacidade de melhorar a qualidade dos lixiviados, acelerar a decomposição dos resíduos e de aumentar a produção de metano; situação interessante para os aterros que aproveitam da combustão deste gás para comercializar créditos de carbono e/ou na geração de energia (GRIFFIN *et al.*, 1998; RHEW; BARLAZ, 1995). Os benefícios de utilizar o lodo em coberturas finais

² Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS.

advêm principalmente do aproveitamento dos nutrientes no crescimento da vegetação de cobertura, alternativa importante para se evitar a erosão e a geração de lixiviado.

Além disso, aterros sanitários demandam grande quantidade de material de cobertura e o volume ocupado pelas camadas diárias pode chegar a quase 20% do volume total da obra, enquanto a cobertura final ocupa em torno de 7% (McBEAN *et al.*,1995). Considerando as dimensões de um aterro, pode-se concluir que isso significa uma quantidade considerável. Por isso, normalmente jazidas de solo são exploradas a um custo alto para suprir esta demanda, e após serem usufruídas não são na maioria das vezes recuperadas, ocasionando passivos ambientais. Nesse sentido, a valorização do lodo de esgoto como material de cobertura de aterro se traduz em benefício tanto na esfera ambiental, ao se evitar a exploração de jazidas, e na esfera econômica, pois o proprietário do aterro evitaria o gasto com a aquisição deste material e o gerador de lodo valorizaria este resíduo e reduziria os custos com sua disposição.

Neste contexto, o presente trabalho objetiva avançar a produção de conhecimentos na área de aproveitamento de lodo de ETE e faz parte de um amplo projeto de pesquisa, denominado *Estudos sobre Gerenciamento de Lodos Produzidos na Estação de Tratamento de Esgotos Insular*, realizado pelos alunos e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da UFSC e financiado pela FAPESC³ em parceria com a Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN). O projeto visa estudar alternativas de valorização do lodo produzido na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) Insular, e foi dividido em quatro subprojetos, dentre os quais a presente dissertação se insere no subprojeto nº4: a utilização de lodo em coberturas alternativas de aterro sanitário e como material de construção de tubos de concreto. O foco deste trabalho será o estudo da utilização de lodo de esgoto em camadas de coberturas de aterros sanitários.

Atualmente, a CASAN deposita o lodo resultante do seu tratamento de esgotos domésticos em aterro sanitário, técnica esta amplamente utilizada e considerada como adequada. Contudo, a empresa resolveu financiar este projeto visando reduzir os elevados custos de destinação deste resíduo e atender às recomendações por parte do Tribunal de Contas do Estado de Santa Catarina, o qual sugeriu um estudo de alternativas para o aproveitamento da torta de lodo. O principal motivo é que a valorização deste resíduo por meio de seu

³ Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina.

aproveitamento como matéria prima é economicamente e ecologicamente preferível ao seu simples descarte.

A temática em questão já foi abordada na Agenda 21 (1992), documento produzido pela Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992. Recomendou-se o “Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com esgotos” e definiram-se orientações gerais para sua gestão, como a redução da sua produção e o aumento máximo da reutilização e reciclagem. No Brasil a Lei 11.445 de janeiro de 2007 estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico, mas não especifica critérios particulares para a gestão do lodo de esgoto.

A lei, porém, determina que o Plano Nacional de saneamento Básico englobe o manejo de resíduos sólidos e outras ações de saneamento básico de interesse para a melhoria da salubridade ambiental. Mais recentemente, em agosto de 2010, instituiu-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos por meio da Lei Federal 12.305 (BRASIL, 2010a), regulamentada pelo Decreto 7.404 de 23 de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010b). A Política aprovada estabelece princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, e define as responsabilidades dos geradores e do poder público, nas suas diferentes esferas.

No sentido de valorizar o potencial do lodo de esgoto como matéria prima, o Brasil instituiu a Resolução CONAMA nº 375 de agosto de 2006, que define critérios e procedimentos para seu uso agrícola e dá outras providências. Entretanto, não há normas nacionais que regulem o aproveitamento deste resíduo especificamente no uso em camada de cobertura de aterros sanitários e o país carece, portanto, de estudos desta técnica já aplicada e regulamentada em outras nações.

1.1 OBJETIVOS

Dentro do contexto acima apresentado, a principal pergunta desta pesquisa é a seguinte: “O lodo de esgoto gerado na ETE Insular pode ser utilizado em coberturas de aterros sanitários?”.

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a viabilidade técnica de utilização da torta de lodo da ETE Insular como material de cobertura de aterros sanitários, considerando-se os aspectos ambientais e geotécnicos envolvidos nesta prática.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir o percentual de cal mais satisfatório para estabilização e higienização alcalina do lodo de esgoto em estufa agrícola, de maneira que atenda aos critérios ambientais requisitados.
- Comparar as características geotécnicas de misturas de lodo estabilizado e solo argiloso com as características requisitadas em coberturas finais de aterros sanitários.
- Avaliar a influência do lodo aplicado como cobertura de aterro sanitário na qualidade do lixiviado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho abordará assuntos de distintas áreas de pesquisa que serão associadas. Em função disso, a revisão bibliográfica foi escrita da seguinte maneira: inicialmente os principais temas e subtemas foram fundamentados teoricamente. Posteriormente foram apresentados trabalhos com enfoque em aproveitamento de resíduos em camada de cobertura de aterros sanitários, destacando-se as pesquisas relacionadas ao lodo de esgoto. A Figura 1 apresenta os principais tópicos abordados na revisão bibliográfica.

Figura 1. Principais tópicos da revisão bibliográfica.



2.1 LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Estações de tratamento de esgoto (ETE) são instalações que promovem a depuração de efluentes sanitários com o objetivo de garantir a preservação da qualidade dos recursos hídricos e seus usos previstos, além de promover a saúde, à segurança e o bem estar da população. O esgoto, quando descartado sem tratamento adequado, causa uma série de alterações nos corpos d'água: depleção do oxigênio dissolvido, resultante do consumo aeróbio da matéria orgânica; cor e turbidez, em função da carga de sólidos; eutrofização⁴, devido ao excesso de nutrientes; e doenças de veiculação hídrica, oriundas dos organismos patogênicos presentes nos excrementos. No caso dos esgotos com contribuição industrial, outros tipos de contaminantes são

⁴ *Eutrofização* é o crescimento excessivo das algas e plantas aquáticas, estimuladas pelas elevadas concentrações de nutrientes nos corpos d'água (principalmente fósforo e nitrogênio), a ponto de causar interferência significativa na qualidade do corpo hídrico (THOMANN & MUELLER, 1987 *apud* VON SPERLING, 2005).

encontrados com mais frequência, como metais e substâncias tóxicas (JORDÃO; PESSÔA, 2005; VON SPERLING, 2005).

Nas ETEs a remoção destes poluentes pode ocorrer por meio de operações físico-químicas ou por processos biológicos, em que os subprodutos e os resíduos resultantes ocorrem na forma sólida, líquida e gasosa. A fração sólida inclui os sólidos grosseiros, removidos na etapa preliminar de gradeamento; os sólidos inorgânicos (ex: areia, silte), removidos nas caixas de areia ou desarenadores; o material flutuante (graxas, óleos, gorduras) e as escumas (presente em quase todas as unidades de uma ETE); e por fim, o lodo de esgoto – este sob a forma de um líquido ou semi-sólido que normalmente contém 0,25% a 12% em peso de sólidos, o que dependerá das operações e processos utilizados (TCHOBANOGLOUS; BURTON; STENSEL, 2003). Apesar da maior parte do lodo ser constituída de água, considera-se este subproduto como fase sólida para ser distinguido do tratamento da fase líquida do esgoto. Dentre todos os componentes removidos no tratamento, o lodo é o maior em volume, e sua transformação e eliminação é um problema bastante complexo no contexto da engenharia sanitária e ambiental (Ibidem).

2.1.1 Características dos Lodos de Esgoto

A característica do lodo produzido em uma ETE está diretamente relacionada com a qualidade do esgoto tratado, com a operação e manutenção da estação e com o tipo de tratamento empregado para a fase líquida e fase sólida do efluente. O lodo pode ser classificado em:

a) *Lodo primário*: produzido nas estações que possuem unidade de decantação primária ou tratamento primário, composto pelos sólidos sedimentáveis (SS) do esgoto bruto, tanto a fração orgânica, quanto a inorgânica (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

b) *Lodo biológico*: também conhecido como lodo secundário, pois provém dos processos biológicos de tratamento (etapa secundária), onde as frações de matéria orgânica do esgoto são utilizadas no metabolismo bacteriano como fonte de energia (catabolismo) e como fonte de novo material celular (anabolismo), resultando em sólidos biológicos ou biossólidos (VAN HAANDEL; ALÉM SOBRINHO, 2006; VON SPERLING; GONÇALVES, 2001). O lodo biológico pode ser proveniente de um processo anaeróbio, o qual já sai estabilizado, ou de um processo aeróbio (dependendo do sistema empregado o lodo pode

sair estabilizado ou não). O Quadro 1 apresenta os três tipos de lodo biológico, sua origem e descrição:

Quadro 1. Origem e descrição dos tipos de lodo biológico.

Tipo de lodo biológico	Origem	Descrição
ANAERÓBIO	<i>Reatores anaeróbios</i> (UASB, filtros anaeróbios) e <i>Lagoas de estabilização</i> (facultativa, anaeróbias, aeradas facultativas, aeradas de mistura completa, de decantação)	Constituído de biomassa anaeróbia, ou seja, que oxida a matéria orgânica na ausência de oxigênio. Neste caso o lodo já sai estabilizado, por que biomassa cresce lentamente e permanece longo tempo no sistema, o que possibilita a digestão do próprio material celular
AERÓBIO (estabilizado)	<i>Reatores aeróbios com biofilme - baixa carga</i> (filtro biológico baixa carga, biodisco, biofiltro aerado) e <i>Lodos ativados por aeração prolongada</i>	Nos sistemas de baixa carga a disponibilidade de alimento é menor e a biomassa fica retida mais tempo no reator. Assim, ela e é induzida a consumir as próprias reservas de matéria orgânica (respiração endógena), resultando em um lodo estabilizado e sem necessidade de digestão posterior.
AERÓBIO (não estabilizado)	<i>Reatores aeróbios com biofilme - alta carga</i> (filtro biológico de alta carga, biofiltros aerados submersos e biodiscos) e <i>Lodos ativados convencional</i>	Lodo oriundo do crescimento excessivo dos microorganismos aeróbios devido à grande disponibilidade de alimento (matéria orgânica) no esgoto afluente. Em função disso, a biomassa excedente precisa ser retirada para manter o equilíbrio no sistema. Neste caso, o lodo não sai digerido, pois a biomassa fica pouco tempo no sistema e não realiza a respiração endógena.

FONTE: Adaptado de Tchobanoglous, Burton e Stensel (2003) e Von Sperling e Gonçalves (2001).

c) *Lodo químico*: gerado em sistemas de tratamento que adicionam produtos químicos (sais metálicos e cal) para aumentar a eficiência dos decantadores primários ou clarificar os efluentes secundários (USEPA, 1995).

d) *Lodo misto*: é o proveniente da mistura do lodo primário com o biológico, para posterior tratamento em conjunto (VON SPERLING, 2005).

Conforme destacado anteriormente, as propriedades físicas, químicas e microbiológicas do lodo estão relacionadas aos processos de tratamento adotados, assim como às características dos efluentes de origem. Portanto, a qualidade e o volume do lodo gerado podem variar de ETE para ETE, de local para local e sazonalmente. Em sistemas de esgotos sanitários, relevantes contribuições industriais também influenciam consideravelmente, sobretudo na carga de metais pesados e substâncias tóxicas (GRANATO, 2010). O inadequado pré-tratamento deste tipo de efluente aumenta a possibilidade de poluentes chegarem às ETEs e muitas vezes tratamentos específicos de tais elementos são onerosos ou não estão previstos.

Assim, a qualidade do efluente final e dos subprodutos sólidos pode ficar comprometida e, por esta razão, a NBR 9.800 (ABNT, 1987) estabeleceu critérios para o lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário.

A umidade do lodo normalmente se situa entre 88% a 99,75%, mas dependendo do tratamento adotado na fase sólida, este valor pode diminuir consideravelmente, podendo chegar a 60% ou menos (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003; US EPA 1995). Segundo Van Haandel e Lettinga (1994, *apud* VON SPERLING; GONÇALVES, 2001) a umidade do lodo encontra-se nas seguintes formas: água livre, que pode ser removida por gravidade (adensamento ou flotação); água adsorvida, removida por força mecânica ou uso de floculante; água capilar, a qual se encontra adsorvida ao sólido por força capilar diferenciando-se da adsorvida por necessitar de maior força para sua separação e; água celular, a qual só pode ser retirada apenas com uma mudança no estado de agregação da água, ou seja, por congelamento ou evaporação.

A fração sólida do lodo é chamada de sólidos totais (ST) e encontra-se na forma dissolvida ou em suspensão (SST), porém no lodo predomina-se os SST. Em ambas as formas ele se subdivide em sólidos voláteis (SV) – parcela orgânica – e sólidos fixos (SF) – parcela inorgânica. A relação entre SV e ST é um indicativo do grau de estabilidade do lodo. Em sua forma bruta esta relação apresenta-se entre 75% e 85%, enquanto no lodo estabilizado (digerido) chega até 45% (JORDÃO; PESSÔA, 2005). No entanto, Von Sperling e Gonçalves (2001), consideram estável o lodo com SV/ST entre 0,6 e 0,65 e outras

referências (US EPA, 1995) até 0,5. A massa específica (ρ) do lodo normalmente varia de 1020 kg/m³ a 1080 Kg/m³ e depende muito da sua umidade (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003). Como a maior parte deste resíduo geralmente é água ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$), quanto maior for sua umidade, mais próximo de 1000 kg/m³ ficará sua massa específica. Outras características físico-químicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físico-químicas médias do lodo de esgoto em geral.

Parâmetro	Machado (2001) ¹	Tchobanoglous <i>et al.</i> (2003) ²
pH	7,33	6,5 – 8
Material seco, %	32,12	-
Matéria Orgânica, %	56,19	59 – 88
Nitrogênio Total, % N	5,75	2,4 – 5
Carbono Total, % C	28,16	-
Fósforo Total, % P ₂ O ₅	1,82	2,8 – 11
Potássio % K ₂ O	0,36	0,5 – 0,7
Cálcio Total, % CaO	4,27	-
Magnésio Total, % MgO	0,22	-

¹Média geral de 275 ETEs (vários tipos) de todo o Brasil.

²Lodos ativados em geral.

A presença de poluentes no lodo, tais como poluentes orgânicos, metais pesados e microorganismos patogênicos, será discutida a seguir.

2.1.2 Principais Poluentes

O lodo de esgoto é constituído de elementos que lhe conferem um potencial fertilizante, como matéria orgânica e diversos nutrientes, mas também possui uma parcela de componentes indesejáveis que colocam em risco a saúde pública e o ambiente: são os metais pesados, os poluentes orgânicos e os microorganismos patogênicos (SILVA *et al.*, 2001). A presença de agentes patogênicos é inevitável, mas varia de acordo com a saúde da população atendida pelo sistema de esgotamento sanitário (SES). Uma população mais saudável produzirá um esgoto com concentração menor de patógenos que outra população mais

doente. A Tabela 2 apresenta valores com as concentrações de microorganismos para o lodo produzido no Brasil.

Tabela 2. Concentrações de Microorganismos Patogênicos no Brasil.

Parâmetro	Média¹
Coliforme Fecal (Termotolerantes), NMP/100g	20.313,67
Estreptococos Fecais, NMP	100
<i>Salmonella sp</i> , NMP	1
Ovos Helmintos viáveis, ovos/gST	13,47

¹Média geral de 275 ETEs (vários tipos) de todo o Brasil.

FONTE: Machado (2001)

Os agentes patogênicos que apresentam maior risco para a saúde humana e animal são as bactérias, vírus, ovos helmintos e cistos de protozoários. Dentro desses grupos, os indicadores mais utilizados para verificar o potencial de proliferação de doenças são os Coliformes Fecais (Termotolerantes), *Salmonellas sp* e ovos viáveis de helmintos (JORDÃO; PESSÔA, 2003).

Os constituintes químicos representados pelos metais pesados e pelos poluentes orgânicos tóxicos são oriundos de diversos produtos domésticos e comerciais que contém essas substâncias, mas advém principalmente de contribuições industriais nos Sistemas de Esgotos Sanitários (SES).

A minimização destes poluentes pode ser feita pela implantação de novos procedimentos no processo industrial ou por processos de pré-tratamento antes do lançamento destes efluentes nos SES. Baixas concentrações de alguns metais agem como micro-nutrientes para o solo, contudo, em concentrações mais elevadas revelam-se tóxicos às plantas, aos animais e ao homem. A Tabela 3 apresenta alguns valores de metais encontrados no lodo de esgoto.

Alguns compostos orgânicos nocivos à saúde e ao ambiente, como os poluentes orgânicos persistentes (POP's), também podem ser encontrados no lodo de esgoto. Estes são associados a cidades extremamente industrializadas, porém, têm-se observado inúmeros problemas em áreas urbanas de vários portes, associados a fontes pequenas, como postos de gasolina (SILVA *et al.*, 2001). Emissão dos veículos, produtos domésticos e as águas do escoamento superficial pelo efeito das chuvas ácidas também se caracterizam como fontes, entretanto, em escalas reduzidas (USEPA, 1995).

Tabela 3. Concentrações de metais encontradas no lodo de esgoto.

Metal	Lodo seco (mg/kg)		
	ETE Barueri ¹ (Damasceno; Campos, 1998)	Tchobanoglous, <i>et al.</i> (2003)	ETE Belém ² (Fernandes, <i>et al.</i> ,1997)
Arsênico	-	1,1 - 230	-
Cadmo	12,68	1 - 3410	ND
Cromo	1.064,93	10 - 99000	144
Cobalto	-	11,3 - 2490	-
Cobre	737,58	84 - 17000	326
Ferro	-	1000 - 154000	-
Chumbo	181,83	13 - 26000	124
Manganês	152,57	32 - 9870	-
Mercúrio	-	0,6 - 56	-
Molibdênio	-	0,1 - 214	-
Níquel	386,1	2 - 5300	75
Selênio	-	1,7 - 17,2	-
Estanho	-	2,6 - 329	-
Zinco	1.378,67	101 - 49000	828

¹Lodos ativados convencional²Lodos ativados por aeração prolongada

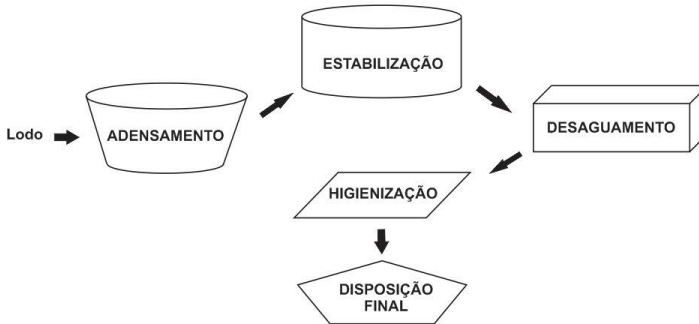
Os principais poluentes orgânicos encontrados no lodo são os cianetos, os fenóis, as bifenilas policloradas (PCB's), dioxinas, pesticidas, hidrocarbonetos clorados, surfactantes entre outros (GSCHWIND *et al.*, 1998; SILVA *et al.*, 2001). Os riscos para saúde humana associados à exposição destes elementos são decorrentes da ingestão de culturas contaminadas, pelo contato direto com o solo contaminado ou pela ingestão de alimentos de origem animal contaminados (NRC, 2002). Os potenciais efeitos adversos incluem intoxicação, câncer, mutação genética e teratogenicidade.

Trabalhos recentes têm também analisado a influência de fármacos (principalmente antibióticos) na aplicação de lodo ao solo, mas os resultados e os efeitos à exposição crônica ainda são inconclusivos (MECKES, 2010). De modo geral, a presença de grandes concentrações de poluentes tóxicos, metais pesados e agentes patogênicos no lodo podem inviabilizar seu potencial de reutilização.

2.1.3 Tratamento de Lodo de Esgoto

O lodo produzido nas ETEs deve passar por determinados tipos de tratamento para adequar-se à destinação final desejada pelo gerador. As etapas mais comuns de tratamento são apresentadas na Figura 2 adensamento, estabilização, desaguamento e higienização.

Figura 2. Etapas de tratamento do lodo. FONTE: Adaptado de Lima (2010).



O lodo nem sempre passa por todas as etapas expostas na Figura 2, pois alguns tipos de disposição final não exigem tratamento aprimorado como requer, por exemplo, o uso agrícola. Entretanto a redução do volume principalmente pelo *adensamento* e pelo *desaguamento* é fundamental para o gerenciamento do lodo e minimização com gastos de transporte. Tais etapas aumentam a concentração de sólidos por processos físicos ou mecânicos e algumas vezes produtos químicos como polímeros e sais metálicos são adicionados para aumentar ainda mais a captura de sólidos (CALVANO, 1998). Segundo Gonçalves, Ludovice e Von Sperling (2001) os principais processos para o adensamento ou espessamento do lodo são:

- a) Adensamento por gravidade;
- b) Flotadores por ar dissolvido;
- c) Centrífugas.

E os processos mais utilizados no desaguamento e desidratação do lodo são:

- a) Leitões de secagem;
- b) Lagoas de lodo;

- c) Centrífugas;
- d) Filtros a vácuo;
- e) Prensas desaguadoras;
- f) Filtros prensa.

A estabilização e a higienização de lodos de esgoto serão descritas com mais detalhes nos tópicos a seguir.

2.1.3.1 Estabilização de Lodo de Esgoto

A estabilização do lodo é realizada para se minimizar as características indesejáveis deste resíduo tais como a geração de maus odores, o potencial de atração de vetores e o teor de microorganismos patogênicos (FERNANDES; SOUZA, 2001). Esses objetivos podem ser alcançados através da oxidação química, biológica ou térmica da fração orgânica presente no lodo (CALVANO, 1998; LUDUVICE, 2001). A estabilização biológica ocorre pela ação de microorganismos específicos e em função da presença de oxigênio livre, podendo ocorrer aeróbia ou anaerobiamente, conforme descrito a seguir (JORDÃO; PESSÔA, 2005):

- Digestão anaeróbia: É a digestão bioquímica da matéria orgânica contida no lodo pela ação de microorganismos anaeróbios e facultativos que atuam na ausência de oxigênio e em condições favoráveis ao processo, resultando em subprodutos estáveis, como o dióxido de carbono e o metano.

- Digestão Aeróbia: É a oxidação bioquímica da matéria orgânica em meio com abundância de oxigênio, favorecendo a atividade de bactérias aeróbias e a formação de subprodutos como dióxido de carbono, água e material estabilizado. Este processo pode ocorrer em reatores de um ou dois estágios ou através da compostagem - em pátios ou biodigestores.

O lodo é considerado digerido quando passa por redução de 40% ou mais de SV em biodigestores anaeróbios ou aeróbios e conseqüentemente não possui odor ofensivo (FERNANDES, 1999).

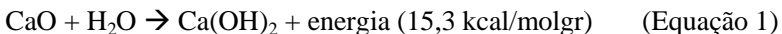
2.1.3.2 Higienização de Lodo de Esgoto

A estabilização biológica do lodo é eficaz para reduzir a geração de odores, contudo, o resíduo continua com altos níveis de patógenos e, dependendo do destino final escolhido, é necessário processo adicional de estabilização, conhecido também como higienização, a fim de tornar características sanitárias do lodo compatível com seu uso (FERNANDES; SOUZA, 2001). De acordo com Pinto (2001), a higienização busca reduzir a patogenicidade do lodo a níveis que não venham causar risco à saúde da população ou impactos negativos ao ambiente e os principais mecanismos adotados são:

- a) Via Térmica: elevação da temperatura em valores acima de 50°C por tempo suficiente para reduzir microorganismos patogênicos;
- b) Via Biológica: inativação de patogênicos pelo metabolismo de minhocas em condições específicas – minhocultura, ou pela compostagem;
- c) Via Radiação: inativação de patogênicos através da emissão de raios Beta e Gama ou até mesmo pela radiação solar;
- d) Via Química: Uso de produtos alcalinizantes para elevar o pH do lodo a níveis que inviabilizem as condições de sobrevivência dos microorganismos. Também é possível a aplicação de outros produtos químicos, como o cloro, ozônio, peróxido de hidrogênio e permanganato de potássio, porém, para escalas menores.

O produto mais utilizado na higienização química é a Cal virgem (CaO), pois é um produto relativamente barato e promove a redução de agentes patogênicos da seguinte maneira:

- A reação exotérmica entre o óxido de cálcio com a água que pode elevar a temperatura a 50°C ou mais (Equação 1⁵) a qual ocorre inativação de ovos de vermes e agentes patogênicos resistentes (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003);



- A formação de hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), produto da hidratação da cal virgem (Equação 1), promove elevação do pH devido a formação de íons hidroxila (OH⁻) (Equação 2⁶). Quando atinge valores

⁵ FONTE: Guimarães (2002).

⁶ *Ibidem.*

próximos de 12, cria-se um ambiente impróprio para os microorganismos patogênicos, pois alteram seu protoplasma celular de forma letal. Além disso, a caleação reduz a emissão de odores do lodo e gera a fixação de metais pesados (FERNANDES *et al.*, 2001);



- O “*stripping*” da amônia – transferência deste composto da fase líquida (íon amônio - NH_4^+) para a gasosa (amônia livre - NH_3) – em função da elevação do pH acontece devido a redução da concentração dos íons H^+ e deslocamento da reação para a direita (Equação 3⁷). A amônia livre é tóxica para diversos organismos e microorganismos e por isso ela atua como desinfetante.



Dentre as principais desvantagens da caleação com relação a outros métodos de tratamento é a incorporação de sólidos ao lodo e a limitação do uso do biossólido em solos com pH elevado, no caso de seu uso agrônômico (ANDREOLI *et al.*, 2001). Na agricultura a cal normalmente é aplicada para corrigir o pH de solos ácidos. Já na engenharia civil, ela atua como aditivo na estabilização de solos (argilosos principalmente), deixando-os mais resistentes e menos propensos a contração e expansão (GUIMARÃES, 2002).

Outro processo de tratamento alcalino avançado de lodo é conhecido como N-VIRO e associa a estabilização alcalina, processo de secagem acelerada e elevação da temperatura (N-VIRO, 2010).

2.1.4 Secagem e Higienização de Lodo em Estufa Agrícola

Dentre as formas de secagem e higienização de lodo de esgoto destaca-se o emprego de estufas plásticas, também conhecidas tecnicamente como estufas agrícolas. O ambiente quente e protegido da estufa possibilita a minimização do efeito da chuva no processo de secagem e também a maximização da energia solar (ANDREOLI *et al.*, 2003; LIMA, 2010). Desse modo, o decaimento da umidade ao longo do tempo é acelerado e atinge até níveis abaixo de 10%, em que a redução do volume a ser disposto é consideravelmente reduzida. Além disso,

⁷ FONTE: Von Sperling (2005).

segundo Yeager e O'Brien (1983, *apud* COMPARINI, 2001), teor de ST acima de 90%, ou seja, umidade menor que 10%, inviabiliza a sobrevivência de microorganismos patogênicos.

Pesquisas que abordam o tema secagem e higienização de lodo de esgoto em estufas ainda são escassas, porém alguns autores como Andreoli *et al.* (2003), Prim (2011), Lima (2010) e Comparini (2001), deram maior enfoque para esta técnica.

No estudo realizado por Andreoli *et al.* (2003) associou-se a técnica de secagem de biossólidos em leitos de secagem com a utilização de estufa plástica. Neste experimento havia também tubulações de cobre preenchidas com óleo, dispostas no fundo do leito para aquecer termicamente o lodo com energia proveniente de um biogás oriundo de um reator tipo RALF. Os resultados atingidos comprovaram que com a associação destas tecnologias foi possível acelerar o processo de secagem e higienização do lodo para seu posterior uso agrícola.

Lima (2010) também estudou o emprego da estufa para o tratamento do lodo visando sua aplicação na agricultura. O lodo desta pesquisa foi proveniente de uma ETE de Vila Velha (Lodos Ativados). A autora testou a utilização de estufa agrícola para a secagem e higienização tanto de lodo digerido anaerobiamente quanto de lodo não-digerido. Em ambos os casos 3 ciclos de secagem foram estabelecidos, considerando-se a variação da configuração do lodo dentro da estufa (camadas de 10 cm, 20 cm ou em leiras); a frequência de revolvimento (uma ou três vezes por semana); e finalmente a adição ou não de cal hidratada. Os ciclos tiveram duração de 63 a 70 dias e encerravam quando o lodo atingia o teor de ST próximo de 90%. Dentre as diversas configurações testadas a melhor para o uso da estufa na secagem e higienização do lodo, considerando as condições metodológicas testadas e seu aproveitamento agrícola, é a seguinte: lodo digerido; tempo de secagem aproximado de 36 dias; forma de disposição do lodo com altura igual a 10cm; período de revolvimento de três vezes por semana; sem adição de cal ao lodo. Com esta configuração é possível o lodo atingir umidade final de aproximadamente 75% e uma diminuição de volume de cerca de 76%. Desse modo o material atinge a qualidade para ser utilizado como insumo agrícola.

Outro estudo focado na utilização de estufa para a estabilização de lodo de esgoto é o de Comparini (2001). Com o objetivo de avaliar o decaimento de patógenos em biossólidos submetidos à secagem em estufa, o autor constatou a boa eficiência deste método de tratamento. Nesta pesquisa o lodo era proveniente de uma ETE de Lodos Ativados e

havia passado inicialmente por processo de digestão anaeróbia. Após três repetições do processo de estabilização em estufa, com duração de 90 dias cada, os principais resultados relevantes para o presente trabalho foram os seguintes:

- A umidade reduziu de valores iniciais entre 82% e 84% para valores médios entre 9,7% e 11,45% .

- A concentração de SV em relação à de ST reduziu de 73% do início dos experimentos a valores da ordem de 53% ao final, o que demonstra prosseguimento do processo de estabilização do biossólido durante a secagem.

- A taxa de redução de umidade foi maior quando o processo de reviramento iniciou com o espalhamento do lodo em uma camada de 10 cm com posterior formação de leira 15 dias após o início.

Com o objetivo de secar e higienizar lodos de estação de tratamento de água e de esgoto para seu uso posterior em coberturas de aterros, Prim (2011) também empregou estufa agrícola e obteve resultados similares aos autores supracitados. A autora adicionou percentuais que variaram de 15% a 45% de cal ao lodo e o resultado da mistura mais eficiente (15%) antes e depois da secagem, assim como o de outros autores, são expostos na Tabela 4.

As temperaturas médias das máximas e mínimas diárias ocorridas dentro da estufa fora dela (temperatura ambiente) nos experimentos das principais referências consultadas estão descritas na Tabela 5.

No âmbito comercial já existem algumas empresas fabricantes de estufas que realizam a secagem e/ou higienização de lodo de esgoto e lodo de água em pequenas e grandes escalas. A PARKSON CORPORATION (2011), por exemplo, desenvolveu um sistema chamado de Thermo-System Active Solar Sludge Dryer capaz de se aplicar à ETEs que recebem desde 8,76 L/s (0,2 MGD⁸) até 1752 L/s (40 MGD) de efluentes. Neste sistema um microprocessador controla todas as variáveis climáticas internas (umidade, ventilação e exaustão) e também o ciclo operacional de um equipamento móvel, responsável pela distribuição, aeração e revolvimento do lodo. Aproximadamente 95% da energia necessária para secar o lodo provém do sol e no final do processo o material encontra-se biologicamente estabilizado, com teor de sólidos de até 90% e padrão Classe A para legislação norte-americana.

⁸ MGD = Milhões de Galões por Dia (Millions of U.S. Gallons per Day). 1 U.S. Gallon = 3.78 Litros.

Outra grande empresa que produz estufas comerciais para tratar lodo é a VEOLIA. O processo desenvolvido por ela associa a secagem do lodo com a biodegradação aeróbia. Neste caso o biossólido é disposto em leiras triangulares as quais são periodicamente reviradas automaticamente por um equipamento destinado a este fim. Desse modo

Tabela 4. Parâmetros de qualidade do lodo antes e após secagem e higienização em estufas de referências consultadas.

AUTORES	pH		Umidade (%)		SV/ST (%)		<i>E.coli</i> (NMP/gST)		Ovos Helmintos (ovos viáveis /gST)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
	COMPARINI (2001)	6,0 a 7,7	6,0 a 7,7	82 a 84	9,7 a 11,5	73	53	2,34 x 10 ⁵	<10 ³	27,06
LIMA (2010) lodo sem cal¹	6,2 a 7,3	5,1 a 6,4	85,2 a 89,1	5,9 a 27,9	64,6 a 79,7	36,0 a 45,7	10 ⁴ a 10 ⁵	<3,6 a 10 ²	0,21 a 0,29	0,11 a 0,16
LIMA (2010) lodo com cal^{2*}	12 a 12,4	7,7 a 8,1	82,3 a 87,9	5,7 a 21,9	52,1 a 66,5	33,0 a 35,4	<3,6 a 10 ¹	<3,6 a 10 ¹	0,17 a 0,31	0,09 a 0,16
PRIM (2011)*	13,3	9,5	62	6	39	38	7,9 x 10 ²	1,8x 10 ¹	-	-

Obs: A segunda casa decimal de alguns resultados foi arredondada

¹Os resultados de Lima (2010) expostos englobam os valores dos 3 ciclos realizados e consideram a etapa de lodo não estabilizado.

* O teor de cal adicionado no experimento de Lima (2010) foi de 13,5% em relação aos ST e de Prim (2011) foi de 15%.

Tabela 5. Valores máximos e mínimos da temperatura de estufa e seu ambiente externo de referências consultadas.

AUTORES	Temperatura Ambiente (°C)		Temperatura Estufa (°C)	
	Máxima ¹	Mínima ²	Máxima ¹	Mínima ²
	COMPARINI (2001)	37	12,9	55,8
LIMA (2010)³	37,5	16,5	51,6	18,3

¹Média das máximas diárias.

²Média das mínimas diárias.

³Considerando a etapa de tratamento de lodo não digerido deste trabalho.

o oxigênio entra em contato com o lodo e a fermentação provoca a elevação da temperatura até 50-60°C. Assim, a maior parte dos microorganismos são inativados e a secagem é acelerada. O produto final atende às exigências da Diretiva Européia para aplicação de lodo de esgoto na agricultura.

2.1.5 Aproveitamento e Disposição Final

A disposição final de dejetos humanos tem sido considerada assunto de preocupação provavelmente desde que o homem começou a se congreguar em aldeias, vilas e cidades. O objetivo principal sempre foi livra-se do material para manter o bem-estar público e o seu aproveitamento era secundário, com exceção de regiões orientais muito populosas, onde a necessidade de garantir cada grama de material fertilizante para o crescimento e cultivos de alimentos tornou-se fator determinante (DE TURK, 1935).

Na Alemanha, porém, há registros do uso de lodo como fertilizante desde o século XVI e posteriormente, em 1869, Berlim passou a comprar grandes áreas para adubar culturas com lodo de esgoto fresco (BASTIAN *et al.*, 1998). A partir do século XIX então, a França, a Inglaterra e os Estados Unidos estabeleceram seus primeiros sistemas de irrigação com esgoto e ao longo do século XX, o uso do lodo e pesquisas no sentido de se aproveitar este resíduo, se intensificaram nos países desenvolvidos (EPSTEIN, 2003).

No Brasil, segundo Poggiani *et al* (2006), a experiência do uso de lodo na agricultura se iniciou na década de 1980 com os pesquisadores Wagner Bettiol e Paulo de Campos Torres de Carvalho, sendo que as primeiras pesquisas na área florestal especificamente surgiram apenas no final dos anos noventa. O estudo e as pesquisas sobre o aproveitamento de lodo para outros fins como a fabricação de tijolos e uso como agregado para fabricação de concreto surgiram nas décadas de 70 e 80 nos EUA e apenas na década de 90 o lodo começou a ser testado em coberturas de aterros sanitários (GRIFFIN *et al*, 1998; LEFFLER *et al.*, 2000; PAPIN; WEST, 1999). Atualmente as principais alternativas para o aproveitamento e disposição final de lodo de esgoto, são as seguintes:

- Aplicação em áreas degradadas
- Disposição em aterros sanitários
- Incineração

- Disposição em oceanos
- Aplicação na agricultura, florestas, campos de golfe, etc.
- Utilização como agregado na construção civil
- Utilização em camadas de coberturas de aterro sanitário

2.1.6 Limites Normativos

Na definição de *resíduos sólidos* da NBR 10.004 (ABNT, 2004a) o lodo de esgoto é enquadrado como tal, pois neste conceito estão incluídos, dentre outros materiais, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e os gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. A classificação deste material, segundo os critérios desta mesma NBR, é como resíduo Classe IIA – não inerte⁹. Apesar da periculosidade sanitária do lodo de esgoto, a norma coloca que os resíduos gerados nas estações de tratamento de esgotos domésticos não são classificados segundo os critérios de patogenicidade.

No sentido de valorizar o potencial do lodo de esgoto como matéria prima, o Brasil possui a Resolução do CONAMA nº 375 de agosto de 2006 (BRASIL, 2006), que define critérios e procedimentos para seu uso agrícola e dá outras providências. Esta norma apresenta duas distintas classes de lodo em função da concentração de patógenos presentes no bioossólido (Tabela 6). Para cada classe há restritos tipos de cultura permitida para se aplicar o lodo de esgoto.

No anexo I da norma são apresentados processos aceitos para redução significativa de patógenos (necessários para a obtenção de bioossólido tipo B), redução adicional de patógenos (necessários para a obtenção de bioossólido tipo A) e redução da atratividade de vetores. Dentre estes, a estabilização com cal deve ser realizada de maneira que a quantidade de 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 aplicação adicional de álcali. Com esses critérios é possível enquadrar o lodo como Classe B. Caso se queira elevar o produto a Classe A, é necessário que este seja submetido a redução adicional de patógenos.

⁹ “Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduo classe I – Perigosos ou de resíduo classe IIB – Inertes, nos termos desta norma. Os resíduos classe IIA – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.” (ABNT, 2004a, p.5)

A condição de estabilidade requerida é considerada a partir do teor de sólidos voláteis com relação aos sólidos totais (SV/ST). Essa variável deve estar com valores menores que 0,7 para o lodo ser considerado estável. Em relação aos compostos orgânicos potencialmente tóxicos, a norma apresenta no Anexo V, uma lista de

Tabela 6. Classes de Lodo de Esgoto e requisitos do CONAMA.

Tipo de lodo de esgoto	Concentração de patógenos
Classe A	Coliformes Termotolerantes $<10^3$ NMP / g de ST
	Ovos viáveis de helmintos $< 0,25$ ovo / g de ST
	<i>Salmonella</i> ausência em 10 g de ST
	Vírus $< 0,25$ UFP ou UFF / g de ST
Classe B	Coliformes Termotolerantes $<10^6$ NMP / g de ST
	Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

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

substâncias que devem ser determinadas e suas respectivas concentrações permitidas em solos agrícolas. Contudo, ela exige total ou parcialmente o gerador de tais análises caso o órgão ambiental autorize em função das características específicas da bacia de esgotamento sanitário e dos efluentes recebidos na ETE.

Com relação às substâncias inorgânicas potencialmente tóxicas, os limites máximos estabelecidos que o material poderá atingir, para seu uso na agricultura ser permitido, são expostos na Tabela 7, assim como os valores de referência da legislação norte-americana.

A norma referente a disposição de biossólidos nos Estados Unidos é a a 40 CFR Part 503 (Código de Regulamentações Federais N° 40, Seção 503), promulgada pela Agência de Proteção Ambiental estadunidense (EPA) em 1993 e revisada em 2003 (US EPA, 2003). Tal foi a principal referência para a formulação da norma brasileira, o CONAMA n° 375 de 2006, e os valores de referência para as classes de uso também são parecidos. Para o lodo atingir padrão Classe A, pela norma norte-americana e no momento em que o material for ser usado ou disposto, a densidade de coliforme fecal deve ser menor que 1000 NMP/g ST; *Salmonella* sp. deve ser inferior a 3 NMP/4g ST; densidade de vírus entéricos menor que 1 UFP/4g ST; e ovos de helmintos viáveis menor que 1 ovo/4g ST. Para o lodo se enquadrar como Classe B ele deve possuir densidade de coliformes menor que 2×10^6 NMP/ g ST.

No Brasil, antes da criação da Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006), alguns Estados como o Paraná, São Paulo e Distrito Federal já possuíam legislações que regulavam e estabeleciam diretrizes para o uso e aplicação do lodo de esgoto na agricultura. Na esfera federal, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento também criou Instruções Normativas sobre a utilização de biossólidos na agricultura. Tais normas, porém, não serão detalhadas, pois o presente trabalho se baseou no CONAMA e na legislação norte-americana – principal referência citada quanto a qualidade de lodo de esgoto para sua aplicação em coberturas de aterro sanitário.

Tabela 7. Concentrações Máximas Substâncias Inorgânicas segundo CONAMA e a US EPA.

Parâmetros Inorgânicos	Concentração Máxima Permitida (mg/Kg, base seca)	
	Brasil	Estados Unidos
	Arsênio	41
Bário	1.300	-
Cádmio	39	85
Chumbo	300	840
Cobre	1.500	4.300
Cromo	1.000	3.000
Mercurio	17	57
Molibdênio	50	75
Níquel	420	720
Selênio	100	100
Zinco	280	7500

2.2 ATERROS SANITÁRIOS

A disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos no solo, na forma de vazadouros e lixões¹⁰, constitui sério problema ambiental e de saúde pública, pois a falta de medidas de controle propicia a proliferação

¹⁰ O termo “Lixão” é utilizado para designar a forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos municipais, caracterizada pela simples descarga sobre o solo sem qualquer medida de controle e proteção ao ambiente e saúde pública (D’ALMEIDA, VILHENA, 2000).

de vetores de doenças, a geração gases nocivos, maus odores, riscos de deslizamento em encostas, entupimento dos sistemas de drenagem e, sobretudo, a poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas pelos lixiviados, resultante da decomposição dos resíduos sólidos (ZANTA *et al.* 2006; ABNT, 1992). Além disso, Borges e Lima (2000) destacam que os lixões são também fontes de problemas sociais em função de atraírem pessoas que sobrevivem da catação as quais se instalam nestes locais, agrupando suas famílias e muitas vezes formando comunidades.

No Brasil, diversas cidades infelizmente ainda vivem este cenário e não destinam adequadamente seus resíduos sólidos. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) realizada em 2008 e divulgada em 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 50,8% dos municípios destinam seus resíduos para um lixão e 22,3% para um aterro controlado¹¹. Contudo, esse percentual vem decrescendo gradualmente e cada vez mais cidades têm evoluído seu processo de gestão, incorporando programas de coleta seletiva e uma forma de disposição final de mais apropriada, através da construção de aterros sanitários. Na Tabela 8 é possível visualizar esta evolução, principalmente com relação aos aterros sanitários, que era uma solução adotada por 1,1% dos municípios em 1989, mas progrediu para 27,7% em 2008.

A definição de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos (RSU) pode ser colocada da seguinte maneira:

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 camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores se necessário (ABNT, 1992, p.1).

Segundo Castilhos Junior *et al.* (2003), esta técnica é considerada o método mais utilizado e de menor custo para o tratamento

¹¹ Segundo a NBR 8849 (ABNT, 1985), *Aterro controlado* é um método que utiliza princípios de engenharia para disposição dos resíduos no solo, cobrindo-o com material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho. Neste caso, porém, não há necessariamente impermeabilização de base, tratamento do percolado e tratamento de gases.

de RSU. Vale ressaltar que a NBR 8419 (ABNT, 1992) define *resíduos sólidos urbanos* como os “resíduos sólidos gerados em um aglomerado urbano, excetuando os resíduos industriais perigosos¹², hospitalares sépticos¹³ e de aeroportos e portos¹⁴”. Além disso, Resolução do CONAMA nº307 (BRASIL, 2002) restringe a disposição de resíduos da construção civil em aterros sanitários, excetuando os com características de RSU. De modo geral, consideram-se passíveis de disposição em aterro os resíduos cujos líquidos lixiviados gerados possam sofrer alguma forma de atenuação no solo, seja por processos de degradação, seja por processos de retenção (filtração, adsorção, troca iônica, etc). A Figura 3 apresenta a estrutura de um aterro sanitário.

Tabela 8. Relação entre percentual de municípios brasileiros e respectivo destino final dos resíduos entre 1989 e 2008.

Ano	"Lixões" e Vazadouros a céu aberto	Aterro Controlado	Aterro Sanitário
1989	88,2%	9,6%	1,1%
2000	72,3%	22,3%	17,3%
2008	50,8%	22,5%	27,7%

FONTE: IBGE (2010).

No interior de um aterro sanitário, que pode ser concebido como um biorreator, a degradação dos resíduos ocorre basicamente de três maneiras: através da dissolução dos elementos minerais presentes no meio; devido ao carreamento das finas partículas e do material solúvel pela água de percolação; e principalmente em função da bioconversão da matéria orgânica em formas solúveis e gasosas, sob influência de mecanismos físicos, químicos e biológicos resultantes da interação entre os componentes oriundos do próprio resíduo e entre os agentes naturais (água e microorganismos) (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2003; ZANTA *et al.*, 2006). O efeito concomitante de todos esses fenômenos produz os

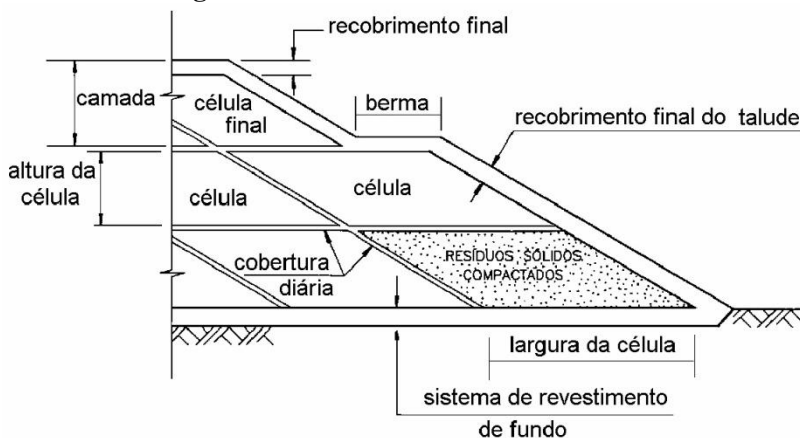
12 Todos os resíduos sólidos, semi-sólidos e os líquidos não passíveis de tratamento convencional, resultantes da atividade industrial e do tratamento de seus efluentes que, por suas características, apresentam periculosidade efetiva ou potencial à saúde humana ou ao meio ambiente, requerendo cuidados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

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

14 Resíduos sólidos provenientes de navios e portos (ABNT, 1992, p.2).

diversos impactos ambientais nas redondezas de um aterro sanitário, tais como a geração de odores, a atração de vetores e principalmente a geração de lixiviado e de biogás (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2003).

Figura 3. Estrutura de um aterro sanitário.



FONTE: Engecorps (1996, *apud* CARVALHO, 1999).

2.2.1 Biogás

O biogás é o principal produto resultante da digestão anaeróbia da matéria orgânica aterrada e suas características variam conforme a composição dos resíduos aterrados e o estágio de decomposição destes. O metano (CH_4) é o seu principal gás e apesar de ser inodoro, insípido e não tóxico, possui elevado poder calorífico e é um dos responsáveis pelo efeito estufa, tendo um potencial 21 vezes maior de aprisionamento de calor na atmosfera que o dióxido de carbono (CO_2) (MCT, 2010). Além disso, outros gases que compõem o biogás em menores concentrações lhe conferem odor desagradável (mercaptanas, compostos de enxofre) e podem ser tóxicos (REICHERT, 2007). Por essas razões os aterros devem possuir sistemas de drenagem de biogás, que evitem sua migração através dos meios porosos do subsolo, sua dispersão aos arredores da vizinhança. O controle destes gases é também fundamental para garantir a estabilidade física dos maciços de resíduos e impedir a formação de bolsões em seu interior, os quais poderão causar explosões ou incêndios locais (GOMES; MARTINS, 2003). A forma de tratamento é a simples queima nos drenos verticais ou sistemas

centralizados de queimadores, onde seu potencial energético pode ser aproveitado.

2.2.2 Lixiviado

O lixiviado é o líquido originário da água infiltrada pela cobertura do solo de um aterro sanitário e da água que excede a capacidade de retenção da umidade dos materiais aterrados e percola através massa de resíduos (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993). Sua composição é bastante variável de aterro para aterro e até mesmo dentro de um mesmo aterro ao longo do tempo e seu alto potencial poluidor é devido ao contato com a uma massa de resíduos sólidos em decomposição (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000). Antes de ser lançado ao ambiente o lixiviado deve ser coletado e tratado, mas também pode ser recirculado para o próprio aterro e interferir positivamente na decomposição dos resíduos e na produção de biogás (BORGES; LIMA, 2000). Segundo Lima e Pinheiro (2003) a recirculação do lixiviado associada com a aeração da massa de resíduos é uma solução atraente pois favorece a estabilização do mesmo e a redução de custos relacionados ao seu tratamento.

Segundo Jucá *et al.* (2006), as características físicas, químicas e biológicas dos lixiviados variam conforme o tipo de resíduo aterrado, o grau de decomposição, clima, estação do ano, idade do aterro, profundidade do resíduo aterrado, dentre outros. Em função do grande número de variáveis relacionadas com a qualidade dos lixiviados, é difícil definir valores típicos destes efluentes. Porém, a Tabela 9 apresenta faixa de valores normalmente encontrados em aterros norte-americanos e suas variações em função da idade do aterro. Tais números não representam a realidade brasileira, cujas condições climáticas, sócio-econômicas, dentre outras são diferentes. Valores da composição de lixiviados produzidos em aterros sanitários brasileiros são apresentados na Tabela 10.

O processo de decomposição dos resíduos aterrados pode ser subdividido em 5 fases definidas por Pohland e Harper (1985) citado por Gomes *et al.* (2006):

Fase I: Predomina degradação aeróbia, pois há oxigênio suficiente disponível logo após a deposição do resíduo. Esta fase dura poucos dias, por que suprimento adicional de oxigênio logo fica limitado após o aterramento (Mc BEAN *et al.*, 1995). Os microorganismos aeróbios transformam a fração orgânica dos resíduos em hidrocarbonetos, dióxidos de carbonos, água e calor.

Tabela 9. Variações das Concentrações de Lixiviados com a Idade do Aterro

Parâmetros	Idade do Aterro (Anos)			
	0 a 5	5 a 10	10 a 15	> 20
DBO (mg/L)	10000 - 25.000	1000 - 4.000	50 - 1.000	< 50
DQO (mg/L)	15000 - 40.000	10000 - 20.000	1000 - 5.000	< 1000
NTK (mg/L)	1000 - 3.000	400 - 600	75 - 300	< 50
N-NH ₃ (mg/L)	500 - 1500	300 - 500	50 - 200	< 30
SDT (mg/L)	10000 - 25.000	5000 - 10.000	2000 - 5.000	< 1000
pH	3 - 6	6 - 7	7 - 7,5	7,5
Cálcio (mg/L)	2000 - 4.000	500 - 2.000	300 - 500	< 300
Sódio e potássio (mg/L)	2000 - 4.000	500 - 1.500	100 - 500	< 100
Ferro e magnésio (mg/L)	500 - 1.500	500 - 1.000	100 - 500	< 100
Zinco (mg/L)	100 - 200	50 - 100	10 - 50	< 10
Cloreto (mg/L)	1000 - 3.000	500 - 2.000	100 - 500	< 100
Sulfato (mg/L)	500 - 2.000	200 - 1.000	50 - 200	< 50
Fósforo (mg/L)	100 - 300	10 - 100		< 10

FONTE: El-Fadel *et al.* (2002)

Fase II: Ocorre transição entre fase aeróbia e anaeróbia e microorganismos presentes toleram ambas as condições (facultativos). Compostos orgânicos complexos como proteínas, lipídeos e hidrocarbonetos são hidrolisados e fermentados para formar dióxido de carbono, hidrogênio e principalmente amônia e ácidos graxos. O pH fica na faixa de 5,5 a 6,5.

Fase III: Microorganismos acetogênicos transformam ácidos orgânicos da fase II em ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio. A concentração de íons metálicos aumenta no lixiviado devido às condições ácidas do meio, pois o pH fica na faixa de 4 ou menos. Nitrogênio e fósforo (nutrientes) são consumidos devido ao crescimento dos microorganismos atuantes.

Fase IV: Há grande produção de metano e dióxido de carbono pelas bactérias metanogênicas a partir dos ácidos da fase III, mas metano (junto com água) também é gerado a partir do hidrogênio e do dióxido de carbono. Devido ao consumo de ácidos o pH se eleva e fica

Tabela 10. Variação da composição do lixiviado gerado em aterros brasileiros.

Variável	Faixa Máxima		Faixa mais Provável		FVMP (%)
pH	5,7 -	8,6	7,2 -	8,6	78
Alcalinidade total (mg/L de CaCO ₃)	750 -	11.400	750 -	7.100	69
Condutividade (µS/cm)	2950 -	2.500	2950 -	17.600	77
DBO (mg/L de O ₂)	< 20 -	30.000	< 20	8.600	75
DQO (mg/L de O ₂)	190 -	80.000	190 -	22.300	83
Óleos e graxas (mg/L)	10 -	480	10 -	170	63
Fenóis (mg/L de C ₆ H ₅ OH))	0,9 -	10	0,9 -	4	58
NTK (mg/L de N)	80 -	3.100	Não há		-
N-amoniaco (mg/L de N)	0,4 -	3.000	0,4 -	1.800	72
N-orgânico (mg/L de N)	5 -	1.200	400 -	1.200	80
N-nitrito (mg/L de N)	0 -	50	0 -	15	69
N-nitrato (mg/L de N)	0 -	11	0 -	4	69
P-total (mg/L)	0,1 -	40	0,1 -	-15	63
Sulfeto (mg/L)	0 -	35	0 -	10	78
Sulfato (mg/L)	0 -	5.400	0 -	1.800	77
Cloreto (mg/L)	500 -	5.200	500 -	3.000	72
Sólidos totais (mg/L)	3200 -	21.900	3200 -	14.400	79
Sólidos totais fixo (mg/L)	630 -	20.000	630 -	5.000	60
Sólidos totais voláteis (mg/L)	2100 -	14.500	2100 -	8.300	74
Ferro (mg/L)	0,01 -	260	0,01 -	65	67
Manganês (mg/L)	0,04 -	3	0,04 -	2	79
Cobre (mg/L)	0,005 -	1	0,05 -	0	61
Níquel (mg/L)	0,03 -	1	0,03 -	1	71
Cromo (mg/L)	0,003 -	1	0,003 -	1	89
Cádmio (mg/L)	0 -	0	0 -	0	67
Chumbo (mg/L)	0,01 -	3	0,01 -	1	64
Zinco (mg/L)	0,01 -	8	0,01 -	2	70

FVMP: frequência de ocorrência dos valores mais prováveis.

FONTE: Souto e Povinelli (2007).

entre 7 e 8 e alguns metais são removidos por complexação e precipitação. O potencial redox fica bem baixo e sulfatos e nitratos são reduzidos para sulfitos e nitrogênio gasoso. Esta fase pode durar de seis meses até vários anos após a deposição dos resíduos.

Fase V: a atividade biológica se reduz bastante pela diminuição de substratos e nutrientes disponíveis. O lixiviado apresenta baixa carga orgânica, a produção de gases cai consideravelmente e a degradação de matéria orgânica recalcitrante pode lentamente produzir moléculas de ácidos húmicos.

O volume de lixiviado gerado tem relação direta com o ciclo hidrológico da região e com o balanço hídrico do aterro (precipitação, evaporação, escoamento superficial, infiltração e evapotranspiração). Nesse aspecto, as características da camada de cobertura influenciam diretamente e por isso são tão importantes em um aterro sanitário (CASTILHOS JUNIOR *et al.*, 2003). É importante que se monitore as características do lixiviado ao longo da construção do aterro, pois indicam o grau de decomposição dos resíduos e revelam os principais poluentes a se tratar.

Os parâmetros mais importantes para se analisar em lixiviados são, segundo Gandolla *et al.* (1995 *apud* REICHERT, 2007): pH, DQO, DBO₅, relação DBO₅/DQO, metais, nitrogênio e ácidos orgânicos. O enxofre e o fósforo podem ser também monitorados, mas normalmente aparecem em quantidades modestas.

2.2.3 Camadas de Cobertura de Aterro

O sistema de cobertura de resíduos é um aspecto construtivo de fundamental importância nos aterros sanitários, pois objetiva essencialmente minimizar a infiltração de água na massa de resíduos para evitar a formação de lixiviado e mitigar os impactos decorrentes da exposição deste material ao ambiente (BAGCHI, 2004; D'ALMEIDA; VILHENA, 2000). Dentre outras funções, D'Almeida e Vilhena (2000, p. 283) colocam que o sistema de cobertura deve “eliminar a proliferação de vetores, reduzir a exalação de odores, diminuir a taxa de formação de lixiviados, impedir a catação, permitir o tráfego de veículos coletores sobre o aterro, eliminar a queima de resíduos e a saída descontrolada de biogás”.

As camadas de cobertura executadas ao longo do processo de enchimento de um aterro são chamadas de cobertura *diária* ou

intermediária e as camadas efetuadas na finalização do aterramento são denominadas cobertura *final* (LANGE *et al.*,2006).

2.2.3.1 Camada de cobertura diária e intermediária

As coberturas diárias são realizadas no final de cada jornada de trabalho (ou mais freqüente, caso haja essa demanda), e suas funções básicas são as seguintes (Mc BEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995):

- a) Diminuir a infiltração de água pluvial no maciço de resíduos;
- b) Evitar a dispersão e o espalhamento dos resíduos pela ação dos ventos;
- c) Ajudar a reduzir a emissão de odores;
- d) Limitar o contato de aves e vetores de doença com os resíduos;
- e) Permitir a operação e o acesso de veículos à frente de serviço;
- f) Ajudar a prevenir incêndios;
- g) Minimizar o impacto visual.

Uma camada diária de solo compactado com 15 cm é suficiente para alcançar essas funções (Mc BEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995), mas esse valor varia normalmente entre 10 e 20 cm (JARAMILLO, 1991 *apud* LANGE *et al.*, 2006). No Brasil, as normas técnicas que tratam aspectos operacionais e construtivos de aterros sanitários - NBR 8419 (ABNT, 1992) e NBR 13896 (ABNT, 1997) - não especificam a espessura desta camada.

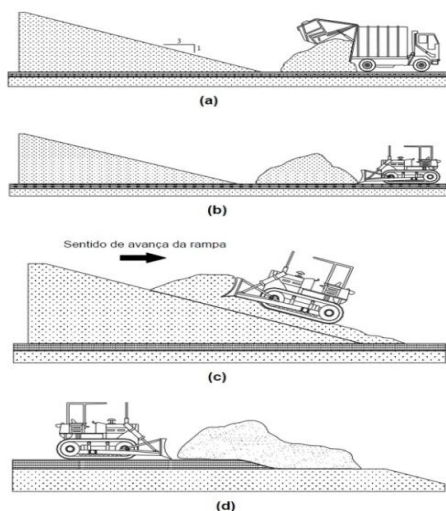
As coberturas intermediárias têm praticamente a mesma função que as coberturas diárias, mas costumam ser mais espessas – em torno de 30 cm – e são utilizadas em áreas que estão ou ficarão inativas por período prolongado. Os autores D’Almeida e Vilhena (2000) consideram que este tipo de camada se aplica quando o tempo inativo é mais que um mês, enquanto Mc Bean, Rovers e Farquhar (1995) afirmam ser aplicável para período maior que um ano. A compactação e o espalhamento do material são realizados geralmente com trator-deesteira (Figura 4), mas em pequenos aterros pode-se recorrer à retroescavadeira ou então proceder para a cobertura manual (REICHERT, 2007).

A utilização de recobrimento diário dos resíduos muitas vezes é questionada, pois diminui o volume disponível para aterramento e conseqüentemente a vida útil do aterro. Assim, quanto mais espessa for a camada de cobertura intermediária, maior será essa perda, que

segundo Engecorps (1996 *apud* Carvalho, 1999) pode chegar até 20% do volume total do aterro, englobando uma parcela entre 20 e 30% da despesa global da obra. Outro ponto a se considerar é a interferência que as camadas de recobrimento causam no fluxo vertical do lixiviado, ocasionando lençóis suspensos de lixiviado e bolsões de gás (CARVALHO, 1999).

Com o objetivo de permitir uma melhor movimentação vertical dos lixiviados para as camadas subjacentes e evitar vazamento de lixiviado nos pés dos taludes, conhecido como “choro de pé de talude”, Reichert (2007) sugere que se remova a camada intermediária antes da alocação de nova cobertura. Desse modo há maior contato entre as camadas de resíduos e economia de material de cobertura, uma vez que este pode ser reaproveitado na camada superior subsequente. O mesmo autor salienta que neste processo pode ocorrer “contaminação” do solo de cobertura em função do carreamento de alguns resíduos junto com a camada retirada, mas que este problema pode ser resolvido colocando-se uma fina camada de 5 cm de solo “virgem”. Outra solução adotada por alguns aterros é o uso de “mantas de sacrifício” desenrolada sobre a frente de resíduos exposta e ancorada nas bordas. Dependendo da quali-

Figura 4. (a) Descarga na frente de serviço; (b) e (c) Espalhamento e compactação dos resíduos em rampa 3:1, indicando o sentido de avanço da rampa; (d) Cobertura periódica dos resíduos compactados.



FONTE: Reichert (2007).

-dade do material empregado – normalmente algum tipo de plástico – esta pode ser reutilizada e tem a vantagem de não ocupar o volume que camada de 15 cm de solo ocuparia (McBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995).

A origem do material que se utilizará como cobertura é de grande relevância em um projeto de aterros, devido a grande quantidade demandada ao longo de sua vida útil. Em alguns casos este pode ser obtido a partir das escavações requeridas para futura disposição de resíduos – o que seria o ideal. Contudo, muitas vezes o volume de material disponível é limitado e outras fontes, como jazidas fora da área do aterro sanitário, devem ser previstas. Este caso implica em maiores custos de transporte e do próprio material, além de que estas (jazidas) devem ser alvo de licenciamento ambiental (REICHERT, 2007). A Figura 5 mostra a operação de recobrimento de resíduos de um aterro sanitário.

Figura 5. Cobertura intermediária dos resíduos (ao fundo, retirada de material no próprio aterro) Aterro Metropolitano Santa Tecla, Gravataí, RS.



FONTE: Reichert (2007).

Nesse sentido, uma tendência importante é a crescente aceitação da cobertura diária com materiais alternativos em substituição ao solo compactado (McBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995).

Segundo Lange *et al.* (2006), dentre as principais motivações destaca-se o crescente incentivo da reciclagem dos materiais, e conseqüente minimização de impactos ambientais associados a esta prática, além da busca por redução de custos com gerenciamento dos resíduos. É imprescindível, portanto, que estes novos produtos tenham viabilidade econômica e exerçam a função requerida para sua aplicação. Na literatura são encontradas diversas alternativas para utilização de

materiais como cobertura diária e/ou intermediária e os principais estão listados no Quadro 2.

Quadro 2. Materiais alternativos utilizados em coberturas diárias e intermediárias.

Materiais cobertura diária	Descrição
<i>Resíduos da Construção Civil (RCD)</i>	Solos ou entulhos resultantes da construção civil podem ser utilizados para fazer cobertura diária e intermediária de aterros sanitários (GOMES; MORAES; BOFF, 2007; REICHERT, 2007)
<i>Espuma long-lasting Aft-500</i>	Camada de espuma que pode ser aplicada com pulverizadores, cuja cobertura dura 40 dia após sua aplicação (LANGE <i>et al.</i> , 2006)
<i>Mantas sintéticas</i>	Mantas geotêxtil ou mantas plásticas de polipropileno, também chamadas geossintéticas são coberturas colocadas no fim da jornada de trabalho e retirada no dia seguinte para colocação de mais resíduos. Possuem a vantagem de não ocupar o volume que camada de 15 cm de solo ocuparia (McBEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995).
<i>Composto orgânico</i>	A utilização de Composto orgânico é indicada para camadas de cobertura, pois é feita em parte com resíduos que seriam aterrados e por ter bom potencial para oxidar metano - quando em condições aeróbias (TANTHACHOON; CHIEMCHASRI; CHIEMCHASRI, 2007). É preciso o material bem estabilizado para evitar a geração de maus odores (ROSE, 2009).
<i>Lodo (ETE, ETA, Indústria papel)</i>	Lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) estabilizado e com umidade menor que 50% pode ser utilizado como cobertura diária em aterros sanitários (GRIFFIN <i>et al.</i> , 1998). Lodo de estação de tratamento de água também tem potencial de ser utilizado para esta finalidade (LANGE <i>et al.</i> , 2006; PRIM, 2011), assim como lodo de indústria de papel (TEIXEIRA, 2002; CABRAL <i>et al.</i> , 2002).
<i>Outros</i>	Dentre outros materiais, há pesquisas que indicam potencial de cobertura de <i>areia de fundição</i> (GOMES, MORAES, BOFF, 2007; QUISSINI, 2009) e de mistura de <i>resíduos de poda e capina com madeira</i> (Mc BEAN; ROVERS; FARQUHAR, 1995).

Nota: Algum dos materiais citados no Quadro 2 também podem ser aplicados como camada de cobertura final.

A Agência Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) por meio do Título 40 do Código de Regulamentos Federais – Parte 258 (US EPA, 1991) define os requisitos para o projeto e operação de aterros sanitários de RSU. Esta determina no parágrafo §258.21 que deve-se colocar 15 cm de terra no final de cada dia de operação, ou com intervalos mais frequentes, se necessário, para controlar vetores de doenças, incêndios, odores, dispersão de resíduos sólidos pelo vento, e a organização do local. Contudo, essa espessura pode variar no caso de se aplicar materiais alternativos, os quais devem ser antes aprovados pelo Estado perante demonstração do cumprimento dos requisitos já citados (controlar vetores, incêndios, etc.) sem que represente uma ameaça para a saúde humana e para o meio ambiente. Entretanto, pode ocorrer extremos sazonais das condições climáticas que tornem estes requisitos impraticáveis e neste caso, o Estado pode conceder uma dispensa temporária da exigência explanadas.

2.2.3.2 Camada de Cobertura Final

O sistema de impermeabilização superior de um aterro sanitário é composto basicamente pela camada de cobertura final e objetiva isolar a massa de resíduos do ambiente externo para evitar a geração de lixiviado, a atração de vetores e a saída de gases para atmosfera. Devem também possuir baixa permeabilidade à água e durabilidade ao longo do tempo, pois ficam suscetíveis às intempéries, escavações por animais, erosão, recalques da massa de resíduos dentre outros elementos (MARIANO, 2008; REICHERT, 2007). Segundo McBean *et al.* (1995), as principais finalidades da cobertura final são:

- a) Proporcionar o escoamento da água superficial e proteger a cobertura em si de erosões;
- b) Atuar como uma capa de baixa permeabilidade que reduz a infiltração das águas superficiais na massa de resíduos e limite a geração de lixiviado;
- c) Reter umidade para o crescimento de vegetação;
- d) Reduzir ou aumentar a migração de gases do aterro, dependendo dos objetivos do projeto;
- e) Adequar a área e os seus contornos de acordo com sua futura utilização;
- f) Fornecer uma base para o estabelecimento de uma cobertura de solo adequada.

Normalmente a cobertura final possui de 3% a 5% de inclinação (QASIM; CHIANG, 1994), de 0,5m a 1m de espessura e pode ser composta por uma ou mais camadas com diferentes funções. Segundo Pereira (2005), grande parte dos aterros construídos no Brasil emprega camada homogênea de argila compactada. Porém, os autores Gomes e Martins (2003) recomendam a utilização de solo argilo-arenoso, por apresentar menor retração (fissuras) por secagem em relação a solos com teores de argila muito elevados.

O aparecimento de macro ou microfissuras é resultado tanto de ciclos de estiagem e de chuva, como também da penetração das raízes de vegetação. Elas propiciam caminhos preferenciais ao fluxo de líquidos e gases e aumentam a permeabilidade em torno de 3 ordens de grandezas, passando de 10^{-7} a 10^{-4} cm/s (JESSBERGER; STONE, 1991 *apud* MARIANO, 2008). É importante a escolha do tipo de vegetação adequada à camada, pois esse elemento ajuda a evitar problemas de erosão e contração de solo, mas pode também aumentar sua condutividade hidráulica. Por esse motivo, a camada de vegetação, além de ser resistente, deve situar-se na parte superficial da cobertura e possuir raízes que não penetrem na camada impermeabilizante (camada argilosa) (REICHERT, 2007).

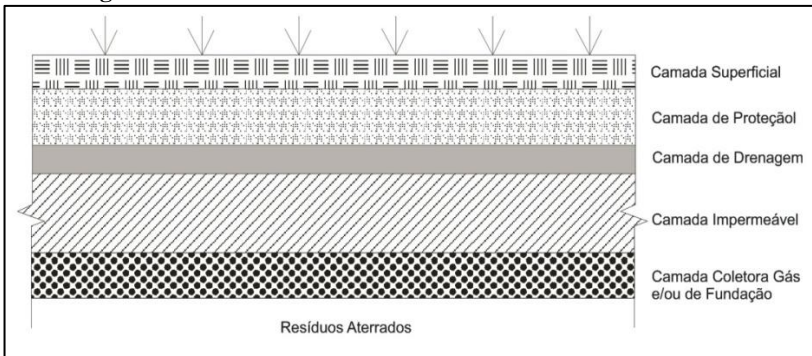
Há diversos arranjos possíveis para a camada final de cobertura, os quais são construídos de acordo com as características meteorológicas do local, os objetivos e os recursos disponíveis. No entanto, os componentes de uma cobertura final normalmente apresentado pela literatura são estes (Figura 6):

- Camada Superficial: Também conhecida como camada vegetativa ou camada de controle de erosão. Deve ter pelo menos 15 cm e normalmente é feita de solo fértil onde se estabelece grama ou plantas herbáceas, as quais não possuem raízes profundas. Este tipo de cobertura minimiza a ocorrência de erosão, promove transpiração da água de volta à atmosfera, diminui o impacto da chuva e diminui a velocidade dos ventos sobre a superfície do solo (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). Em locais áridos esta camada geralmente é de pedras e britas pela dificuldade de se estabelecer vegetação (*Ibidem*).

- Camada de Proteção: Situa-se abaixo da camada superficial (pode ser também combinada com ela) e é feita com solo nativo disponível, material residual recuperado ou até blocos rochosos (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000). Objetiva proteger a camada impermeável de ressecamento, escavações por animais, penetração de

raízes, da penetração pelo gelo e intrusões acidentais (REICHERT, 2007; LANGE *et al.*, 2006; QIAN; KOERNER; GRAY, 2002). 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). Contudo a legislação alemã determina espessura mínima de 1 metro para esta camada (SIMON e MÜLLER, 2004).

Figura 6. Camada de cobertura final de um aterro sanitário.



FONTE: Adaptado de Bagchi (2004).

- Camada de drenagem: se situa abaixo da camada de proteção e acima da impermeável. Objetiva remover a água que penetra sobre a cobertura para: minimizar a infiltração, manter a estabilidade dos taludes e permitir camada superior de absorver e reter água adicional. Segundo Qian, Koerner e Gray (2002) esta camada deve ter: permeabilidade de 10^{-2} cm/s ou mais; mais de 30 cm de espessura; inclinação mínima de 4%. A legislação alemã também adota esta mesma espessura mínima, porém, determina permeabilidade de 10^{-1} cm/s ou mais (SIMON e MÜLLER, 2004). Os materiais mais empregados são solos granulares e não coesivos como areias e cascalhos, mas também se utiliza geossintéticos.

- Camada impermeável: é a principal camada para fornecer proteção contra infiltração de água. Ela objetiva também evitar que os gases de aterro sejam lançados para a atmosfera. Pode ser feita de argila compactada, argila geossintética, geomembranas ou a associação entre mais de um destes materiais (D'ALMEIDA; VILHENA, 2000; QIAN; KOERNER; GRAY, 2002; BAGCHI, 2004). Deve possuir pelo menos 45 cm de espessura (QIAN; KOERNER; GRAY, 2002) e os requisitos geotécnicos desta camada são apresentados no tópico a seguir (2.2.3.3)

- Camada Coletora de gás e ou fundação: é a camada em contato com a massa de resíduos e objetiva regularizar a superfície que servirá de suporte para camada impermeável. Quando o solo desta camada é granular, ela também atua como camada de ventilação de gases.

Outra duas categorias de cobertura são as camadas evapotranspirativas e as barreiras capilares. As primeiras apresentam uma camada de solo disposto sob condições naturais e uma cobertura vegetal com plantas nativas. Já as barreiras capilares são constituídas por solos finos depositados sobre uma camada de solo granular, geralmente areia ou cascalho. Neste caso o fluxo de água descendente é limitado devido a diferença na matriz de sucção na interface das duas camadas (BAGCHI, 2004).

A camada final de cobertura é de grande importância também na prevenção do comportamento geotécnico e biológico da massa de resíduos sólidos e na determinação de parâmetros de projeto e operação do aterro. (PEREIRA, 2005).

2.2.3.3 Características Geotécnicas das Coberturas de Aterros

As normas brasileiras relativas ao projeto, implantação e operação de aterros sanitários não apresentam nenhuma especificação técnica a respeito das propriedades geotécnicas das camadas de coberturas em geral. Uma delas – a NBR 13.896 (ABNT, 1997, p. 9) – apenas indica que a cobertura final deve “minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro”. Esta recomenda a execução de aterros em áreas onde o subsolo tenha coeficiente de permeabilidade inferior a 5×10^{-5} cm/s, mas considera desejável existência de um depósito natural de material com permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s. Com relação a coberturas diárias, tal norma não menciona nenhuma recomendação. Granato (2011) também afirma que não há requisitos geotécnicos para as camadas de cobertura *diária* ou *intermediária*, apenas para as camadas *finais*.

Conforme já colocado no tópico anterior, o uso de camada homogênea de argila compactada é muito empregado nos aterros sanitários, em função de suas propriedades. Porém, para um solo argiloso ser considerado adequado como impermeabilização de aterros –

tanto em camadas de base (inferior) como coberturas (superior) – deve atender às seguintes características (ROCCA *et al.*, 1993):

- a) Ser classificado como CL, CH, SC ou OH, segundo sistema unificado de classificação de solo (ASTM D2487-00);
- b) Apresentar uma porcentagem maior do que 30 % de partículas passando pela peneira nº 200 da ASTM (Análise de Granulometria por Peneiramento e Sedimentação conforme NBR 7181/84);
- c) Limite de Liquidez (LL) maior ou igual a 30 % (conforme NBR 6459/84);
- d) Índice de Plasticidade (IP) maior ou igual a 15 (conforme NBR 7180/84);
- e) pH maior ou igual a 7;
- f) Coeficiente de permeabilidade (k) inferior a 10^{-7} cm/s quando compactado.

O principal parâmetro considerado nas coberturas *fnais* é a permeabilidade, pois solo com baixa permeabilidade reduz as possibilidades de contaminação do aquífero. Quanto maior o percentual de argilas, menos permeável será o solo. Outro parâmetro importante relativo ao comportamento de camadas de aterros é a resistência ao cisalhamento em função das solicitações, cargas pontuais, mudanças de temperatura e ao próprio peso dos resíduos, acarretando no aparecimento de potencial superfície de deslizamento ou ruptura.

As camadas impermeabilizantes de argila quando forem compactadas devem seguir as seguintes orientações (ROCCA *et al.*, 1993):

- a) Camadas compactadas de no máximo 20 cm de espessura;
- b) Umidade em torno da ótima obtida em ensaio de compactação com Proctor normal;
- c) Densidade de no mínimo 95% da densidade máxima obtida no ensaio de compactação Proctor Normal;
- d) Coeficiente de permeabilidade (k) de no máximo 10^{-7} cm/s.

Franceschet *et al.* (2005) estudaram quatro tipos de solo utilizados para a impermeabilização da camada de base e de cobertura de aterros sanitários de diferentes regiões de Santa Catarina e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 12.

Além dos critérios já apresentados por Rocca *et al.*(1993) a Tabela 11 apresenta outros parâmetros geotécnicos definidos pelas principais referências consultadas.

Tabela 11. Requisitos para cobertura de aterro sanitário de Referências.

ROCCA et al. (1993)	U.S.EPA (1993)	QIAN, KOERNER, GRAY (2002)	QASIN E CHIANG (1994)	NBR 13896 (ABNT, 1997)
$k < 10^{-7}$ cm/s	$k < 10^{-5}$ cm/s	$k < 10^{-7}$ cm/s	$k < 10^{-7}$ cm/s	$k < 5 \times 10^{-5}$ cm/s
Classificação SUCS (CL, CH, SC ou OH)	-	solo rico em areia com argilas (SC)	-	-
% Passante na #200 > 30%	-	-	% Passante na #200 > 40%	-
LL>30%	-	-	LL>25%	-
IP>15%	-	IP<50%	IP>10%	-

Nota: o símbolo “#” refere-se ao número da peneira utilizada em ensaios geotécnicos.

2.3 UTILIZAÇÃO DE LODO EM CAMADA DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS

O uso benéfico do lodo de esgoto em coberturas de aterros sanitários ainda não é prática de gerenciamento de lodo de esgoto muito difundida. Contudo, alguns países como os Estados Unidos, o Canadá, Itália, Noruega, China, Austrália, África do Sul a aplica recorrentemente, pois ao mesmo tempo em que se valoriza um resíduo, minimiza-se a demanda por solo em jazidas naturais (LeBLANC; MATTHEWS; RICHARD, 2008). Idealmente seria interessante aplicar todo o lodo gerado na agricultura devido a ciclagem de nutrientes, porém, nem sempre este subproduto é aceito nesta atividade ou atinge a qualidade requerida para evitar riscos à saúde pública e ambiental. Nesse sentido, o emprego do bio sólido em camadas diárias ou finais de cobertura é uma alternativa interessante, pois não demanda um alto grau de qualidade como o uso agrônômico, e é capaz de cumprir as funções requeridas nos aterros sanitários. Além disso, Granato (2010) afirma que manter um leque de opções para a disposição final de lodo de esgoto é muito importante estrategicamente e para a gestão de risco desta atividade.

Em Chicago, por exemplo, toda sua produção de lodo poderia ser destinada para adubar e condicionar o solo das fazendas situadas nos

municípios circunvizinhos. Contudo, esta metrópole adotou uma política de que parte significativa da sua produção de lodo deveria permanecer

Tabela 12. Propriedades geotécnicas de solos de cobertura utilizados em Santa Catarina.

ENSAIOS	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4
<i>Análise Granulométrica</i>	<i>Silte arenoso</i> (silte 46,9 %; areia 27,6 %; argila 25,6 %)	<i>Areia siltosa</i> (areia 47,0 %; silte 45,2 % e argila 7,8 %)	<i>Silte argiloso</i> (silte 55,7 %; argila 22,3 % e areia 22,1 %)	<i>Argila Siltosa</i> (argila 64,2 %; silte 33,6 % e areia 2,2 %)
<i>Limite de Liquidez (LL)</i>	76%	67%	56%	72%
<i>Índice de Plasticidade (IP)</i>	22 (altamente plástico)	14 (medianamente plástico)	11 (medianamente plástico)	6,8 (fracamente plástico)
<i>Massa específica dos grãos (g/cm³)</i>	2,596	2,223	2,319	2,231
<i>Compactação</i>	Umidade ótima = 26,3 %	Umidade ótima = 36,0 %	Umidade ótima = 32,1 %	Umidade ótima = 31,8 %
<i>Compactação</i>	Massa específica aparente máxima do solo seco = 1,46 g/cm ³	Massa específica aparente máxima do solo seco = 1,30 g/cm ³	Massa específica aparente máxima do solo seco = 1,35 g/cm ³	Massa específica aparente máxima do solo seco = 1,45 g/cm ³
<i>Permeabilidade (cm/s)</i>	4,83 x 10 ⁻⁶	5,43 x 10 ⁻⁷	4,11 x 10 ⁻⁷	2,30 x 10 ⁻⁷
<i>Índice de vazios amostra compactada (e)</i>	0,83	0,74	0,75	0,58

FONTE: Franceschet *et al.* (2005).

na própria cidade, para evitar a geração de passivos em outros locais e para poder ter um leque maior de alternativas, caso alguma outra tivesse problemas (GRANATO, 2010). Desse modo, 60% do lodo é destinado à agricultura, 15% para áreas urbanas, 15% em camadas de cobertura diária e 10% em camadas de cobertura final (*Ibid.*). Em São Francisco, por exemplo, 100 % dos biossólidos gerados são aproveitados e o

percentual empregado em coberturas de aterros passa dos 50% do total (SFPUC, 2009). A Figura 7 apresenta a aplicação de biossólido como cobertura alternativa de aterro sanitário em Vancouver, EUA.

Figura 7. Utilização de biossólido em coberturas de aterro.



FONTE: HDR Engineering, Inc. (2009).

Para o lodo ser aproveitado como camada de cobertura, porém, é imprescindível que este passe por processo de redução de sólidos voláteis e de umidade. Griffin *et al.* (1998) afirma que lodo de esgoto estabilizado e com teor de sólidos de 50% ou mais apresenta diversas vantagens quando utilizado como camada *diária* de cobertura: auxilia no controle de vetores, reduz a emissão de odores, favorece a geração de metano, reduz o potencial de contaminação do solo e também a chance de ocorrência de incêndios em aterros sanitários.

Segundo Granato (2011) a relação SV/ST do biossólido aplicado em coberturas na cidade de Chicago varia entre 35% e 50%, mas normalmente situa-se mais próximo de 40%. Neste caso todo o lodo utilizado para este fim é anaerobiamente digerido em temperaturas mesofílicas (35°C) e posteriormente desaguado em centrífugas e ao ar livre, até a umidade próxima de 60%, ou 40% de ST. Simmons (2003), no entanto, apresenta valores de SV/ST que se situam entre 31,4% e 40,8% para lodo aplicado em coberturas. Para este mesmo parâmetro, Pietz *et al.* (1996) mostram lodo com 42,1%.

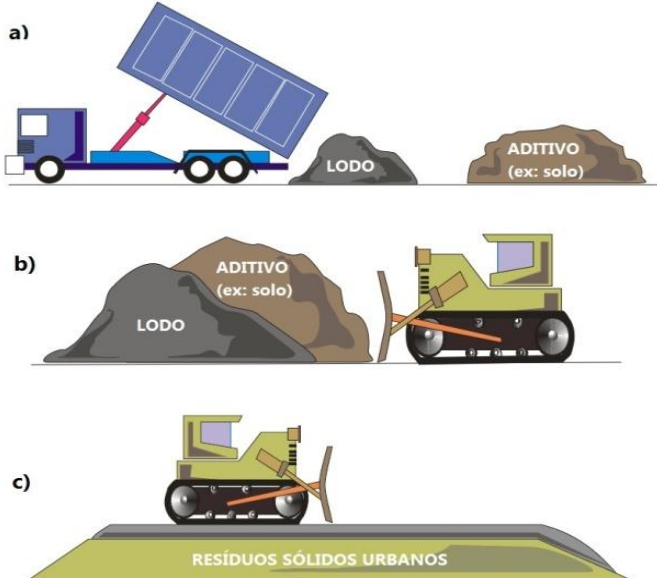
No caso da aplicação como camada *final* o lodo também deve ter reduzido teor de SV (estabilizado) e possuir teor de sólidos maior que 20%. Para se evitar deslizamentos nas encostas laterais recomenda-se que o lodo seja misturado com solo, aparas de madeira ou cinzas em proporção a ser definida em função da qualidade deste material (solo) e dos parâmetros geotécnicos e agronômicos requisitados (GRIFFIN *et*

al., 1998; GRANATO, 2011). O solo, além de melhorar as características geotécnicas do lodo, deixa também o biossólido com melhor trabalhabilidade para os operadores dos aterros. A proporção desta mistura é em geral de 1:1 (JAMAL; NORIEH; FARZADKIA, 2011; WILLIFORD *et al.*, 2007; GRIFFIN *et al.*, 1998; PAPIN; WEST, 1999). A Figura 8 ilustra o processo de descarregamento de lodo de esgoto no aterro, sua mistura com aditivo (ex: solo) e posterior aplicação em cobertura.

É importante ressaltar que termo “camada final” nos estudos referentes a aplicação de lodo em cobertura de aterros refere-se a camada vegetativa situada acima da camada impermeável de solo, normalmente de argila, projetada para evitar a entrada de chuva dentro do aterro sanitário.

O autor observa que além dos aspectos técnicos há grandes benefícios econômicos, operacionais e institucionais na utilização do lodo tanto como camada de cobertura *diária*, quanto em camada de cobertura *final* em aterros sanitários.

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).

Um estudo de Farrell (1988) citado por Griffin *et al.* (1998), demonstrou-se que o lodo de esgoto é capaz de melhorar a qualidade do lixiviado. Nesta pesquisa comparou-se o lixiviado provindo de células com mistura de lodo de esgoto misturado e resíduos urbanos com células preenchidas apenas com resíduos urbanos. Os resultados do monitoramento de vinte meses de duração apontaram que as células que possuíam lodo produziram lixiviado com demanda química de oxigênio (DQO) de 1.500 mg/L. As outras células sem lodo produziram lixiviado com DQO de 30.000 mg/L. Além disso, concentração de metais como Cd, Cr, Cu, Pb Ni, Fe e Zn foram menores nos lixiviados das células com lodo de esgoto.

Salim (2011), por outro lado, verificou que coberturas com traços de solo e lodo de esgoto 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 de aterro. Seus resultados demonstraram que a taxa de oxidação máxima do traço foi de 55,9 g/m².d, aproximadamente 2,8 vezes maior que o ensaio testemunho (solo argiloso), com valor máximo e 19,83 g/m².d.

2.3.1 Aspectos Legais sobre a aplicação de Lodo em Coberturas

Na literatura consultada encontraram-se normas e orientações técnicas a respeito das camadas de coberturas de aterros sanitários, conforme explanado no tópico 2.2.3. Contudo, regulamentação técnica para aplicação especificamente de lodo de esgoto em coberturas somente foi verificada na China (HE; WONG, 2008). Esta foi lançada em 2007 com o código CJ/T249-2007 e intitulada “*Sludge Characteristics of Landfill with Municipal Solid Waste from Municipal Wastewater Treatment Plant Disposal*”. Os critérios são os expostos na Tabela 13. O documento o qual cita este regulamento, no entanto, não especifica alguns dos parâmetros apresentados, e a aplicação de tais critérios em outros lugares fica impossibilitada, até por que a norma em si não foi encontrada virtualmente. Com relação ao odor, os níveis olfatométricos não são citados e o tipo de ensaio para o cisalhamento transversal não é discriminado, nem qualquer tensão normal padrão. Outro termo utilizado é o “box”, o qual acredita-se ser equivalente à unidade de volume (m³).

Tabela 13. Requisitos para uso de lodo de esgoto como solo de cobertura em aterros sanitários.

Parâmetro	Valores
Umidade	< 45%
Odor	< 2° nível*
Densidade de mosquitos após aplicação	< 5 por “box”**
Cisalhamento Transversal	> 25 KN/m ²
Mortalidade de ovos de helmintos	> 95%
Patógenos Contagiosos	Não Detectável

* o documento consultado não especifica tais níveis.

** Acredita-se que o termo “Box” seja “m³”, mas o documento não esclarece isso.

FONTES: He e Wong (2008).

2.3.2 Lodo tratado com cal para uso em coberturas de aterros

Segundo Williford *et al.* (2007) o lodo submetido a estabilização alcalina pode ser adequado para aplicação na agricultura, paisagismo, condicionador de solo e recuperação de áreas degradadas, por ser fonte de matéria orgânica, muito fértil e melhorar as propriedades do solo como: textura, pH e capacidade de retenção de água. Por esse motivo, o lodo caledo e enquadrado como Classe B, segundo os critérios da U.S EPA, pode ser aproveitado em coberturas finais de aterro sanitário para melhorar as condições de crescimento vegetativo. O material também pode ser empregado em coberturas diárias, mas a espessura desta deve ser avaliada caso a caso (*Ibidem*).

A cidade de Greenville (Carolina do Sul - EUA), por exemplo, optou pela aplicação do lodo estabilizado com cal em coberturas diárias de aterro sanitário em função de este material reduzir o odor no aterro e a concentração de metais no lixiviado. Além disso, havia os benefícios econômicos tanto para o gerador de lodo quanto para o proprietário do aterro, fruto de acordo intergovernamental. Neste caso, o lodo era misturado com solo na razão de 1:1 e posteriormente os resíduos de poda e capina também passaram a ser adicionados. A proporção de mistura de lodo, solo e capina passou a ser 1:1:1 (PAPIN; WEST, 1999).

Leffler *et al.* (2000), no entanto, relatou problemas com emissão de amônia de biossólidos digeridos anaerobiamente e alcalinamente estabilizado em sua estocagem e durante espalhamento nas coberturas de aterros. Tal ocorrência foi notada por operadores de campo e para

resolvê-la os autores incorporaram lascas de árvores de pinos numa proporção de 10% em relação ao biossólido. Desse modo, foi possível fixar o nitrogênio no material de cobertura, reduzir a emissão de amônia em até 96%, melhorar as características físicas do material e beneficiar resíduos de poda – oriundos principalmente de árvores de natal.

Jamal, Norieh e Farzadkia (2011), em estudo realizado para comparar a estabilização aeróbia de lodo de esgoto com sua estabilização alcalina, concluíram que este último método era mais adequado higienicamente e financeiramente. Com a adição de 40% de cal hidratada (com base nos ST) e em 30 dias foi possível produzir um biossólido enquadrado como Classe B, segundo os critérios da USEPA e adequado para se utilizar em coberturas de aterros ou como condicionador de solos ácidos.

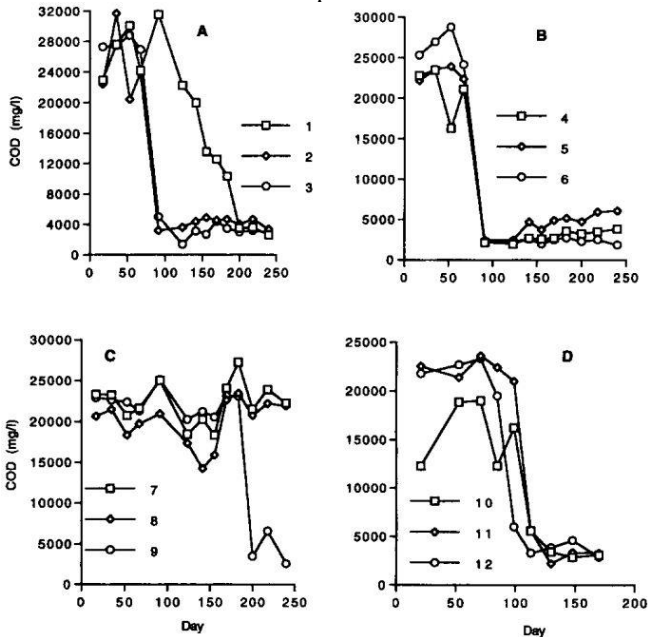
Um estudo merecedor de destaque para a presente dissertação é o de Rhew e Barlaz (1995). Os autores com base em testes em pequenos reatores que simulavam célula de aterros verificaram que o lodo tratado com cal (LTC) e utilizado em coberturas acelera a decomposição dos resíduos e melhora a qualidade do lixiviado. O experimento consistiu na montagem de 12 reatores preenchidos com 3,2 L de resíduos sólidos urbanos picotados e cobertos com uma camada de 0,8 L. Cada grupo de três reatores tinha uma diferente composição de camada de cobertura, totalizando 4 distintas camadas: uma com 100% de solo; outra com 100% de cal; outra com 70% LTC e 30% de solo; e enfim, uma com 40% LTC e 60% de solo. Para acelerar a decomposição dos resíduos e produção de metano, o lixiviado era recirculado e os reatores eram mantidos a 40°C.

Neste experimento, os lixiviados dos reatores com cal ou LTC foram neutralizados em função da alcalinidade da cal, resultando em aumento na produção de metano. Esse fenômeno ocorreu por que na primeira etapa da decomposição anaeróbia (hidrólise e acidogênese) formam-se ácidos que posteriormente são transformados em metano, mas para isso é necessário condições de pH próximo a neutralidade. Assim, a cal forneceu alcalinidade demandada nestas transformações. Além disso, o aumento do pH em função da cobertura com cal ou com LTC favoreceu a volatilização da amônia pelo *stripping* e conseqüentemente sua redução no lixiviado, atingindo um mínimo de 312 mg/L NH₃-N no reator grupo B (40% LTC e 60% solo – vide Figura 9). No caso dos reatores do grupo com apenas solo de cobertura não se verificou aumento do pH, com exceção de um dos três reatores. Enquanto o pH dos reatores que possuíam cal ou LTC saíram de um pH

em torno de 5,5 e foi para valores por volta de 7,5, o grupo com apenas solo de cobertura tendeu a manter o pH próximo de 5,5.

A demanda química de oxigênio (DQO) no lixiviado dos reatores que possuíam lodo na camada de cobertura foi nos primeiros dias maior que os outros, como é possível verificar na Figura 9, provavelmente em função da matéria orgânica presente no lodo. Entretanto, posteriormente verificou-se grande decaimento da DQO nos reatores que possuíam LTC ou cal (reatores grupos A, B e D), próximo do 90º dia, resultado da aceleração na degradação do lixiviado. Já a DQO dos reatores do grupo C (cobertura de apenas solo) não apresentou tendência de decaimento, com exceção apenas do reator 9.

Figura 9. Variação da DQO do lixiviado de 4 configurações de reatores em triplicata.



A – 70% LTC + 30% Solo

B – 40% LTC + 60% Solo

C – 100% solo

D – 100% cal

FONTE: Rhew, Barlaz (1995).

A concentração inicial de fósforo fosfato ($\text{PO}_4\text{-P}$) entre todos os reatores foi bastante diferente. Verificou-se que o LTC não influenciou nestes valores iniciais, os quais variavam desde aproximadamente 3 mg/L até um pouco mais que 50 mg/L. Contudo, em nos reatores em que ocorreu aumento do pH ao longo do tempo, notou-se grande decaimento das concentrações. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que a solubilidade do fosfato de cálcio aumenta em proporção ao crescimento do pH. Além disso, o fosfato também se complexa com outros cátions, incluindo o NH_4 , fato também favorecido em pHs mais elevados.

A presença de LTC não resultou em aumento nas concentrações dos metais Cd, Cr, Fe, Ni, Pb e Zn no lixiviado. No entanto ocorreu um ligeiro aumento na concentração de Cu foi notado, mas com valores abaixo do limite permitido pela legislação estadunidense. Era de se esperar uma diminuição nas concentrações de metais nas camadas com LTC e com cal em função de ambientes alcalinos favorecerem a complexação destes elementos e conseqüente dessolubilização. Contudo, a decomposição dos resíduos produz ácidos húmicos e isto pode aumentar a concentração de metais pela quelação.

Os mesmos autores, com base em suas investigações, afirmam que o LTC utilizado em coberturas diárias de aterros não afeta a qualidade do lixiviado de forma adversa. As concentrações de metais pesados do líquido lixiviado diminuíram com a presença de LTC nas coberturas devido a complexação dos metais em ambientes alcalinos.

Contudo, Amoozegar, Barlaz e Rubin (1995) em um estudo paralelo deste mesmo trabalho perceberam que a condutividade hidráulica saturada das misturas solo-LTC aumentou com a fração de LTC. A presença de LTC em valores acima de 50% aumentou a capacidade de retenção de água nas misturas de solo-LTC e houve diferenças significativas nos limites de Atterberg (liquidez e plasticidade) entre o solo e as misturas solo-LTC.

Kim, Cho e Yim (2005) tiveram conclusões semelhantes ao testar uma mistura de cal virgem com escória de indústria de aço na solidificação de lodo de esgoto com o objetivo de utilizá-lo como cobertura de aterro. No experimento elaboraram-se misturas de lodo com cal virgem (5% a 10%) e escória (20% a 40%), a qual possuía dentre outros elementos 38,5% de CaO. Os resultados da pesquisa indicaram que a adição de cal e escória em proporções adequadas ao lodo melhorou suas propriedades geotécnicas e sanitárias, possibilitando sua aplicação como coberturas diárias de aterros. Neste mesmo estudo os autores analisaram uma amostra de lodo misturado com 30% de

escória e 10% de cal através de difração de raio-X, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva. A partir disso, constatou-se grande presença diversos compostos hidratados, dentre os quais se destaca o CSH ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) como maior agente solidificante. A abundante presença deste produto (CSH) foi provavelmente pelo fato de os compostos CaO , SiO_2 e Al_2O_3 contidos na escória terem estimulado uma reação pozolânica. Os produtos deste tipo de reação são cimentantes, ou seja, solidificadores.

Prim (2011) também testou diferentes composições de solo e lodo para aplicá-las em coberturas de aterros, porém, considerando o uso tanto do lodo de esgoto (LETE) quanto do lodo de estação de tratamento de água (LETA). A pesquisadora concluiu que o uso do traço de Solo:LETA:LETE:CaO na proporção de 1:0,425:0,425:0,15 é viável geotecnicamente, ambientalmente e economicamente para o cenário estudado.

Chung, Yu e Lee (2006) avaliaram a eficiência da utilização de lodo de esgoto solidificado em coberturas diárias de aterro, através da realização de teste de compressibilidade, CBR (Califórnia Bearing Ratio), condutividade hidráulica, resistência à erosão e capacidade de escoamento de precipitações. Neste estudo o lodo foi solidificado com misturas de cal e cimento e com misturas de cal e escória de aço inoxidável. Os traços de lodo:cimento:cal eram de 100:10:10 e de lodo:escória de aço:cal eram de 10:15:01. Os resultados apontaram que o lodo solidificado de ambas as maneiras ficou com condutividade hidráulica compatível com a de um solo típico, entre $8,5 \times 10^{-6}$ e $5,4 \times 10^{-6}$ cm/s, com resistência à compressão maior que o desejável ($0,5 \text{ kgf/cm}^2$) e com resistência à erosão melhor que os solos graníticos comumente utilizados na Coréia do Sul.

Lim *et al.* (2002) avaliaram as propriedades de engenharia do lodo de esgoto misturado com cal hidratada, cinzas e loesse (solo “amarelo” encontrado em parte da Europa e na China) em várias proporções. Os autores indicam que esta mistura é mais uma possibilidade para se estabilizar lodo de esgoto, pois as propriedades geotécnicas e ambientais atingem padrões suficientes para seu uso como material alternativo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos utilizados na presente pesquisa e inicialmente é descrita a ETE Insular e o seu processo de tratamento da fase líquida e da fase sólida dos efluentes. Posteriormente as metodologias de caracterização do lodo – objeto de estudo deste trabalho, bem como seu tratamento e testes laboratoriais e em campo são detalhadas.

3.1 DESCRIÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

A ETE Insular, operada e mantida pela Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN), localiza-se no município de Florianópolis (SC), bairro Centro, aterro da Baía Sul e proximidades da Ponte Pedro Ivo Campos. Esta iniciou suas operações em outubro de 1997 e foi projetada para atender a 150.000 habitantes, equivalente a uma vazão máxima de 278 L/s (CASAN, 2010). Na Figura 10 é apresentada a localização da ETE.

Figura 10. Município de Florianópolis com localização aproximada da ETE Insular e ao lado a ETE.



FONTE: Google Earth, 2010.

Atualmente ela atende em torno de 140.000 hab. oriundos das seguintes regiões: Centro, Costeira do Pirajubaé, Saco dos Limões, parte da Carvoeira, parte da Trindade, Parte do Parque São Jorge, parte do Córrego Grande e Agrônômica (FORNARI FILHO, 2010).

A produção diária de biossólidos é em média 35 m³/dia, mas dependendo do controle operacional do sistema pode chegar a volumes maiores ou menores. Isso equivale a aproximadamente 6 ton/dia em

base seca e 37 ton/dia em base úmida. Atualmente a destinação final do lodo é o aterro sanitário da empresa Proactiva, localizado no município de Biguaçu – 35 km da Capital. O preço pago pela CASAN para o transporte e destinação final do lodo é de R\$125,16 (cento e vinte cinco reais e dezesseis centavos) por metro cúbico (FORNARI FILHO, 2010).

3.1.1 Sistema de tratamento da ETE

O sistema de tratamento empregado para tratar a fase líquida do esgoto é por lodos ativados, modalidade aeração prolongada, com eficiência prevista de remoção de 98% da DBO e 90% de coliformes (CASAN, 2010). Após o tratamento o efluente final é lançado na Baía Sul por meio de um emissário submarino.

No Quadro 3 são apresentadas de maneira resumida as etapas de tratamento da fase líquida e de desaguamento da fase sólida do esgoto na ETE Insular.

Quadro 3. Etapas de tratamento da ETE Insular.

Tratamento Fase Líquida	Pré- tratamento	Gradeamento (2 grades mecanizadas tipo cremalheira).
		Calha Parshall (medição de vazão)
		Desarenação gravimétrica.
	Tratamento Secundário	Seletor Biológico
		Câmara de desnitrificação
		Tanques de aeração de mistura completa
Decantador secundário		
Tratamento terciário	Desinfecção do Efluente	
Desaguamento da Fase Sólida	Adensamento	Unidade composta por dois tanques de armazenamento e adensamento de lodo de modo gravimétrico, com removedor mecânico. A função desta unidade é reduzir a quantidade de água contida no lodo sedimentado nos decantadores.
	Prensagem Hidráulica	Pré-condicionamento químico de lodo adensado, com suspensão de cal e de solução de polieletrólito catiônico e posterior encaminhamento a prensas desaguadoras.

Os sólidos grosseiros e a areia são retidos na etapa de pré-tratamento do efluente (gradeamento e na desarenação gravimétrica) e posteriormente encaminhados diretamente ao aterro sanitário. Já os sólidos formados nos decantadores secundários (lodo biológico)

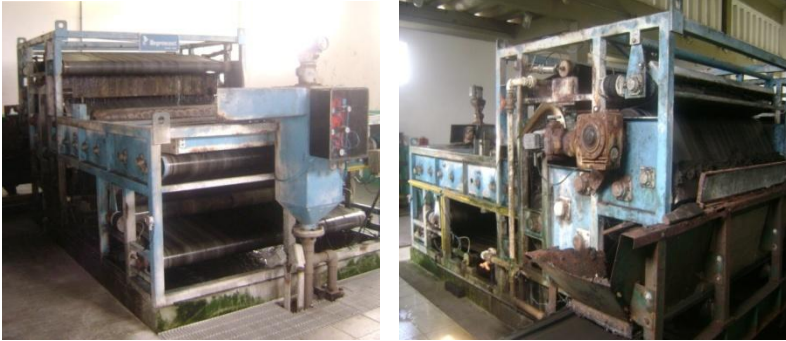
retornam para o tanque de aeração a fim de inoculá-lo com microorganismos estabilizadores de matéria orgânica. A parcela excedente deste lodo é constantemente retirada para manter o equilíbrio do sistema e subseqüentemente encaminhada para unidades de adensamento e desidratação, compostas respectivamente de dois tanques adensadores e de duas prensas desaguadoras (vide Quadro 3). Após estas etapas os subprodutos sólidos são transformados em uma torta de lodo com aproximadamente 13% de teor de sólidos, a qual é finalmente disposta em aterro sanitário. A Figura 11 ilustra a torta de lodo sendo descarregada no caminhão transportador e a Figura 12 a prensa desaguadora.

Figura 11. Torta de Lodo da ETE Insular.



FONTE: Piana (2009).

Figura 12. Prensa desaguadora de lodo.



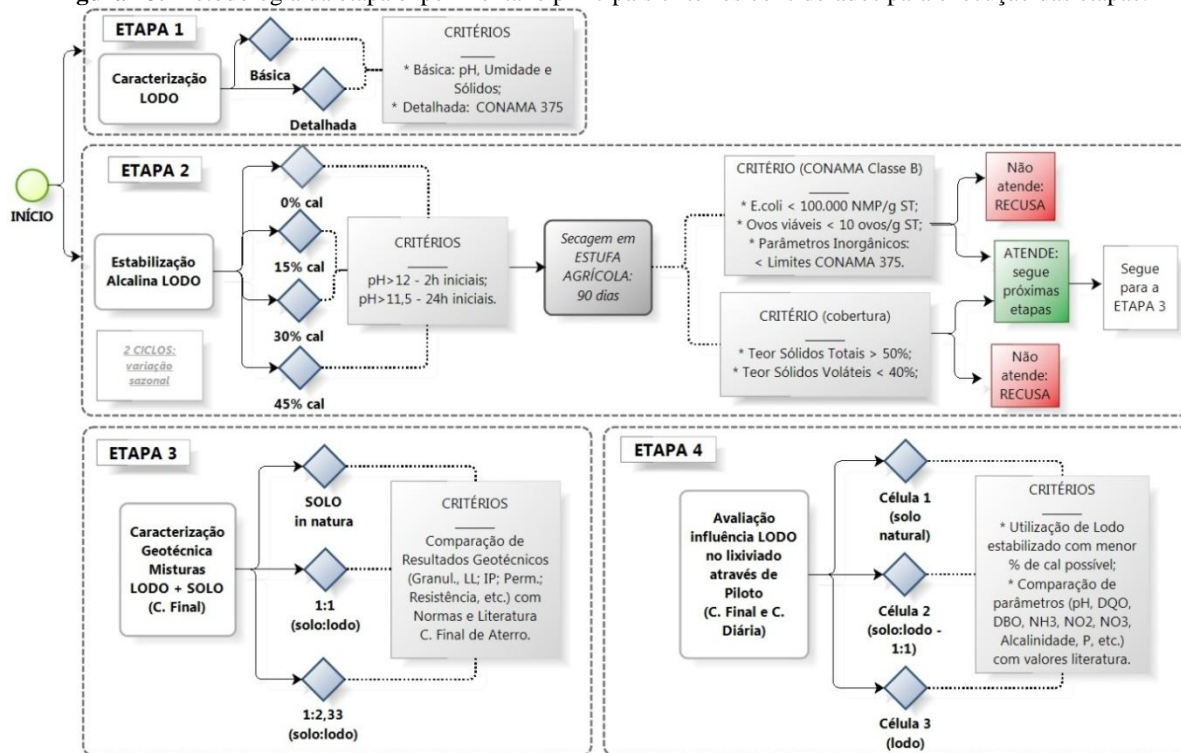
FONTE: Arquivos Pessoais.

3.2 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O desenvolvimento experimental do trabalho objetivou avaliar a utilização de lodo de esgoto como cobertura de aterro sanitário (cobertura final e intermediária) considerando três aspectos fundamentais: a qualidade do lodo requerida para este fim; os aspectos geotécnicos exigidos em camadas de cobertura de aterros; e a influência da cobertura de biossólido na qualidade do lixiviado. Para cada um destes aspectos desenvolveu-se uma etapa com metodologias específicas que serão detalhadas neste Capítulo. Além disso, outra etapa foi realizada, dedicada à caracterização do resíduo sólido estudado e realizada no início deste trabalho. Todas estas quatro etapas formam o pilar metodológico desta dissertação.

A seguir a Figura 13 é apresentado o fluxograma da metodologia e os principais critérios considerados para realização de cada uma das quatro etapas, as quais serão descritas detalhadamente nos tópicos posteriores.

Figura 13. Metodologia da etapa experimental e principais critérios considerados para execução das etapas.



3.2.1 ETAPA 1: Caracterização do Resíduo (lodo de esgoto)

A primeira etapa do desenvolvimento experimental foi a caracterização do objeto de estudo desta pesquisa – o lodo da ETE Insular. Para isso, realizou-se uma caracterização mais *detalhada* e outra mais *básica*. A detalhada englobou diversos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos e foi baseada na Resolução nº375 do CONAMA (BRASIL, 2006), a qual define as diretrizes para a utilização de biossólidos na agricultura. A caracterização *básica* considerou apenas poucos parâmetros físicos, mas serviu para verificar se havia muita ou pouca variabilidade das propriedades do lodo ao longo do tempo.

A Resolução nº 375 foi tomada como base por duas razões. A primeira é pelo fato de o lodo exercer a função de camada suporte vegetativa quando empregado em camadas finais de cobertura, exercendo, desse modo, função agrônômica. E a segunda razão é em função desta norma ser a principal legislação federal que regula a valorização do lodo na agricultura e não há nenhuma outra que oriente ou regularize seu uso em coberturas de aterros sanitários.

3.2.1.1 Caracterização detalhada

Os parâmetros físico-químicos analisados na caracterização detalhada estão descritos na Tabela 14 e os parâmetros microbiológicos na Tabela 15.

A Resolução CONAMA nº 375 especifica que a amostragem de lodo de esgoto para análise de parâmetros *inorgânicos* deve ser realizada a partir da coleta de 4 amostras compostas – para o caso de o lodo não estar estabilizado¹⁵ – coletadas com defasagem mínima de 7 dias, formadas por sub-amostras de iguais quantidades do material retiradas em diferentes pontos da pilha de amostragem. Nesta pesquisa optou-se por coletar uma amostra a cada estação do ano, obedecendo-se a defasagem mínima recomendada entre as 4 amostras para análises de parâmetros inorgânicos. Uma quinta amostra em uma das estações também foi realizada. Para a caracterização microbiológica e parasitológica, porém, a norma determina a coleta de pelo menos 15 amostras num período de 3 meses.

¹⁵ Salienta-se que apesar de o tratamento da ETE ser por lodos ativados de aeração prolongada, o lodo biológico não sai estabilizado, diferente do que se esperaria na teoria. Os resultados que corroboram esta constatação encontram-se no Capítulo de Resultados e Discussão.

Tabela 14. Parâmetros para caracterização do Lodo da ETE.

Parâmetro	Metodologia
pH em água 1:5	Potenciométrico ¹
pH em CaCl ₂	Potenciométrico ¹
Teor de Sólidos Totais	Gravimétrico ¹
Teor de Sólidos Fixos	Gravimétrico ¹
Teor de Sólidos Voláteis	Gravimétrico ¹
Carbono Orgânico Total	Oxidação – K ₂ Cr ₂ O ¹
Matéria Orgânica	Oxidação – K ₂ Cr ₂ O ¹
Cálcio (Ca)	Espectrofotometria de Absorção Atômica (Chama) ¹
Magnésio (Mg)	Espectrofotometria de Absorção Atômica (Chama) ¹
Zinco (Zn)	Espectrofotometria de Absorção Atômica (Chama) ²
Ferro (Fe)	Espectrofotometria de Absorção Atômica (Chama) ²
Cobre (Cu)	Espectrofotometria de Absorção Atômica (Chama) ²
Bário (Ba)	Espectrofotometria de Absorção Atômica (Chama) ²
Níquel (Ni)	Espectrofotometria de Absorção Atômica (Chama) ²
Cadmio (Cd)	Espectrofotometria de Absorção Atômica (Chama) ²
Chumbo (Pb)	Espectrofotometria de Absorção Atômica (Chama) ²
Cromo (Cr)	Espectrofotometria de Absorção Atômica (Chama) ²
Selênio (Se)	Forno de Grafite ²
Molibdênio (Mo)	Forno de Grafite ²
Arsênio (As)	Forno de Grafite ²
Mercúrio (Hg)	Vapor Frio ²
Umidade a 105 ± 5°C	Gravimétrico ¹
Densidade	Gravimétrico ¹
Nitrogênio Total	Kjeldahl titulométrico ¹
Nitrogênio Amoniacal	Kjeldahl titulométrico ¹
Teor de cinzas a 850°C	Gravimétrico ¹
Ortofosfato	Espectrofotométrico ¹

¹ I.N. n° 28 de julho de 2007 (BRASIL, 2007); ² EPA 3050B - U.S.EPA (1996)

Tabela 15. Parâmetros microbiológicos analisados no lodo de esgoto in natura.

Parâmetro	Metodologia
Coliformes Totais	Tubos múltiplos (APHA, 2005)
<i>Escherichia Coli</i>	Tubos múltiplos (APHA, 2005)
Ovos de Helminhos viáveis	Detecção, enumeração, viabilidade EPA (2003)

No presente trabalho não foi possível analisar microbiologicamente tal quantidade de amostras no tempo estipulado pela Resolução em função de problemas logísticos e então apenas 10 análises foram realizadas ao longo dos dois anos de pesquisa.

Para todo o caso, de forma geral as coletas na ETE Insular foram realizadas através da retirada de amostras simples em distintas posições e profundidades da torta de lodo acumulada no caminhão de coleta. Tais foram então misturadas, homogeneizadas e em seguida quarteadas¹⁶ para obtenção de uma porção representativa de aproximadamente 1 kg. Posteriormente as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos esterilizados e encaminhadas dentro de caixas de isopor, com temperatura interna de aproximadamente 4°C, aos laboratórios de análise da UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense e da ECONCONSULTING Laboratório e Gestão Ambiental. Este realizou as análises de ovos helmintos e aquele (UNESC) as demais análises citadas na Tabela 14 e na Tabela 15.

Os resultados do presente trabalho foram comparados com valores de referência da literatura (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003; LIMA, 2010; DAMASCENO; CAMPOS, 1998; FERNANDES *et al.*, 1997), do CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006) e de estudos similares realizados com o lodo produzido na ETE Insular (TURMINA, 2007).

3.2.1.2 Caracterização Básica

Além da caracterização detalhada do lodo, uma caracterização mais simples foi realizada considerando apenas pH, umidade e série de

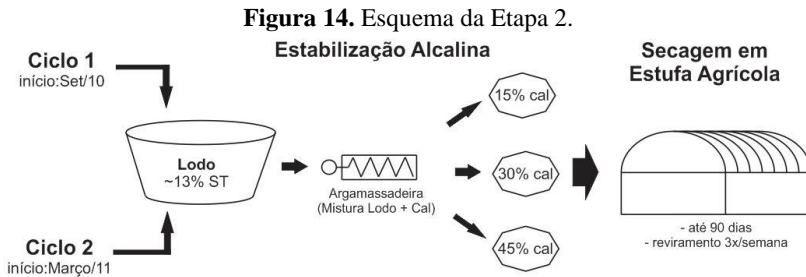
¹⁶ **Quarteamento:** Processo de divisão em quatro partes iguais de uma amostra pré-homogeneizada, sendo tomadas duas partes opostas entre si para constituir uma nova amostra e descartadas as partes restantes. As partes não descartadas são misturadas totalmente e o processo de quarteamento é repetido até que se obtenha o volume desejado (ABNT, 2004b, p.1).

sólidos (totais, fixos e voláteis). Esta objetivou avaliar a variabilidade das propriedades do lodo ao longo do tempo. Por isso, amostras aleatórias do lodo da ETE foram coletadas ao longo do ano de 2010 e 2011 de acordo com a mesma metodologia descrita no item anterior. As análises de pH e umidade foram realizadas no LIMA – Laboratório Integrado de Meio Ambiente (UFSC). As de Sólidos Voláteis desta etapa foram realizadas no Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos (LABEFLU) e gentilmente cedidas pelo pesquisador Wanderli Rogério Leite.

3.2.2 ETAPA 2: Processo de Estabilização Alcalina em Estufa

O processo adotado para tratar o bio-sólido desta pesquisa foi a estabilização química com cal virgem (CaO) e posterior secagem em estufa agrícola. Este método possibilita a desidratação e a higienização do lodo basicamente de quatro maneiras: pela elevação da temperatura em função da reação exotérmica entre o CaO e a água; pelo aumento do pH a valores próximos a 12; pela formação de amônia gasosa; e pela redução da umidade. Técnica similar foi adotada nas pesquisas de Comparini (2001), Lima (2010), Prim (2011) e outros.

Nesta pesquisa realizaram-se dois ciclos de tratamento de lodo, englobando a estabilização alcalina seguida de secagem em estufa agrícola. O objetivo da repetição dos ciclos foi avaliação deste processo em uma nova época do ano e a obtenção de um volume maior de dados para avaliação estatística. Cada ciclo foi planejado para durar até 90 dias ou até que os parâmetros se estabilizassem, conforme recomendação de Fernandes e Souza (2001) e Prim (2011). Um deles iniciou em setembro de 2010 e o outro, em março de 2011. O objetivo do tratamento foi enquadrar o lodo na *Classe B* estabelecida pelo CONAMA n° 375 (BRASIL, 2006) e nos padrões de umidade e estabilidade requeridos em coberturas de aterros. Para este tipo de destinação recomenda-se que o bio-sólido além de se enquadrar na *Classe B* (LEFFLER *et al.*, 2000; WILLIFORD *et al.*, 2007; JAMAL, NORIEH e FARZADKIA, 2011), tenha pelo menos 50% de ST (GRIFFIN *et al.*, 1998) e esteja estabilizado com teor de SV/ST abaixo de 40% (GRANATO, 2011; SIMMONS, 2003; PIETZ *et al.*, 1996). Na Figura 14 está esquematizada a Etapa 2.



No tópico 4.2.2.1 será descrito a metodologia da caleação do lodo e em seguida, no tópico 4.2.2.2, o método de secagem e monitoramento em estufa.

3.2.2.1 Processo de Estabilização Alcalina

O processo de caleação foi feito com base na Resolução N° 375 do CONAMA (BRASIL, 2006) a qual especifica que para redução significativa de patógenos do lodo de esgoto (higienização) a porcentagem de cal adicionada, com relação aos ST do lodo, deve ser suficiente para elevar o pH a valores próximos a 12 por um período mínimo de 2 h. Neste caso, o critério para verificar se o potencial de atração de vetores foi reduzido é a manutenção do pH acima de 11,5 por mais 22 h após a higienização com cal.

A partir da literatura consultada (FERNANDES, 1999; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2001; LIMA, 2010; PRIM, 2011) os percentuais de cal testados, em relação ao peso seco do lodo, foram de 0% (controle), 15%, 30% e de 45%.

Logo após a mistura de lodo com a cal, a temperatura atingida pelo lodo foi medida com um termômetro de bulbo com graduação de 0 a 60 °C. O pH foi mensurado com um pHmetro digital, de acordo com o método da SANEPAR (2000), pois este trata especificamente da análise para lodo de esgoto. Caso alguma das misturas não atingisse os critérios de pH estabelecidos pelo CONAMA, a amostra seria rejeitada e não prosseguiria para secagem na estufa agrícola. Esta fase (secagem em estufa) será descrita no tópico 3.2.2.2.

A cal escolhida para o experimento possuía pureza (percentual de CaO presente na mesma) de 55% e as outras características físico-

químicas da cal, informadas pelo fabricante (Cal Cem Indústria de Minérios LTDA.), estão descritas na Tabela 16.

Tabela 16. Características físico-químicas da cal.

Parâmetro	Percentual
Óxido de Magnésio (MgO);	35%
Sílica e Resíduo Insolúvel (SiO ₂ + RI)	3%
Carbonato Residual	8,30%
Anidrido Carbônico (CO ₂)	6,50%
Perda ao Fogo (PF)	9,80%
Água Combinada	3,30%
Granulometria # 18 (1,00 mm)	1,70%
Granulometria # 50 (0,30 mm)	18,20%
Umidade	0,60%

O cálculo realizado para determinar a quantidade de cal a se adicionar na massa amostral de lodo de esgoto, no qual foi considerado seu grau de pureza, é apresentado conforme a Equação 4:

$$M_{cal} = [(M_{lodo} \times (1 - h)) \times p] \div P \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

M_{cal} = massa de cal impura a se adicionar (kg);

M_{lodo} = massa de lodo amostral (kg);

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

p = percentual de cal (em relação ao peso seco) desejado - adimensional;

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

A mistura do lodo com a cal foi realizada com o auxílio de um misturador forçado de eixo horizontal (argamassadeira), com capacidade útil de 110 L (Figura 15), durante tempo suficiente para obter um material completamente homogêneo e sem torrões – aproximadamente 10 minutos. Uma balança comum com capacidade de 200 kg foi utilizada para quantificar a massa de lodo e de cal para as misturas. Após esta etapa o lodo seguiu para secagem na estufa agrícola.

Figura 15. Argamassadeira utilizada na mistura de lodo com cal.



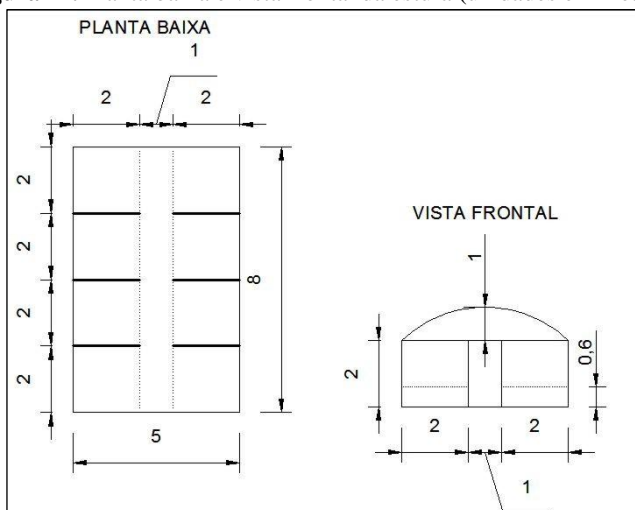
3.2.2.2 Secagem em Estufa Agrícola

A estufa agrícola construída para a pesquisa, localizada próxima ao Laboratório de Hidráulica da UFSC, possui as seguintes dimensões: 5,0 m de largura, 8,0 m de comprimento e 2,0 m de altura. O piso foi impermeabilizado com concreto para evitar a perda de umidade do lodo para o solo e as laterais juntamente com a cobertura foram revestidas com telas de proteção e lona plástica translúcida para possibilitar penetração da radiação solar e evitar a entrada da água da chuva. As lonas laterais eram móveis e ficavam embrulhadas nos horários de reviramento e coleta de amostras, mas permaneciam fechadas todo o resto do tempo. A estufa (Figura 16) foi dividida em 8 baias de 2 x 2 m separadas por estrutura de madeira de 0,60 m de altura visando uma melhor organização do local (Figura 17).

Figura 16. Estufa agrícola.



Figura 17. Planta baixa e vista frontal da estufa (unidades em metros).



Tanto a temperatura do interior da estufa, quanto a temperatura externa (ambiente) foram registradas de hora em hora, por meio de um sensor de temperatura, armazenado em *datalogger* marca AKSO, modelo 8828, com faixa de medição de - 4 a 85°C, resolução de 0,1°C e exatidão de $\pm 1,0^\circ\text{C}$. Tais registros foram feitos entre julho e dezembro de 2011, após o encerramento dos dois ciclos de estabilização. Não foi possível realizar as medições de temperatura durante a secagem do lodo em função de problemas logísticos no recebimento do equipamento. Porém, esses dados serviram para avaliar o comportamento da estufa ao longo do tempo e em relação às condições meteorológicas locais. Além do registro da temperatura, os dados meteorológicos referentes à precipitação pluviométrica e à umidade relativa foram fornecidos pelo Laboratório de Energia Solar da UFSC (LEPTEN/ LABSOLAR), o qual possui uma estação meteorológica localizada a aproximadamente 550 m da estufa.

Para facilitar o manuseio do material (coleta de amostras e reviramentos periódicos) as misturas foram acondicionadas em caixas de madeira, revestidas com lona (Figura 18).

Figura 18. Caixas de madeira utilizadas para acondicionar lodo.

Nas caixas as misturas foram dispostas com uma altura que variou entre de 13 a 20 cm (conforme o tamanho da caixa) e foram revolvidas manualmente com enxada 3 vezes por semana, a fim de acelerar o processo de secagem. O monitoramento encerrou após 90 dias do início do experimento.

Ao longo do procedimento de secagem e estabilização na estufa, amostras de lodo das 3 misturas (15%, 30% e 45%) e do controle (0%) eram semanalmente coletadas e analisadas no Laboratório Integrado de Meio Ambiente – UFSC. Os parâmetros monitorados, a frequência de coleta e os métodos empregados estão descritos na Tabela 17. Todas as análises, com exceção de *Escherichia coli*, Ovos viáveis de helmintos, foram realizadas em triplicata.

Tabela 17. Parâmetros monitorados na Etapa 2

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

Ao final dos 90 dias de monitoramento, análises detalhadas de todas as misturas (0%, 15%, 30% e 45%) foram realizadas, considerando os parâmetros descritos na Tabela 14 e na Tabela 15. Os

resultados obtidos, tanto durante o monitoramento quanto na caracterização final, foram comparados com: valores de referência da literatura relativos ao uso agrônômico do lodo (FERNANDES *et al.*, 1999; ANDREOLI, FERNANDES e VON SPERLING, 2001; ANDREOLI, 2001; ANDREOLI, 2006; LIMA, 2010); valores de referência relativos ao uso de lodo em coberturas de aterros (LEFFLER *et al.*, 2000; WILLIFORD *et al.*, 2007; JAMAL, NORIEH E FARZADKIA, 2011; GRIFFIN *et al.*, 1998; GRANATO, 2011; SIMMONS, 2003; PIETZ *et al.*, 1996); e finalmente, com os valores do CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006).

Para a etapa seguinte, foram selecionadas as misturas que atenderam aos critérios ambientais desejados – lodo *Classe B* da Resolução CONAMA 375 de 2006 (BRASIL, 2006) – com relação à concentração de patógenos, parâmetros inorgânicos e aos requisitos de estabilidade. Esta resolução considera estável o lodo tratado com relação SV/ST menor que 0,70 e que não apresenta potencial de geração de odores e de atratividade de vetores, mesmo quando reumidificado.

Outros critérios considerados na seleção de misturas foram os seguintes: umidade menor que 50% (GRIFFIN *et al.*, 1998) e relação SV/ST menor que 40%, com base nos valores citados por Granato (2011), Simmons (2003) e Pietz *et al.* (1996).

3.2.2.3 Análise Estatística da Estabilização do Lodo

Para avaliar o comportamento das propriedades do lodo ao longo do período de secagem, utilizou-se estatística descritiva e inferencial, considerando as diferentes variáveis monitoradas. Para estatística descritiva verificou-se a média, mediana, variância, desvio padrão e intervalo de confiança (95% dos parâmetros: pH, Coliformes Totais, Coliformes Termotolerantes (*E.coli*) e Umidade. O tempo e os percentuais de cal virgem adicionados em relação ao peso seco (0%, 15%, 30% e 45%) foram definidos como variáveis independentes. As variáveis dependentes utilizadas para a avaliação estatística foram o pH, umidade, relação SV/ST.

Para comparação entre os Ciclos 1 e 2 e verificar se havia diferença significativa ($\alpha = 5\%$) entre eles, realizou-se teste ANOVA, considerando as médias gerais dos parâmetros monitorados nos dois grupos. Posteriormente, compararam-se as médias par a par por meio de teste de TUKEY ($\alpha = 5\%$) considerando o cruzamento parâmetro x tempo e parâmetro x percentual de cal adicionado.

3.2.3 ETAPA 3: Caracterização Geotécnica das Misturas Lodo/Solo

Conforme a literatura consultada (JAMAL, NORIEH e FARZADKIA, 2011; WILLIFORD *et al.*, 2007; GRIFFIN *et al.*, 1998; PAPIN e WEST, 1999), é recomendável que ao se aplicar o lodo em coberturas de aterros sanitários, principalmente em coberturas finais, este material seja misturado com solo argiloso ou algum outro aditivo na proporção de 1:1 (massa seca:massa seca). Esta proporção, porém, pode variar em função da qualidade do solo, do lodo e dos requisitos agrônômicos e geotécnicos demandados. Desse modo, as misturas de lodo+cal selecionadas na fase anterior foram testadas geotecnicamente com dois diferentes traços de *solo: mistura* – 1:1 e 1:2,33. Esta última proporção, equivalente a 30% de solo e 70% de lodo, serviu para avaliar o comportamento geotécnico de um traço com maior quantidade de lodo. A homogeneização do solo com a mistura foi feita manualmente com o auxílio de pequenas pás em uma padiola.

É importante ressaltar que nesta etapa se fará a distinção entre o conceito de “umidade” e de “teor de umidade”, definidos na literatura consultada. Ambos se referem à quantidade de água presente em uma amostra. Contudo, o primeiro é com referência a massa total da amostra e o segundo com referência à massa seca. Na mecânica dos solos se emprega este último (CAPUTO, 1988; ABNT, 1986a). A relação entre eles pode ser feita pelas Equações 5 e 6:

$$ST = \frac{1}{1+TU} \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

ST = sólidos totais (relação entre massa seca e massa total do lodo) - adimensional;

TU = teor de umidade (relação entre massa de água e massa seca do lodo) - adimensional;

Lembrando que:

$$ST = 1 - U \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

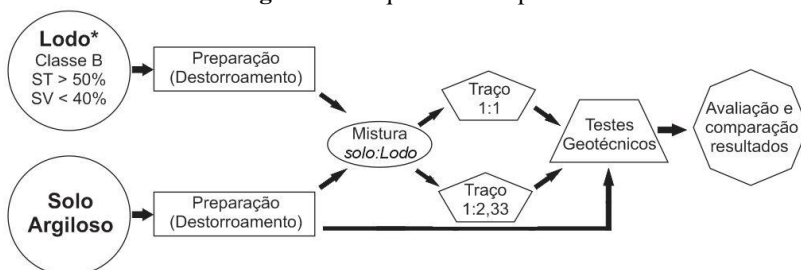
U = umidade (relação entre massa de água e massa total do lodo) - adimensional;

O teor de matéria orgânica é comumente associado ao teor de sólidos voláteis das amostras. Contudo, para o cálculo da fração de matéria orgânica do lodo caledado nesta pesquisa é necessário considerar:

$$\text{Teor MO} = \text{Teor de SV} \quad (\text{Equação 7})$$

O solo utilizado nas misturas foi retirado de uma jazida do município de Governador Celso Ramos, localizado a aproximadamente 30 km de Florianópolis. Coletou-se o volume de 2 m², do qual amostras simples eram retiradas para formarem amostras compostas nas misturas dos traços. O aterro sanitário de Biguaçu, onde são destinados os resíduos urbanos da capital de Santa Catarina, normalmente retira solo de cobertura deste local. Este material também foi testado geotecnicamente. A Figura 19 apresenta a Etapa 3 de maneira esquemática.

Figura 19. Esquema da Etapa 3.



(*) Qualquer uma das misturas lodo+cal selecionada na etapa 2.

Os ensaios realizados nesta etapa foram feitos no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC. Pela limitação no número de ensaios, apenas os experimentos com o solo natural e com os traços 1:1 de 30% e 1:1-45% foram em duplicatas e os outros não. As respectivas metodologias estão citadas na Tabela 18. As normas não foram detalhadas neste trabalho por se tratar de procedimentos já bastante consolidados na área da Geotecnia.

Tabela 18. Ensaios Geotécnicos realizados na Etapa 3.

Ensaio	Método
Análise Granulométrica	NBR 7181 (ABNT, 1984d)
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 1984b)
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 1984c)
Massa Específica dos grãos	NBR 6508 (ABNT, 1984a)
Compactação (preparação)	NBR 6457 (ABNT, 1986a)
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 1986b)
Permeabilidade	NBR 14545 (ABNT, 2000)
Cisalhamento Direto	ASTM D3080 (ASTM, 2004)

Para os ensaios de compactação, dos traços de lodo e solo, foi feita inicialmente a divisão do material em pesos similares no teor de umidade inicial. O solo antes da mistura nos traços foi seco até o teor de umidade higroscópica, igual a 20,2%, e as amostras de 15, 30 e 45% estavam respectivamente com teor de umidade de 13,6%, 19% e 9,4% após secagem na estufa agrícola. Depois, para atingir o teor de umidade desejado para cada ponto da curva, adicionou-se e água nas porções de amostra e estas foram colocadas em sacos plásticos vedados e mantidas em processo de cura numa câmara úmida durante 48hs. A NBR 7182 (ABNT, 1986b) recomenda este procedimento quando a incorporação da água no material seco apresentar dificuldades e sugere o tempo de 24h na câmara. Contudo, para o tipo de material estudado, verificou-se em laboratório que a absorção de água foi melhor com tempo de 48h. Além disso, o teor de umidade desejado em cada parte foi feita variando de 4 em 4 % ao invés dos 2% recomendado pela norma. Esta diferença foi adotada com base em experimento similar de Kim, Cho e Yim (2005) com lodo de esgoto. Para os ensaios de permeabilidade e cisalhamento direto a preparação dos traços testados foi da mesma maneira.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado aplicando-se as tensões normais de 33, 78 e 128 kPa, com base em estudos de Prim (2011) para misturas de solo e lodos de estação de tratamento de água e esgoto.

O ensaio de permeabilidade foi à carga variável, pois é mais recomendável para materiais cujo coeficiente de permeabilidade é inferior a 10^{-3} cm/s.

Os desempenhos dos traços propostos nesta pesquisa, sob o ponto de vista da Mecânica dos Solos, foram comparados com as recomendações para coberturas finais de aterros sanitários, segundo as referências consultadas (ROCCA *et al.*, 1993; QASIN; CHIANG, 1994; ABNT, 1997; U.S.EPA, 1993; QIAN, KOERNER, GRAY, 2002). Não

há requisitos geotécnicos quanto às camadas de coberturas diárias e intermediárias.

3.2.3.1 Análise Microestrutural

As características físico químicas da superfície de três amostras – lodo *in natura*, estabilizado com cal e da mistura de um traço 1:1 – foram analisadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS). O objetivo foi observar alterações nas estruturas do lodo de esgoto submetido a tratamento com cal e depois verificar sua interação com o solo natural. O lodo coletado para esta análise foi oriundo do monitoramento do Ciclo 2 e seco na estufa agrícola. O traço 1:1 de solo e lodo caledado foi umidificado e deixado mais de 28 dias em cura e secagem ar livre. O microscópio eletrônico utilizado, do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC e modelo JEOL JSM-6390LV, foi operado em uma aceleração de voltagem de 10 kV com tempo de detecção de 30 segundos e magnificação de até 5000 vezes.

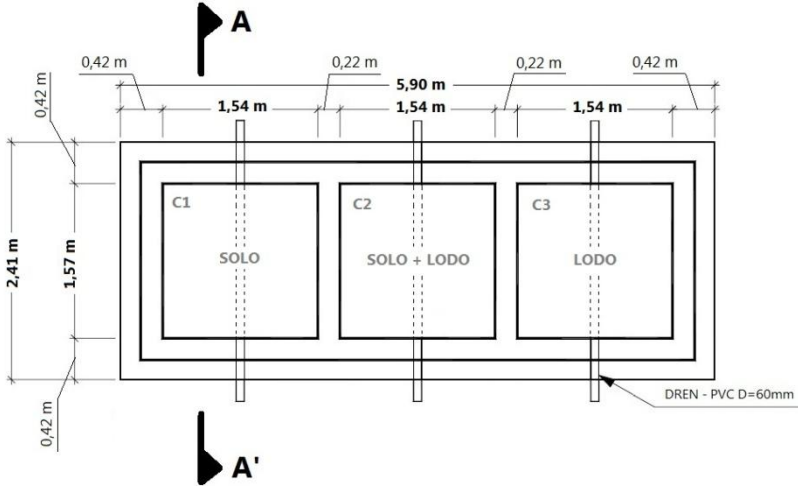
Ao final da Etapa 4 escolheu-se o traço, com menor percentual de cal possível, que apresentou característica geotécnica compatível com os requisitos da literatura. Este traço, então, foi utilizado no experimento de um piloto (Etapa 4.2.4), para se avaliar a influência do lodo no lixiviado.

3.2.4 ETAPA 4: Avaliação da Influência do Lodo no lixiviado

Nesta etapa, objetivou-se avaliar a influência do lodo de esgoto na qualidade do lixiviado, quando tal aplicado como cobertura de aterro sanitário. Para isso, utilizou-se um sistema piloto experimental composto por 3 células iguais preenchidas com um volume aproximado de 2,90 m³ de resíduos sólidos urbanos com peso específico igual a 470 kg/m³ – cobertas com as camadas de cobertura testadas. Na primeira célula (C1) foi colocada uma coberta com solo argiloso natural e serviu como referência. Na segunda célula (C2) aplicou-se uma camada com uma mistura com traço de solo e lodo de esgoto, previamente escolhido com base nas etapas anteriores. E finalmente, na terceira célula (C3), colocou-se uma camada unicamente de lodo tratado com o menor percentual de cal possível e atendendo aos critérios de estabilidade. Neste caso objetivou-se avaliar a influência do lodo no lixiviado em uma situação extrema, ou seja, uma camada com maior quantidade de

lodo possível. Na Figura 20 é apresentada a disposição das coberturas em planta baixa, as dimensões do piloto e a vista dos drenos de lixiviado. É importante salientar que nesta pesquisa focou-se na comparação entre um aterro que não recebe lodo como disposição e outro que recebe, mas apenas como coberturas.

Figura 20. Planta Baixa da instalação experimental.



FONTE: Adaptado de Medeiros *et al.* (2002).

Cada célula da estrutura, situada nas proximidades do Laboratório de Hidráulica da UFSC, constituía um lisímetro com as dimensões 1,54 x 1,57 m de base e 3,26 m de altura. A espessura da camada de resíduos era de 1,20 m e a da cobertura de 0,08 m. Esse último valor foi calculado em função da proporção da altura que se adota em campo. Segundo Reichert (2007), a altura de uma célula varia de 2 a 5 m e a cobertura intermediária geralmente é de 0,20 m. Se considerarmos como padrão para o cálculo uma camada de 4 m resíduos coberta com 0,20 m de solo e aplicarmos esta proporção para uma camada de 1,20 m ter-se-ia uma cobertura de 0,06 m. Contudo, para as células estudadas adotou-se uma cobertura de 0,08 m. As características das células são resumidas na Tabela 19.

Tabela 19. Características resumidas das células do piloto.

Área =	2,42 m ² /cel
Altura camada RSU =	1,20 m
Vol. Célula* =	2,90 m ³ /cel
Massa Resíduos* =	1365 kg/cel
Densidade* =	470,48 kg/m ³
Altura cobertura =	8,00 cm

* valores aproximados.

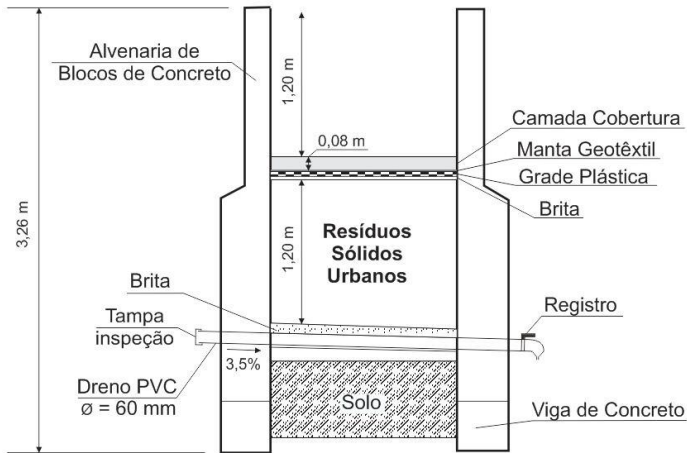
As amostras que representaram o material de cobertura foram preparadas de acordo com a norma NBR 6457 (ABNT, 1986a) e compactadas manualmente dentro das células conforme NBR 7182 (ABNT, 1986b) e com o auxílio de um soquete de madeira de 7 Kg. Rocca *et al.*(1993) recomenda que coberturas de aterro devem ser compactadas em camadas de no máximo 20 cm de espessura. Contudo, não foi preciso subdividir a cobertura em subcamadas para a compactação, pois sua altura total era apenas de 0,08 m. Antes da colocação das coberturas a camada de resíduos também foi compactada.

Na base de cada lisímetro, havia um dreno de PVC de 60 mm de diâmetro e com declividade de 3,5% para permitir a percolação e a coleta do lixiviado na base das células, por meio de registros (Figura 21).

Para garantir maior estabilidade física das coberturas testadas e se evitar rachaduras em função de recalques diferenciais resultantes do próprio peso dos resíduos e da cobertura, construiu-se uma camada estrutural. Esta era composta de brita, grade plástica e manta geotêxtil. A brita foi utilizada para nivelar a massa de resíduos, a grade para dar estrutura à camada e a manta para evitar perda de finos da cobertura.

Os resíduos urbanos colocados nas células já estavam na estrutura desde 2006. Tais foram coletados no bairro Canasvieiras e transportados até o local do experimento através de um caminhão coletor da Companhia de Melhoramentos da Capital (COMCAP). Nesta época, a composição gravimétrica era conforme a Tabela 20.

De 2006 até 2011 a estrutura ficou coberta e a decomposição natural dos resíduos ocorreu protegida de intempéries. Em função disto, alguns cuidados foram tomados antes da reativação do piloto. Primeiramente, as tampas de proteção foram retiradas e deixou-se entrar água da chuva por uma semana, para umidificar e saturar a massa de

Figura 21. Desenho esquemático em corte (A A') da instalação experimental.**Tabela 20.** Composição Gravimétrica dos resíduos em 2006.

Resíduo	Massa (gramas)	Proporção em massa
Orgânico	4265	51,76%
Plástico	1320	16,02%
Papel	870	10,56%
Vidro	290	3,52%
TetraPak	310	3,76%
Tecido	880	10,68%
Contaminado	180	2,18%
Alumínio	75	0,91%
Outros	50	0,61%
TOTAL	8240	100%

resíduos. Posteriormente, antes de se colocar as camadas de coberturas testadas, no dia 27 de junho de 2011, inoculou-se a massa de resíduos com aproximadamente 600 mL de lodo anaeróbio por célula, proveniente de um reator UASB (*Upflow anaerobic sludge blanket*) da ETE Barra da Lagoa (CASAN). Esse procedimento seguiu as recomendações de Castilhos Junior (1990) e o volume de lodo anaeróbio inoculado foi calculado da seguinte maneira:

$$V_{recomendado} = 200ml_{\text{lodo an.}}/m^3 \text{ resíduo} \quad (\text{Equação 7})$$

No momento da aplicação diluiu-se o lodo em um balde com água para facilitar seu espalhamento nas células. As características desse lodo estão descritas no Apêndice G e foram determinadas no Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos da UFSC. Na Figura 22 são apresentadas as etapas de montagem das camadas de cobertura, incluindo a inoculação da massa de RSU.

Os parâmetros físico-químicos analisados no lixiviado estão listados na Tabela 21.

As análises do lixiviado foram realizadas no Laboratório de Pesquisas em Resíduos Sólidos (LARESO) e no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA) da UFSC. O equipamento utilizado na análise de metais foi o Espectrômetro de absorção atômica marca VARIAN modelo 50B (SpectrAA 50).

Ao longo de todo o período do experimento os dados meteorológicos referentes à precipitação pluviométrica, à umidade relativa e a radiação solar global foram coletados. Estas informações foram fornecidas pelo Laboratório de Energia Solar da UFSC (LEPTEN/ LABSOLAR), o qual possui uma estação meteorológica localizada a aproximadamente 550 m do piloto.

3.2.4.1 Análise Estatística

Estatística descritiva englobando médias, desvios padrões, variância, intervalos de confiança (95%), mínimos e máximos foi feita para todas as variáveis, com exceção de pH, DBO₅, DBO₅/DQO e Alcalinidade.

Já estatística inferencial, através de análise de variância (ANOVA) e testes de Tukey par a par das médias calculadas, para verificar se a presença de lodo de esgoto na cobertura das células ocasionou alteração significativa, foi realizado para os parâmetros DQO e metais. Neste caso, os dados com valores abaixo ou próximos do limite de detecção também foram considerados. Todas as comparações foram feitas considerando intervalo de confiança de 95%.

Figura 22. Processo de inoculação e montagem das camadas de cobertura.

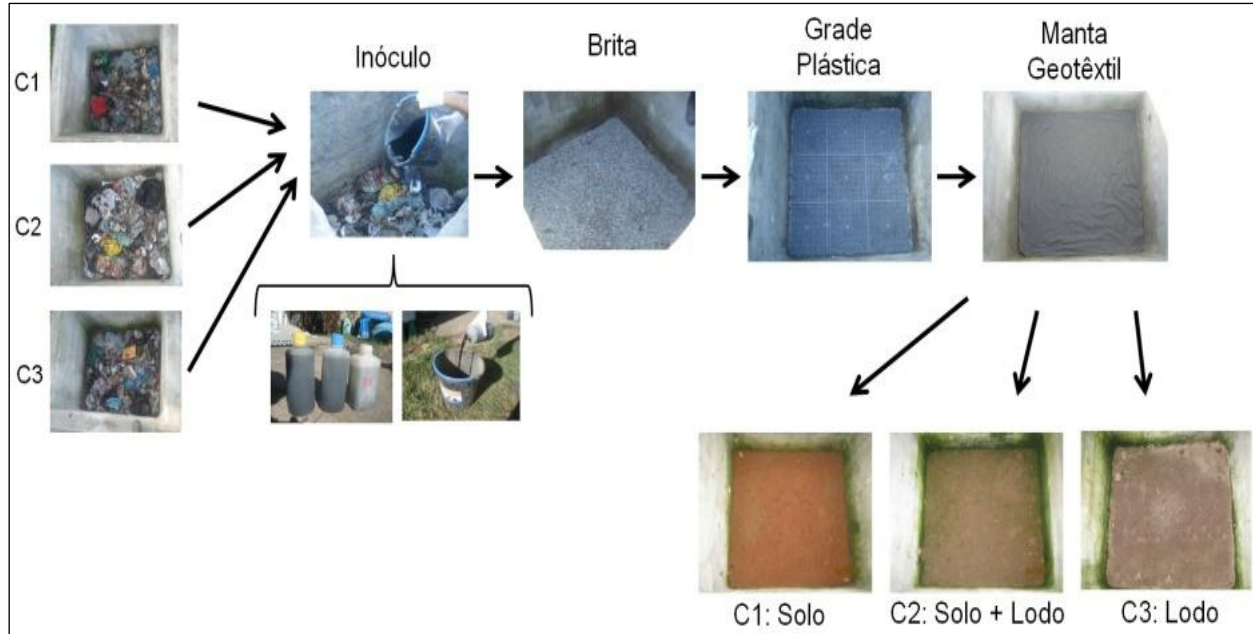


Tabela 21. Parâmetros físico-químicos analisados no lixiviado.

Parâmetros	Método	Referência (APHA, 2005)	Frequência
pH	Potenciométrico	4500-H ⁺ B	Semanal
Alcalinidade total	Titulométrico	2320 B	Semanal
DBO	Manométrico	5210 B	Semanal
DQO	Colorimétrico - Refluxo fechado	5220 D	Semanal
N-amoniacoal	Colorimétrico Nessler	4500 F	Semanal
N-nitrito	Colorimétrico	4500 B	Semanal
N-nitrato		4500 B	
P-total	Colorimétrico-Vanadomolibdico	4500 C	Semanal
Sólidos totais		2540 B	
Sólidos totais fixo	Gravimétrico	2541 E	Semanal
Sólidos totais voláteis		2542 E	
Cobre			
Níquel			
Cádmio	Espectrofotometria de Absorção Atômica	¹ EPA 3010A	Quinzenal
Chumbo			
Zinco			

¹ US EPA (1992)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados assim como as discussões de cada uma das quatro etapas realizadas estão apresentados separadamente neste capítulo. Posteriormente, uma análise global dos resultados é exposta no Capítulo de Conclusões e Recomendações.

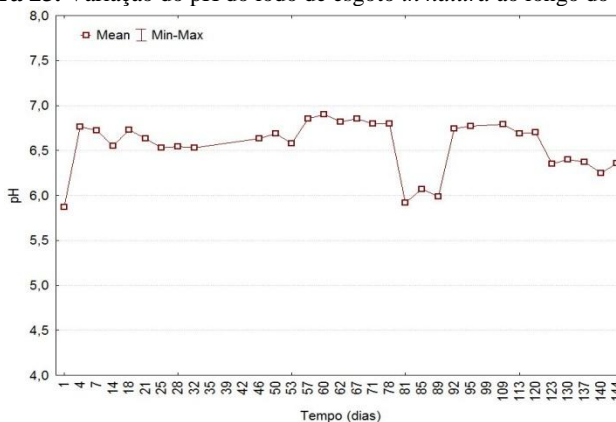
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESGOTO

A caracterização detalhada do lodo de esgoto (tópico 4.1.2), envolvendo os parâmetros citados na Resolução CONAMA nº 375, refere-se ao lodo pós prensa hidráulica – principal objeto deste trabalho. Para a caracterização básica (tópico 4.1.1), o pH e a umidade também são relativos ao lodo prensado. No entanto, o teor de sólidos voláteis é referente ao lodo adensado e foi obtido pelos pesquisadores Leite e Belli Filho (2011). Esta variável não se altera no processo de desidratação do lodo, conforme é apresentado a seguir.

4.1.1 Caracterização Básica do Lodo de Esgoto

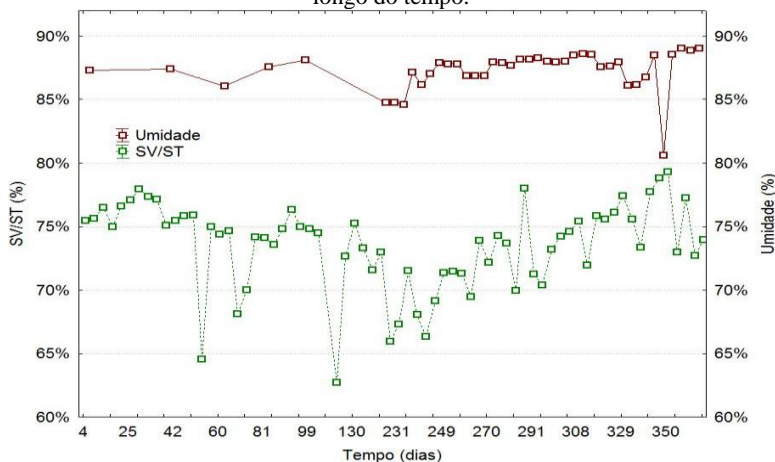
Os resultados da caracterização básica, englobando apenas pH, Umidade e relação SV/ST, são apresentados na Figura 23 e na Figura 24. O dia inicial de monitoramento do pH e umidade foi 03 de setembro de 2010 e de SV/ST foi 19 de agosto de 2010.

Figura 23. Variação do pH do lodo de esgoto *in natura* ao longo do tempo.



A média geral do pH, obtida a partir do monitoramento, foi de $6,54 \pm 0,05$. O desvio padrão geral foi de 0,29 e o intervalo de confiança (95%) ficou entre 6,44 e 6,65. Esta faixa de valores, um pouco abaixo da neutralidade, está situada dentro do que a literatura apresenta para lodos de ETEs por lodos ativados (LEITE, 2011; LIMA, 2010, COMPARINI, 2001; TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003). Entre os dias 78 e 89 os valores ficaram bem abaixo da média em função de problemas operacionais na ETE.

Figura 24. Variação da umidade e sólidos voláteis do lodo de esgoto *in natura* ao longo do tempo.



FONTES: SV/ST cedido por Leite e Belli Filho (2011) e Umidade de Arquivos pessoais.

O intervalo de confiança de 95% para o teor de SV/ST do lodo *in natura*, considerando todas as medidas expostas na Figura 24, variou entre 72,7% e 74,3%. A média geral e o desvio padrão foram respectivamente $73,5 \pm 0,4\%$ e 3,4%. Segundo a Resolução CONAMA 375, o lodo não está estabilizado ($SV/ST < 70\%$), e também segundo USEPA (1995) ($SV/ST < 50\%$), Jordão e Pessoa (2005) ($SV/ST < 45\%$). Segundo Von Sperling e Gonçalves (2001) pelo fato de a ETE ser de lodos ativados por aeração prolongada, era esperado que o biossólido já saísse do sistema estabilizado e com teor de SV/SV entre 0,65 e 0,70. Os resultados, contudo, comprovam que isto não está ocorrendo e o material demanda tratamento *a posteriori*.

A umidade média do lodo após passar por desaguamento foi de 87,3% e variou pouco ao longo do tempo (Desvio Padrão = 1,6% e IC

95% entre 86,8% e 87,8%) conforme apresentado na Figura 24. Isto demonstra boa regularidade do processo. Estes valores, contudo, situam-se um pouco acima do intervalo citado pela literatura para lodos desidratados em prensas desaguadoras. Ferreira, Andreoli e Jürgensen (1999) descrevem o intervalo entre 75% e 85% e Von Sperling e Gonçalves (2001) a faixa de 70% a 80% para lodos ativados de aeração prolongada.

4.1.2 Caracterização Detalhada do Lodo de Esgoto

Os resultados da caracterização completa do lodo prensado encontram-se na Tabela 22.

Os parâmetros físico-químicos são oriundos da média de cinco amostras coletadas ao longo do ano e os parâmetros biológicos da média de dez amostras, com exceção de ovos viáveis helmintos e *Salmonella sp.* No Apêndice A os resultados detalhados de cada amostra são apresentados e na Tabela 22 há um comparativo entre a média dos valores encontrados, os resultados de Turmina (2007) para caracterização do mesmo lodo e os limites da Resolução CONAMA N° 375.

Os resultados de Turmina (2007) são muito similares com encontrados nesta pesquisa, e apenas o nitrogênio total e os metais como Ba, Mo, Ni e Se tiveram diferenças mais evidentes. No entanto, todos os resultados estão abaixo dos limites fixados pela Resolução CONAMA N° 375, com exceção dos valores de SV e de *Escherichia coli*. Isto significa que o lodo não é estabilizado e em sua forma bruta ($SV > 0,7$) e não pode ser aproveitado diretamente na agricultura ou em coberturas de aterro sanitário ($SV > 0,4$ e $ST < 0,5$), sem antes, passar por adequado tratamento e secagem. Tais valores, contudo, situam-se dentro da faixa encontrada na literatura consultada para lodo não estabilizado (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003; LIMA, 2010; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 1999; MACHADO, 2001).

As baixas concentrações de metais no lodo, com relação aos limites da resolução do CONAMA, são justificadas pela não contribuição de efluentes industriais na região atendida pela ETE. Estes resultados também estão todos abaixo dos apresentados pela literatura para lodos oriundos de ETE por lodos ativados convencional (DAMASCENO; CAMPOS, 1998; TCHOBANOGLIOUS; BURTON;

STENSEL, 2003) e por aeração prolongada (FERNANDES *et al.*, 1997).

Tabela 22. Resultados da caracterização completa do lodo de esgoto.

Parâmetros	Média	Desvio Padrão	Turmina (2007)	CONAMA N° 375 Classe B
pH em água 1:5	6,65	0,35	6,11	-
pH em CaCl ₂	6,67	0,38	-	-
Teor de Sólidos Totais (%) (m/m)	12,70	0,50	-	-
Teor de Sólidos Fixos (%ST) (m/m)	23,52	2,94	-	-
Teor de 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	3,22	-
Nitrogênio Amoniacal (%) (m/m)	1,33	0,23	-	-
Fósforo (P) Total (%) (m/m)	2,28	0,34	2,96	-
Fósforo (PO ₄) (%) (m/m)	2,48	1,21	-	-
Alumínio (Al) (%)	1,00	0,32	-	-
Cálcio (Ca) (%)	0,99	0,11	1,06	-
Magnésio (Mg) (%)	0,56	0,08	0,38	-
Arsênio (As) (mg/kg)	3,73	1,96	3,67	41
Bário (Ba) (mg/kg)	147,75	21,63	-	1300
Mercúrio (Hg) (mg/kg)	0,95	0,45	ND	17
Molibdênio (Mo) (mg/kg)	13,80	10,80	ND	50
Níquel (Ni) (mg/kg)	14,25	0,88	32,15	420
Selênio (Se) (mg/kg)	2,70	2,40	9,47	100
Ferro (Fe) (mg/kg)	12850,0	1350,00	-	-
Cobre (Cu) (mg/kg)	198,00	21,00	221,3	1500
Zinco (Zn) (mg/kg)	521,8	26,56	583,7	2800
Cádmio (Cd) (mg/kg)	0,70	0,13	2,7	39
Chumbo (Pb) (mg/kg)	22,64	2,49	37,5	300
Cromo (Cr) (mg/kg)	37,52	20,19	35,1	1000
Umidade a 65 ± 5°C (%)	86,34	0,81	87,1	-
Umidade a 105 ± 5°C (%)	87,30	0,50	-	-
Densidade (g/cm ³) (1)	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	-	-	-

4.2 ESTABILIZAÇÃO ALCALINA EM ESTUFA

Os resultados dos dois ciclos de estabilização alcalina em estufa são apresentados e discutidos juntos, pois se trata de uma repetição do experimento com pequenas variações de um para o outro. À medida que são expostos, estes são comparados com as principais referências

consultadas. Para facilitar a análise dos dados dividiremos esta etapa em duas: o Processo de estabilização alcalina e a secagem em estufa.

4.2.1 Processo de Estabilização Alcalina

O primeiro critério avaliado na estabilização alcalina foi a medição do pH nas primeiras horas após a mistura de lodo com cal. No primeiro ciclo, apenas a mistura de 15% não atendeu ao critério de estabilização alcalina estabelecido pelo CONAMA nº375 – pH acima de 12 por 2h e acima de 11,5 por 24h.. No segundo ciclo, porém, os valores de pH de todas as misturas (15%, 30% e 45%) atenderam. Na Tabela 23 estão relacionados os valores medidos.

Tabela 23. Valores de pH para 0h, 2h e 24h nos Ciclos 1 e 2.

Ciclo	Tempo	% de Cal (em relação ao peso seco)		
		15%	30%	45%
1	0h	10,90*	12,32*	12,90*
	2h	-	-	-
	24h	10,3	12,22	12,33
2	0h	13,05	13,33	13,36
	2h	12,95	13,27	13,18
	24h	12,74	13,08	13,35

*Medidas realizadas diretamente na massa de lodo, diferentemente do método SANEPAR (2000)¹⁷. Testes realizados comparando-se os dois métodos apontaram diferença de menos de 1 unidade de pH entre eles.

Com relação às temperaturas das misturas de lodo com o álcali, estas foram medidas logo após a homogeneização dos componentes em todos os percentuais de cal e em todos os dois ciclos. Nenhuma mistura, no entanto, atingiu valores acima de 50°C, conforme indicava a literatura em misturas de cal virgem e lodo (PINTO, 2001; TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003). Isso ajudaria ainda mais na eliminação de microorganismos patogênicos, até os mais resistentes como os ovos de helmintos. A temperatura inicial do lodo *in natura* era de 23°C e a temperatura máxima atingida foi de aproximadamente 39°C para a mistura de 45% no segundo ciclo. As outras misturas ficaram abaixo disto. Na média dos dois Ciclos as temperaturas foram de 29°C para 15%; 35°C para 30% e 38°C 45%. A

¹⁷ Neste método adiciona-se 10g de lodo em 50 mL de água destilada fervida e faz-se a leitura após pelo menos 3 horas de repouso.

pouca elevação da temperatura pode ter algumas razões: a origem da cal ser de rocha dolomítica (ricas em magnésio), que gera menos calor que cales cálcicas (GUIMARÃES, 2002); a elevada umidade do lodo *in natura* – aproximadamente 87% - quanto maior, menos a temperatura se eleva (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003); a baixa qualidade de cal; ou pelo fato do material (cal) talvez ter absorvido alguma umidade em seu processo de armazenamento.

4.2.2 Secagem em Estufa Agrícola

O primeiro e o segundo ciclo de secagem de lodo caleado, ocorridos respectivamente entre setembro e dezembro de 2010 e entre março e junho de 2011, possibilitaram ter uma idéia do comportamento da estufa em diferentes épocas do ano. A variação da temperatura em cada período será apresentada no tópico 4.2.2.1 na Figura 27.

Ao longo dos dois ciclos a temperatura interna da estufa não foi monitorada em função de problemas no fornecimento do termômetro digital. Contudo, posteriormente conseguiu-se resolver este problema e foi possível conhecer o comportamento da estufa com relação ao ambiente. O monitoramento interno e externo (ambiente) ocorreu entre julho e dezembro de 2011. A Figura 25 apresenta as temperaturas mínimas, máximas e médias das médias horárias para a estufa e o ambiente.

Conforme se pode visualizar na Figura 25, das 21h até às 8:00h a variação da temperatura ambiente para a temperatura da estufa foi praticamente nula. Nas horas restantes, a temperatura da estufa se manteve sempre elevada em relação ao ambiente, além de apresentar maiores amplitudes térmicas. Os picos e máximos e mínimos são apresentados na Tabela 24 e comparados com as principais referências consultadas sobre o assunto.

Tabela 24. Comparação de temperaturas extremas ambiente e estufa.

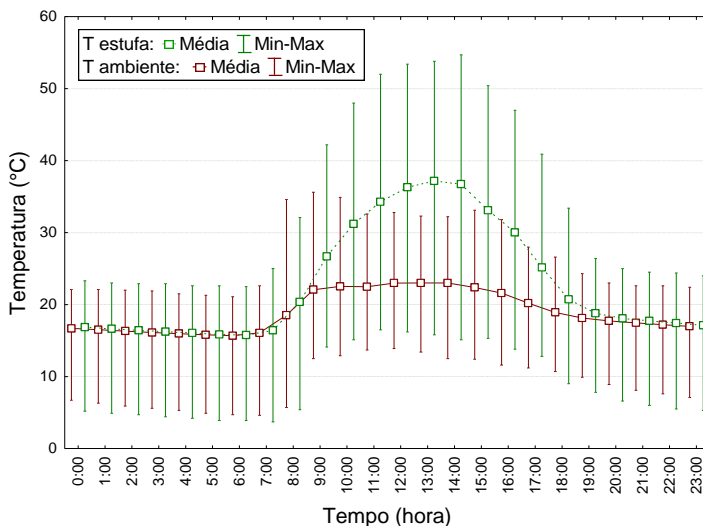
AUTORES	Temperatura Ambiente (°C)		Temperatura Estufa (°C)	
	Máxima ¹	Mínima ²	Máxima ¹	Mínima ²
Presente Pesquisa	35,6	4,6	54,7	3,7
COMPARINI (2001)	37	12,9	55,8	14,6
LIMA (2010) ³	37,5	16,5	51,6	18,3

¹Média das máximas diárias.

²Média das mínimas diárias.

³Considerando a etapa de tratamento de lodo não digerido deste trabalho.

Figura 25. Máximos e mínimos horários de temperaturas estufa e ambiente e médias das médias horárias.



Em função da localização geográfica do presente experimento, a média de temperaturas mínimas é muito inferior a encontrada nos trabalhos de Lima (2010) e Comparini (2011), realizados na região sudoeste do país. Além disso, o período medido compreendeu a estação do inverno. As temperaturas máximas, no entanto, estiveram na mesma faixa das principais referências e no caso da Lima (2010) até um pouco maior. Isto corrobora para a aplicação da estufa como método tratamento do lodo.

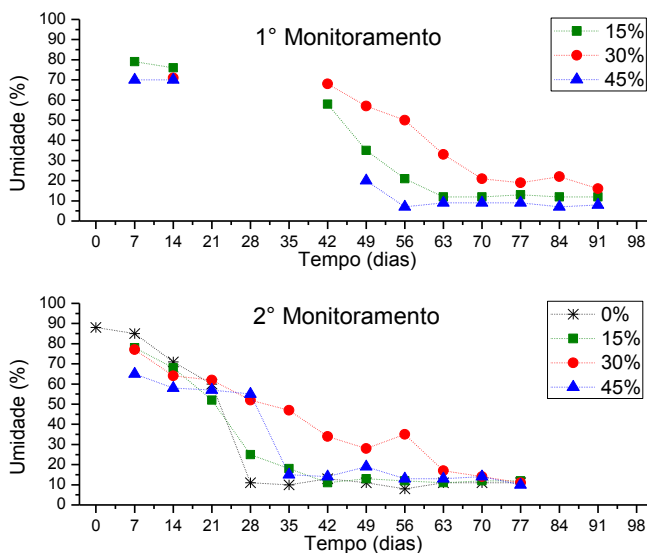
4.2.2.1 Monitoramento da secagem do lodo

Logo após o processo de caleação as misturas de cal e lodo foram colocadas nas bacias dentro da estufa. Apesar de a amostra de 15% não ter atingido o critério de pH da Resolução CONAMA n° 375 no Ciclo 1, prosseguiu-se com sua secagem na estufa, já que esta também é considerada uma forma de higienização do lodo quando atinge-se níveis menores que 10% de umidade (BRASIL, 2006; ANDREOLI *et al.*, 2003, LIMA, 2010; COMPARINI, 2001). No Ciclo 2, no entanto, esta amostra se enquadrou à norma.

Na primeira semana, forte odor originário da volatilização da amônia ainda era percebido - efeito da elevação do pH pela cal. Notou-se também, nos Ciclos 1 e 2, o aparecimento de manchas brancas (fungos) principalmente nas amostras de 15% e de 30%, as quais desapareceram da metade para o final dos ciclos. Além disso, observou-se a presença de moscas dentro da estufa a partir da terceira semana de monitoramento de ambos os ciclos, até a umidade ficar abaixo de 50% aproximadamente. Curiosamente, elas foram atraídas principalmente pela amostra de 15%, muito mais até que a amostra referência (0%) no Ciclo 2.

Na Figura 26 estão os gráficos relativos ao decaimento da umidade para os Ciclos 1 e 2.

Figura 26. Umidade ao longo do tempo para o Ciclo 1 e o Ciclo 2.

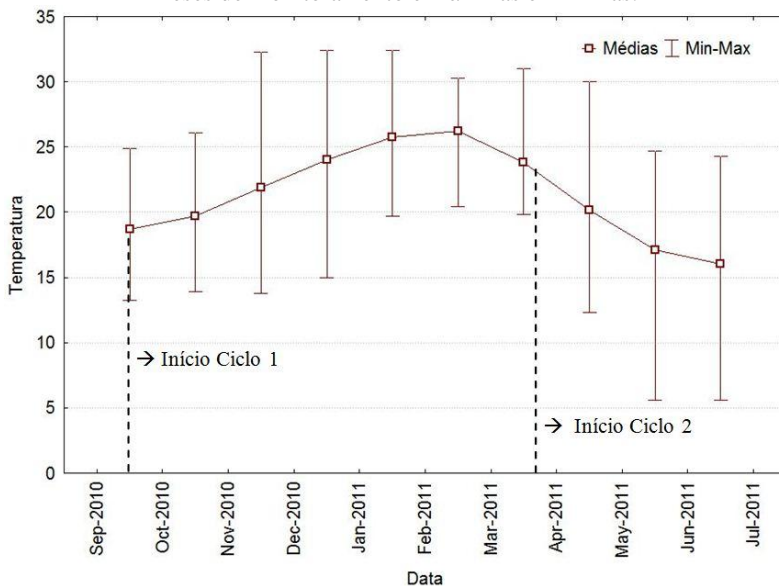


Conforme pode-se notar na Figura 26, inicialmente há uma maior resistência no decaimento da umidade para ambos os ciclos em função da grande quantidade de água livre presente no lodo, principalmente nas camadas mais profundas, dificultando a evaporação da água. Entre o 42º e o 60º dia do Ciclo 1, e entre o 25º dia e o 35º dia do Ciclo 2, taxa de decaimento da umidade do lodo é bastante expressiva, provavelmente em função do aumento da porosidade aparente da massa de lodo e consequente facilitação da evaporação da água. A partir do 63º dia do

Ciclo 1 e 40° dia do Ciclo 2, aproximadamente, a taxa de decaimento da umidade se torna a baixar e posteriormente se estabiliza em torno de 10 a 15%. Isso ocorreu provavelmente em função da dificuldade de evaporação da água residual contida nas microporosidades das partículas sólidas do material. Efeito similar foi relatado por Prim (2011) e Lima (2010), em que maior parte da umidade é removida aproximadamente nos primeiros 40 dias e depois estabilizada entre 10 e 20% até o final do ciclo.

Também é possível notar que no Ciclo 1 a umidade demora mais para decair que no Ciclo 2. A amostra de 30%, por exemplo, atingiu 50% de umidade aos 56° dia no Ciclo 1 enquanto no Ciclo 2 levou apenas 31 dias. Isso ocorreu, provavelmente por que a época em que se iniciou o Ciclo 1 (setembro) não estava tão quente e tão seco quanto a época do início do Ciclo 2 (março). Enquanto em Setembro de 2010 a temperatura média foi de 19,0°C (DP=2,0°C) em Março de 2011 foi de 23,3°C (DP=1,6°C). A umidade relativa do ar, no entanto, não teve muita diferença e foi em média 78,7% (DP=10,2%) em Setembro/10 e 75,9% (DP=8,0%) em Março/11. Na Figura 27 estão os registros da média de temperatura mensal do ar ambiente (externo) nas épocas do experimento.

Figura 27. Temperaturas médias mensais do ar ambiente (externo) durante os meses de monitoramento e máximas e mínimas.



Além disso, notou-se que as amostras dispostas nas caixas mais baixas, entre 13 e 15 cm de altura aproximadamente, secaram muito mais rapidamente que as dispostas em caixas um pouco maiores, de 20 cm. Na Tabela 25 é apresentada a altura aproximada do lodo e o número de dias que as misturas levaram para atingir a umidade de 50% - a requerida para coberturas diárias (GRIFFIN *et al.*, 1998).

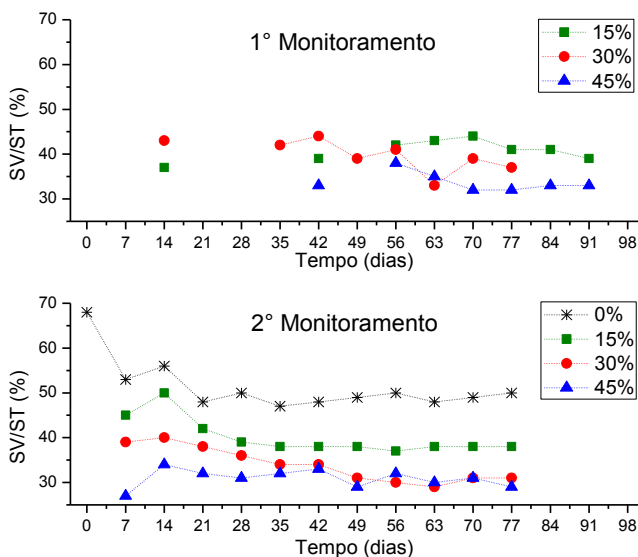
Tabela 25. Relação entre número de dias (t) para misturas atingirem umidade de 50% nos Ciclos com altura camada de lodo (h) nas caixas dentro da estufa.

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

Lima (2010), de forma similar, verificou que camada de 10 cm de altura era mais vantajosa na secagem em estufa que outros arranjos maiores de camada. Com base em sua pesquisa a autora recomendou o tempo de secagem de 36 dias para atingir umidade de 25%, com um lodo padrão Classe A (exceto vírus).

A variação do teor de SV em relação aos ST é apresentada na Figura 28.

Figura 28. Monitoramento do teor de SV/ST para o Ciclo 1 e o Ciclo 2.



Percebe-se, para o Ciclo 2, uma tendência de decaimento dos sólidos voláteis em todas as misturas, com exceção da de 45% nas duas primeiras medidas. Esta, porém, volta a para a mesma tendência (de decaimento) das outras misturas no 20º dia do Ciclo 2. A diminuição gradual observada é em função da continuidade do processo de estabilização do lodo e à perda de orgânicos voláteis para a atmosfera que pode chegar até 35% (ANDREOLI *et al.*, 2001). Efeito similar foi constatado pela literatura (PRIM, 2011; LIMA, 2010; COMPARINI, 2001). No Ciclo 1, a mesma tendência não é visualizada, por falta de dados no início do monitoramento. Além disso, o reduzido teor de SV/ST das amostras com cal em relação à amostra referência (0% do Ciclo 2) é decorrente do efeito de diluição provocado pelo aumento da massa de ST com a adição de cal ao lodo. O incremento de ST quando se adiciona cal está dentro da faixa de 10% a 30% citado pela literatura (LUE-HING *et al.*, 1998) e pode ser visto na Figura 26.

Os valores de SV/ST de todas as misturas, incluindo a controle (0%) ficaram abaixo de 0,7, conforme estabelecido pelo CONAMA nº 375/06 (BRASIL, 2006). As referências consultadas (PRIM, 2011; LIMA, 2010; COMPARINI, 2001) também conseguiram reduzir o teor de sólidos voláteis para níveis abaixo de 0,7 do lodo submetido à estufa. Contudo, nem todos os resultados ficaram abaixo do percentual de 40% de SV/ST estabelecido nesta pesquisa como máximo desejável para o uso de lodo em coberturas de aterros sanitários, com base nos valores típicos citados de pela literatura (GRANATO, 2011; SIMMONS, 2003; PIETZ *et al.*, 1996). Este parâmetro é de grande importância por ter relação direta com o grau de estabilização e consequente potencial de geração de odor. A amostra de 45% ficou abaixo deste valor em ambos os ciclos durante todo o monitoramento; a amostra de 30% a partir do 49º dia do Ciclo 1 e a partir do 21º dia do Ciclo 2; e a amostra de 15% e a partir do 28º dia do Ciclo 2 e para o Ciclo 1 manteve-se sempre acima ou muito próxima dos 40% de SV/ST, com exceção dos dois primeiros pontos medidos – estes considerados valores discrepantes, em função de não obedecerem a tendência de decaimento visualizada nos pontos posteriores (Figura 28). No último dia de monitoramento, esta chegou a ficar com 39% de SV/ST. A amostra referência do Ciclo 2 (0%), ficou com média de valores muito acima dos 40% de SV, como pode-se perceber na Figura 28.

Na Tabela 26 está descrita de forma resumida o número de dias para as misturas atingirem 40% SV/ST.

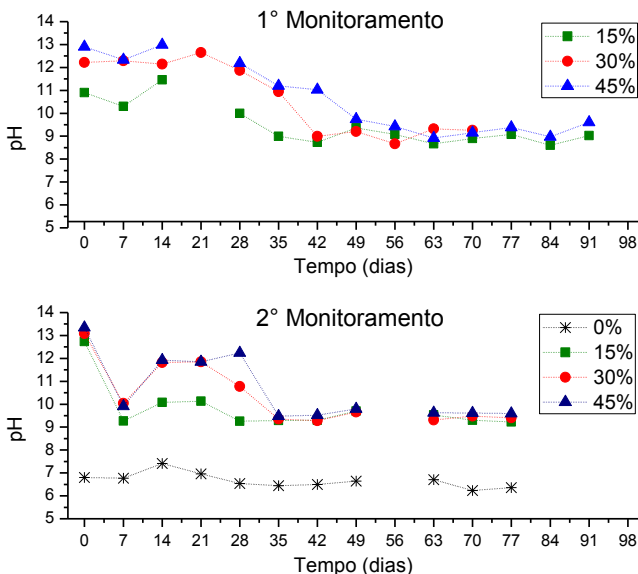
Tabela 26. Número de dias para as misturas atingirem 40% SV/ST ou menos.

Ciclos	Misturas			
	0%	15%	30%	45%
1	NA	77	49	T
2	NA	28	21	T

NA – Não Atingiu e ficou sempre acima de 40%.

T – Todos os dias ficou abaixo de 40%

Já a variação de pH no tempo, é apresentada na Figura 29. Para ambos os Ciclos, o pH das amostras caledas decrescem gradualmente, devido a perda da umidade, e estabilizam-se em valores entre 9 e 9,5. Neste ponto, a concentração de H^+ e OH^- entraram em equilíbrio com o meio. O pH do lodo *in natura* (amostra 0% do 2º Ciclo) não sofreu variação significativa ao longo do tempo.

Figura 29. Monitoramento do pH no tempo para o Ciclo 1 e o Ciclo 2.

Outro parâmetro monitorado ao longo do período de secagem foi *Escherichia coli*, apresentado na Figura 30 (Ciclo 1) e na Figura 31 (Ciclo 2).

Figura 30. Monitoramento de *Escherichia coli* Ciclo 1.

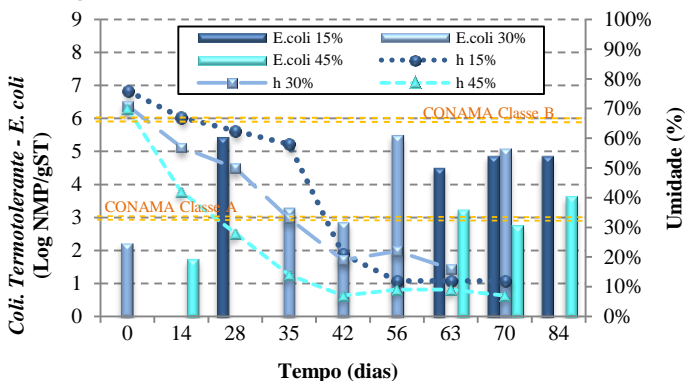
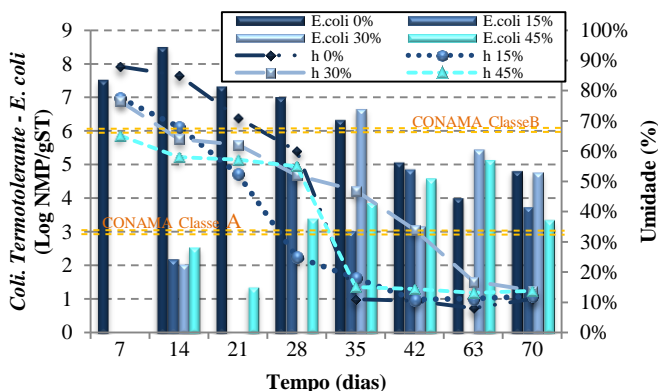


Figura 31. Monitoramento de *Escherichia coli* Ciclo 2.



Conforme os gráficos apresentados, a concentração de *E.coli* das amostras caledas estavam zeradas no início, com exceção da amostra de 0% no Ciclo 2 e 30% no Ciclo 1. Isto ocorreu devido ao elevado pH no início dos Ciclos. Porém, notou-se posteriormente um recrescimento na metade do monitoramento, provavelmente devido a redução do pH e favorecimento das condições de sobrevivência de tal bactéria. Outra possível causa seria recontaminação nos reviramentos periódicos dos lodos, mesmo apesar dos cuidados com a limpeza das enxadas. Outras prováveis fontes de contaminação, de fato notadas, podem ter sido a as fezes de animais hospedeiros como lagartos, moscas e baratas. Ao final do monitoramento, no entanto, percebeu-se nova tendência de

decaimento das concentrações de *E.coli*, pelo fato de baixas umidades dificultarem a sobrevivência deste microorganismo. No Ciclo 1 as amostras ficaram o monitoramento inteiro dentro do padrão *Classe B* da Resolução n° 375 do CONAMA (BRASIL, 2006). Para o Ciclo 2, a partir do 42° dia todas as amostras, incluindo a referência (0%), estavam dentro do padrão *Classe B*. O padrão de recrescimento e diminuição do *E.coli* com o passar do tempo se assemelha com resultados das principais referências (COMPARINI, 2001; LIMA, 2010). Contudo, o material dos autores atingiu padrão *Classe A* ao final de 36 dias para Lima (2010) e de 70 dias para Comparini (2001).

Após o final do Ciclo 1 realizou-se uma análise completa dos lodos secos e higienizados na estufa agrícola (Tabela 27).

Tabela 27. Resultado das análises realizadas após monitoramento na estufa no 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	-
pH em CaCl ₂ (1)	5,90	9,30	9,50	9,80	-
Carbono Orgânico (%) (m/m)	36,87	26,31	26,10	18,90	-
Matéria Orgânica (%) (m/m)	63,42	45,25	44,89	32,51	-
Cinzas a 550°C (%) (m/m)	25,57	45,39	51,66	60,94	-
Nitrogênio Total (%) (m/m)	5,90	3,10	2,60	2,50	-
Nitrogênio Amoniacal (%) (m/m)	1,00	0,60	0,30	0,20	-
Fósforo (P) Total (%) (m/m)	1,40	0,90	0,70	0,50	-
Fósforo (PO ₄) (%) (m/m)	4,30	2,80	2,10	1,50	-
Alumínio (Al) (%)	1,20	0,70	0,50	0,40	-
Cálcio (Ca) (%)	1,10	7,94	10,12	13,67	-
Magnésio (Mg) (%)	0,63	5,01	5,91	8,11	-
Ferro (Fe) (mg/kg)	12013,00	7828,00	4778,00	4168,00	-
Cobre (Cu) (mg/kg)	217,00	115,00	81,00	65,00	1500
Zinco (Zn) (mg/kg)	540,00	454,00	272,00	215,00	2800
Cádmio (Cd)(mg/kg)	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	39
Chumbo (Pb) (mg/kg)	29,10	11,40	22,70	7,40	300
Cromo (Cr) (mg/kg)	26,20	21,60	15,40	11,20	1000
Umidade a 65 ± 5°C (%)	5,82	5,36	5,50	4,23	-
Umidade a 105 ± 5°C (%)	8,50	9,90	9,56	6,85	-
Densidade (g/cm ³)	0,81	0,72	0,67	0,89	-
Coliformes Totais (NMP/ gST)	0,00	0,00	0,00	0,00	-
Coliformes Fecais (NMP/ gST)	0,00	0,00	0,00	0,00	-
<i>Escherichia coli</i> (NMP/ gST)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,0E+06
Ovos Helm. (ovo viável /g ST)	0,37	0,33	0,30	0,08	10

Conforme se aumentou o percentual de cal adicionado, notou-se o aumento gradual das concentrações de Ca e Mg, como já esperado, pois estes elementos são os mais abundantes na cal. Contudo, a concentração de cada um dos outros metais analisados (Cu, Al, Zn, Cr, Fe, Pb, Cd) decaíram em função do efeito de diluição decorrente da adição de sólidos (cal) no lodo. As amostras cujos resultados são apresentados na tabela acima foram enviadas para análise no final do mês de fevereiro. Estas relacionam-se ao material gerado no primeiro experimento. Considerando que o período experimental encerrou no início de dezembro, o tempo entre o final do monitoramento e o envio das amostras para caracterização geral contribuiu para uma maior higienização do lodo caledado. A presença de coliformes não foi detectada neste estágio, provavelmente em função da baixa umidade das amostras analisadas – todas com menos de 10%. A concentração de ovos viáveis de helmintos, contudo, foi ainda detectada e as misturas 0%, 15% e 30% ficaram dentro na *Classe B* e o 45% atingiu padrão *Classe A* (ovos viáveis < 0,25ovos / g ST). Cabe lembrar que as amostras de lodo *in natura* apresentaram concentração de ovos viáveis helmintos muito abaixo do limite para *Classe B* (10 ovos viáveis / g ST), conforme Apêndice A. Isto reforça que este parâmetro, apesar de sua importância sanitária, não é, a princípio, fator limitante para enquadramento do lodo da ETE Insular como *Classe B*.

A concentração de parâmetros agronômicos (P, PO₄, N_{total}, NH₄ e Carbono orgânico) decaíram assim como a da matéria orgânica, resultado do efeito de diluição da cal e da volatilização da amônia por *stripping*.

4.2.2.2 Resultados Gerais Compilados

Os resultados iniciais e finais do monitoramento desta pesquisa, para os Ciclos 1 e 2 (C1 e C2 respectivamente), são apresentados na Tabela 28. Eles foram comparados com as principais referências consultadas relativas ao tratamento de lodos em estufas.

De modo geral os resultados deste trabalho situam-se dentro das faixas de valores encontrados por Lima (2010), Comparini (2001) e Prim (2011), com exceção dos valores iniciais de SV/ST e finais de *E.coli*. A grande diferença entre os valores iniciais de SV/ST desta pesquisa para as de Lima (2010) e Comparini (2001) se deve ao fato de as análises do Ciclo 1 terem sido iniciadas apenas 14 dias após a montagem do experimento; para o Ciclo 2, essa defasagem foi de 7 dias,

com exceção do pH. Além disso, o início do monitoramento foi o período justamente com maior decaimento para Lima (2010), provavelmente em função da perda de amônia e compostos orgânicos voláteis por *stripping*. Contudo, a tendência de decaimento para o lodo com e sem cal foi a mesma e apresentou continuidade da estabilização.

Os resultados finais de *E.coli* foram muito diferentes das referências provavelmente em função de recontaminação, já comentadas no tópico 4.2.2.1, ocorridas no final dos ciclos. De qualquer modo, todas as misturas atenderam ao critério do CONAMA para biossólidos *Classe B*, ao longo de todo o Ciclo 1 e aos 42 dias do Ciclo 2.

Tabela 28. Comparação de resultados com as principais pesquisas relacionadas.

AUTORES	pH		Umidade (%)		SV/ST (%)		<i>E.coli</i> (NMP/gST)		Ovos Helminthos (ovos viáveis /gST)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
	COMPARINI (2001)	6,0 a 7,7	6,0 a 7,7	82 a 84	9,7 a 11,5	73	53	5,37	<3	27,06
LIMA (2010) lodo sem cal¹	6,2 a 7,3	5,1 a 6,4	85,2 a 89,1	5,9 a 27,9	64,6 a 79,7	36,0 a 45,7	4 a 5	<0,5 a 2	0,21 a 0,29	0,11 a 0,16
LIMA (2010) lodo com cal^{1*}	12 a 12,4	7,7 a 8,1	82,3 a 87,9	5,7 a 21,9	52,1 a 66,5	33,0 a 35,4	<0,5	<0,5 a 1	0,17 a 0,31	0,09 a 0,16
PRIM (2011)	13,3	9,5	62	6	39	38	7,9 x 10 ²	1,8x 10 ¹	-	-
C1 15%	10,9	9,0 a 9,1	78 a 80	12	35 a 39	32 a 42	0,00	4,88	-	0,33
C1 30%	12,2 a 12,3		69 a 75	16	42 a 44	34 a 39	2,24	5,08	-	0,30
C1 45%	12,9	9,4 a 9,5	69 a 71	7 a 8	14 a 24	30 a 34	0,00	3,64	-	0,08
C2 0%	6,8	6,3 a 6,4	88	11 a 12	68	44 a 56	7,53	4,84	0,054	0,035
C2 15%	12,7	9,2	78	12	45	37 a 38	0	3,75	-	0,003
C2 30%	13,1	9,4	77	10 a 11	39	29 a 32	0	4,78	-	0,004
C2 45%	13,4	9,6	65	10 a 11	27	27 a 30	0	3,37	-	0

Obs: A segunda casa decimal de alguns resultados foi arredondada

¹Os resultados de Lima (2010) expostos englobam a média dos valores dos 3 ciclos realizados e consideram a etapa de lodo não digerido.

* O teor de cal adicionado no experimento de Lima (2010) foi de 13,5% em relação aos ST.

4.2.2.3 Avaliação Estatística dos dados

A seguir, é apresentada a análise estatística da etapa de higienização e secagem de lodo. A Tabela 29 e a Tabela 30 apresentam a estatística descritiva do Ciclo 1 e 2, respectivamente.

Tabela 29. Resultado da estatística descritiva para Ciclo 1.

% Mistura	Parâmetros	Estatística Descritiva					Variância
		Média	Mediana	DP	IC (-95%)	IC (+95%)	
15%	pH	9,18	9,03	0,59	8,97	9,39	0,35
	C. Totais*	4,00	4,88	2,28	1,17	6,83	5,20
	E. Coli*	3,94	4,88	2,23	1,18	6,71	4,97
	SV/ST (%)	41	42	4	39	42	0
	Umidade (%)	34	13	27	24	44	7
30%	pH	10,59	10,94	1,55	10,02	11,16	2,40
	C. Totais*	5,08	5,46	1,31	3,45	6,71	1,73
	E. Coli*	3,79	3,30	1,42	2,04	5,55	2,00
	SV/ST (%)	40	41	4	38	42	0
	Umidade (%)	39	29	22	30	48	5
45%	pH	9,98	9,45	1,16	9,57	10,39	1,35
	C. Totais*	3,14	4,21	2,18	0,44	5,85	4,73
	E. Coli*	2,28	2,76	1,45	0,47	4,08	2,11
	SV/ST (%)	31	33	8	28	35	1
	Umidade (%)	23	9	24	14	32	6

* Unidade: Log NMP/gST

Tabela 30. Resultado da estatística descritiva para o Ciclo 2.

% Mistura	Parâmetros	Estatística Descritiva					Variância
		Média	Mediana	DP	IC (-95%)	IC (+95%)	
0%	pH	6,57	6,54	0,26	6,46	6,69	0,07
	C. Totais*	7,97	8,00	0,75	7,34	8,59	0,56
	E. Coli*	6,34	6,68	1,54	5,05	7,63	2,38
	Umidade (%)	50	49	5	48	52	0
	SV/ST (%)	21	11	25	11	31	6
15%	pH	9,59	9,32	0,72	9,29	9,89	0,52
	C. Totais*	5,05	5,44	2,23	3,18	6,91	4,96
	E. Coli*	2,36	2,62	2,16	0,56	4,16	4,65
	Umidade (%)	39	38	3	37	40	0
	SV/ST (%)	20	12	18	12	27	3
30%	pH	9,85	9,46	1,00	9,43	10,28	1,00
	C. Totais*	4,42	5,53	2,95	1,95	6,88	8,70
	E. Coli*	2,77	2,62	2,68	0,53	5,01	7,16
	Umidade (%)	33	32	3	31	34	0
	SV/ST (%)	31	28	19	23	39	4
45%	pH	10,08	9,62	1,07	9,63	10,53	1,14
	C. Totais*	5,77	5,44	0,72	5,11	6,43	0,51
	E. Coli*	3,04	3,39	1,69	1,62	4,45	2,86
	Umidade (%)	31	31	2	30	32	0
	SV/ST (%)	21	14	17	14	28	3

*Unidade = Log NMP/gST

Na Tabela 31 são apresentados os resultados dos testes ANOVA comparando-se as médias gerais dos resultados do Ciclo 1 com o Ciclo 2. Além disso, os testes de Tukey, realizados comparando-se as médias gerais de cada parâmetro (par a par) entre os dois ciclos, confirmam que não há diferença significativa (para significância de 5%) entre os dois grupos de dados de modo geral. As amostras testadas abaixo são apenas as caleadas (sem considerar a amostra referência – 0%).

Tabela 31. Resultado da análise de variância para a interceptação do dois experimentos monitorados.

Interceptação	Variável Dependente	ANOVA		Teste de Tukey*	
		F	p-valor	Média 1º Experimento	Média 2º Experimento
	pH	0,260	0,611714	10,10200	10,26652
1º Experimento	C. Totais	0,4724	0,496549	4,076000	4,604882
X	E. Coli	1,46129	0,235065	3,338667	2,509078
2º Experimento	SV/ST	3,237	0,077563	0,349697	0,376087
	Umidade	0,0211	0,885103	0,320000	0,329091

Obs: F = distribuição de Snedecor; * todos os resultados do valor-p foram < 5%.

Como não houve diferença significativa entre os dois monitoramentos, optou-se por trabalhar apenas com o segundo conjunto de dados para a estatística inferencial, pois este monitoramento foi efetuado com maior consistência.

O fato de ambos monitoramentos não apresentarem diferenças significativas ($p > 0,05$) corrobora o fato que em épocas diferentes os tratamentos trazem resultados semelhantes de maneira geral. Porém, como já discutido anteriormente, a sazonalidade e a altura do lodo disposto na estufa influi no tempo de secagem do mesmo.

São apresentados na Tabela 32 os resultados dos testes de Tukey par a par para cada parâmetro em função do tempo e do percentual de mistura separadamente.

Análise parâmetro x % mistura

Com relação ao pH, a amostra referência (0% de cal) apresentou diferença significativa de todos os outros percentuais de mistura (15%, 30% e 45%), enquanto para os lodos caleados não apresentaram diferença significativa entre si ($p > 0,05$). Isso evidencia a influência da cal no parâmetro pH.

O teor de SV/ST apresentou diferença significativa entre todos os percentuais, com exceção do par 30%-45%. Este resultado confirma uma tendência já observada na Figura 28. A partir do 35º dia os

Tabela 32. Testes de Tukey par a par das amostras do Ciclo 2.

Interceptação		pH	SV/ST	Umidade
		p	p	P
Parâmetro X % Mistura	0% - 15%	0,0001	0,0001	0,8905
	0% - 30%	0,0001	0,0001	0,5774
	0% - 45%	0,0001	0,0001	0,9681
	15% - 30%	0,6870	0,0001	0,2064
	15% - 45%	0,1801	0,0001	0,9941
	30% - 45%	0,7850	0,2656	0,3206
Parâmetro X Tempo	0-7	0,5393	0,1169	0,9878
	7-14	0,9902	0,9999	0,9670
	14-21	1,0000	0,9991	0,9674
	21-28	1,0000	1,0000	0,5873
	28-35	0,9906	1,0000	0,0002
	35-42	1,0000	1,0000	0,8967
	42-49	1,0000	1,0000	1,0000
	49-56	1,0000	1,0000	0,9910
	56-63	1,0000	0,9999	1,0000
	63-70	1,0000	1,0000	1,0000
	70-77	1,0000	1,0000	1,0000

Obs: Em cinza os resultados que apontaram diferenças estatisticamente significativas, com significância de 5%.

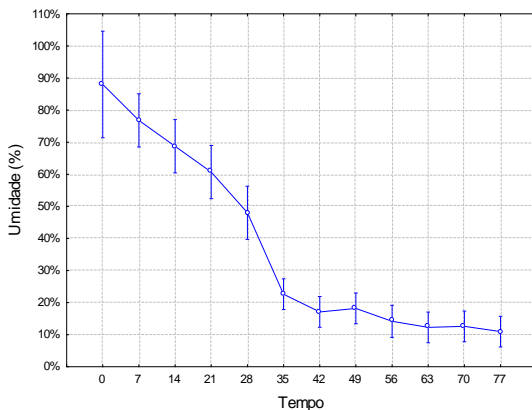
resultados se igualaram, apesar de se esperar valores menores para as amostras de 45% em função do efeito de diluição da cal.

O parâmetro UMIDADE não apresentou diferença significativa na comparação entre todos os percentuais de mistura par a par. Isto evidencia que o efeito de desidratação do lodo na estufa independe da adição ou não de cal ou do percentual adicionado.

Análise parâmetro x tempo

De forma geral os resultados não apresentaram diferença significativa ao longo do tempo, ou seja, de uma semana para outra não há decaimentos bruscos de nenhum parâmetro. A exceção é do parâmetro *umidade* entre os dias 28 e 35 ($p = 0,0002$). Na Figura 32, a qual apresenta a média de umidade e os intervalos de confiança (95%) para o fator tempo, pode-se perceber a queda brusca do 28° para o 35° dia. Isto ocorreu, provavelmente, pelo fato de neste período a massa de lodo já estar muito porosa, possibilitando a entrada de ar e facilitando a evaporação de água livre e intersticial remanescente.

Figura 32. Média da umidade para todas as amostras Ciclo 2 e IC 95%.



4.2.3 Conclusões da Etapa de Estabilização Alcalina em Estufa

A associação da técnica de caleação do lodo com sua posterior secagem e higienização em estufa agrícola se mostrou eficiente para adequar-lo ao seu aproveitamento em camadas de coberturas de aterros sanitários. Foi possível atender aos critérios ambientais considerados: relação SV/ST, umidade, pH, Coliformes Termotolerantes (*E.coli*), ovos viáveis de helmintos, metais e parâmetros inorgânicos. De forma geral, as considerações mais relevantes são as seguintes:

- Todos os tratamentos testados (adição de 15%, 30% e 45% de cal) tanto no Ciclo 1 quanto no Ciclo 2 mostraram ser eficientes para enquadrar o lodo na *Classe B* do CONAMA nº375. Contudo, apesar de o tratamento com 15% no Ciclo 1 não ter atendido ao pH mínimo para redução de patógenos (pH = 12 por 2h) nem para redução de atratividade de vetores (pH = 12 por um período mínimo de 2 horas, permanecendo acima de 11,5 por mais 22 horas) esta amostra também foi avaliada na etapa geotécnica, pois no Ciclo 2 atendeu ao requisito.

- Os tratamentos com adição de 30% e 45% foram eficientes tanto no Ciclo 1 quanto no Ciclo 2 para deixar o lodo com teor de SV/ST menor que 0,4 – requisito de estabilidade definido para coberturas de aterro com base na literatura. O tratamento com 15% de cal atendeu também em ambos os Ciclos, mas ficou próximo do limite (39% no Ciclo 1 e 38% no Ciclo 2).

- Todos os tratamentos atingiram a umidade de 50% ou menos, necessária para aplicação em coberturas diárias e intermediárias, em até

56 dias no Ciclo 1 (com altura de 20 cm de lodo) e até 29 dias no Ciclo 2 (com 15 cm de lodo). Com isso verificou-se a influência da sazonalidade no tempo de secagem, além da altura de lodo disposto na estufa. Neste caso recomenda-se altura de até 15 cm, considerando reviramento de 3 vezes por semana, para que o decaimento de umidade ao longo do tempo seja otimizado. Como o efeito de desidratação do lodo na estufa independe da adição ou não de cal ou do percentual adicionado, e com base na Tabela 25, conclui-se que a desidratação do lodo em estufa no período equivalente ao Ciclo 1 (início em setembro) demoraria aproximadamente 44 dias.

- A desidratação e higienização do lodo na estufa, para atingir padrão *Classe B*, independe da adição de cal ao lodo. Contudo, sem a cal o lodo não atinge teor de SV/ST máximo (0,4) para ser aplicado em coberturas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA MISTURAS LODO/SOLO

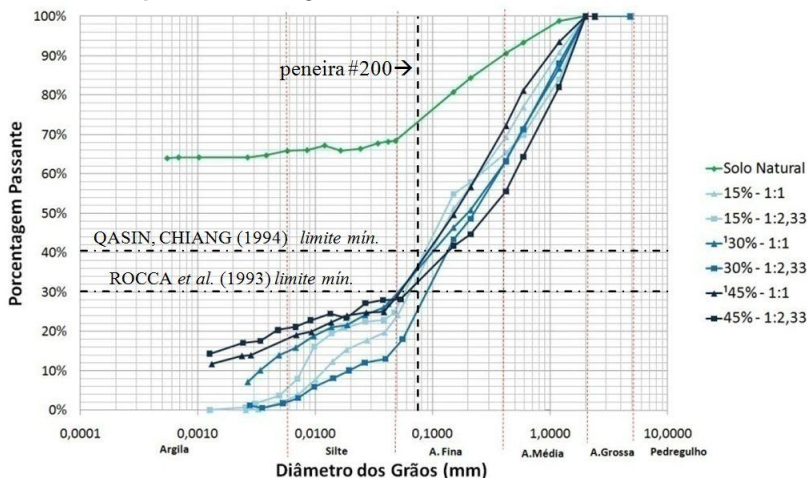
Todas as misturas da etapa anterior (15%, 30% e 45%) atenderam aos critérios ambientais definidos, embora a mistura de 15% tenha ficado muito próxima do limiar de 40% de SV nos dois Ciclos (39% e 38%). Mesmo assim, os testes com os traços 1:1 e 1:2,33 (solo:lodo) foram realizados para todos os percentuais supracitados. Os resultados foram comparados com as características geotécnicas do solo natural e com os requisitos de cobertura citados pela literatura relacionada.

Nos ensaios que envolveram reumidificação das amostras percebeu-se a emanção de maus odores, principalmente da amostra de 15%. Notou-se também nas misturas de lodo com cal a presença de grãos com tamanho de areia muito rígidos e de difícil destorroamento. Estes eram formados pela ação cimentante da cal que tende a unir as partículas de lodo em forma de agregados. A seguir são descritos os ensaios geotécnicos realizados.

4.3.1 Ensaio de Granulometria

As curvas granulométricas dos traços estudados são apresentadas na Figura 33.

Figura 33. Curva granulométrica das misturas testadas.



De maneira geral percebe-se que o solo natural (linha verde) apresenta maior percentual de grãos finos que as misturas solo:lodo. A fração de finos do solo, por exemplo, passou de 76% para 32%, no caso da amostra 30% 1:1. Isto evidencia a influência da fração de lodo com cal no aumento da granulometria dos traços. Este mesmo efeito ocorre quando cal é adicionada ao solo com o objetivo de estabilizá-lo e adequá-lo geotecnicaamente (GUMARÃES, 2002).

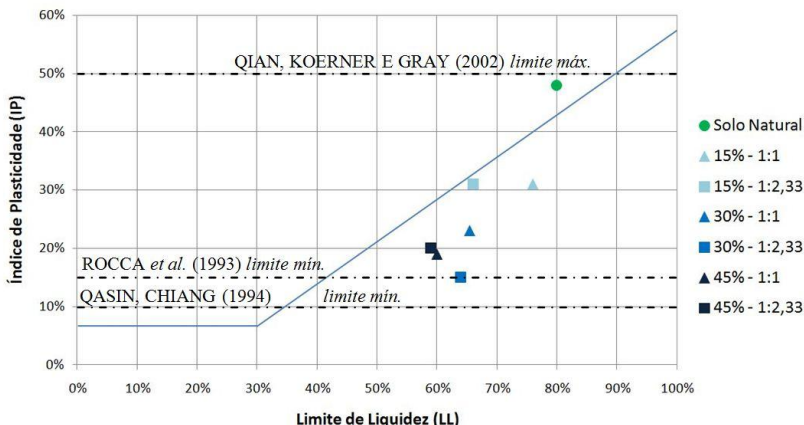
Com relação aos critérios de Qasim e Chiang (1994) para coberturas de aterros – passante na peneira 0,076 mm (n°200) > 40% - nenhuma amostra se enquadrou. Contudo, segundo critérios de Rocca *et al.* (1993) – passante na peneira n°200 > 30% - todas as misturas se enquadram, com exceção da 30% 1:2,33.

4.3.2 Índices de Consistência

Os índices de consistência ou limites Atterberg são apresentados graficamente na Carta de Plasticidade (Figura 34). Da mesma maneira que o ensaio de granulometria, estes resultados evidenciam o aumento da fração de areia ao se incorporar lodo caleado no solo, pois solos mais granulares são menos plásticos. Além disso, a matéria orgânica presente em um solo - em nosso caso o lodo - eleva seu LP sem elevar seu LL, reduzindo assim seu IP (PINTO, 2006). A cal presente nas misturas, da mesma forma que a matéria orgânica, favoreceu para reduzir ainda mais

o IP das misturas, pois as amostras de 30% e 45% ficaram com IP bem abaixo da amostra de 15%. Guimarães (2002) relata este mesmo efeito ao se estabilizar solos argilosos com cal e Kim, Cho e Yim (2005) também notaram significativo decaimento do IP do lodo de esgoto (de 49 para 9) ao se adicionar 10% de cal virgem.

Figura 34. Carta de Plasticidade.



O solo e praticamente todas as misturas atenderam aos requisitos para materiais de cobertura de aterros, com relação aos índices de consistência segundo os critérios de Qasim e Chiang (1994) e Rocca *et al.* (1993). Os primeiros estabelecem que LL deva ser maior que 25% e IP maior que 10%; os últimos que LL seja maior que 30% e IP maior que 15%. A amostra 30% 1:2,33 fica, no entanto, exatamente no limite de 15% para o IP.

Para o limite máximo de plasticidade recomendado por Qian, Koerner, Gray (2002) em coberturas ($IP < 50$) para se evitar muita expansão e contração, as quais acarretariam em fissuras e conseqüentemente aumento da permeabilidade. Este requisito foi atendido por todos os traços. O solo, porém, por ter muita argila, ficou com valor muito próximo do limiar ($IP = 48$).

De forma geral, observou-se que traços com maiores teores de cal (45% de cal) resultaram em amostras com menores LL e menores IP (Figura 34), ou seja, menos compressíveis. Mesmo efeito acontece ao se adicionar cal ao solo (GUIMARÃES, 2002).

O IP também pode ser classificado qualitativamente conforme a classificação proposta por Burmister (1949 *apud* DAS , 2007) (Tabela 33). O solo natural e as misturas são classificadas da seguinte maneira:

Tabela 33. Classificação qualitativa do índice de plasticidade.

SOLO	15%		30%		45%	
	1:1	1 : 2,33	1:1	1 : 2,33	1:1	1 : 2,33
MA	A	A	A	M	M	M-A

M – Plasticidade média

A – Plasticidade Alta

MA – Plasticidade muito alta

M-A – Plasticidade entre média e alta

4.3.3 Classificação dos solos

Conforme a classificação do Sistema Unificado (SUCS), o solo natural é considerado argila de alta compressibilidade (CH – *clay of high plasticity*) e todas as misturas são areias siltosas (SM – *sandy silt*). Apenas a mistura 15% - 1:2,33, situada muito próxima do limite da linha A (linha inclinada da Figura 34), foi considerada uma areia que contém grandes quantidades de silte e de argila ao mesmo tempo (SC-SM). Pelo sistema rodoviário de classificação, conhecido como HRB (*Highway Research Board*), todas as misturas na proporção 1:2,33 foram enquadradas no grupo A 2-7 – areias com presença de finos. As misturas na proporção 1:1 foram consideradas solos com granulação mais fina (com mais de 35% de passante na peneira n° 200), com exceção da mistura 15% - 1:1, classificada no grupo A 2-7. De forma resumida a classificação do solo e dos traços são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34. Classificação do solo natural e das misturas.

Classificação	SOLO	15%		30%		45%	
		1:1	1 : 2,33	1:1	1 : 2,33	1:1	1 : 2,33
SUCS	CH	SM	SC-SM	SM	SM	SM	SM
HRB	A 7-6	A 2-7	A 2-7	A 7-5	A 2-7	A 7-5	A 2-7

Rocca *et al.* (1993) consideram que solos argilosos destinados para cobertura devam ser, segundo o sistema de classificação unificada, argilas de baixa compressibilidade (CL - *Low Compressible Clay*), argilas de alta compressibilidade (CH), areias argilosas (SC – *Sandy Clay*) ou solos orgânicos de alta compressibilidade (OH – *organic soil*,

high compressibility). Segundo este critério, apenas o solo natural se enquadrrou.

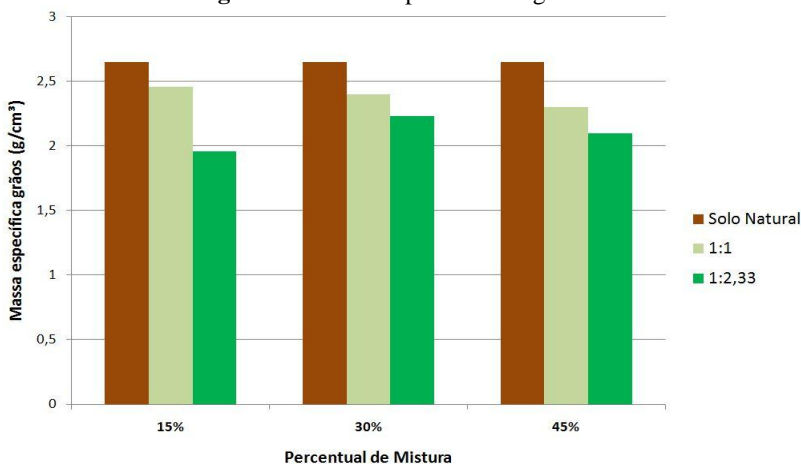
4.3.4 Massa específica dos grãos

A variação da massa específica dos grãos pode ser claramente visualizada na Figura 35. A adição de lodo caaleado ao solo natural resultou na diminuição da massa específica dos grãos em todos os casos. Isso se deve ao incremento da fração orgânica do lodo nas misturas (EKWUE, 1990; CAPUTO, 1988; PINTO, 2006). As misturas com maiores teores de lodo – os traços 1:2,33 – foram as que tiveram menor massa específica. O mesmo efeito de diminuição da massa específica ao se adicionar lodo de esgoto no solo foi observado na literatura (AMOOZEGAR, BARLAZ E RUBIN, 1995; PRIM, 2011).

A massa específica dos grãos de solo natural foi de $2,65 \text{ g/cm}^3$ e situa-se dentro da faixa de $2,6$ a $2,7 \text{ g/cm}^3$ para solos inorgânicos (LANYON, 2003) e dentro da faixa de $2,65$ a $2,85 \text{ g/cm}^3$ para a maioria dos solos (PINTO, 2006; CAPUTO, 1988).

A massa específica das partículas para os traços de lodo com solo variaram desde $1,96$ (15%-1:2,33) até $2,46 \text{ g/cm}^3$ (15%-1:1) e ficaram um pouco abaixo, mas próximas das encontradas em experimentos semelhantes, entre $2,47 \text{ g/cm}^3$ (PRIM; 2011) até $2,54 \text{ g/cm}^3$ (AMOOZEGAR, BARLAZ e RUBIN, 1995).

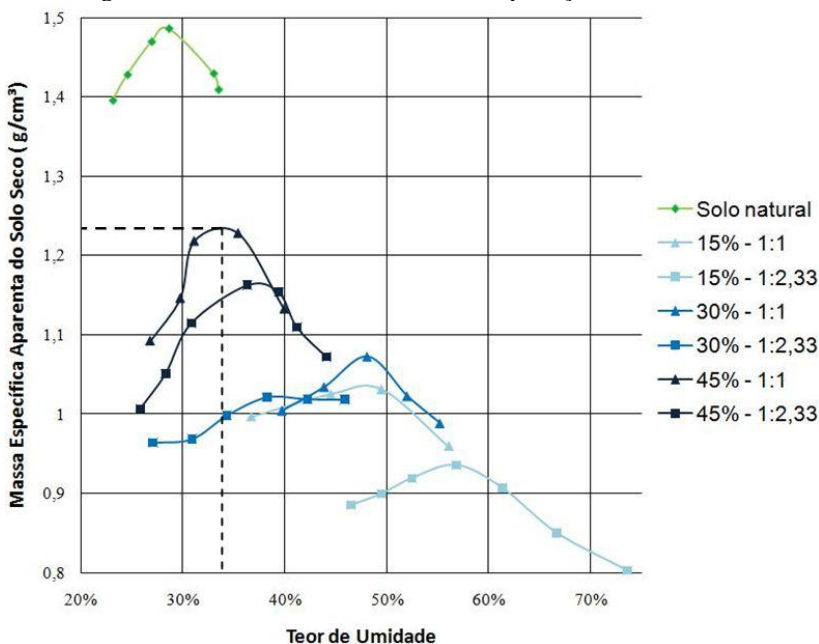
Figura 35. Massa específica dos grãos.



4.3.5 Compactação dos Solos

Nos ensaios de compactação, a influência da fração orgânica do lodo nos traços também foi percebida. De modo geral, quanto mais matéria orgânica tinha o traço, menor era sua a massa específica seca máxima (γ_s , máx) e maior era seu teor de umidade ótima (Hot), conforme relatado pela literatura (BRAIDA, 2004; EKWUE, 1990; PINTO, 2006; CAPUTO, 1988; DAS, 2007; ZHANG, 1994). Assim, os traços com amostras de 15% de cal, ou seja, com maior quantidade de lodo (matéria orgânica) proporcional, atingiram as menores densidades secas e maiores umidades ótimas. Mesmo efeito foi observado por Prim (2011) ao se adicionar 5%, 10% e 15% de cal ao lodo. Na Figura 36 essa tendência pode ser observada claramente e a reta tracejada exemplifica o Hot e o γ_s , máx do traço 45% - 1:1. A amostra que um pouco destoia a esta regra é apenas o traço 30% - 1:2,33, com relação ao traço 30% - 1:1.

Figura 36. Resultados dos ensaios de compactação das amostras.

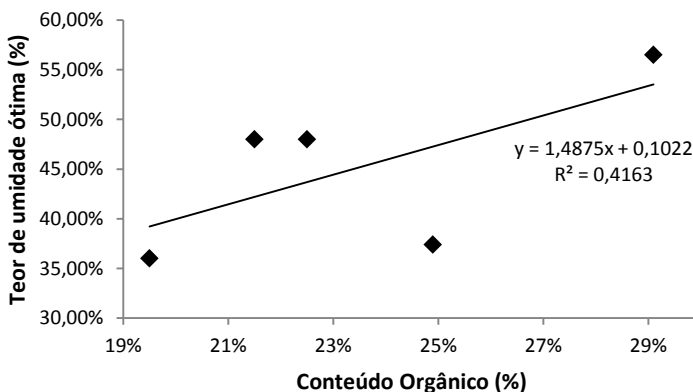


Estes resultados demonstram a capacidade da matéria orgânica em absorver água e deixar o solo menos denso. Franklin, Orozco e

Semrau (1973 *apud* DAS, 2007) observaram este mesmo efeito e verificaram que quando o conteúdo orgânico excede de 8% a 10 %, o γ_s , máx do solo decresce de modo rápido e H_{ot} aumenta.

Os resultados de Lancaster *et al.* (1996 *apud* DAS, 2007), no entanto, para misturas de solo arenoso fino com lodo de esgoto, apresentaram pouca variação da umidade ótima com o aumento do conteúdo orgânico dos traços, diferentemente da tendência verificada na presente pesquisa (Figura 37). Contudo, o mesmo autor ao misturar solo com outros materiais orgânicos (casca de arroz e casca de sequóia), obteve resultados mais semelhantes ao deste trabalho.

Figura 37. Variação da umidade ótima com o conteúdo orgânico.



Ao longo dos ensaios observou-se que a absorção de água dos traços solo:lodo foi muito mais lenta que a amostra de solo natural. Comportamento similar foi observado por Simmons (2003). Por este motivo adotou-se o procedimento de manter as amostras em câmara úmida por 48h antes dos ensaios de compactação.

O'Kelly (2004) afirma não ser recomendável a secagem do lodo até umidades significativamente mais baixas que as umidades ótimas, pois em seu processo de reidratação ocorre grande inchamento no material. No caso desta pesquisa, o fato de lodo ter sido seco na estufa agrícola até o teor de ST próximo de 90%, foi o que provavelmente acarretou na dificuldade de sua reidratação.

Com relação à densidade máxima das misturas, os traços com lodo de 30% e de 15% estão com valores próximos do recomendado para um solo com boa densidade para o estabelecimento de vegetação ($1,0 \text{ g.cm}^{-3}$), segundo Dias (1998) (Figura 36). Por outro lado, Neto

(1995 apud PRIM, 2011) coloca que raízes de plantas crescem bem em substratos com densidades de 1,1 a 1,5 g.cm⁻³, moderadamente bem em solos com massa específica de até 1,7 g.cm⁻³ e pobremente ou não crescem em densidades mais altas. Considerando este critério, os dois traços de 45% e o solo estariam dentro da faixa ótima (1,1 a 1,5 g.cm⁻³) e o traço 30%-1:1 estaria muito próximo também, com 1,07 g.cm⁻³.

4.3.6 Permeabilidade

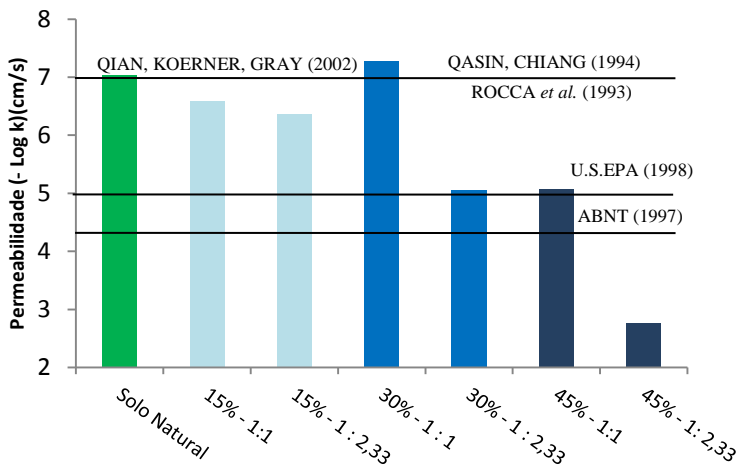
A variação da permeabilidade do solo natural e das misturas é apresentada na Tabela 35 e em escala logarítmica inversa (-Log) na Figura 38, para melhor visualização e comparação entre as mesmas. Neste caso, quanto menor o valor no eixo das ordenadas, mais permeável é a amostra.

Tabela 35. Permeabilidade das amostras estudadas.

SOLO	15%		30%		45%	
	1:1	1 : 2,33	1:1	1 : 2,33	1:1	1 : 2,33
9,3E-08	2,5E-07	4,4E-07	5,2E-08	8,7E-06	8,6E-06	1,7E-03

Obs: unidades em cm/s.

É possível observar uma tendência de aumento da permeabilidade na medida em que o teor de cal no traço fica maior. Desse modo, os traços de 45% foram os mais permeáveis. Esse fenômeno ocorre devido ao efeito de aglomeração e floculação por troca iônica da cal, processado entre finas partículas reativas do solo e da cal que tornam o material mais grosseiro e mais permeável (GUIMARÃES, 2002). Amoozegar, Barlaz e Rubin (1995), do mesmo modo, identificaram crescimento da permeabilidade ao se aumentar a quantidade de cal de 22% para 30% em diferentes traços de solo:lodo. Os resultados destes autores, porém ficaram maiores que o desta pesquisa e variaram entre $6,4 \times 10^{-5}$ cm/s (para o traço solo:lodo 1:0,11) e $2,9 \times 10^{-4}$ cm/s (traço 1:3).

Figura 38. Permeabilidade das amostras em escala logarítmica inversa.

Comparando-se os resultados obtidos com os padrões estabelecidos pela literatura para coberturas de aterros, ilustrados pelas linhas da Figura 38, percebe-se que todas as amostras, com exceção da 45% - 1:2,33, atenderam aos critérios de U.S.EPA (1998) – $k < 10^{-5}$ cm/s – e da ABNT (1997) – $k < 5 \times 10^{-5}$ cm/s. Para os padrões de Rocca *et al.* (1993), Qian, Koerner, Gray (2002) e Qasin e Chiang (1994) – $k < 10^{-7}$ cm/s –, apenas o solo natural e a amostras 30% - 1:1 atenderam.

4.3.7 Resistência ao cisalhamento

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento direto são apresentados na

Tabela 36.

Tabela 36. Parâmetros de resistência dos traços e do solo.

Parâmetro	SOLO	15%		30%		45%	
		1:1	1:2,33	1:1	1:2,33	1:1	1:2,33
Coesão (kPa)	2,94	13,8	26,5	15,6	30,6	17	25,8
Ângulo de Atrito (°)	35,45	30,2	32,1	31	27,7	38,6	38,9

Os resultados indicam grande aumento da coesão aparente em todos os traços em comparação ao solo natural: de 4,7 vezes mais para o traço 15% - 1:1 até 10,4 vezes para o traço 30% - 1:2,33. Para a elevação deste fator, tanto a matéria orgânica, quanto a cal pode ter influenciado. A presença de matéria orgânica no solo pode resultar em aumento de sua coesão verdadeira (forças eletroquímicas entre as partículas) e coesão aparente (pressão capilar), pois tende a agregar as partículas em função de sua natureza coloidal, a qual lhe confere elevado número de cargas superficiais e área superficial específica (SANTOS *et al.*, 2008; MEURER *et al.*, 2000 *apud* BRAIDA, 2004). Por outro lado, a ação cimentante da cal (CaO) e provavelmente de sua associação com os minerais argílicos, principalmente as sílicas (SiO₄) e as Aluminas (AlO₆), podem também ter contribuído para a coesão. As reações pozolânicas, que resultam em compostos hidratados, aglutinantes e cimentantes, são baseadas principalmente na interação entre estes três compostos e a água (TAYLOR, 1997). Além disso, outras reações que favorecem o aumento da resistência provocada pela cal são as de carbonatação e de troca iônica (GUIMARÃES, 2002).

O ângulo de atrito, contudo, diminuiu um pouco nos traços com amostras de 15% e 30%, mas aumentou nas amostras com 45%. O efeito da redução do ângulo de atrito foi em função da fração orgânica presente nos traços, a qual pode favorecer no descimento da resistência dos solos (DAS, 2007; BRAIDA, 2004; ZHANG, 1994; O'KELLY, 2005). Certamente essa redução não pode ser atribuída à cal, pois este material é amplamente utilizado na engenharia civil para estabilizar solos pelo melhoramento de suas características geotécnicas, incluído a resistência ao cisalhamento (GUIMARÃES, 2002). Com relação a matéria orgânica, apesar de algumas pesquisas apontarem que ela pode aumentar a resistência do solo (EKWUE, 1990; PUPPALA *et al.*, 2007; DAVIES, 1985 *apud* BRAIDA, 2004), outros autores apontam o oposto (ZHANG, 1994; DAS, 2007; O'KELLY, 2005; BRAIDA, 2004). Esta discrepância pode ser em função da origem do material orgânico adicionado, da textura do solo, estado de decomposição, teor de água no solo, dentre outros fatores (EKWUE, 1990; BRAIDA, 2004).

Nos resultados da presente pesquisa, observou-se também que quando se acrescentou o percentual de lodo de 1:1 para 1:2,33, a coesão praticamente dobrou para as amostras de 15% e de 30% e aumentou de 17 kPa para 25,8 kPa para a amostra de 45%. O ângulo de atrito, por outro lado, não teve um acréscimo proporcional tão grande quanto a coesão dos traços 1:1 para os traços 1:2,33. Foi apenas de 30,2° para 32,1° nas amostras de 15% e de 38,6 para 38,9 nas de 45%. Nota-se,

portanto, o efeito da cal para o aumento do ângulo de atrito, principalmente pelos elevados valores da amostra de 45% em relação ao solo natural. A amostra de 30%, no entanto, contrariando o padrão, reduziu o ângulo de atrito de 31° para 27,7°.

4.3.8 Análise de MEV / EDS

Por meio de análise de MEV e EDS foi possível analisar as principais alterações na estrutura morfológica e nos elementos químicos dos grãos de lodo antes e após a caleação, bem como após sua mistura com solo.

Através da observação do lodo *in natura* por MEV (Figura 39 a e b) nota-se grãos irregulares, o que aparenta ser uma agregação de pequenas partículas na maioria dos casos. Os grãos tem várias composições apresentadas pela análise de EDS (Figura 40a), dentre os quais se destacam os elementos orgânicos em maiores quantidades como o C (46,1%), O (21%), N (5,2%) e P (0,6%) e alguns minerais como Si(4,4%), Fe (14,1%), Al (3,8%), Ca (2,7%), K (1,3%), Mg (0,8%). Na Figura 39c e na Figura 39d há imagens do lodo caleado (30% do peso seco) e é possível identificar alguns cristais alongados e estruturas em forma de agulhas (aciculares) que se assemelham à morfologia hidróxido de cálcio ou Ca(OH)_2 e de Aluminatos de Cálcio (TAYLOR, 1997). Não foi possível realizar análise raio-X para identificar os compostos presentes, contudo, os elementos distinguidos na análise de EDS (Figura 40b), como Ca (17%), oriundo da cal, e Si (2,8%), Al (1,17%), O (32,4%), sugerem ser possível a presença daqueles.

As imagens do traço 1:1 de solo e lodo 30% (Figura 39e e Figura 39f) apresentam placas lamelares característica de argilominerais e pequenas armações policristalinas. Estas últimas são encontradas em solos compactados com cal (GUIMARÃES, 2002). Nestas imagens, maiores evidências de compostos hidratados, oriundos de reações pozolânicas, como estruturas fibrosas, aciculares ou em formato de colméias não foram identificadas. Contudo, os elementos encontrados nos diagramas EDS (Figura 40c), como o O (33,9%), o Ca (12,4%) e principalmente o Si (12,5%) e o Al (5,6%) – em maiores quantidades por causa do solo – favorecem tais reações. Análises de raio-X, no entanto, poderiam confirmar ou não a presença de tais compostos.

Figura 39. Imagens de MEV do lodo *in natura* (a)(b), do lodo calcado a 30% (c)(d) e do traço 1:1 de solo e lodo 30% (e)(f).

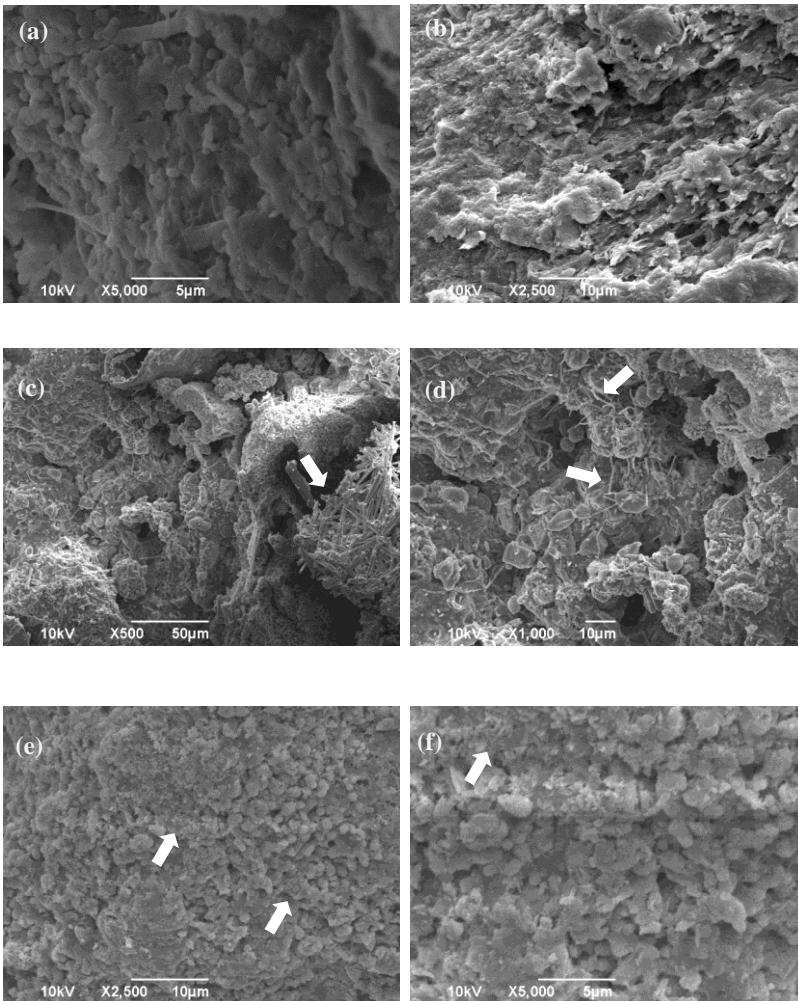
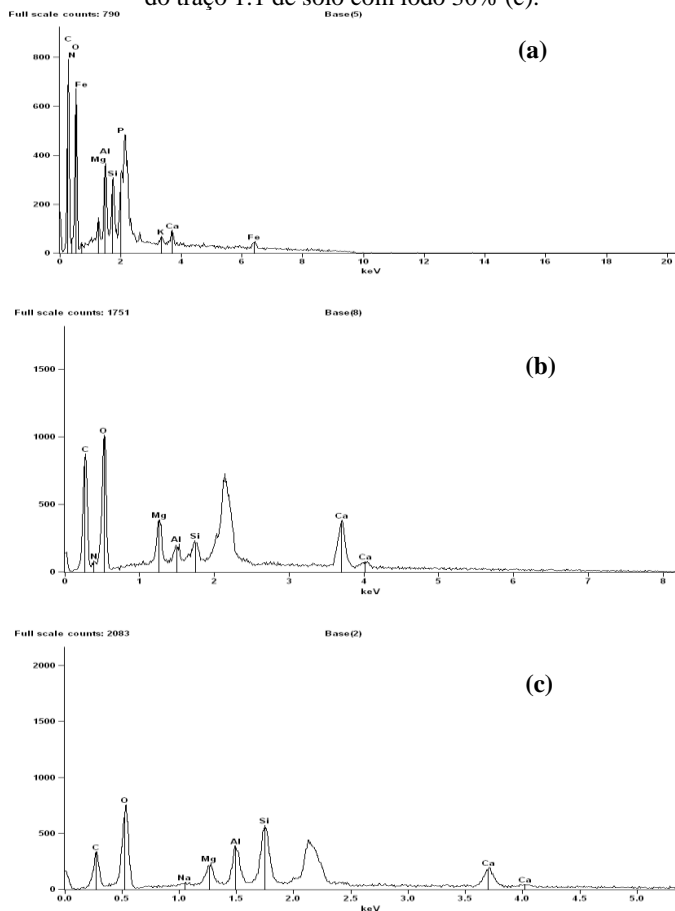


Figura 40. Diagramas EDS do lodo *in natura* (a), do lodo calcado a 30% (b) e do traço 1:1 de solo com lodo 30% (c).



4.3.9 Conclusão da etapa de avaliação geotécnica

Para o critério de permeabilidade, todos os traços de solo e lodo, com exceção do 45%-1:2,33, se mostraram adequados para sua aplicação como camada impermeável nas coberturas de aterros, segundo os padrões da norma técnica brasileira (ABNT, 1997) e estadunidense (U.S.EPA, 1993). Entretanto, para o requisito mais rigoroso da literatura (QIAN, KOERNER, GRAY, 2002; ROCCA *et al.*, 1993; QASIN E CHIANG, 1994) de $k < 10^{-7}$ cm/s, praticamente nenhuma amostra

atendeu (30%-1:1 foi a exceção neste caso), pois o acréscimo de lodo ao solo tende a aumentar a permeabilidade da mistura. Um modo de minimizar este problema em campo seria a aplicação de maior energia na compactação. Porém, por precaução, não se recomenda aplicação destes traços como *camada impermeável*, até por que pelo critério da peneira 0,076 (nº200) definido por Qasim e Chiang (1994) e do tipo de solo (ROCCA *et al.*, 1993), nenhuma amostra se enquadrou aos padrões da literatura.

Por outro lado, a adição de lodo ao solo natural se mostrou benéfica, pois o solo ficou mais bem graduado, diminuiu o IP e o LL, e assim menos propenso a contrações e expansões. Além disso, quanto aos índices de consistência, todos os traços satisfizeram aos requisitos da literatura.

A adição de lodo resultou em diminuição da densidade dos traços e isso é interessante para minimizar a carga sobre a massa de resíduos e efeitos de recalque e adensamento.

A coesão dos traços foi aumentada provavelmente em função tanto da adição de cal, quanto de matéria orgânica. Já o ângulo de atrito foi afetado negativamente nas amostras com maior conteúdo orgânico, mas a cal favoreceu em seu aumento. Somando-se a isso, o fato de o lodo com cal a princípio apresentar bom potencial agrônômico, por conter nutrientes (N, P, Ca, Mg, Fe, Cu e Zn) e matéria orgânica, conforme resultados da etapa II (item 4.2), favorece sua aplicação em coberturas, pois facilitaria o desenvolvimento de plantas que forneceriam proteção contra erosão hídrica e eólica. Da mesma forma, o aumento da capacidade em absorver água pela adição de matéria orgânica, notados nos testes de compactação, é benéfico ao desenvolvimento de plantas nas camadas de cobertura. Assim, considerando-se os aspectos geotécnicos, é recomendável a aplicação de traços de solo:lodo em *camadas superficiais* (vegetativas) e em *camadas de proteção* de sistemas de coberturas. Não se recomenda, porém, a aplicação dos traços em *camadas drenantes* ou *camadas de fundação* (coletora de gases), pois as amostras apresentam elevada coesão e permeabilidade menor que 10^{-2} cm/s, o que dificultaria o escoamento de fluidos.

A partir dos resultados desta etapa, os traços com amostra de 15% seriam a princípio as mais recomendadas para coberturas, pois atendem a maioria dos requisitos geotécnicos, possuem menor percentual de cal e maior percentual de lodo. Contudo, nos testes que envolveram reumidificação (Limites de Atterberg, Compactação, Cisalhamento Direto, Permeabilidade e Massa específica dos grãos) as amostras com

15% foram as que apresentaram maior emissão de maus odores e atratividade de vetores (moscas), mesmo tendo atendido padrão *Classe B* ao final da secagem em estufa. Somado a isso, o fato de a amostra de 15% não ter atendido ao critério de higienização (pH acima de 12 por 2 horas) e de redução da atratividade de vetores (pH acima de 11,5 por 22 horas após higienização) em um dos ciclos da Etapa 2, além de estar com teor de SV/ST próximo do limite de 40% fez com que sua aplicação em coberturas não fosse a princípio recomendada. Seguindo tais critérios, o traço 30%-1:1 é o mais recomendável, pois atende a aos requisitos geotécnicos e ambientais citados pela literatura. O traço de 30%-1:2,33 não é recomendável em *camadas finais* por que foi o que apresentou o menor ângulo de atrito interno entre todos os traços e o solo e por ter plasticidade igual à mínima recomendada por Rocca *et al.* (1993). Tal traço, contudo, poderia ser utilizado em *coberturas diárias* e *intermediárias*, pois apesar de estes tipos de camadas não terem restrições geotécnicas, o traço 30%-1:2,33 possui baixa permeabilidade ($8,7 \times 10^{-6}$ cm/s). O traço com 45%-1:1 também poderia ser aplicado tanto em camadas finais, caso maior resistência fosse demandada, quanto intermediárias. Porém, em outros casos seria desperdício de cal. Já o traço 45%-1:2,33 não é recomendável em nenhum caso por que apesar elevada resistência (coesão 25,8 kpa, ângulo de atrito interno $38,9^\circ$), sua permeabilidade é muito alta ($1,7 \times 10^{-3}$ cm/s).

Salienta-se que as amostras de 30% e de 45% também apresentaram emissão de odores, mas em menores proporções que a de 15%, pelo fato desta conter maior percentual de lodo. Neste caso, análises olfatométricas seriam recomendadas para uma avaliação mais precisa, mas fogem do escopo de trabalho proposto nesta pesquisa. Por esse motivo o critério de pH e de SV/ST foram os considerados.

É importante ressaltar que aspectos agronômicos não foram aprofundados, pois este trabalho focou os parâmetros geotécnicos relacionados à aplicação do lodo em coberturas. Nesse sentido, recomendam-se estudos posteriores que avaliem essas propriedades e as culturas mais apropriadas para este tipo de solo.

4.4 PILOTO EXPERIMENTAL

Com base nos resultados das etapas anteriores o lodo escolhido para verificar sua influência no lixiviado em piloto experimental foi o caleado com 30% de cal. Assim, conforme descrito na metodologia, o arranjo das células ficou sendo da seguinte maneira:

- Célula 1 (C1) – camada de solo natural argiloso;
- Célula 2 (C2) – traço 1:1 de solo com lodo 30%;
- Célula 3 (C3) – camada composta apenas de lodo 30%.

4.4.1 pH e Alcalinidade

A variável pH foi monitorada semanalmente durante 154 dias e os valores das 3 células de um modo geral não apresentam muitas variações neste período. Esta estabilidade é pelo fato de os RSU terem sido depositados nas células há aproximadamente 5 anos - tempo suficiente para a maior parte da matéria orgânica ter sido degradada e as células terem passado pelas fases de decomposição I (aeróbia), II (hidrólise, acidogênese), III (acetogênese) e estar provavelmente entre as fases IV (metanogênese) e V (maturação), citada por Pohland e Harper (1985 *apud* Gomes *et al.* 2006).

Conforme pode-se visualizar na Figura 41 e na Figura 42, ao longo de todo o monitoramento o pH da célula 1 (C1) está dentro da faixa esperada para aterros que possuem de 5 a 10 anos (pH entre 6 e 7) conforme El-Fadel *et al.* (2002) com média¹⁸ de $6,59 \pm 0,03$ e desvio padrão de 0,15. Já o pH tanto da Célula 2 (C2) quanto para a Célula 3 (C3) – $7,59 \pm 0,06$ e $6,96 \pm 0,04$ respectivamente – estão sempre acima do da célula referência (C1), provavelmente em função da influência da cal presente nas coberturas. Na Figura 41 também são apresentadas linhas tendência e respectivos R², obtidos por meio de regressão linear.

Rhew e Barlaz (1995) em experimento similar ao do presente estudo, mas com RSU frescos e reatores de 4 Litros (3,2 L de resíduos urbanos e 0,8 L de cobertura), tiveram resultados parecidos com os deste trabalho. Os autores verificaram que as células com camadas de lodo tratado com cal (LTC) elevaram o pH do lixiviado de 5,5 para aproximadamente 7,5. Neste caso a cal forneceu alcalinidade demandada nas reações de metanogênese e ajudou a acelerar a produção de metano e a decomposição dos resíduos em comparação com os reatores com camadas de solo apenas. Prim (2011), porém, não observou elevação do pH de camada mais alcalina, em experimento com

¹⁸ O conceito de média geral aplicado para um conjunto de dados de temporais geralmente não é adequado. Porém, neste trabalho utilizou-se médias gerais para se ter uma idéia genérica do comportamento de cada célula e informações complementares (erro padrão, Box-plot, regressão linear e em alguns casos desvios padrões, mínimos, máximos e intervalos de confiança) foram apresentadas para se ter uma análise mais detalhada dos dados.

Figura 41. Variação do pH ao longo do tempo nas três células monitoradas.

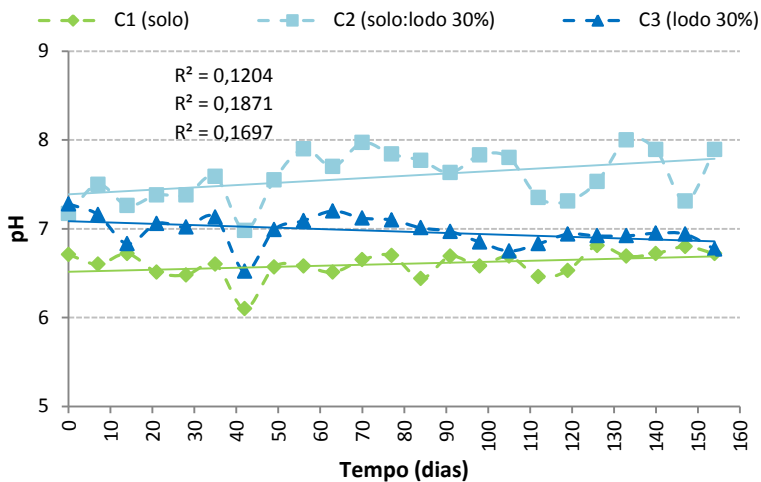
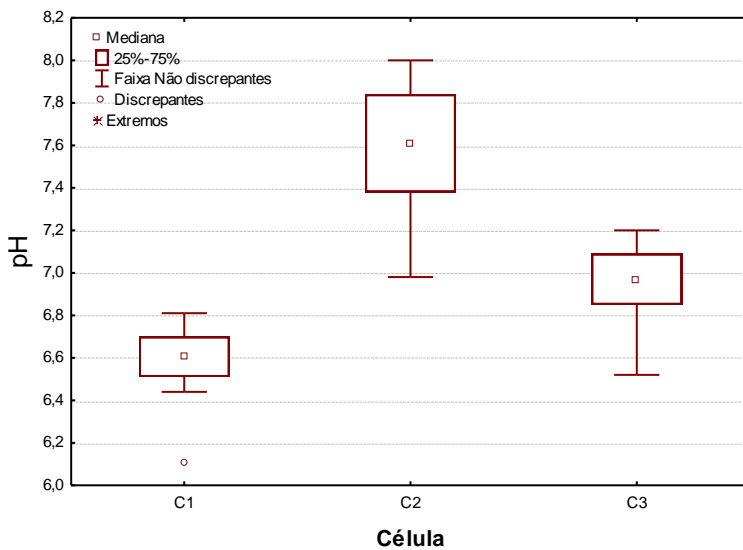


Figura 42. Box-plot do pH nas células experimentais.

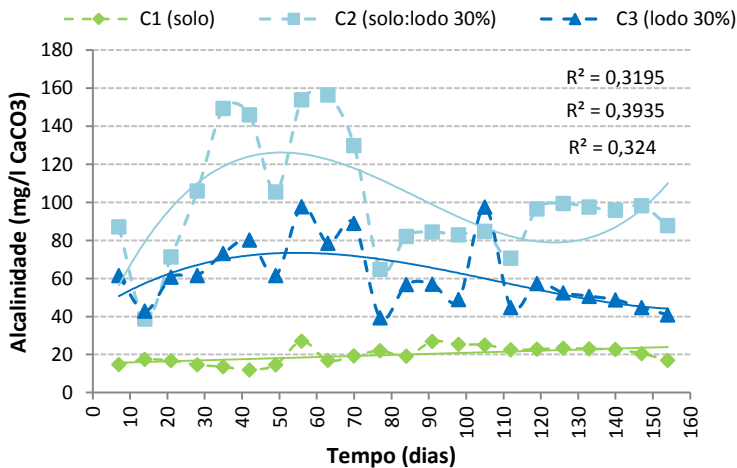


reatores comparando-se uma cobertura de solo argiloso com outra composta de solo (50% da cobertura), lodo de ETE e lodo de ETA, ambos calcados com 15% de cal com relação ao peso seco.

No entanto, diferentemente do que se esperava, o pH da célula de cobertura com mais cal proporcionalmente (C3) manteve-se abaixo da célula com cobertura de solo e lodo (C2) praticamente todo o monitoramento, com exceção do dia 0. Esse efeito ocorreu provavelmente pelo fato de a célula C3 ser muito mais permeável que C2, pois aquela tem granulometria predominantemente de areia, conforme verificado nos ensaios geotécnicos. Desse modo, a água permeia mais rápido pela camada e fica menos tempo em contato com o lodo tratado com cal de C3, resultando em pouca elevação do pH.

A cal, por conter altos teores de magnésio (Mg) e de cálcio (Ca) na forma de óxidos, tem o potencial de aumentar tanto o pH quanto a alcalinidade quando em meio aquoso. Assim, era esperado que os resultados de alcalinidade apresentassem comportamento semelhante aos resultados de pH e, de fato, isso foi observado conforme pode-se verificar nas Figura 43 e na Figura 44. Na Figura 43 também são apresentadas linhas tendência e respectivos R^2 , obtidos por meio de regressão linear.

Figura 43. Variação da alcalinidade ao longo do tempo nas três células.

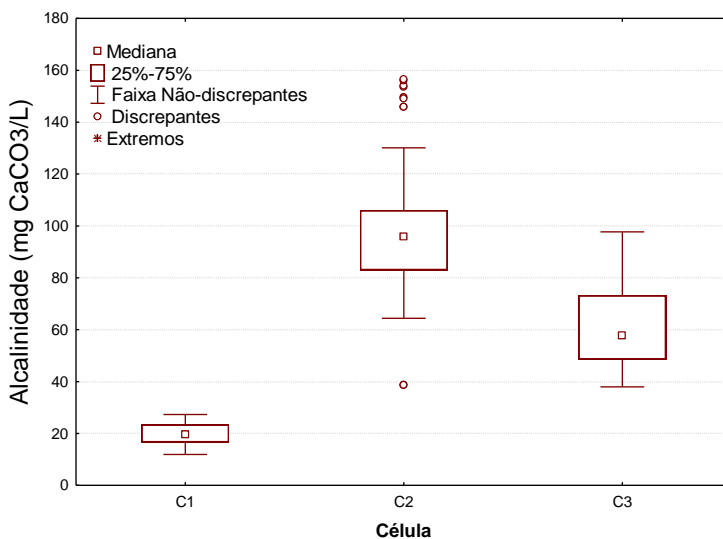


Por esse motivo, C2 (traço 1:1 de solo e lodo) foi a célula com os maiores valores medidos e C1 (solo natural) a célula com os menores.

Como na faixa de pH entre 4,4 e 8,3 há apenas alcalinidade devido a bicarbonatos (VON SPERLING, 2005), conclui-se que os principais elementos responsáveis pela elevação da alcalinidade de C3 e de C2 com relação a C1 (controle) são os bicarbonatos de cálcio e de magnésio.

Este resultado favorece a aplicação de lodo caledo em coberturas, pois as reações de metanogênese são realizadas em pH próximos da neutralidade e a alcalinidade fornecida pela cal atua como tampão neste processo.

Figura 44. Box-plot da alcalinidade nas células experimentais.

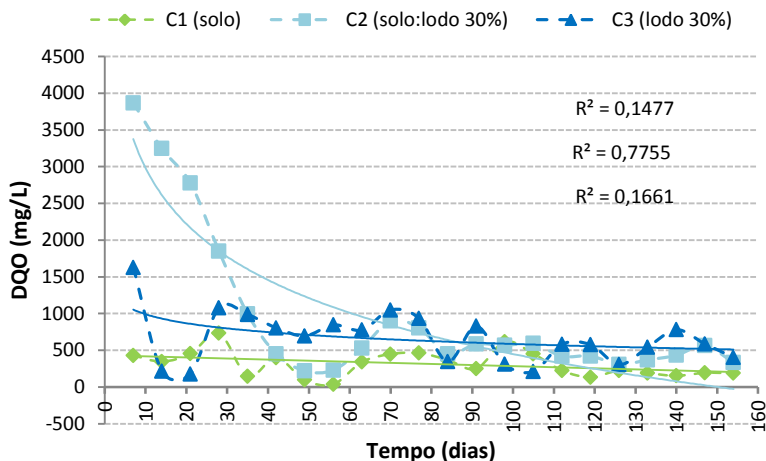


4.4.2 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

O comportamento da concentração de DQO dos três reatores ao longo do tempo é apresentado na Figura 45. De modo geral a DQO no lixiviado dos reatores que possuíam lodo na camada de cobertura (C2 e C3) foi maior que a célula de referência (C1) com solo de recobrimento. Esse comportamento sugere uma relação entre aumento da DQO com a presença de matéria orgânica oriunda do lodo. Na Figura 45 também são apresentadas linhas tendência e respectivos R^2 , obtidos por meio de regressão linear.

Também se destaca nos primeiros dias a alta DQO do lixiviado produzido pela Célula C2 (solo:lodo) em relação às outras células. Com o passar do tempo, no entanto, a DQO desta célula vai caindo e a partir do 35º dia tende a ficar abaixo dos valores da Célula C3 (lodo) e acima da Célula C1 (solo). Os trabalhos consultados envolvendo comparação de lixiviados de células com cobertura de apenas solo com outras de lodo com cal (RHEW E BARLAZ, 1995; PRIM, 2011) verificaram tendência semelhante a da presente pesquisa: aumento inicial da DQO nos primeiros dias nas células com lodo caleado, mas decaimento rápido após início fase metanogênica. No caso de Rhew e Barlaz (1995) os reatores com lodo caleado chegaram a ficar com DQO até cinco vezes

Figura 45. Variação DQO ao longo do tempo nas três células.



menor que a dos reatores com solo apenas (aproximadamente 4.000 mg/L no primeiro caso e acima de 20.000 mg/L no segundo) e se notou aceleração da degradação dos resíduos. Nestes estudos, porém, os resíduos no início do experimento eram frescos e passaram por todas as fases de degradação.

A média dos valores medidos de DQO das Células C1, C2 e C3 foram respectivamente 311 ± 28 mg/L, 930 ± 129 mg/L, 744 ± 58 mg/L. e todos ficaram abaixo dos valores de DQO para aterros entre 5 e 10 anos, que varia de 10.000 a 20.000 mg/L segundo El-Fadel *et al.* (2002). No entanto, tais valores situam-se dentro da faixa mais provável de DQO para aterros brasileiros – de 190 a 22.300 mg/L, citada por (Souto

e Povinelli, 2007) e da faixa de 20 a 35.000 mg/L na fase metanogênica, citada por Souto (2009).

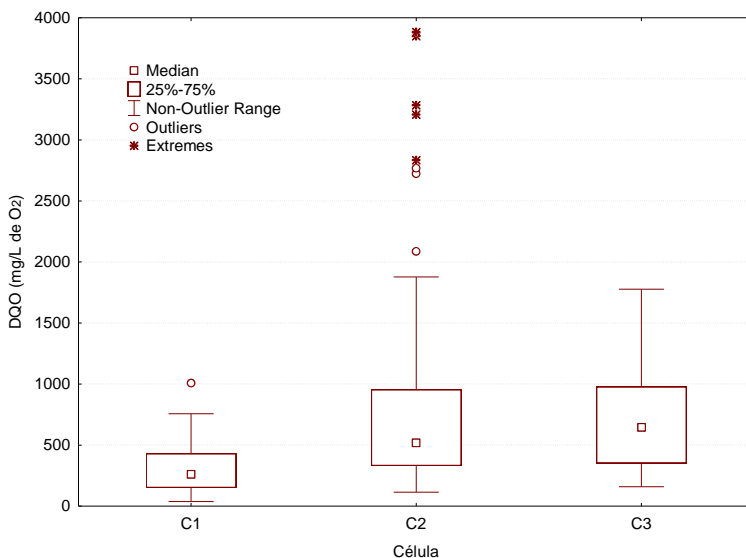
O teste de ANOVA comprovou que há diferença significativa ($p < 0,05$) entre as médias gerais das três células ($F=13,93$; $p=0,000003$). Contudo, o teste de Tukey (Tabela 37) comparando as médias par a par revelou não haver diferença significativa ($p > 0,05$) entre as células C2 e C3, conforme é possível visualizar no diagrama de caixas (box-plot) da Figura 47. Isso significa que independente de a camada ter 100% lodo (C3) ou 50% (C2), a influência na DQO do lixiviado é praticamente a mesma. Além disso, o tempo de contato da água percolada com as coberturas não foi determinante para variar a DQO do mesmo modo que foi para o pH e para a alcalinidade.

Tabela 37. Comparação de Médias par a par (Teste de Tukey)

Célula	C1	C2	C3
C1	-	0,000022	0,000983
C2	-	-	0,262965

Obs: Em cinza os resultados que apontaram diferenças significativas.

Figura 46. Box-plot da DQO nas células experimentais



4.4.3 DBO₅ e relação DBO₅/DQO

As células C1, C2 e C3 tiveram uma DBO₅ média respectivamente de 42 ± 5 mg/L, 54 ± 12 mg/L e 84 ± 12 mg/L. Isto indica uma relação entre o aumento da DBO₅ com o aumento da quantidade de lodo na cobertura, possivelmente associado com a matéria orgânica presente neste material. A Figura 47 e a Figura 49 ilustram este comportamento. Esses resultados não estão dentro da faixa de DBO₅ para aterros entre 5 e 10 anos segundo El-Fadel *et al.* (2002), a qual varia de 1.000 a 4.000 mg/L. Nem mesmo dentro da faixa de 100 a 200 mg/L para aterros com mais de 10 anos, conforme Qasin e Chiang (1994). Contudo, estão dentro da faixa de Souto e Povinelli (2007) e de Souto (2009) para aterros brasileiros, que varia respectivamente de < 20 a 8.600 mg/L (para 75% dos casos) e de 3 a 17.200 mg/L (fase metanogênica).

Na Figura 47 percebe-se grande oscilação da DBO₅, principalmente para a célula C3, claramente visualizada pela grande faixa de valores não discrepantes (Non-Outlier Range) na Figura 49. Essas variações têm provavelmente relação com o regime de chuvas, mas este comportamento nem sempre é linear, como se pode perceber comparando-se a Figura 47 e a Figura 48. Esta última apresenta as precipitações diárias no período monitorado. Na Figura 47 também são apresentadas linhas tendência e respectivos R², obtidos por meio de regressão linear.

Como a DBO₅ representa a fração biodegradável da matéria orgânica, ao longo do tempo, sua concentração tende a decair mais rapidamente que a DQO, pois ela é reduzida tanto por processos de lixiviação quanto pela degradação biológica (QASIN e CHIANG, 1994). Por esse motivo, o lixiviado de aterros mais jovens são mais biodegradáveis, ou seja, possuem maior biodegradabilidade. Essa característica pode ser mensurada pela relação DBO₅/DQO e quanto maior mais biodegradável. Segundo Hamada (1997) relações entre 0,4 e 0,6 indicam boa biodegradabilidade. Aterros antigos, no entanto apresentam baixa biodegradabilidade e valores situam-se entre 0,05 e 0,2 (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993). Comumente, os compostos remanescentes são recalcitrantes, ou seja, de difícil degradação biológica (SILVA, 2007).

Os valores médios da relação DBO₅/DQO das células C1, C2 e C3 foram respectivamente 0,16 \pm 0,03; 0,05 \pm 0,007 e 0,15 \pm 0,02 e são apresentados na Figura 50. Todos ficaram dentro da faixa esperada para aterros antigos ($< 0,2$) conforme era de se esperar.

Figura 47. Variação da DBO₅ ao longo do tempo nas três células

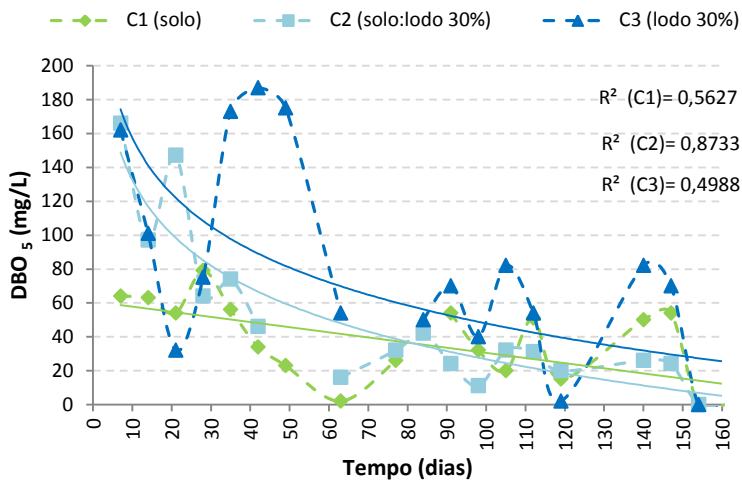


Figura 48. Precipitações diárias ao longo do tempo.

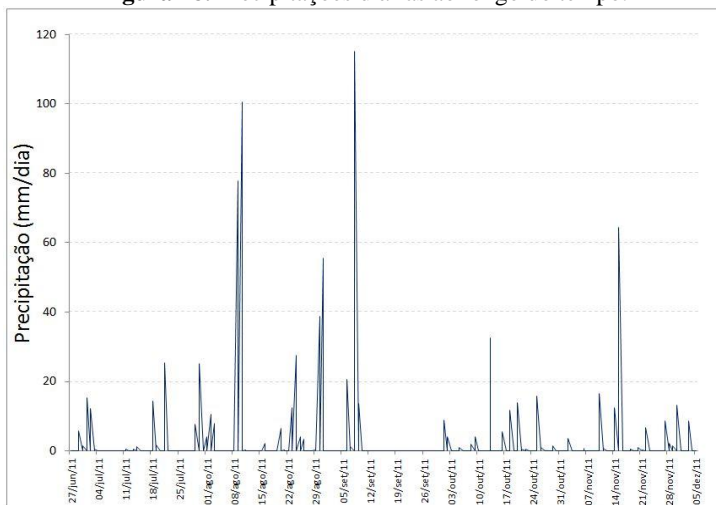


Figura 49. Box-plot da DBO₅ nas células experimentais.

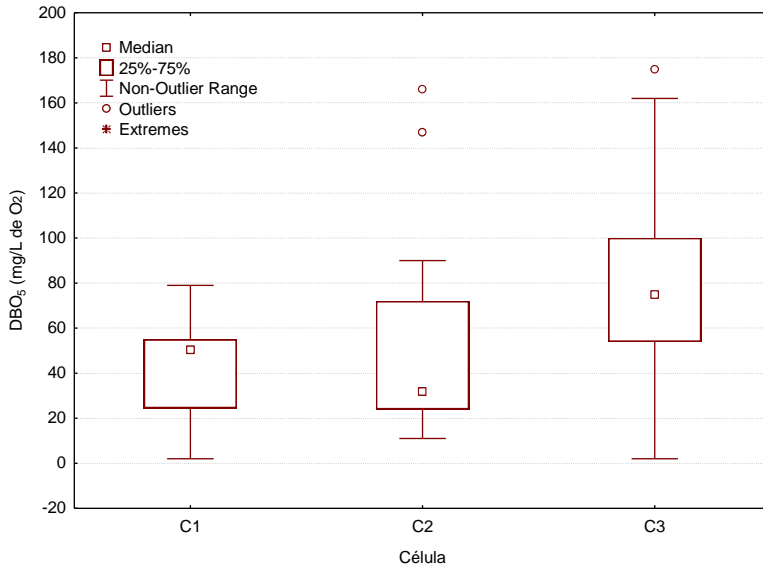
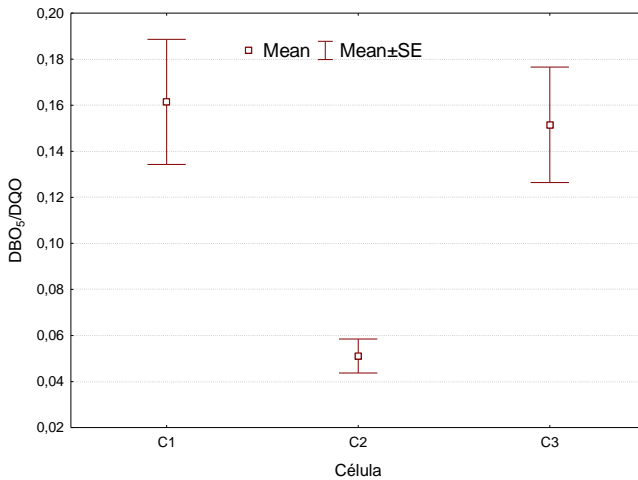


Figura 50. Média e erro padrão da relação DBO₅/DQO das células experimentais.



4.4.4 Amônia, Nitrito e Nitrato

As concentrações de nitrogênio amoniacal das células experimentais ficaram bem abaixo da faixa de 300 a 500 mg/L para aterros entre 5 e 10 anos, segundo El-Fadel *et al.* (2002). Contudo, as concentrações de nitrogênio amoniacal em lixiviados de aterros sanitários variam bastante sendo que em fase ácida podem estar entre 0,07 e 2.000 mg/L, e de 0,03 a 3.000 mg/L em fase metanogênica (SOUTO, 2009).

A variação da amônia no tempo sugere que a camada com lodo aumenta a concentração de nitrogênio amoniacal em até 28 vezes nas análises iniciais (7° dia) para o lixiviado de C2 e até 17 vezes para a célula C3. Enquanto o teor de amônia oriundo do lixiviado da célula C1 não apresenta muita variação ao longo do tempo (média de $2,3 \pm 0,2$ mg/L), nas células C2 ($11,4 \pm 2,36$ mg/L) e C3 ($31,6 \pm 3,1$ mg/L) observa-se maior oscilação (principalmente no início) conforme ilustra a Figura 51 e o diagrama de caixas da Figura 52. A célula C2, no entanto, reduz os níveis de amônia para valores próximos da Célula referência (C1), entre 0 e 10 mg/L, no 42° dia, muito antes de similar redução da Célula C3, ocorrida no 84° dia. Desses dias em diante os valores tenderam a se estabilizar e a sempre ficar abaixo da concentração de 20 mg/L de nitrogênio amoniacal, fixada pela Resolução do CONAMA n° 430 de maio de 2011 (BRASIL, 2011) como limite de lançamento de efluentes. Esse fenômeno pode estar ligado ao processo de volatilização da amônia por *stripping*, ocasionado pelos maiores valores de pH verificados no lixiviado da Célula C2, conforme discutido no item 4.4.1. Rhew e Barlaz (1995) verificaram mesmo fenômeno de decaimento da amônia em reatores com valores de pH na mesma faixa que a célula C2 – entre 7,5 e 8,0. Porém, estes não observaram diferença significativa ($p < 0,05$) de concentrações iniciais desta variável ao comparar o lixiviado de reatores com camada de lodo e cal e reatores com solo apenas.

É interessante observar nas células C2 e C3 o grande decaimento de amônia ($N-NH_3$) entre a primeira e a segunda medição (7° e 14° dia respectivamente da Figura 51), é acompanhado de grande aumento da concentração de nitritos ($N-NO_2$) e nitratos ($N-NO_3$) no mesmo período (Figura 53 e Figura 55). Isto pode estar relacionado com a oxidação de uma parte da amônia para Nitrito, pelas bactérias *Nitrossomonas*, e depois para nitrato, pelas *Nitrobacters* (SAWYER, McCARTY, 1978), devido a presença do oxigênio remanescente após a colocação da cobertura nas células experimentais.

Figura 51. Variação nitrogênio amoniacal no tempo das células experimentais. No detalhe, grande decaimento inicial de amônia nas células C1 e C2.

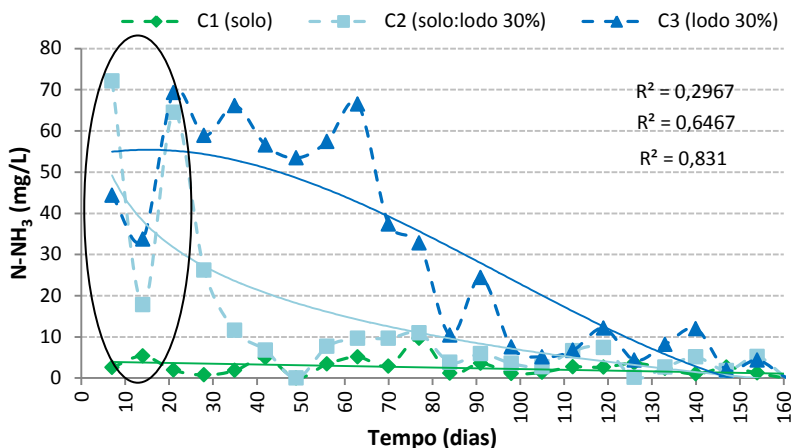
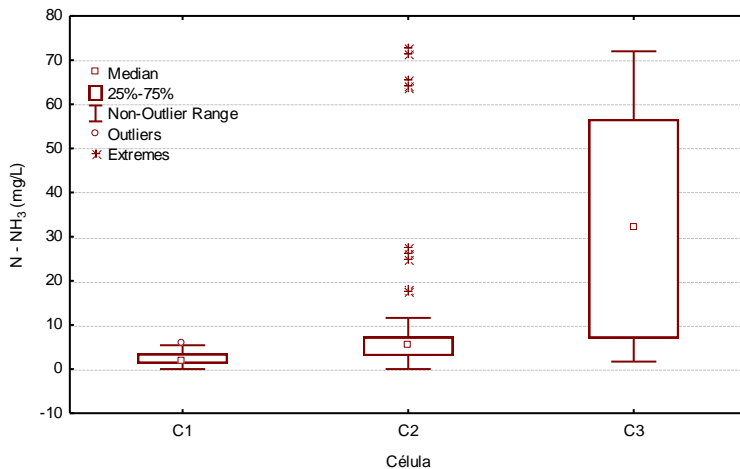


Figura 52. Box-plot de nitrogênio amoniacal nas células experimentais.



Com relação ao nitrogênio em sua forma mais oxidada - nitratos (N-NO_3), as concentrações médias da célula C1, C2 e C3 foram respectivamente 39 ± 3 mg/L ; 55 ± 6 mg/L e 42 ± 4 mg/L. Estes resultados estão dentro da faixa de valores de lixiviados de aterros brasileiros na fase metanogênica, relatados por Souto (2009), que varia de 0 a 270 mg/L sendo que 90% dos casos valores chegam até 100

mg/L. No entanto, estão fora da faixa descrita por Souto e Povinelli (2007) de 0 a 11 mg/L.

Na maior parte do tempo a concentração de nitrato medida no lixiviado das células com lodo (C2 e C3) foi maior que o da célula referência (C1), conforme verificado pelas médias já apresentadas. No 60º dia a concentração de C2 chegou a ficar maior que o dobro de C1, mas perto do 100º dia decaiu bastante e voltou a oscilar novamente (Figura 53). Diferentemente de Prim (2011) não se observou decaimento do nitrato ao longo do tempo para nenhum dos reatores (inclusive o referência), mas sim muita oscilação provavelmente relacionada com o regime de chuvas do período monitorado (vide Apêndice I). Esta grande variação é refletida nos grandes desvios padrões (DP) calculados para as Células C1 (DP=25,5), C2 (DP=42,7) e C3(32,8) e percebido no diagrama de caixas da Figura 54.

Para a variável nitrito (N-NO_2), as maiores concentrações iniciais podem estar relacionadas com a oxidação de uma parte da amônia, conforme já discutido. Após o 49º dia os valores de nitrito se estabilizam e ficam próximos de zero para todas as três células (Figura 55).

Figura 53. Variação de nitratos no tempo das células experimentais. No detalhe, grande aumento inicial de nitrato nas células C1 e C2.

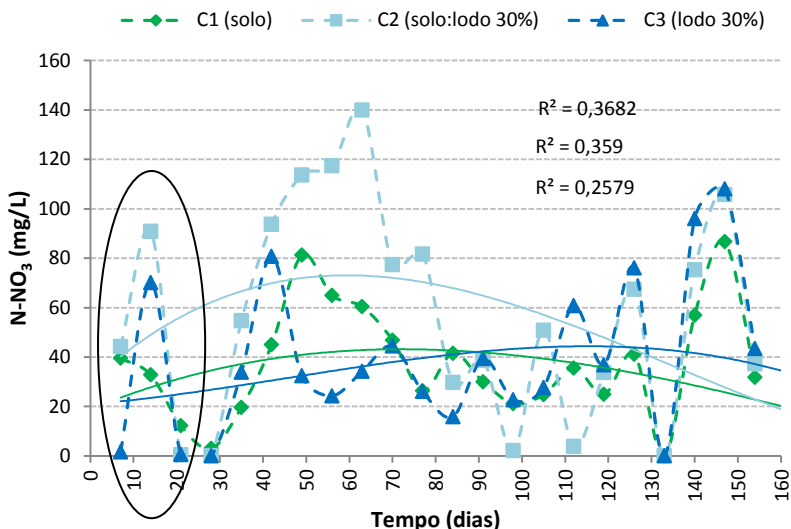


Figura 54. Box-plot de nitrogênio na forma de nitratos nas células experimentais.

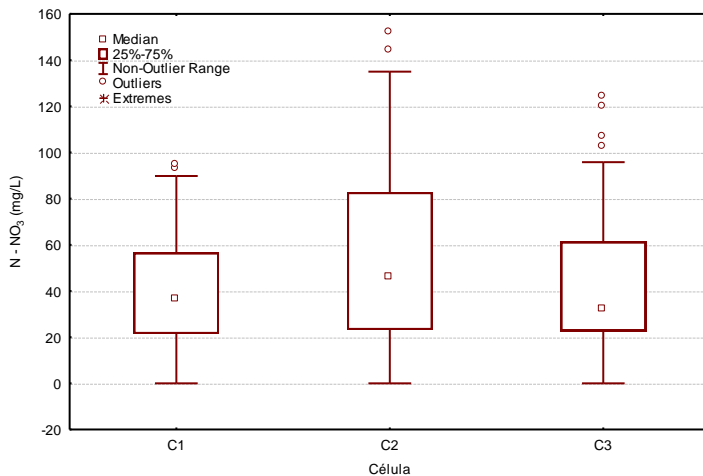
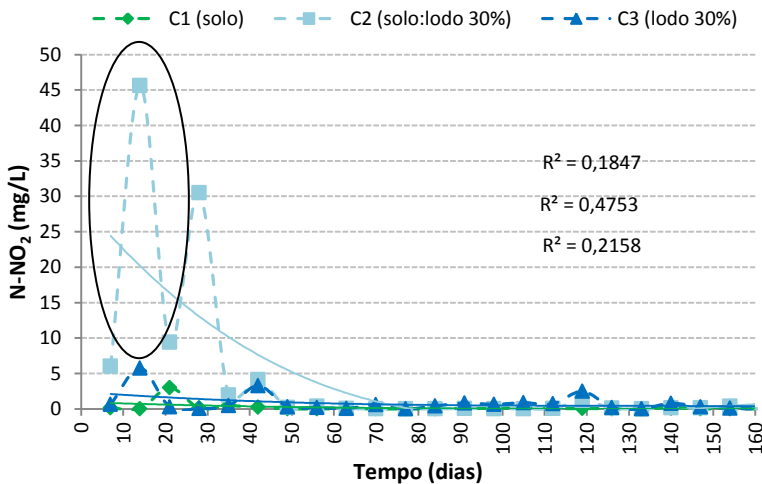


Figura 55. Variação de nitritos no tempo das células experimentais. No detalhe, grande aumento inicial de nitrito nas células C1 e C2.

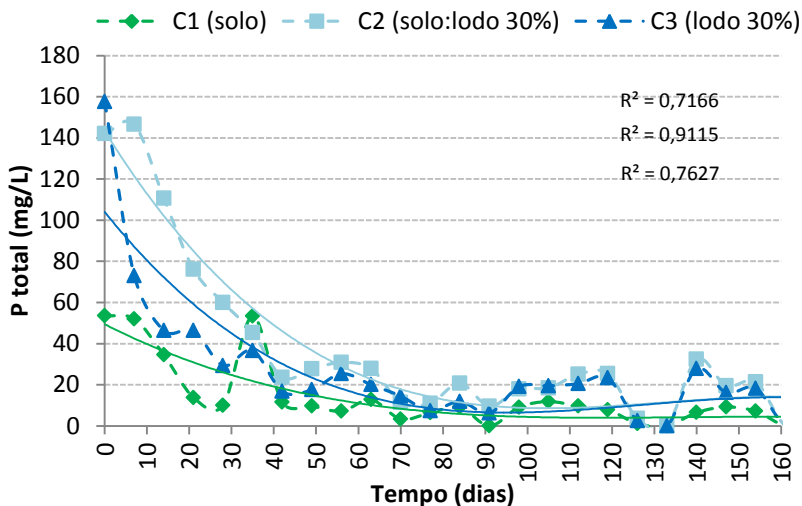


4.4.5 Fósforo Total

A variável *fósforo total* do lixiviado de todas as células, incluído a referência (C1), apresentou maiores concentrações no início do monitoramento e posterior decaimento com o tempo (Figura 56). Este comportamento reflete a influência do lodo anaeróbio inoculado no início do experimento, pois este material (lodo de esgoto) normalmente apresenta grandes concentrações de fósforo, principalmente quando oriundo de ETEs que alternam tratamento anaeróbio e aeróbio dos efluentes. (SAWYER, McCARTY, 1978). Isto ocorre por que o estágio anaeróbio funciona como um seletor biológico para os microorganismos armazenadores de fósforo, os quais absorvem apreciáveis quantidades deste nutriente do meio aquoso na fase aeróbia, sendo removidos do sistema pelo lodo excedente (VON SPERLING, 2002; TCHOBANOGLIOUS, BURTON, STENSEL, 2003).

As elevadas concentrações iniciais de fósforo no lixiviado das células C2 e C3 ($C2 = 142 \pm 1$ mg/Le $C3 = 157 \pm 2$ mg/L), com relação à célula referência ($C1 = 53 \pm 0,5$ mg/L) sugerem influência do lodo de esgoto utilizado nas coberturas para a elevação desta variável. Contudo, a alta taxa de decaimento das células C1 e C2 entre o início e o 35º dia do experimento pode estar associada com a presença de cal e de íons metálicos, como o ferro, o cálcio e o alumínio, os quais podem favorecer a complexação e precipitação de fosfatos. O fosfato também se complexa com outros cátions, incluindo o NH_4^+ (RHEW; BARLAZ, 1995). A reação entre o fósforo livre e a cal forma de precipitados como o fosfato tricálcico $[Ca_3(PO_4)_2]$, hidroxiapatita $[Ca_5(PO_4)_3 OH]$, dentre outros compostos (SOUZA; FORESTI; VAZOLLÉR, 1997). Como o lodo utilizado na cobertura possui alto teor de Ferro, conforme item 4.1.2, outros compostos insolúveis provavelmente gerados são a vivianita $[Fe_3 (PO_4)_2 \cdot 8H_2O]$, o fosfato ferroso $[Fe_3 (PO_4)_2]$ e carbonato ferroso $[FeCO_3]$ (*Ibidem*).

Figura 56. Variação de Fósforo Total ao longo do tempo nas células experimentais.



Sendo assim, no 35º dia as concentrações de C1 e C2 chegaram a ficar mais baixas que a célula referência, mas posteriormente voltaram a se manter um pouco elevadas com relação a C1, provavelmente devido a influência do lodo contido na cobertura.

A partir do 42º dia as concentrações de fósforo de todas as células tendem a se estabilizar e a ficar dentro da faixa máxima desta variável em lixiviados brasileiros, entre 0,1 a 40 mg/L (SOUTO e POVINELLI, 2007).

4.4.6 Sólidos Fixos, Voláteis e Totais

A variação da concentração de sólidos fixos (SF), voláteis (SV) e totais (ST) no lixiviado gerado pelas células experimentais ao longo do tempo é apresentada na Figura 57. A comparação das médias, máximos e mínimos é apresentada na Tabela 38. De forma geral todas as médias se encontram dentro da faixa citada pela literatura de aterros brasileiros (SOUTO E POVINELLI, 2007). A maior concentração de SF e ST observada na célula C2 pode estar relacionada com a camada de brita disposta antes da camada de lodo, pois os sacos despejados nesta célula continham mais areia residual que das outras células. Contudo, parte do

aumento da concentração de sólidos pode ter relação com o lodo na cobertura, já que o lixiviado da célula C3 também apresentou maior teor de ST e SF em relação a célula referência C1.

Tabela 38. Concentrações de Sólidos (mg/L) das células experimentais.

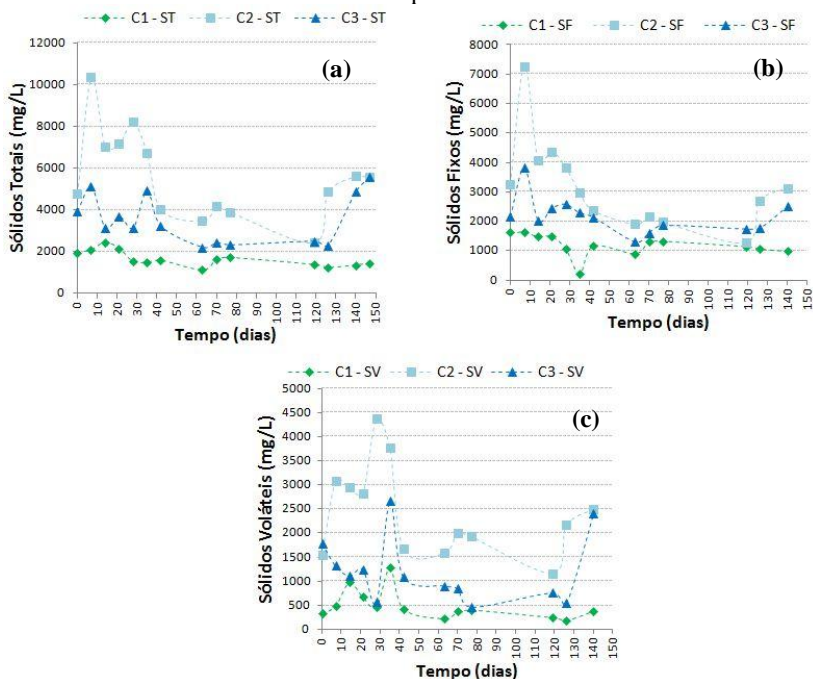
Variável	Célula	Média	Mín.	Máx.	Souto e Povinelli (2007)
ST	C1	1.676	1.000	2.682	3.200 - 21.900
	C2	5.446	2.120	10.348	
	C3	3.362	1.180	6.260	
SF	C1	1.286	220	2.760	630 - 20.000
	C2	3.029	1.280	7.266	
	C3	1.998	780	3.824	
SV	C1	483	0	1.274	2.100 - 8.300
	C2	2.431	540	4.380	
	C3	1.195	400	3.060	

*Faixa máxima para aterros brasileiros.

É possível notar também maiores concentrações de SV nas células com lodo na camada (C2 e C3) em relação à célula C1 e isso pode estar relacionado com a matéria orgânica oriunda do biossólido.

Nos resultados, também ficou evidente a predominância de SF em relação aos SV em todas as células, durante praticamente todo o monitoramento. Tal comportamento é comum em aterros na fase metanogênica, segundo Souto (2009) e referências com experimento em média e pequena escala de lisímetros simulando aterros (PRIM, 2011; PESSIN *et al.*, 2002; LANGE *et al.*, 2006). O que também contribui para isso é o fato de o lixiviado ser de aterro mais antigo e maior parte da matéria orgânica já ter sido degradada.

Figura 57. Balanço de Sólidos Totais (a), Fixos (b) e Voláteis (c) ao longo do tempo.



4.4.7 Metais (Pb, Cu, Zn, Cd, Ni)

Os resultados apresentados no item 4.1 (caracterização do lodo de esgoto) comprovam que o biossólido possui concentrações de metais muito abaixo dos limites preconizados pela Resolução CONAMA n° 375 para seu uso em agricultura. Isso se deve principalmente pelo fato de a ETE Insular não receber efluentes industriais. Contudo, independente disso, a influência da camada de lodo na concentração de alguns metais do lixiviado foi avaliada.

O Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Cádmio (Cd) e o Níquel (Ni) foram monitorados ao longo de 112 dias e os principais resultados estão na Tabela 39. Os valores medidos de Cádmio não foram apresentados por que foi igual a zero em todas as medições.

De forma geral todas as concentrações medidas das Células C1, C2 e C3 ficaram abaixo do padrão de lançamento de efluentes estabelecido pela Resolução do CONAMA n° 430 de maio de 2011

(BRASIL, 2011), conforme pode ser verificado na Figura 58, Figura 59, Figura 60 e na Figura 61. Os limites são os seguintes: Pb (0,5 mg/L); Cu (1,0 mg/L); Zn (5,0 mg/L); Cd (0,2 mg/L) e Ni (2,0 mg/L).

Tabela 39. Estatística descritiva dos metais monitorados.

Metal	Célula	n	Média	DP	IC (-95%)	IC (+95%)	Mediana	Mín.	Máx.
Ni	C1	12	0,30	0,27	0,13	0,47	0,22	0,05	0,79
	C2	12	0,49	0,32	0,29	0,70	0,45	0,12	1,07
	C3	12	0,63	0,34	0,42	0,84	0,49	0,30	1,20
Zn	C1	20	0,13	0,06	0,10	0,15	0,13	0,00	0,24
	C2	18	0,28	0,15	0,21	0,35	0,27	0,09	0,66
	C3	21	0,18	0,09	0,14	0,22	0,15	0,09	0,43
Pb	C1	19	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,00	0,10
	C2	21	0,04	0,04	0,02	0,05	0,03	0,00	0,11
	C3	21	0,05	0,04	0,03	0,07	0,05	0,00	0,13
Cu	C1	18	0,03	0,03	0,01	0,04	0,01	0,00	0,11
	C2	21	0,19	0,18	0,11	0,27	0,12	0,01	0,61
	C3	21	0,05	0,03	0,03	0,06	0,03	0,01	0,11

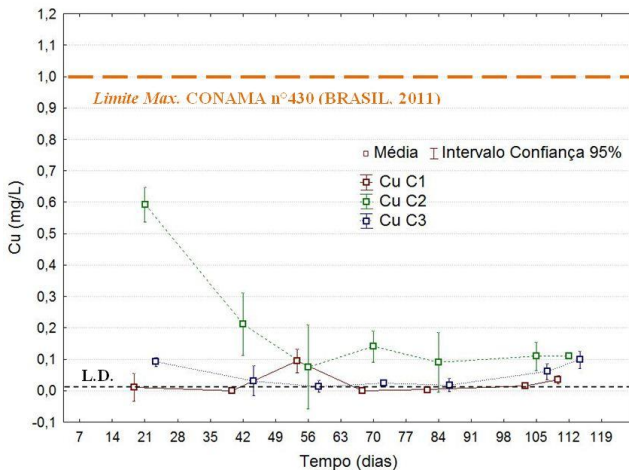
Obs: n = número de amostras; DP = desvio padrão; IC = intervalo de confiança.

Conforme explicado na metodologia, para avaliar a influência das camadas com lodo nos metais do lixiviado, aplicaram-se testes estatísticos em que se consideraram também os valores abaixo ou próximos do limite de detecção (linha preta tracejada na Figura 58, Figura 59, Figura 60 e na Figura 61), apesar da perda de precisão nestes casos.

O intervalo de confiança apresentado nas figuras acima objetivou ilustrar a pouca diferença entre as concentrações de metal medidas nas três células. Os testes ANOVA comparando-se as médias gerais de todas as células simultaneamente para cada metal apontaram diferença estatisticamente significativa (significância de 5%) para os metais Zn ($F=11,29$; $p=0,00007$) e Cu ($F=13,77$; $p=0,00001$). O Ni ($F=3,36$; $p=0,0469$) foi considerado caso de fronteira por estar com valor-p muito próximo de 0,05 e para o metal Pb não houve diferença significativa entre as três médias ($F=2,62$; $p=0,0812$). Os testes de Tukey, realizados

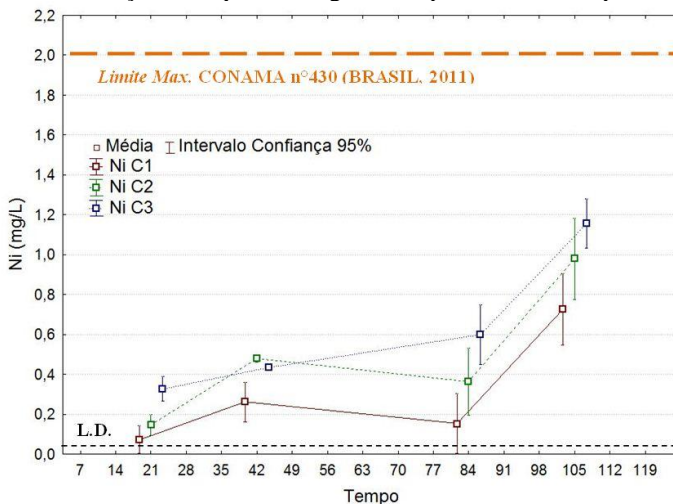
par a par entre as médias gerais (Tabela 40) apontaram especificamente as células com médias significativamente diferentes.

Figura 58. Variação de cobre ao longo do tempo das células experimentais.

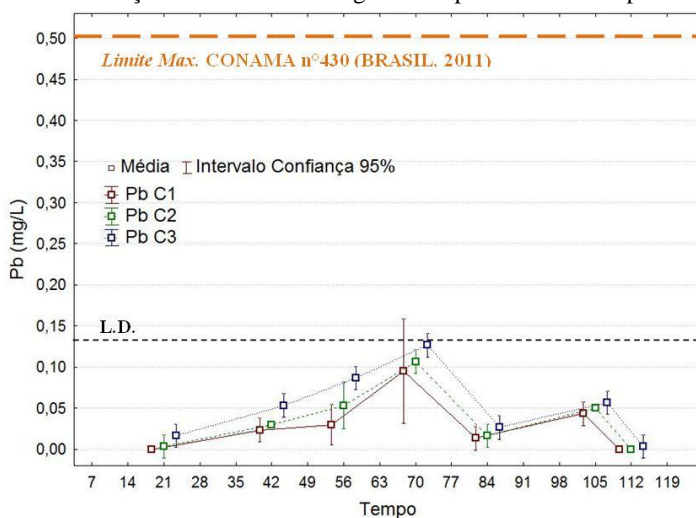


Obs: linha tracejada preta é o limite de detecção (L.D.), igual a 0,014mg/L.

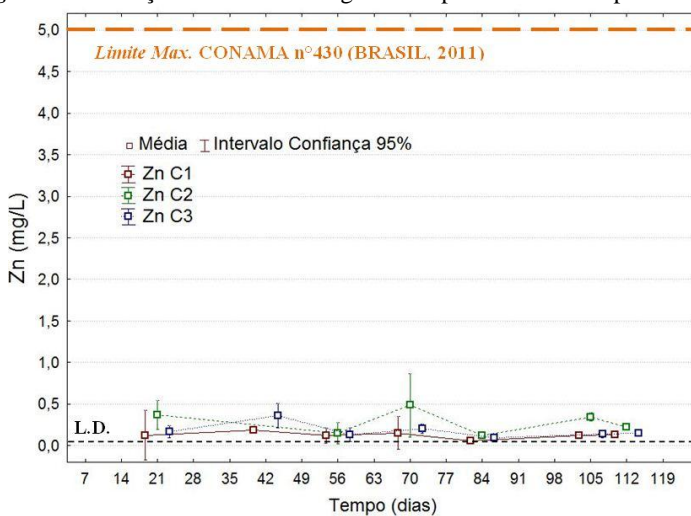
Figura 59. Variação de níquel ao longo do tempo das células experimentais.



Obs: linha tracejada preta é o limite de detecção (L.D.), igual a 0,068mg/L.

Figura 60. Variação de chumbo ao longo do tempo das células experimentais.

Obs: linha tracejada preta é o limite de detecção (L.D.), igual a 0,13mg/L.

Figura 61. Variação de zinco ao longo do tempo das células experimentais.

Obs: linha tracejada preta é o limite de detecção (L.D.), igual a 0,011mg/L.

Nota-se que para nenhum dos metais as células com lodo na cobertura (C2 e C3) foram simultaneamente diferentes da célula referência (C1). Além disso, os diagramas de caixa (Figura 62 e Figura 63) permitem visualizar com mais clareza o comportamento de cada metal em função da camada. Para os metais Ni e Pb a célula com camada composta só de lodo (C3) contribuiu para elevar suas concentrações, embora significativamente ($p < 0,05$) apenas o níquel. Já as concentrações de Cu e Zn tiveram aumento significativo no lixiviado das células com camada de solo misturado com lodo (C2). Estes resultados deixam claros que não é linear a relação entre a quantidade de lodo na camada e aumento de concentração de metais no lixiviado.

Tabela 40. Valor-p do Teste de Tukey par a par entre as médias gerais das células experimentais.

Metal		C1	C2	C3
Ni	C1	-	0,3073	0,0375
	C2	-	-	0,5272
Zn	C1	-	0,0002	0,2455
	C2	-	-	0,0071
Pb	C1	-	0,6635	0,0699
	C2	-	-	0,3329
Cu	C1	-	0,0002	0,7938
	C2	-	-	0,0003

Obs: em cinza os resultados com diferença significativa ($p < 0,05$)

A concentração de Cu da Célula C2 nos primeiros dias chamou a atenção (Figura 58 e Figura 62), pois estava com $0,59 \pm 0,02$ mg/L, bem acima dos valores medidos nas outras células (C1 = $0,01 \pm 0,01$ mg/L e C3 = $0,09 \pm 0,005$ mg/L). Contudo, ainda estava abaixo do limite do CONAMA 430 (1,0 mg/L) e depois tendeu a diminuir e estabilizar em valores próximos de 0,1 mg/L. Rhew e Barlaz (1995) também observaram aumento do cobre no lixiviado de pequenos reatores preenchidos de resíduos urbanos com camada de solo misturado com lodo de esgoto caledado, em relação a outros reatores com camada de solo apenas. Os valores, no entanto, chegaram à média de 0,06 mg/L e também ficaram abaixo da legislação estadunidense (1,0 mg/L). Com relação aos outros metais monitorados por este autor (Cr, Fe, Ni e Zn), não se verificou alteração significativa ($p < 0,05$) na concentração do

lixiviado nas camadas com presença de lodo caledado. Prim (2011) também notou relativo aumento de Cu ao comparar o lixiviado de um reator de RSU e camada de solo, lodo de ETE e lodo de ETA com outro de apenas solo na cobertura. A diferença era pouca e predominou nos 114 dias iniciais de monitoramento com valores entre 0,03 e 0,06 mg/L.

Figura 62. Box-Plot das concentrações de Cd, Pb e Cu.

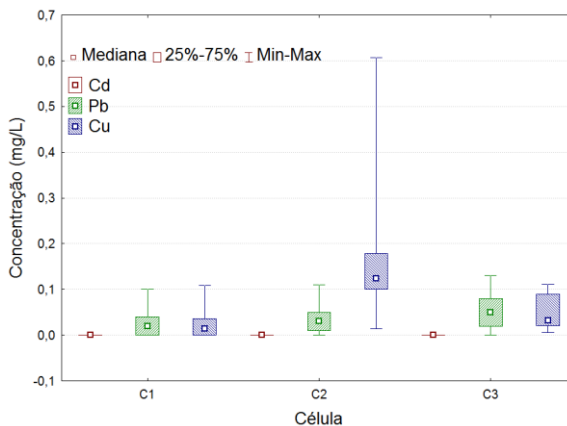
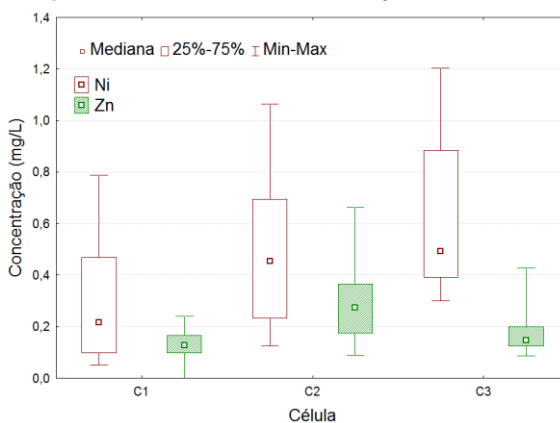


Figura 63. Box-Plot das concentrações de Ni e Zn.



Segundo Robertson *et al.* (1982, *apud* WONG *et al.*, 2007) a maior razão para o aumento da mobilidade de metais pesados em solos tratados com lodo foi o decrescimento do pH. Entretanto, a lixiviação de

Cd e Cu e Pb em solos tratados com lodo de esgoto foi também observado em altos pHs em alguns experimentos de campo (WILLIAMS *et al.*, 1987 *apud* CAMOBRECO *et al.*, 1996). Zhou e Wong (2001) também verificaram uma tendência de diminuição da sorção de Cu em solos tratados com lodo de esgoto e em pHs acima de 6,8. Isso talvez possa explicar os altos valores de Cu na célula C2, com a maior média de pH entre os três reatores. Além disso, a matéria orgânica dissolvida oriunda do lodo de esgoto também pode facilitar o transporte de metais através da formação de complexos metal-matéria orgânica solúvel (WONG *et al.*, 2007).

Com relação ao Zn e ao Cd, algumas pesquisas apontam que estes possuem baixa tendência para complexarem com a M.O. em comparação com Cu e Pb, mas tem forte relação com o pH (CAMOBRECO *et al.*, 1996). As concentrações de Zn foram maiores na célula C2 provavelmente por que sua faixa de pH (6,98 – 7,97) é a que mais está próxima da faixa em que a matéria orgânica dissolvida mais inibe a sorção de Zn, a qual varia de 7 a 7,5 (WONG *et al.*, 2007). Além disso, entre os metais pesados o Zn é um dos que apresentam maior mobilidade nos aterros sanitários (HE *et al.*, 2006).

Em um meio aquoso, a concentração de metais e suas espécies predominantes envolve diversas variáveis, como o pH do meio, a temperatura, pressão, a concentração dos ligantes no qual o metal pode estar adsorvido e a condição de oxi-redução do sistema (BAIRD, 2004; TONIETTO, 2006; VOGUEL, 1981). As principais mudanças que normalmente ocorrem aos metais, em função de sua complexação, são relativas à sua solubilidade, toxicidade, propriedades bioestimuladoras, capacidade de modificação de superfícies sólidas e de adsorção (SNOEYINK e JENKINS, 1980). Sendo assim, pela grande abrangência deste tema, enfoque mais profundo não foi feito, pois o objetivo era apenas saber se a camada aumentava ou diminuía a concentração de metais do lixiviado e se a alcalinidade da cal influiria numa possível diminuição.

Em comparação com as concentrações típicas de Ni, Zn, Pb, e Cu no lixiviado citado pela literatura, apenas valores máximos de Ni e Zn das camadas com lodo (C2 e C3) estão um pouco acima da média para um dos autores citados pela Tabela 41.

O valor máximo de cobre para C2 também ficou um pouco acima da média em comparação com um dos autores (QASIN e CHIANG, 1994), mas dentro da faixa máxima de aterros brasileiros (SOUTO E POVINELLI, 2007). Contudo, todos os valores médios estão dentro do normal ou abaixo dos valores citados.

Tabela 41. Comparação de Médias com valores de literatura.

Metal	Célula	Média	DP	Mín.	Máx.	Souto e Povinelli (2007)	QASIM e CHIANG (1994)
Ni	C1	0,30	0,27	0,05	0,79		
	C2	0,49	0,32	0,12	1,07	0,03 - 1	-
	C3	0,63	0,34	0,30	1,20		
Zn	C1	0,13	0,06	0,00	0,24		
	C2	0,28	0,15	0,09	0,66	0,01 - 8	0,40
	C3	0,18	0,09	0,09	0,43		
Pb	C1	0,03	0,03	0,00	0,10		
	C2	0,04	0,04	0,00	0,11	0,01 - 3	0,50
	C3	0,05	0,04	0,00	0,13		
Cu	C1	0,03	0,03	0,00	0,11		
	C2	0,19	0,18	0,01	0,61	0,005 - 1	<0,5
	C3	0,05	0,03	0,01	0,11		

Nota: em cinza valores máximos que excederam alguma faixa da literatura.

4.4.8 Conclusão etapa Piloto Experimental

O lodo de esgoto aplicado em coberturas de aterros, dependendo da configuração da camada (com 50% de lodo ou 100% de lodo) pode influenciar no aumento da concentração de alguns parâmetros do lixiviado nas fases iniciais do monitoramento, como a DQO a DBO, amônia, nitrito, fósforo e alguns metais. Contudo, algumas semanas após sua aplicação, a concentração da maioria dos parâmetros tendiam a baixar e a ficarem estabilizados e próximos dos valores do piloto referência (C1) com solo apenas na cobertura. A exceção a esta regra é o nitrato, o pH e o níquel. Verificou-se também que a concentração de tais parâmetros nem sempre aumenta linearmente com a quantidade de lodo presente na cobertura e em alguns casos (pH, Alcalinidade, nitrito, fósforo, cobre, zinco) a camada com mais lodo até (C3) apresenta valores inferiores que a camada com 50% de solo e 50% de lodo (C2). Isto pode estar relacionado com o tempo de contato da água da chuva

percolada com o a camada, pois a célula C3 é mais permeável que C2, já que possui granulometria predominantemente de areia, conforme verificado nos ensaios geotécnicos.

Com relação aos metais, os resultados apresentados no item 5.1 (caracterização do lodo de esgoto) comprovam que o bio sólido possui concentrações muito abaixo dos limites preconizados pelo CONAMA 375 (BRASIL, 2006) para seu uso em agricultura. Entretanto, a concentração de metais no lixiviado das células com camadas de lodo na cobertura aumentou em alguns casos para a camada C3 com mais lodo (Ni) e outros para a camada C2 com menos lodo (Zn e Cu). O cobre em especial aumentou significativamente no início do monitoramento para a célula C2, mas decaiu bastante posteriormente. No entanto, em nenhum momento a concentração de qualquer um dos metais monitorados, inclusive o cobre, excedeu os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n°430 (BRASIL, 2011).

Conclui-se, assim, que a apesar de o lodo presente em coberturas alterar a concentração de lixiviado de modo negativo nos primeiros dias após sua aplicação, esse efeito tende a desaparecer em poucas semanas. Além disso, caso o lixiviado fosse de RSU aterrados recentemente, talvez isso nem seria percebido, como foi o caso de trabalhos muito semelhantes executados em tais condições (RHEW e BARLAZ, 1995; PRIM, 2011).

É importante comentar que lodo muitas vezes é destinado sem tratamento para aterros sanitários e efeitos deletérios na qualidade do lixiviado poderiam ser piores nos primeiros dias monitorados, apesar de estudos afirmarem que a médio-longo prazo ele pode ter efeitos benéficos (Farrell, 1988 *apud* Griffin *et al.*, 1998). Como este trabalho focou na comparação entre um aterro que não recebe lodo e outro que só o recebe como cobertura, não é possível afirmar isto com base nestes resultados. Todavia, a presença de cal no lodo tende a ser benéfica nas reações de metanogênese ao fornecer alcalinidade demandada neste processo, efeito tampão, e assim talvez acelerar a decomposição dos resíduos e consequente geração de metano, como verificou Rhew e Barlaz (1995).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados do presente estudo, as principais conclusões são as seguintes:

- A quantidade mínima de cal para satisfazer as exigências legais de higienização e atratividade de vetores, para o lodo da ETE Insular, é de 30% em relação à massa seca de lodo.

- Todos os tratamentos atingiram a umidade de 50% ou menos, necessária para aplicação em coberturas diárias e intermediárias, em até 56 dias no Ciclo 1 (setembro a dezembro) e até 29 dias no Ciclo 2 (março a junho). No Ciclo 1, o tempo foi maior por que a temperatura média do início do monitoramento foi menor que a do Ciclo 2, assim como o fato de alturas maiores de lodo (até 20 cm) terem sido adotadas.

- Para a secagem do lodo na estufa é recomendável uma altura de até 15 cm, considerando reviramento de 3 vezes por semana, para que o decaimento de umidade ao longo do tempo seja otimizado.

- Para o uso agrônômico do lodo, a sua secagem em estufa agrícola sem a adição de cal (*in natura*) seria suficiente para atingir padrão Classe B, considerando a secagem do lodo até níveis acima de 90% de ST, conforme condicionante da Resolução CONAMA n° 375. Contudo, para a aplicação em coberturas de aterro a adição de cal é necessária para atingir a concentração de sólidos voláteis (SV/ST) requerida para este fim e para minimizar o efeito de emissão de odores.

- Conforme apontaram os testes estatísticos, o efeito de desidratação do lodo na estufa independe da adição ou não de cal ou do percentual adicionado.

- Não se recomenda a utilização dos traços estudados de solo:lodo em *camadas impermeáveis* de cobertura e nem em *camadas drenantes* e de *fundação* (coletora de gases). Contudo traços de 1:1 com 30% de cal é o mais recomendável para coberturas finais nas *camadas superficiais* (vegetativas) e *camadas de proteção* e o traço 1:2,33 com 30% é recomendável para coberturas diárias e intermediárias. O traço 45% - 1:1 também poderia ser aplicado em camadas finais e intermediárias, caso maiores resistências fossem demandadas. Contudo, de modo geral seria desperdício de cal.

- Devido à adição de lodo ao solo aumentar sua permeabilidade e a capacidade de absorver água, a camada reteria a água da chuva e evitaria que ela se infiltrasse para dentro do aterro sanitário, liberando água para a camada vegetativa conforme sua demanda ou através de sua evaporação para a atmosfera. Estes fatores ajudariam a manter a camada

vegetativa, e a reduzir a erosão e a infiltração de água da chuva, diminuindo assim a geração de lixiviado e o potencial de contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

- Coberturas com lodo de esgoto podem contribuir para elevar a concentração de alguns parâmetros do lixiviado nos primeiros dias após sua aplicação, como a DQO, a DBO, a amônia, o nitrito, o fósforo, os sólidos e alguns metais, mas poucas semanas depois esses valores tendem a baixar e a ficar próximos de uma célula normal que não tivesse recebido lodo em sua cobertura.

- Em alguns casos (pH, Alcalinidade, nitrito, fósforo, cobre, zinco), a camada com mais lodo (C3) chegou a apresentar valores inferiores a camada com 50% de solo e 50% de lodo (C2). Isto pode estar relacionado com o menor tempo de contato da chuva infiltrada com a camada da célula C3, mais permeável que C2, já que tal possui granulometria predominantemente de areia, conforme verificado nos ensaios geotécnicos.

- A concentração de níquel no lixiviado da célula com lodo apenas (C3) aumentou significativamente ($p < 0,05$) com relação à célula referência (C1), mas não em relação à célula com 50% de lodo (C2). Já a concentração de zinco e cobre teve aumento significativo para a célula C2 com relação a C1 e a C2. Contudo, em nenhum momento a concentração de qualquer um dos metais monitorados, inclusive o cobre, excedeu os limites estabelecidos pela Resolução do CONAMA n°430 (BRASIL, 2011). Além disso, todos os valores médios estavam dentro ou abaixo da faixa de valores citados pela literatura consultada.

Sendo assim, conclui-se que a utilização em coberturas de lodo de esgoto caleado e seco em estufa é uma técnica com bom potencial de aplicação, pois atende aos principais aspectos técnicos envolvidos nesta atividade. Espera-se, desse modo, contribuir para que a técnica de aplicação de lodo de esgoto em coberturas seja uma alternativa de disposição final considerada nos complexos processos de gestão de lodo das ETE's do Brasil, onde o assunto ainda é pouco estudado.

5.1 RECOMENDAÇÕES

- Realizar testes para avaliar a atratividade de vetores de traços de solo e lodo.
- Realizar testes olfatométricos similar Pietz *et al.*(1996), os quais consideraram o teor máximo de diluição detectável para

metade de membros de um painel olfatométrico (ED50) igual a 300.

- Calcular a redução de volume de lodo na estufa agrícola e estimar o impacto econômico da aplicação desta técnica, considerando a aplicação do bio-sólido em coberturas.
- Em escala real verificar se o lodo não libera ainda quantidade remanescente de amônia por *stripping* a ponto de prejudicar os operadores do aterro. Caso aconteça, testar diferentes misturas com resíduos de poda além de solo ou maior proporção de solo.
- Realizar testes em escalas reais buscando-se analisar o comportamento ambiental e geotécnico do material em um longo período (pelo menos 2 anos). Verificar: a presença ou não de odores e caso sim, o número de dias em que é detectável; a presença de vetores, roedores e insetos; se houve ou não aumento na dispersão dos resíduos pelo vento; se há emissão de amônia remanescente; se o traço proporcionou boa “trabalhabilidade” para os operadores.
- Realizar mais testes geotécnicos com misturas de solo e lodo, como ensaios de adensamento, compressibilidade, expansão e resistência à erosão.
- Ao aplicar traços de solo e lodo em campo adicionar água até o teor de umidade (Hot) ótima de forma gradual e lenta, principalmente se o lodo tiver sido ressecado a teores muito abaixo da Hot.
- Estudar a utilização do lodo compostado ou estabilizado de outras maneiras em coberturas de aterro e em outras obras de engenharia que demandem solo fértil.
- Através de células piloto comparar a influência no lixiviado entre o lodo disposto como resíduos sem tratamento e entre o lodo tratado aplicado como coberturas. Considerar longo período de monitoramento (pelo menos um ano) e utilizar RSU frescos.
- Realizar outros testes como estabilidade de agregados, determinação de constante de erodibilidade, testes de toxicidade para substratos vegetais típicos de coberturas de aterro e demais aspectos agrônômicos relacionados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

_____. **NBR 13869:** Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR 8849:** Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro. 1985.

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

_____. **NBR 6508:** Solo – Determinação da Massa específica aparente, 1984a.

_____. **NBR 6457:** Solo – Preparação para ensaio de compactação, 1986a.

_____. **NBR 6459:** Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984b.

_____. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984c.

_____. **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984d.

_____. **NBR 14545:** Determinação do coeficiente de permeabilidade e solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 7182:** Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986b.

_____. **NBR 9895:** Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987b.

_____. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - classificação, 2º ed. Rio de Janeiro, 2004a.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de Resíduos Sólidos, 2º ed. Rio de Janeiro, 2004b.

AGENDA 21. **Agenda 21 global**.. Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, 1992. Disponível em: < www.ecolnews.com.br/agenda21/>. Acesso em abr. 2010.

Agência Nacional das Águas (ANA). **Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH)**. 2006. Disponível em: <www.ana.gov.br>. Acesso em abr. 2010.

AMOOZEGAR, A.; BARLAZ, M. A.; RUBIN, A. R. **Use of Lime-Treated Wastewater Sludge-Soil Mixtures for Daily Cover in Solid Waste**. Special Report N° 16 January 1995. Disponível em: <<http://www.ncsu.edu/wrri/reports/summaries/srs16.html>> Acesso: Janeiro de 2011.

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. v.6, 2001. 484p.

ANDREOLI, C.V.(Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 417 p.

ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2001. 282 p.

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.; BORGES, E. S. M. 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: Abes, RiMa, 2003. cap. 5, p. 121-165.

ANDREOLI, C. V.; GARBOSSA, L.H.P.; LUPATINI, G.; PEGORIN, E.S. Wastewater sludge management: A Brazilian approach. In: 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. p. 132-146. Disponível em: <http://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/habitat2008.pdf>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2011.

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.

ASTM - American Society for Testing and Materials: **D 3080-04**. Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. 2004.

BAGCHI, A. **Design of Landfills and Integrated Solid Waste Management**. 3^o ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2004. 696 p.

BAIRD.C. **Química Ambiental**. ed. 2. Porto Alegre: Bookman, 2004.

BASTIAN, R.; SOUTHWORTH, R. M.; FARREL, J. B.; GRANATO, T. C.; LUE-HING, C.; PIETZ, R. I.; RAO, K. C. Regulatory Issues. 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. v.4, cap. 2, p. 03-90.

BORGES, M. E.; LIMA, J. M. S. **Aterro Sanitário – Planejamento e Operação**. Viçosa, CPT, 2000. 66 p.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Sol, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 107 f.

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.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº 92, 16 de maio de 2011. Seção 1, p. 89.

_____. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002.** Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº 136, 17 de julho de 2002. Seção 1, p. 95-96.

_____. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. SECRETARIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA – SDA. **Instrução Normativa Nº 62, de 26 de Agosto de 2003.** Oficializa os Métodos Analíticos Oficiais para Análises Microbiológicas para Controle de Produtos de Origem Animal e Água. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 de setembro de 2003, Seção 1, p. 14.

_____. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. SECRETARIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA – SDA. **Instrução Normativa Nº 28, de 25 de Julho de 2007.** Aprova

os Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes Minerais, Orgânicos, Organo-Minerais e Corretivos, disponíveis na Coordenação-Geral de Apoio Laboratorial - CGAL/SDA/MAPA, na Biblioteca Nacional de Agricultura – BINAGRI e no sítio do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 31 de julho de 2007, Seção 1, p. 11.

_____. **Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2010a.

_____. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010.** Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, DF, 2010b.

CABRAL, A.; BURNOTTE, F.; LEFEBVRE, G.; PANAROTTO, C. Geotechnical characterization of pulp and paper residue used in cover systems. **Environmental Geotechnics** (4th ICEG) n. 1, p. 207-212, 2002.

CALVANO, J.; TATA, P.; SAWYER, B.; WILSON, T. E. Sources and Control of Odor Emissions from Sludge Processing and Treatment. 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. 5, p. 212-254.

CAMOBRECO, V.J.; RICHARDS, B. K.; STEENHUIS, T. S.; PEVERLY, J. H.; MCBRIDE, M. B. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. **Soil Science**, v.161, p.740-750, 1996.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações.** 6º Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988.

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 dezembro de 2010.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. . Pollution of Subsurface Water Caused by Sanitary Landfills Effluents - Simulation of Leachates Volumes Produced. In: Seminário Internacional da IAWPRC sobre Processamento de Resíduos Industriais, 1990, Salvador. **Anais do Seminário Internacional da IAWPRC sobre Processamento de Resíduos Industriais**. Salvador, Ba. : IAWPRC, 1990. v. I. p. 301-311

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.

CASTILHOS JUNIOR, A. B.; MEDEIROS, P. A.; FIRTA; I. N.; LUPATINI, G.; SILVA, J. D. 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.

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

CHUNG, B. H. I.; YU, J.; LEE, Y. S. Utilization of Stabilized and Solidified Sewage Sludge as Daily Landfill Cover Material. **KSCE Journal of Civil Engineering**. Vol. 10, N^o. 4, July 2006. p. 255-258.

DAS, B. M. **Fundamentos da Engenharia Geotécnica**; tradução All Tasks; revisão técnica Pérsio Leister de Almeida Barros. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

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

DAMASCENO, S.; CAMPOS, J. **Caracterização de lodo de estação de tratamento de esgotos sanitários para uso agrícola**. Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26, Lima, 1-5 nov. 1998.

DE TURK, E. E. Adaptability of sewage sludge as a fertilizer. **Sewage Works Journal**, Illinois, nº 7, p.597-610, 1935. Disponível em: <<http://www.jstor.org/pss/25028539>>. Acesso: novembro de 2010.

DIAS, L.E. Caracterização de substratos para fins de recuperação de áreas degradadas. In: DIAS L. E. & DE MELLO, J. W. V. (editores) **Recuperação de áreas degradadas**. UFV. Viçosa, 1998, pg. 27-44, 1998.

EPSTEIN, E. **Land Application of Sewage Sludge and Biosolids**. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 1º ed. 1929, 2003.

EKWUE, E.I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil and Tillage Research**, v. 16, 3 ed., p.289-297, 1990.

EL-FADEL, M.; BOU-ZEID, E.; CHAHINE, W.; ALAYLI, B. Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and bale municipal solid waste with high organic and moisture content. **Waste Management**, v. 22, 2002, p. 269-282.

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; ANREOLI, C.V.; DOMASZAK, S.C. **Caracterização preliminar dos principais tipos de lodo de esgoto do Paraná para um programa de reciclagem agrícola**. Sanare, 1997, p.15-21.

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, C.; ANDREOLI, C. V.; JÜRGENSEN, D. Produção e características dos biossólidos. In: **Uso e manejo do Lodo de Esgoto na**

Agricultura. Rio de Janeiro: PROSAB, Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. 1999. Cap. 1, p.16-25.

FORNARI FILHO, P. **Coleta de lodo.** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <franciscojgpimentel@gmail.com> em 27 de agosto de 2010.

FRANCESCHET, M.; CASTILHOS JUNIOR, A. B.; MACCARINI, M.; PRIM, E. C. C.; FUNARI, C. Estudo dos solos utilizados para a impermeabilização da camada de base e de cobertura de aterros sanitários de Santa Catarina. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, Campo Grande: **Anais...** Campo Grande, 2005. CD ROM

GOMES, L. P.; LANGE, L. C.; JUCÁ, J. F. T.; FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. 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.65-107.

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.; 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, abr.-jun., 2007. p. 71-76

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgotos. 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. v.6, 2001. Cap. 5, p. 159-260.

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 BÍOSSÓLIDOS, 7, 2010, Campinas. **Palestra...**, Campinas, 2010.

GRANATO, T. C. **Issues about Sludge and landfill cover**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <franciscojgpimentel@gmail.com> em 21 de fevereiro de 2011.

GRIFFIN, R. A.; LUE-HING, C.; ZENS, D. R.; SIEGER, R. B.; UHTE, W. 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.

GSCHWIND, J.; HARPER, D. W.; KELADA, N. P.; LORDI, D. T.; RICHARDSON, G. R.; SOSZYNSKI, S.; SUSTICH, R. C. Chemical Constituents Present in Municipal Sewage Sludge. 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. 3, p. 91-160.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2º Ed., São Paulo: Pini, 2002.

HAANDEL, A. V.; ALEM SOBRINHO, P. Produção, Composição e Constituição de Lodo de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. Cap. 2, p. 7-28.

HAMADA, J. Estimativa de Geração e Caracterização, do Chorume em Aterros Sanitários. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABES, 1997.

HART M. L.; SHAKOOR, A.; WILSON T. P. Characterization of lime sludge for engineering applications. **Waste Management**. Vol. 13, Ed.1, 1993, p. 55-63.

HDR Engineering, Inc. **Biosolids Management Plan** - Spokane County Division of Utilities. Spokane, WA, USA. 2009. Disponível em: <<http://www.spokanecounty.org/utilities/RptDoc/BiosolidsMgmt-Draft-200804.pdf>>. Acesso em março de 2010.

HE, P.; WONG, J. W. C. Management of sewage sludge in urban areas. In: 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. p. 246-263.

HE, P. J.; XIAO, Z.; SHAO, L. M.; YU, J. Y.; LEE, D. J. In situ distribution and characteristics of heavy metals in full-scale landfill layers. **Journal of Hazardous materials**. v. B137, p. 1385-1394, 2006.

IBGE – **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso: Dezembro de 2010.

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.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4ª Ed., Rio de Janeiro: ABES, Ed. SEGRAC, 2005. 932 p.

JUCÁ, J. F. T.; GOMES, L. P.; LANGE, L. C.; FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. 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.

KIM, E. H.; CHO, J. K.; YIM, S. Digested sewage sludge solidification by converter slag for landfill cover. **Chemosphere**. School of Urban and Civil Engineering, Hongik University, Seoul - Republic of Korea. Elsevier Ltd. vol. 59, n.3, 2005. p.387-395.

LANGE, L.C.; AMARAL, M. C. S. Geração e Características do Lixiviado. In: GOMES, L. P. (Coord.). **Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras**. Rio de Janeiro: PROSAB, 2009. Cap. 2. p.26-59.

LANGE; L. C.; GOMES, L. P.; CASTILHOS JUNIOR, A. B.; RITTER E.; MORAES, C. A. M.; SIMÕES, G. F. PRIM, E. C. C.; FERREIRA, C. F. A.; SILVA, F. V. B.; COELHO, H. M. G.; BOFF, R. D. 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.

LANYON, R. **Geotechnical Characterization of Biosolids**. Report n° 03-08. Prepared by Great Lakes Soil and Environmental Consultants, Inc. Research and Development Department. Chicago, Illinois: Metropolitan Water Reclamation District of Greater Chicago, 2003. 22 p.

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>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2011.

LEFFLER, D.; DRILL, C.; O'NEIL, J.D.; FAULMANN, E.L. 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. **Digestão anaeróbia mesofílica de lodo adensado de estação de tratamento de esgoto**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, SC, 2011. 143 p.

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.

LIM, S.; JEON, W.; LEE, J.; LEE, K.; KIM, N. Engineering properties of water/wastewater-treatment sludge modified by hydrated lime, fly ash and loess. **Water Research**, 36, 2002. P. 4177-4184.

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.

LIMA, A. M. O.; PINHEIRO, A. Estudo experimental do tratamento dos resíduos sólidos Urbanos em aterro aerado. *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 22. **Anais...** Joinville: ABES, 2003, p.1-16.

LUDUVICE, M. Processos de estabilização 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. 4, p. 123-157.

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.

MACHADO M. F. de S. **A situação brasileira dos bio sólidos.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil (FEC) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001. 301 p.

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.

MARIANO, M. O. H.; JUCA, J. F. T. Ensaios de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. **Eng. Sanit. Ambient.** [online]. 2010, vol.15, n.3, pp. 223-228. ISSN 1413-4152.

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.

MECKES, M. C. Land application of treated sewage sludge in the united states: regulatory considerations for risk reduction and determining treatment process equivalency. In: SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE BIOSSÓLIDOS, 7, 2010, Campinas. **Palestra...**, Campinas, 2010.

MEDEIROS, P. A. CASTILHOS JUNIOR, A. B. OLIVEIRA, J. C. S. SOARES, S. R. Geração de líquidos percolados em resíduos urbanos com cobertura permeável. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...** Vitória: ABES, 2002.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Status atual das atividades de projeto de MDL no Brasil e no mundo.** Disponível em:

<www.mct.gov.br/index.php/content/view/30317.html> Acessado em dezembro de 2010.

NRC – National Research Council. **Biosolids applied to land: advancing standards and practices.** Washington DC: National Academy Press, 2002. 178p.

N-VIRO INTERNATIONAL INC. Toledo, Ohio: 2010. Disponível em: <<http://www.nviro.com>>. Acesso em: 16 de setembro de 2010.

O'KELLY, B. C. Mechanical properties of dewatered sewage sludge. **Waste management**. [online], v. 25, n. 1, p.47-52, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X04001369>>. Acesso em: 7 jul. 2010.

O'KELLY, B. C. Geotechnical aspects of sewage sludge monofills. **Municipal Engineer**, v. 157, n. 3, p. 193-197, 2004.

PAPIN, M.; WEST, R. Landfills: landfill covers itself with biosolids. **Waste Age**, 1999. FONTE: <http://wasteage.com/mag/waste_landfills_landfill_covers/> Acesso em: 20 de maio de 2011.

PARKSON CORPORATION, 2011. Disponível em: <<http://www.parkson.com/Page.aspx?PageID=270&FileName=Drying&CC=true>> Acesso em: 03 de março de 2011.

PEGORINI, E. S.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. cap 1, p. 01-06.

PEREIRA, A.V.R.P., **Indicador para avaliação de desempenho de aterros de resíduos sólidos**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

PESSIN, N.; DE CONTO, S. M.; PARANOTTO, C. T.; BRUSTOLIN, I.; VELHO, J. R.; RIZZI, J. C.; FRANZOLOSSO, K. C. Monitoramento do processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos dispostos em duas células piloto de aterramento. In: CASTILHOS JR, A. B.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN; N. **Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para Pequenas Comunidades** (Coletânea de Trabalhos Técnicos). Rio de Janeiro: Rima, ABES, 2002. Projeto PROSAB. p. 47-54.

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.; GRANATO, T. C.; ANDERSON, J. G.; ZENS, D. R.; HILL, R. LUE-HING, C. **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. 58 p.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. 3° Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, M. T. Higienização de Lodos. 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. 6, p. 261-297.

POGGIANI, F.; SILVA, P. H. M. da; GUEDES, M. C. Uso do Lodo de Esgoto em Plantações Florestais. In: ANDREOLI, C. V.. **Alternativas de Uso de Resíduos do Saneamento: PROSAB 4**. Rio de Janeiro: ABES, Semograf, 2006. Cap. 6, p. 159-204.

POVINELLI, J. ; BIDONE, F. R. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. 1. ed. São Carlos: EESC, 1999. v. 1. 120 p.

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.

PUPPALA, A. J.; POKALA, S. P.; INTHARASOMBAT, N.; WILLIAMMEE, R. Effects of Organic Matter on Physical, Strength, and Volume Change Properties of Compost Amended Expansive Clay. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 133, No. 11, 2007. p.1449–1461

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.

REINHART, D. R.; TOWNSEND, T. G.; DUBEY, B.; KIM, H.; BONILLA, V. P.; XU, QIYONG. **Design and Operational Issues Related to Co-Disposal of Sludges and Biosolids in Class-I Landfills – Phase III.** Gainesville, University of Florida. 2007. Disponível em: < <http://www.floridacenter.org/publications/Biosolids%20Report%20Year-3%20with%20BMP.pdf>>. Acesso em 12 abril de 2010.

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.

ROCCA, A.C.; IACOVONE, A. M. M. B.; BARROTI, A. J.; *et al.* **Resíduos Sólidos Industriais.** São Paulo: CETESB, 1993. 233 p.

ROSE, J. L. **Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camadas oxidativas experimentais.** Tese (Doutorado). Programa de Engenharia Civil Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2009. 148 p.

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.

SANTOS, G. de A.; SILVA, L.S. da; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A. de O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

SAWYER, C. N.; McCARTY, P. L. **Chemistry for Environmental Engineering**. 3º ed. Japan: McGraw-Hill Kogakusha, Ltda, 1978.

SFPUC – San Francisco Public Utilities Commission. **Biossolid and Composting Program** (2009). Disponível em <<http://sfwater.org/home.cfm>>. Acesso em fevereiro de 2011.

SILVA, J. D. **Tratamento de lixiviados de Aterro Sanitário por lagoas de estabilização em série – estudo em escala piloto**. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SILVA, S. M. C. P.; FERNANDES, F.; THOMAZ-SOCCOL, V.; MORITA, D. M. Principais contaminantes do lodo. 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. 3, p. 69-121.

SIMMONS, F. W. **Physical and moisture retention characteristics of biosolids and solil-biosolids mixtures**. Report n° 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.

SIMON, F. G. MÜLLER, W. W. Standard and alternative landfill capping design in Germany. **Environmental Science & Policy**, Vol. 7, Issue 4, 2004, p. 277–290.

SNOEYINK, V.L.; D. JENKINS. **Water Chemistry**. John Wiley and Sons Inc., N.Y.,1980.

SOUTO, G. D. B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros**: estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“*stripping*”). Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação. Área de concentração em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

SOUTO, G.B.; POVINELLI, J. 2007. Características do Lixiviado de Aterros Sanitários no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 24, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABES, 2007. 10 p.

SOUZA, J. T.; FORESTI, E.; VAZOLLÉR, R.F. Remoção química de fósforo em processos anaeróbios. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19, **Anais...** Foz do Iguaçu: ABES, 1997.

TANTHACHOON, N., CHIEMCHAI SRI, C. AND CHIEMCHAI SRI, W. Utilization of Municipal Solid Waste Compost as landfill cover soil for reducing greenhouse gas emission, **Int. J. Environmental Technology and Management**, Vol. 7, N°. 3/4, 2007. p. 286–297.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2nd Ed. Heron Quay, London: Thomas Telford Publishin, 1997.

TEIXEIRA, P. F. **Investigação sobre Características Geotécnicas de um Resíduo de Papel**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 118 p.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. 4^o ed. Metcalf & Eddy, Inc. New York: McGraw Hill, 2003.1819 p.

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

TONIETTO, A. E. **Especiação química de cobre e zinco nas águas do Reservatório do Iraí: efeitos da matéria orgânica e interação com microalgas.** Dissertação de Mestrado em Química. Universidade Federal do Paraná, 2006.

TURMINA, A. S. C. **Caracterização do Lodo da Estação de Tratamento de Esgoto Insular da CASAN em Florianópolis/SC e seu Possível Uso Agrícola como Fertilizante.** II Jornada Unisul de Iniciação Científica (JUNIC) e II Seminário de Pesquisa. Universidade do Sul de Santa Catarina. Florianópolis: UNISUL, 2007.

US EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Land application of sewage sludge and domestic septage – Process design manual.** EPA/625/R-95/001: Cincinnati, 1995. 290p.

_____. **Criteria for Solid Waste Disposal Facilities: A Guide for Owners/Operator.** EPA/530-SW-91-08: Washington DC, 1993.

_____. **Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge.** EPA/625/R-92/013: Cincinnati, 2003. 177p

_____. **Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soil – Method 3050B.** Cincinnati, Ohio, 1996. Disponível em: <<http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3050b.pdf>>. Acesso em junho de 2011.

_____. **Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts for Total Metals for Analysis by FLAA or ICP Spectroscopy – Method 3010A.** Washington DC, 1992. Disponível em: <<http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3010a.pdf>>. Acesso em maio de 2011.

_____. Federal Register 40 CFR Part 258: **Criteria for Municipal Solid Waste Landfills.** EPA530-R-93-01: Washington DC, 1991.

VAN HAANDEL, A. C.; ALÉM SOBRINHO, P. Produção, composição e constituição de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Alternativas de uso de resíduos do saneamento.** Rio de Janeiro: Abes, 2006. cap. 2, p. 7-28.

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.; **Lodos Ativados.** v.4, 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2002. 428p.

VON SPERLING, M; ANDREOLI, C. V. Introdução. 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. 1, p.13-14

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgoto: características e produção. 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. 2, p.17-67.

WHO - World Health Organization, Regional Office for the Eastern Mediterranean Regional Centre for Environmental Health Activities Amman. **Integrated Guide to Sanitary Parasitology,** Jordan, 2004.

WILLIFORD, C.; CHEN, W.; SHAMMAS, N. K.; WANG, L. K. Lime Stabilization. In: WANG, L. K.; SHAMMAS, N. K.; HUNG, Y. T. **Handbook of Environmental Engineering: Biosolids Treatment Process.** Humana Press, Vol. 6. Totowa, New Jersey, 2007. p. 207-242.

WONG, J. W. C.; LI, K. L.; ZHOU, L. X.; SELVAM, A. The sorption of Cd and Zn by different soils in the presence of dissolved organic matter from sludge. **Geoderma.** v.137, p 310-317, 2007.

VOGUEL, A. I. **Química Analítica Qualitativa.** Tradução da 5ª edição: Antonio Gimeno. Revisão: Svehla, G. São Paulo: Mestre Jou, 1981.

ZANTA, M. Z.; MARINHO, M. J. M. R.; LANGE, L. C.; PESSIN, N. Resíduos Sólidos, Saúde e Meio Ambiente: Impactos Associados aos Lixiviados de Aterro Sanitário. 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: Sermograf Artes Gráficas e Ed. Ltda., 2006. 494 p.

ZHANG, H. Organic Matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**. v.31, 2-3 Ed, p. 263-275, 1994.

ZHOU, L.X., WONG, J.W.C. Effect of dissolved organic matters derived from sludge and composted sludge on soil Cu sorption. **J. Environ. Qual.** v. 30, p.878–883, 2001.

APÊNDICE A – Resultados Caracterização detalhada Lodo “in natura”

Resultados Caracterização detalhada					
Parâmetros	<i>in natura</i> (jul/10)	<i>in natura</i> (fev/11)	<i>in natura</i> (abr/11)	<i>in natura</i> (jul/11)	<i>in natura</i> (nov/11)
pH em água 1:5 (1)	7,00	6,30	-	-	-
pH em CaCl ₂ (1)	6,60	5,90	6,56	7,08	7,21
Teor de Sólidos Totais (%) (m/m)	12,68	12,59	13,94	12,43	11,87
Teor de Sólidos Fixos (%ST) (m/m) (2)	23,72	30,68	22,74	20,40	20,08
Teor de Sólidos Voláteis (%ST) (m/m) (2)	76,28	69,32	77,26	79,60	79,92
Carbono Orgânico (%) (m/m)	41,97	36,67	34,60	33,60	38,3
Matéria Orgânica (%) (m/m)	72,19	63,07	59,50	57,90	65,9
DQO (mg/g) (m/m)	1118,90	1149,40	-	-	-
Cinzas a 550°C (%) (m/m)	-	30,68	-	-	-
Nitrogênio Total (%) (m/m)	-	6,01	4,60	7,00	6,4
Nitrogênio Amoniacal (%) (m/m)	-	1,30	0,90	1,71	1,4
Fósforo (P) Total (%) (m/m)	-	1,60	2,70	2,40	2,4
Fósforo (PO ₄) (%) (m/m)	-	4,90	1,50	2,00	1,5
Alumínio (Al) (%)	0,89	1,70	1,10	0,59	0,7
Cálcio (Ca) (%)	0,90	1,00	0,95	0,85	1,25
Magnésio (Mg) (%)	0,65	0,66	0,48	0,53	0,48
Arsênio (As) (mg/kg)	< 0,1	-	6,30	4,10	0,8
Bário (Ba) (mg/kg)	117,00	-	191,00	140,00	143,0
Merúrio (Hg) (mg/kg)	0,30	-	1,20	1,60	0,7
Molibdênio (Mo) (mg/kg)	3,00	-	< 5	24,60	< 5
Níquel (Ni) (mg/kg)	14,00	-	14,00	13,00	16,0
Selênio (Se) (mg/kg)	< 0,1	-	6,30	1,00	0,8
Ferro (Fe) (mg/kg)	11500,0 0	14200,0 0	-	-	-

Resultados Caracterização detalhada

Parâmetros	<i>in natura</i> (jul/10)	<i>in natura</i> (fev/11)	<i>in natura</i> (abr/11)	<i>in natura</i> (jul/11)	<i>in natura</i> (nov/11)
Cobre (Cu) (mg/kg)	174,00	230,00	208,00	-	180,0
Zinco (Zn) (mg/kg)	550,00	560,00	515,00	484	500,0
Cádmio (Cd)(mg/kg)	< 1,0	0,90	0,70	0,50	< 0,01
Chumbo (Pb) (mg/kg)	25,00	22,00	26,50	17,70	22,0
Cromo (Cr) (mg/kg)	19,00	28,00	88,00	18,60	34,0
Umidade a 65 ± 5°C (%)	86,40	85,73	84,94	86,84	87,8
Umidade a 105 ± 5°C (%)	87,32	87,41	86,06	87,57	88,13
Densidade (g/cm ³) (1)	1,04	-	-	-	-

Resultados Caracterização detalhada - Microorganismos

Parâmetros	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Coliformes Totais (NMP/ gST)	7,9 E+05	>1,1 E+05	3,3 E+06	4,6 E+06	1,1 E+10	5,4 E+05	1,6 E+06	1,6 E+06	3,5 E+05	4,9 E+06
Coliformes Termot. (NMP/ gST)	5,0 E+04	1,10 E+05	3,3 E+06	9,3 E+05	1,1 E+09	2,2 E+05	9,2 E+05	2,2 E+05	3,5 E+05	3,3 E+06
<i>Escherichia coli</i> (NMP/ gST)	5,0 E+04	1,10 E+05	3,3 E+06	2,2 E+05	1,1 E+09	2,2 E+05	9,2 E+05	2,2 E+05	3,5 E+05	3,3 E+06
Ovos Hel- mintos (ovo viáveis/g ST)	0,337	0,002	0,011	0,008	0,01	0,01	0,005	-	-	-
<i>Salmonella</i> sp. - Mini vidas	Aus.	Aus.	-	-	-	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.	Aus.

APÊNDICE B – Coliformes totais e *Escherichia coli* para o primeiro e o segundo monitoramento.

1° MONITORAMENTO								
Data	0%		15%		30%		45%	
	C. TOTAIS ¹	E. COLI ¹	C. TOTAIS ¹	E. COLI ¹	C. TOTAIS ¹	E. COLI ¹	C. TOTAIS ¹	E. COLI ¹
20/09/2010	-	-	0,00	0,00			0,00	0,00
04/10/2010	-	-	5,73	5,44	2,84	2,24	1,76	1,76
08/11/2010	-	-	4,52	4,52	5,31	3,30	4,21	3,23
15/11/2010	-	-	4,88	4,88	6,32	2,87	4,88	2,76
29/11/2010	-	-	4,88	4,88	5,48	5,48	4,87	3,64
13/12/2010	-	-	-	-	5,46	5,08	-	-

2° MONITORAMENTO								
Data	0%		15%		30%		45%	
	C. TOTAIS ¹	E. COLI ¹	C. TOTAIS ¹	E. COLI ¹	C. TOTAIS ¹	E. COLI ¹	C. TOTAIS ¹	E. COLI ¹
07/04/2011	7,96	7,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14/04/2011	8,89	8,50	6,88	2,20	3,74	2,06	5,43	2,55
21/04/2011	9,00	7,34	6,70	0,00	6,28	0,00	5,18	1,37
28/04/2011	8,29	7,01	6,51	5,02	6,70	0,00	6,73	3,41
05/05/2011	8,05	6,35	4,95	3,04	6,66	6,66	6,45	3,87
02/06/2011	7,27	4,04	4,63	0,00	0,00	5,46	5,44	5,14
09/06/2011	7,10	4,84	4,77	3,75	4,78	4,78	4,86	3,37

APÊNDICE C – Resultados de pH para o primeiro e o segundo monitoramento.

1° MONITORAMENTO				
Data	% de Cal (em relação ao peso seco)			
	0%	15%	30%	45%
13/09/2010	-	10,30	-	11,20
20/09/2010	-	11,46	-	12,99
04/10/2010	-	10,00	12,22	12,19
11/10/2010	-	8,99	12,29	11,20
18/10/2010	-	8,73	12,15	11,03
25/10/2010	-	9,36	12,65	9,74
01/11/2010	-	9,08	11,87	9,43
08/11/2010	-	8,67	10,94	8,92
15/11/2010	-	8,90	8,99	9,15
22/11/2010	-	9,08	9,20	9,38
29/11/2010	-	8,60	8,67	8,97
06/12/2010	-	9,03	9,32	9,61
13/12/2010	-	-	9,26	-

2° MONITORAMENTO				
Data	% de Cal (em relação ao peso seco)			
	0%	15%	30%	45%
31/03/2011	6,80	12,74	13,08	13,35
07/04/2011	6,77	9,27	10,04	9,91
14/04/2011	7,41	10,08	11,82	11,92
21/04/2011	6,96	10,13	11,85	11,85
28/04/2011	6,54	9,26	10,77	12,24
05/05/2011	6,44	9,29	9,35	9,48
12/05/2011	6,50	9,30	9,28	9,52
19/05/2011	6,64	9,70	9,66	9,80
26/05/2011	-	-	-	-
02/06/2011	6,71	9,53	9,31	9,63
09/06/2011	6,23	9,31	9,48	9,62
16/06/2011	6,36	9,23	9,42	9,60

APÊNDICE D – Resultados referentes aos sólidos para o primeiro e o segundo monitoramento.

1º MONITORAMENTO												
Data	0%			15%			30%			45%		
	ST	STV	STF	ST	STV	STF	ST	STV	STF	ST	STV	STF
20/09/2010	-	-	-	24%	37%	63%	-	-	-	30%	18%	82%
18/10/2010	-	-	-	42%	39%	61%	29%	43%	57%	-	-	-
01/11/2010	-	-	-	79%	42%	58%	43%	42%	58%	93%	38%	62%
09/11/2010	-	-	-	88%	43%	57%	50%	44%	56%	91%	35%	65%
15/11/2010	-	-	-	88%	44%	56%	67%	39%	61%	91%	32%	68%
22/11/2010	-	-	-	87%	41%	59%	79%	41%	59%	91%	32%	68%
29/11/2010	-	-	-	88%	41%	59%	81%	33%	67%	93%	33%	67%
06/12/2010	-	-	-	88%	39%	61%	78%	39%	61%	92%	33%	67%
13/12/2010	-	-	-	-	-	-	84%	37%	63%	-	-	-

2º MONITORAMENTO												
Data	0%			15%			30%			45%		
	ST	STV	STF	ST	STV	STF	ST	STV	STF	ST	STV	STF
31/03/2011	12%	68%	32%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07/04/2011	15%	53%	47%	22%	45%	55%	23%	39%	61%	35%	27%	73%
14/04/2011	29%	56%	44%	32%	50%	50%	36%	40%	60%	42%	34%	66%
21/04/2011	40%	48%	52%	48%	42%	58%	38%	38%	62%	43%	32%	68%
28/04/2011	89%	50%	50%	75%	39%	61%	48%	36%	64%	45%	31%	69%
05/05/2011	90%	47%	53%	82%	38%	62%	53%	34%	66%	85%	32%	68%
12/05/2011	87%	48%	52%	89%	38%	62%	66%	34%	66%	86%	33%	67%
19/05/2011	89%	49%	51%	87%	38%	62%	72%	31%	69%	81%	29%	71%
26/05/2011	92%	50%	50%	88%	37%	63%	65%	30%	70%	87%	32%	68%
02/06/2011	89%	49%	51%	89%	38%	62%	83%	29%	71%	87%	30%	70%
09/06/2011	89%	48%	52%	88%	38%	62%	86%	31%	69%	86%	31%	69%
16/06/2011	89%	50%	50%	88%	38%	62%	89%	31%	69%	90%	29%	71%

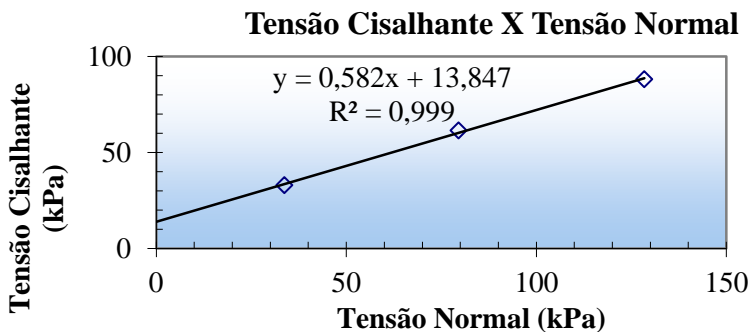
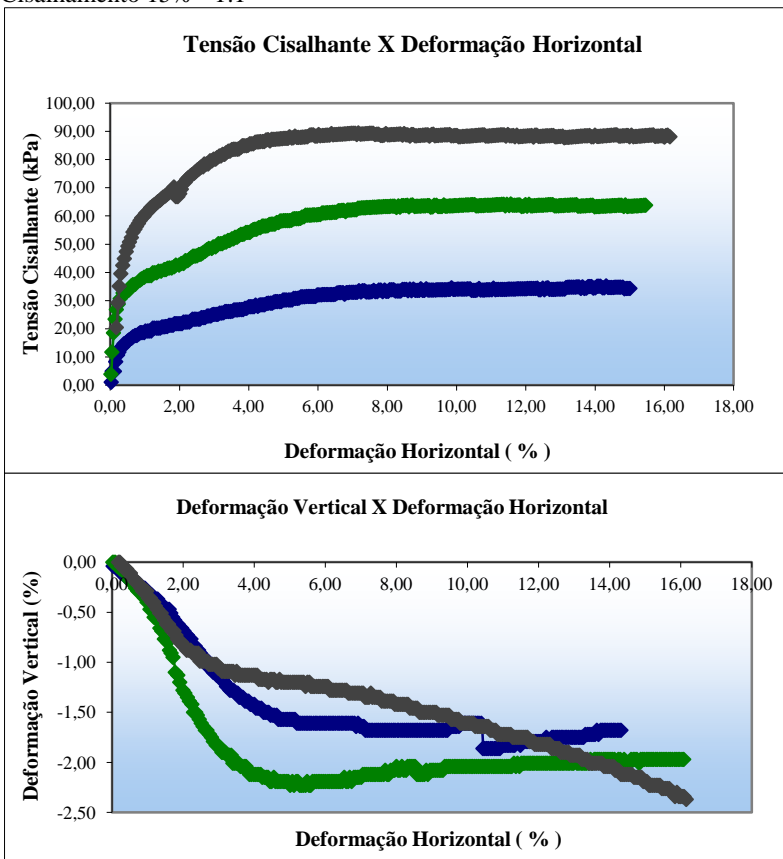
APÊNDICE E – Resultados referentes à unidade para o primeiro e o segundo monitoramento na estufa agrícola.

1° MONITORAMENTO				
Data	% de Cal (em relação ao peso seco)			
	0%	15%	30%	45%
13/09/2010	-	79%	-	70%
20/09/2010	-	76%	-	70%
18/10/2010	-	58%	71%	-
25/10/2010	-	35%	68%	20%
01/11/2010	-	21%	57%	7%
09/11/2010	-	12%	50%	9%
15/11/2010	-	12%	33%	9%
22/11/2010	-	13%	21%	9%
29/11/2010	-	12%	19%	7%
06/12/2010	-	12%	22%	8%
13/12/2010	-	-	16%	-

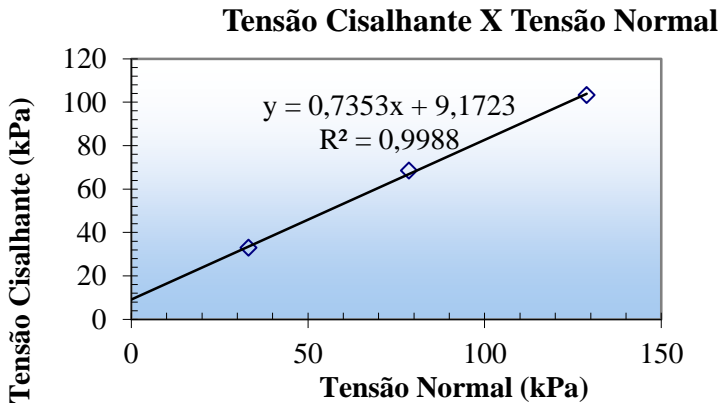
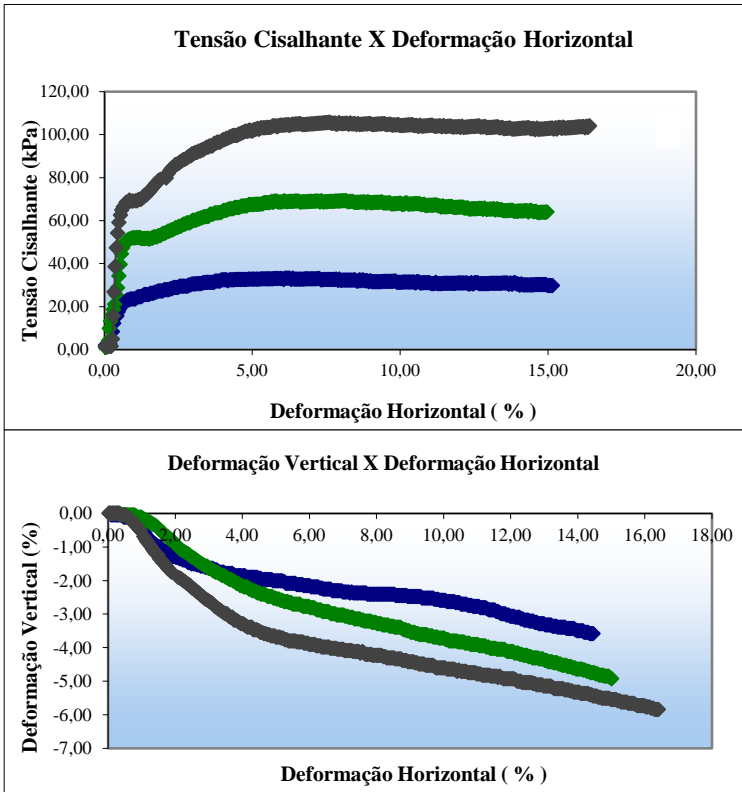
2° MONITORAMENTO				
Data	% de Cal (em relação ao peso seco)			
	0%	15%	30%	45%
31/03/2011	88%	-	-	-
07/04/2011	85%	78%	77%	65%
14/04/2011	71%	68%	64%	58%
21/04/2011	60%	52%	62%	57%
28/04/2011	11%	25%	52%	55%
05/05/2011	10%	18%	47%	15%
12/05/2011	13%	11%	34%	14%
19/05/2011	11%	13%	28%	19%
26/05/2011	8%	12%	35%	13%
02/06/2011	11%	11%	17%	13%
09/06/2011	11%	12%	14%	14%
16/06/2011	11%	12%	11%	10%

APÊNDICE F – Resultados geotécnicos do solo natural e dos diferentes traços testados.

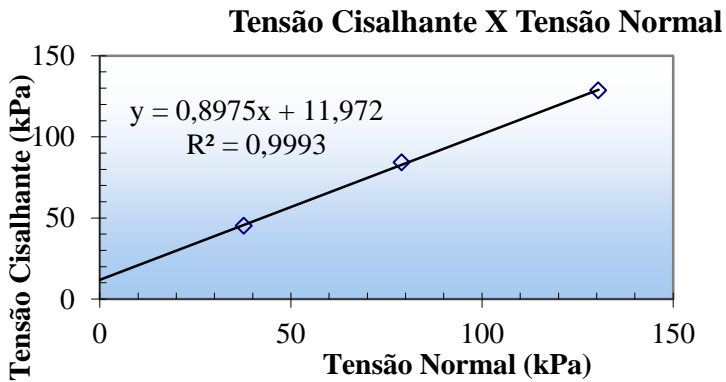
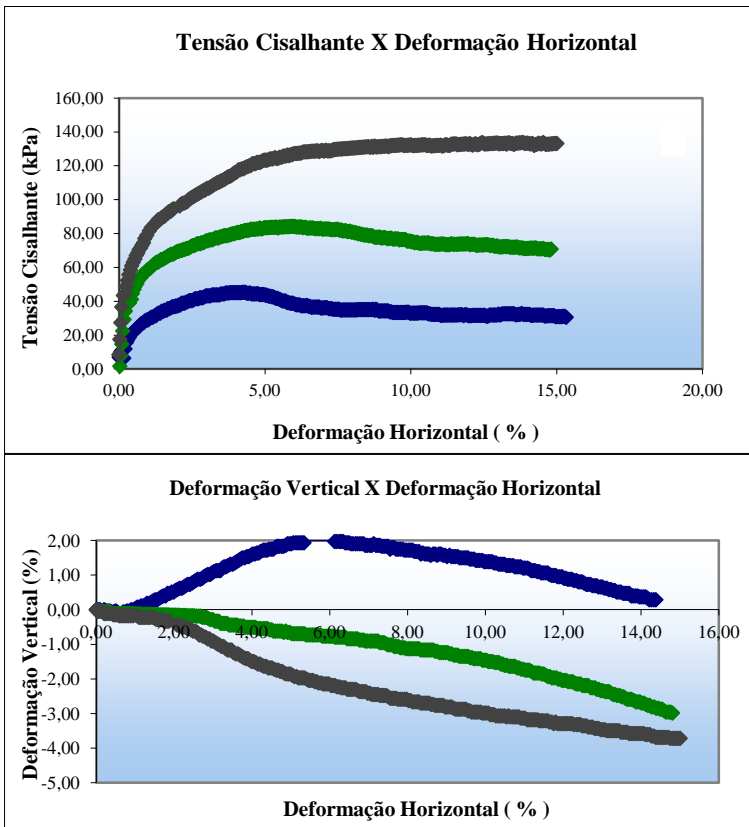
Cisalhamento 15% - 1:1



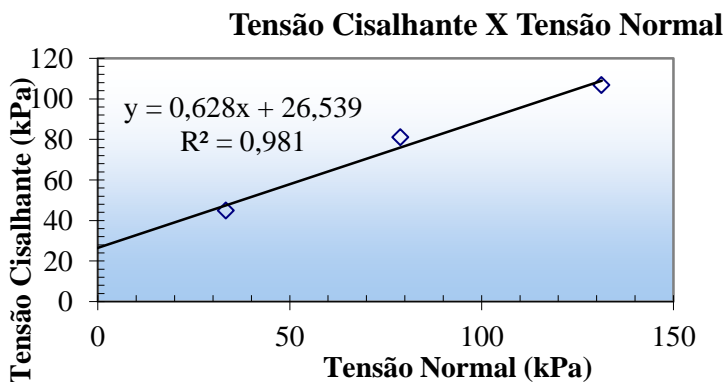
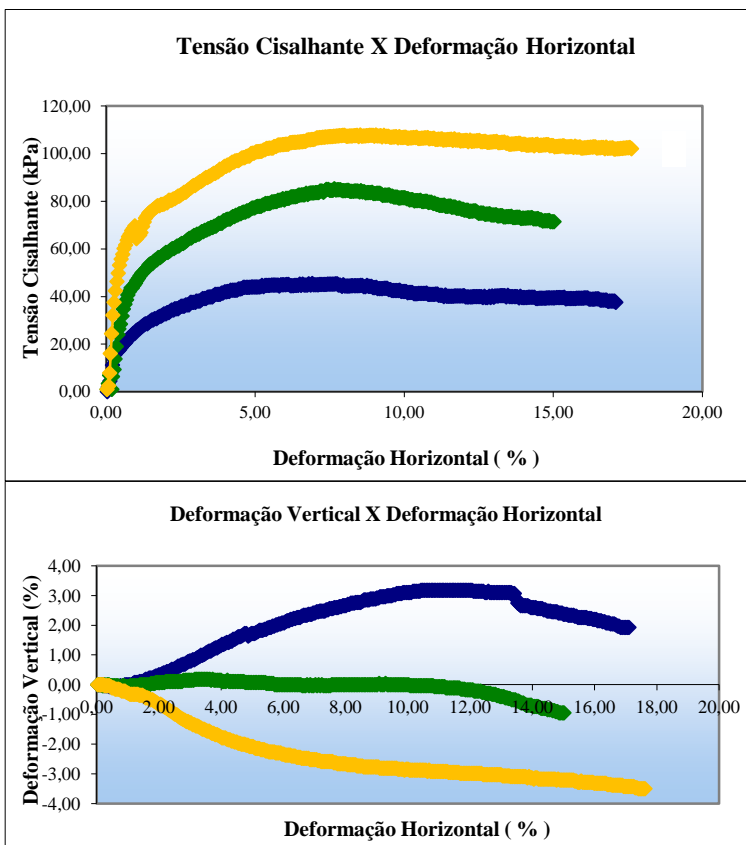
Cisalhamento 30% - 1:1



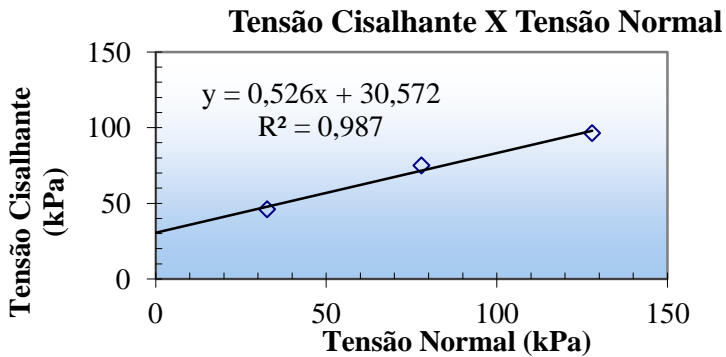
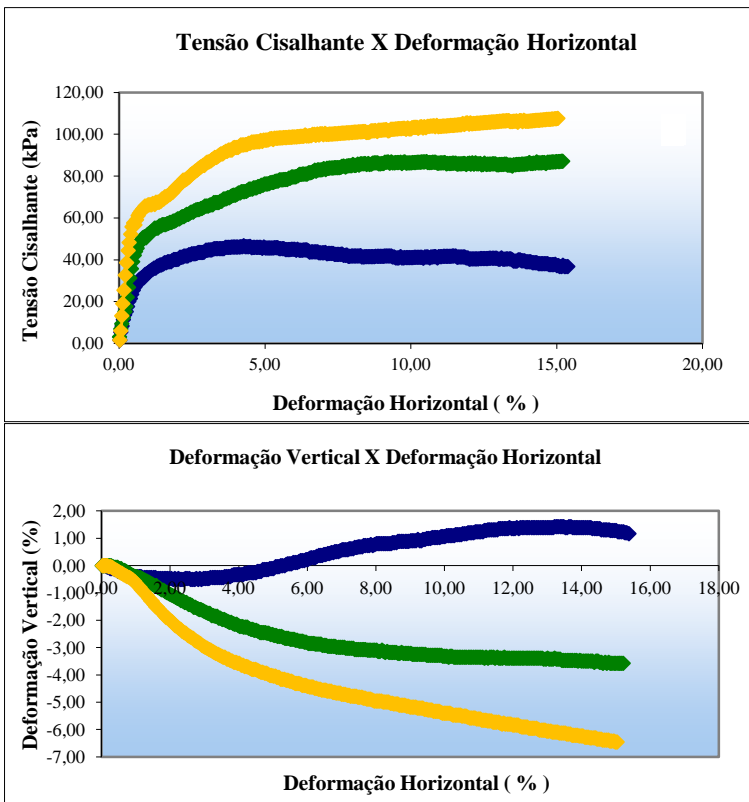
Cisalhamento 45% - 1:1



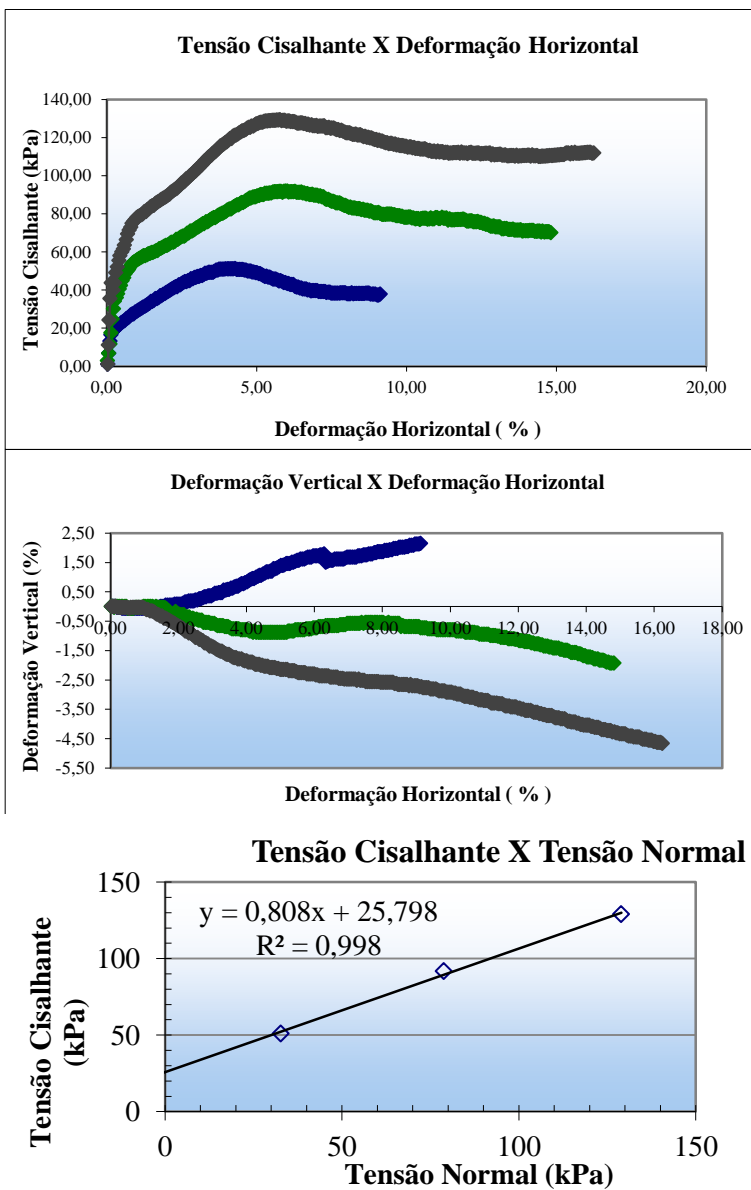
Cisalhamento 15% - 1:2,33



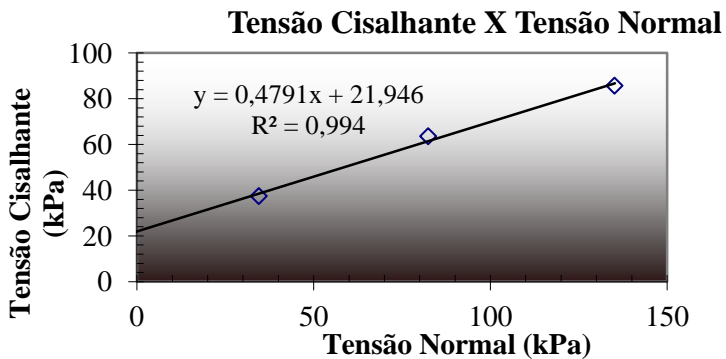
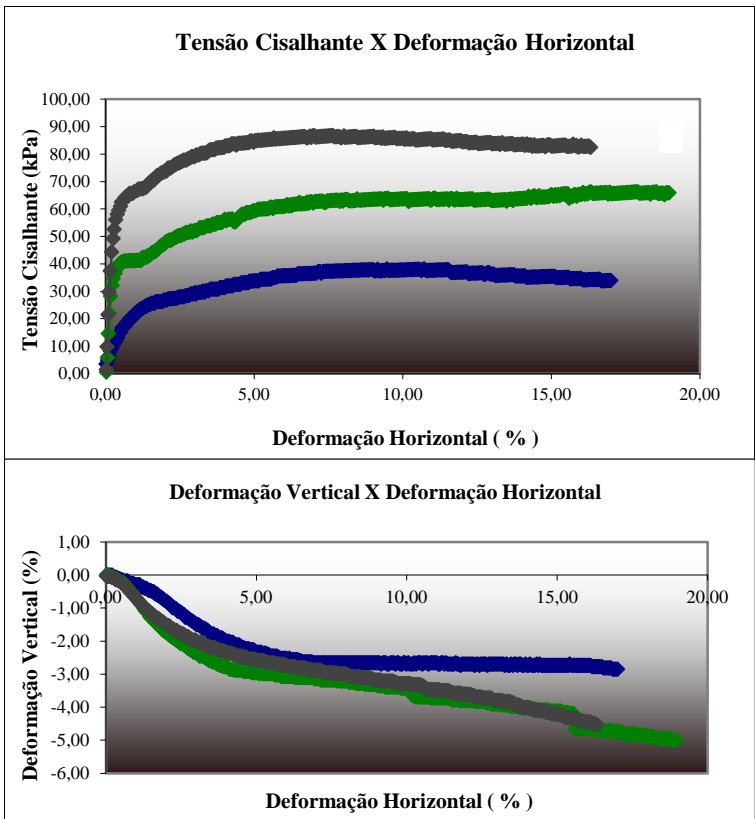
Cisalhamento 30% - 1:2,33



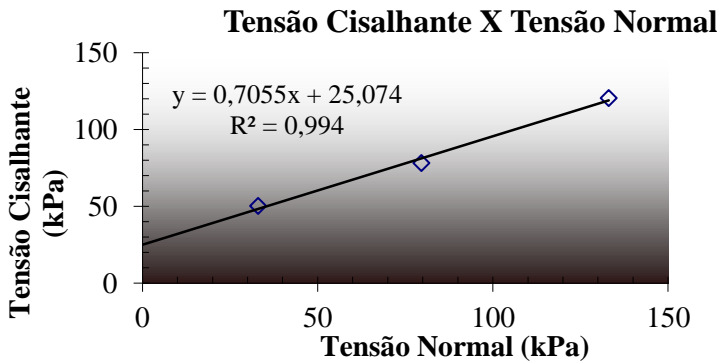
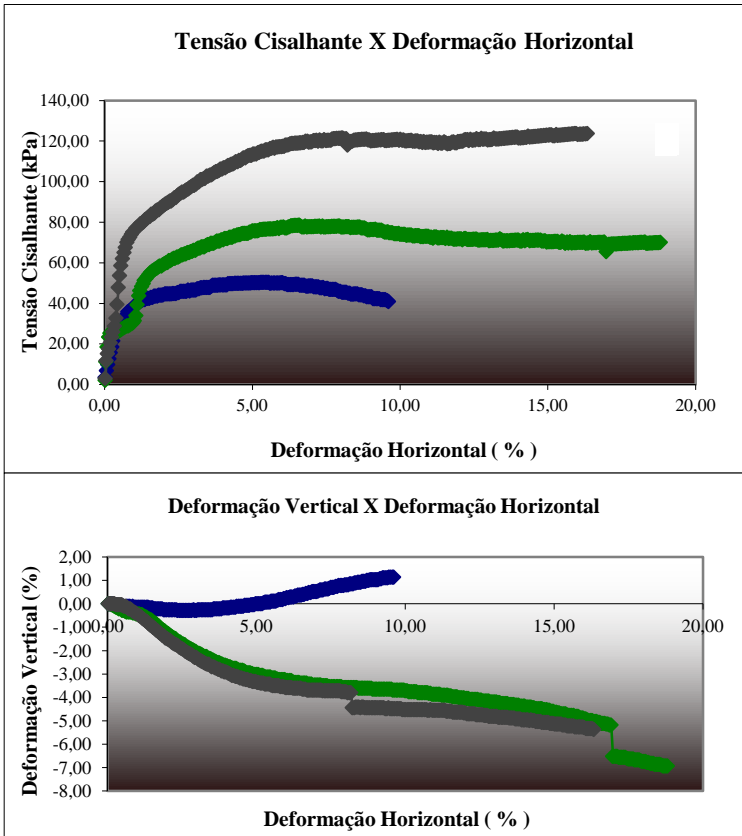
Cisalhamento 45% - 1:2,33



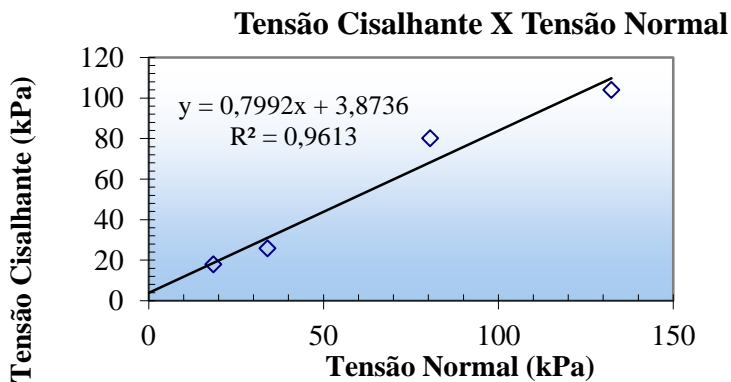
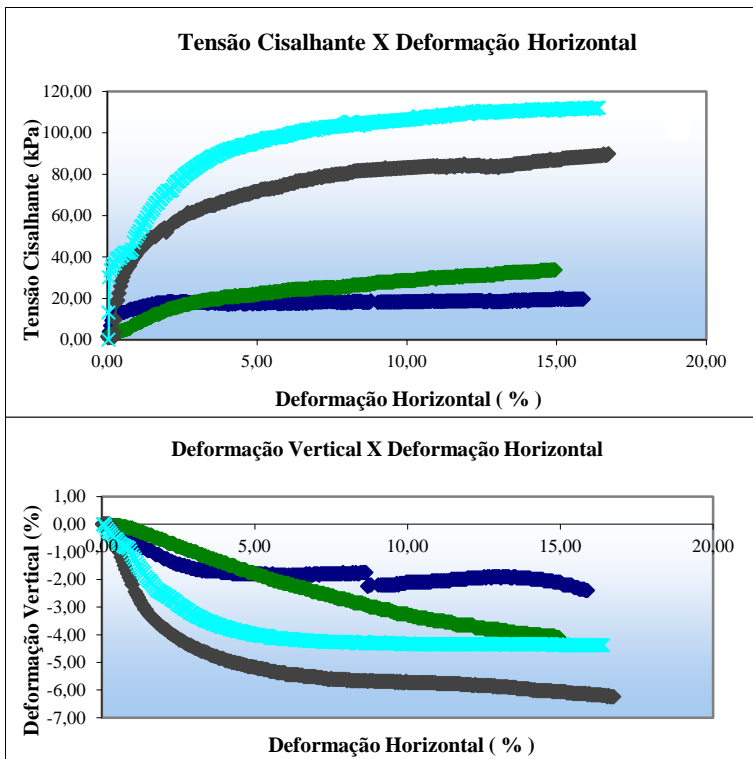
Cisalhamento 30% - 1:1



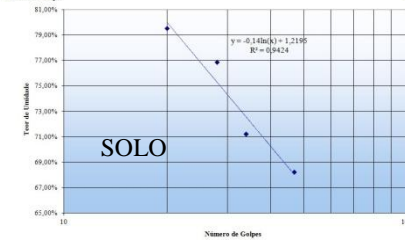
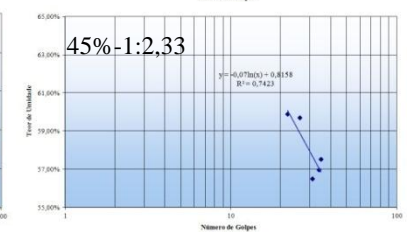
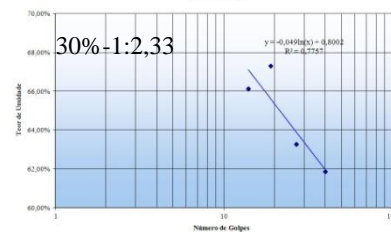
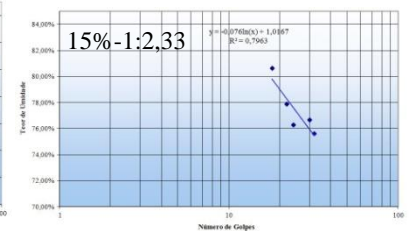
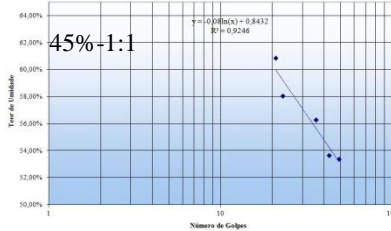
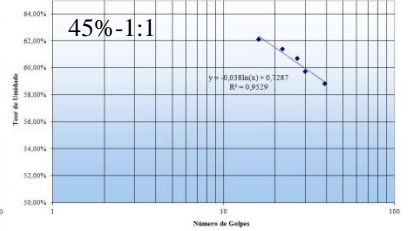
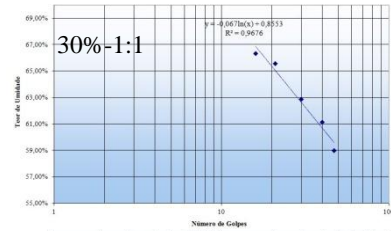
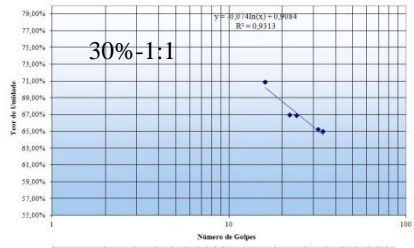
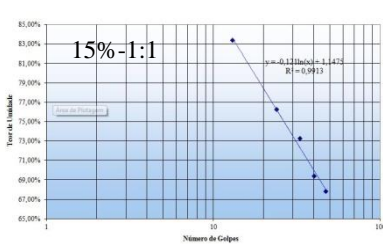
Cisalhamento 45% - 1:1



Cisalhamento Solo Natural



Limite de Liquidez



Permeabilidade

Amostra: 1:1 15%

Laboratorista: Fabio K e Regiane Sbroglia

Interessado:

Responsável: Marciano Maccarini

Data: 21/06/2011

Teor de Umidade		Observações	
Capsula N°			
Peso da Capsula (g)		Tipo do Ensaio:	Carga hidráulica variável
Peso da Capsula + Solo Úmido (g)		Líquido:	Água destilada
Peso da Capsula + Solo Seco (g)		Diâmetro da Bureta (mm):	2,00
Teor de Umidade (%)		ho (cm):	65,00
Teor de Umidade Médio (%)	48,00%	Temperatura (°C):	21

Características da Amostra		Dados de Ensaio		
		Tempo (min)	Leituras	KT (cm/s)
		0	0,1	
Diâmetro (mm):	100,00	4	1	3,06E-07
Altura (mm):	132,00	7	2	3,73E-07
Peso (g):	1585,40	11	3,1	3,78E-07
Área (cm²):	78,50	16	4	3,40E-07
MEA Úmida (g/cm²):	1,53	20	4,7	3,23E-07
MEA Seca (g/cm²):	1,03	25	5,4	2,99E-07
Índice de Vazios:	1,56	30	6,1	2,84E-07
Volume (cm³):	1036,20	35	6,6	2,65E-07
		40	7,1	2,50E-07
Tipo de Amostra: Compactada		50	8,3	2,37E-07
		60	9,1	2,18E-07
		70	10	2,07E-07
		85	11	1,90E-07
Fluxo: Topo - Base		100	12	1,78E-07
		965	20,2	3,37E-08
RESULTADOS				
Coeficiente de Permeabilidade (K) (cm/s): 2,31E-07				
Fator de Correção de Temperatura: 0,9976				
Coeficiente de Permeabilidade Médio (K) (cm/s) 2,53E-07				

Amostra: 1:1 30%

Laboratorista: Carolina Iris

Interessado:

Responsável: Marciano Maccarini

Data: 27/05/2011

Teor de Umidade			Observações	
Capsula N°	250	250	Tipo do Ensaio: Carga hidráulica variável Líquido: Água destilada Diâmetro da Bureta (mm): 8,40 ho (cm): 65,00 Temperatura (°C): 23	
Peso da Capsula (g)	15,4	15,4		
Peso da Capsula + Solo Úmido (g)	100,2	100,2		
Peso da Capsula + Solo Seco (g)	78,1	78,1		
Teor de Umidade (%)	35,25%	35,25%		
Teor de Umidade Médio (%)	35,25%			

Características da Amostra		Dados de Ensaio		
		Tempo (min)	Leituras	KT (cm/s)
		0	0	
Diâmetro (mm):	104,00	0,25	1,5	1,34E-04
Altura (mm):	132,00	0,65	3	1,04E-04
Peso (g):	1479,90	1,55	5	7,40E-05
Área (cm²):	84,91	3,45	7	4,73E-05
MEA Úmida (g/cm³):	1,32	7	9	3,05E-05
MEA Seca (g/cm³):	0,98	10,68	11	2,49E-05
Índice de Vazios:	1,71	14,68	12	1,99E-05
Volume (cm³):	1120,75	23,63	14	1,47E-05
		34,2	16	1,18E-05
Tipo de Amostra:	Compactada	47,5	16,6	8,90E-06
		63,85	19,3	7,91E-06
		79,18	21	7,06E-06
		103,3	23	6,06E-06
		120	24	5,51E-06
RESULTADOS				
Coeficiente de Permeabilidade (K) (cm/s): 3,55E-05				
Fator de Correção de Temperatura: 0,9976				
K 20 (cm/s): 3,54E-05				

Fluxo: Topo - Base

Amostra: 1:1 30%

Laboratorista: F.Krueger / D. Pichetti

Interessado: Francisco Pimentel

Responsável: Marciano Maccarini

Data: 03/11/2011

Teor de Umidade			Observações	
Capsula N°	L33	17	Tipo do Ensaio:	Carga hidráulica variável
Peso da Capsula (g)	22,4	12,4	Líquido:	Água
Peso da Capsula + Solo Úmido (g)	107,2	79,8	Diâmetro da Bureta (mm):	2,00
Peso da Capsula + Solo Seco (g)	80,4	58,9	ho (cm):	121,50
Teor de Umidade (%)	46,20%	44,90%	Temperatura (°C):	25
Teor de Umidade Médio (%)	45,60%			

Características da Amostra		Dados de Ensaio		
		Tempo (min)	Leituras	KT (cm/s)
		0	0	
		0,5	0,1	1,39E-07
		1	0,1	6,96E-08
		2	0,3	1,05E-07
		4	0,5	8,72E-08
		8	1	8,74E-08
		15	1,6	7,47E-08
		30	2,6	6,10E-08
		45	3,3	5,18E-08
		60	3,9	4,60E-08
		75	4,4	4,16E-08
		90	4,8	3,79E-08
		105	5,2	3,52E-08
		120	5,5	3,26E-08
		135	5,8	3,06E-08
		150	6	2,86E-08
RESULTADOS				
Coeficiente de Permeabilidade (K) (cm/s): 5,25E-08				
Fator de Correção de Temperatura: 0,9971				
K₂₀ (cm/s): 5,24E-08				

Fluxo: Topo - Base

Amostra: 1:1 45%
 Interessado:
 Responsável: Marciano Maccarini

Laboratorista: Fabio e Regiane

Data: 17/06/2011

Teor de Umidade		Observações		
Capsula Nº		Tipo do Ensaio: Carga hidráulica variável		
Peso da Capsula (g)		Líquido: Água destilada		
Peso da Capsula + Solo Úmido (g)		Diâmetro da Bureta (mm): 2,00		
Peso da Capsula + Solo Seco (g)		ho (cm): 96,57		
Teor de Umidade (%)		Temperatura (°C): 21		
Teor de Umidade Médio (%)	33,90%			

Características da Amostra		Dados de Ensaio		
Diâmetro (mm):	100,00	Tempo (min)	Leituras	KT (cm/s)
Altura (mm):	132,00			
Peso (g):	1720,00			
MEU Úmida (g/cm³):	1,66	0	0	
MEU Seca (g/cm³):	1,24	6	2,1	3,22E-07
Índice de Vazios:	1,14	11	4	3,38E-07
Volume (cm³):	1036,20	71	13,8	1,91E-07
		243	27,5	1,21E-07
		423	36	9,69E-08
Fluxo: Topo - Base		RESULTADOS		
		Coeficiente de Permeabilidade (K) (cm/s): 2,14E-07		
		Fator de Correção de Temperatura: 0,9976		
		1 - K 20 (cm/s): 2,13E-07		
		2 - K 20 (cm/s): 3,70E-07		
		3 - K 20 (cm/s): 2,56E-07		
		Coeficiente de Permeabilidade Médio (K) (cm/s) 2,80E-07		

Amostra: 1:1 45%
 Interessado: Francisco Pimentel
 Responsável: Marciano Maccarini

Laboratorista: F.Krueger / D. Pichetti

Data: 07/11/2011

Teor de Umidade			Observações	
Capsula Nº	66	801		
Peso da Capsula (g)	22,2	20,3	Tipo do Ensaio:	Carga hidráulica variável
Peso da Capsula + Solo Úmido (g)	102	90,8	Líquido:	Água
Peso da Capsula + Solo Seco (g)	79,8	71,1	Diâmetro da Bureta (mm):	2,00
Teor de Umidade (%)	38,50%	38,70%	ho (cm):	46,00
Teor de Umidade Médio (%)	38,66%		Temperatura (°C):	25

Características da Amostra		Dados de Ensaio		
		Tempo (min)	Leituras	KT (cm/s)
		0	0	
		0,25	3	2,28E-05
Diâmetro (mm):	100,00	0,5	5	1,95E-05
Altura (mm):	127,00	1	8,8	1,80E-05
Peso (g):	1430,00	2	14,5	1,60E-05
Área (cm²):	78,50	3	19,5	1,55E-05
MEA Úmida (g/cm³):	1,43	4	23,3	1,49E-05
MEA Seca (g/cm³):	1,03	6	29,3	1,43E-05
Índice de Vazios:	1,56	8	33,6	1,39E-05
Volume (cm³):	996,95			
Tipo de Amostra: Compactada				
Fluxo: Topo - Base				

RESULTADOS

Coefficiente de Permeabilidade (K) (cm/s): 1,69E-05

Fator de Correção de Temperatura: 0,9971

K 20 (cm/s): 1,68E-05

Amostra: 1,2,33 15%
 Interessado:
 Responsável: Marciano Maccarini

Laboratorista: Fabio K. e Regiane Sbroglia

Data: 17/06/2011

Teor de Umidade		Observações
Capsula Nº		
Peso da Capsula (g)		Tipo do Ensaio: Carga hidráulica variável
Peso da Capsula + Solo Úmido (g)		Líquido: Água destilada
Peso da Capsula + Solo Seco (g)		Diâmetro da Bureta (mm): 2,00
Teor de Umidade (%)		ho (cm): 65,00
Teor de Umidade Médio (%)	56,50%	Temperatura (°C): 20

Características da Amostra		Dados de Ensaio		
		Tempo (min)	Leituras	KT (cm/s)
		0	8,7	
		3	10,2	6,84E-07
		10	12,5	5,30E-07
		17	15,5	5,71E-07
		23	16,8	5,09E-07
		31	18,5	4,63E-07
		38	20	4,42E-07
		47	21,5	4,10E-07
		54	22,5	3,88E-07
		68	24	3,47E-07
		80	25,5	3,29E-07
		102	27,6	2,96E-07
		135	30	2,59E-07
RESULTADOS				
Coeficiente de Permeabilidade (K) (cm/s): 4,36E-07				
Fator de Correção de Temperatura: 0,9976				
K 20 (cm/s): 4,35E-07				

Diâmetro (mm): 100,00
 Altura (mm): 132,00
 Peso (g): 1467,20
 Área (cm²): 78,50
 MEA Úmida (g/cm²): 1,42
MEA Seca (g/cm²): 0,90
 Índice de Vazios: 1,93
 Volume (cm³): 1036,20

Tipo de Amostra: Compactada
 Fluxo: Topo - Base

Amostra: 1:2,33 30%

Laboratorista: Fabio K e Regiane Sbroglia

Interessado:

Responsável: Marciano Maccarini

Data: 11/07/2011

Teor de Umidade		Observações	
Capsula N°		Tipo do Ensaio:	Carga hidráulica variável
Peso da Capsula (g)		Líquido:	Água destilada
Peso da Capsula + Solo Úmido (g)		Diâmetro da Bureta (mm):	2,00
Peso da Capsula + Solo Seco (g)		ho (cm):	35,00
Teor de Umidade (%)		Temperatura (°C):	21
Teor de Umidade Médio (%)	39,00%		

Características da Amostra		Dados de Ensaio		
		Tempo (min)	Leituras	KT (cm/s)
		0	0	
Diâmetro (mm):	100,00	1,92	5	7,06E-06
Altura (mm):	132,00	4,13	10	7,16E-06
Peso (g):	1390,00	9,75	18	6,51E-06
Área (cm²):	78,50	13,83	22,5	6,54E-06
MEA Úmida (g/cm³):	1,34	17,18	25,5	6,67E-06
MEA Seca (g/cm³):	0,97	19,92	27	6,51E-06
Índice de Vazios:	1,75	25,08	30	6,82E-06
Volume (cm³):	1036,20			
Tipo de Amostra: Compactada				
Fluxo: Topo - Base				

RESULTADOS

Coeficiente de Permeabilidade (K) (cm/s): 6,75E-06

Fator de Correção de Temperatura: 0,9976

1- K **20** (cm/s): 6,74E-062- K **20** (cm/s): 8,69E-063- K **20** (cm/s): 9,57E-06Coeficiente de Permeabilidade Médio K) (cm/s): **8,33E-06**

Amostra: 1 - 2,33 45%

Laboratorista: Fabio e Regiane

Interessado:

Responsável: Marciano Maccarini

Data: 07/07/2011

Teor de Umidade		Observações	
Capsula N°			
Peso da Capsula (g)		Tipo do Ensaio:	Carga hidráulica constante
Peso da Capsula + Solo Úmido (g)		Líquido:	Água destilada
Peso da Capsula + Solo Seco (g)		Dif. Nivel Médio(cm):	14,20
Teor de Umidade (%)		ho (cm):	12,60
Teor de Umidade Médio (%)	37,40%	Temperatura (°C):	21

Características da Amostra		Dados de Ensaio		
		Tempo (min)	Leituras (mL)	KT (cm/s)
		0	0	
		11,12	100	1,69E-03
Diâmetro (mm):	100,00			
Altura (mm):	132,00			
Peso (g):	1204,10			
Área (cm²):	78,54			
MEA Úmida (g/cm³):	1,16			
MEA Seca (g/cm³):	0,85			
Índice de Vazios:	2,13			
Volume (cm³):	1036,73			
Vazão (cm³/s)	0,15			
Densidade dos Grãos (g/cm³)	2,65			
Fluxo: Topo - Base				

RESULTADOS

Coeficiente de Permeabilidade (K) (cm/s): 1,69E-03

Fator de Correção de Temperatura: 0,9980

K₂₀ (cm/s): 1,69E-03

Amostra: Solo natural
 Interessado: Francisco Pimentel
 Responsável: Marciano Maccarini

Laboratorista: F.Krueger / D. Pichetti

Data: 17/11/2011

Teor de Umidade			Observações	
Capsula N°	804	28	Tipo do Ensaio: Carga hidráulica variável Líquido: Água Diâmetro da Bureta (mm): 2,00 ho (cm): 123,00 Temperatura (°C): 23	
Peso da Capsula (g)	20,9	15,1		
Peso da Capsula + Solo Úmido (g)	93,1	74,3		
Peso da Capsula + Solo Seco (g)	77,1	62,1		
Teor de Umidade (%)	28,47%	25,96%		
Teor de Umidade Médio (%)	27,21%			

Características da Amostra		Dados de Ensaio		
		Tempo (min)	Leituras	KT (cm/s)
		0	0	
		1	0,3	2,07E-07
Diâmetro (mm): 100,00		2	0,5	1,72E-07
Altura (mm): 127,00		4	0,8	1,38E-07
Peso (g): 1880,80		8	1,2	1,04E-07
Área (cm²): 78,50		15	1,5	6,92E-08
MEA Úmida (g/cm³): 1,89		30	2	4,62E-08
MEA Seca (g/cm³): 1,48		45	2,3	3,55E-08
Índice de Vazios: 0,79		60	2,4	2,78E-08
Volume (cm³): 996,95		75	2,5	2,32E-08
Tipo de Amostra: Compactada		90	2,6	2,01E-08
		105	3	1,99E-08
		120	3,1	1,80E-08
		135	3,2	1,65E-08
		150	3,3	1,53E-08
RESULTADOS				
Coeficiente de Permeabilidade (K) (cm/s): 9,99E-08				
Fator de Correção de Temperatura: 0,931				
K 20 (cm/s): 9,30E-08				

Fluxo: Topo - Base

Limite de Plasticidade

15% - 1:1

Cápsula (N°)	51	207	261	279	262
Peso da Cápsula (g)	7,52	7,14	7,30	6,99	6,99
Amostra + Cáp. + Água (g)	12,11	15,35	17,01	16,75	17,00
Amostra + Cáp. (g)	10,69	12,76	13,96	13,68	13,96
Teor de umidade	44,79%	46,09%	45,80%	45,89%	43,62%

30% - 1:1

Cápsula (N°)	79	A09	1008	18	160
Peso da Cápsula (g)	7,97	7,76	12,48	7,65	8,70
Amostra + Cáp. + Água (g)	8,93	8,83	13,90	9,36	9,96
Amostra + Cáp. (g)	8,70	8,53	13,51	8,87	9,61
Teor de umidade	31,51%	38,96%	37,86%	40,16%	38,46%

45% - 1:1

Cápsula (N°)	260	60	58	1008	261
Peso da Cápsula (g)	6,27	7,94	5,41	12,49	7,31
Amostra + Cáp. + Água (g)	16,06	17,28	14,13	21,35	17,08
Amostra + Cáp. (g)	13,30	14,66	11,71	18,90	14,41
Teor de umidade	39,26%	38,99%	38,41%	38,22%	37,61%

15% - 1:2,33

Cápsula (N°)	14	304	17	32	314
Peso da Cápsula (g)	7,74	6,33	8,20	7,93	6,44
Amostra + Cáp. + Água (g)	13,67	9,49	14,77	11,28	10,56
Amostra + Cáp. (g)	12,14	8,68	13,07	10,42	9,48
Teor de umidade	34,77%	34,47%	34,91%	34,54%	35,53%

30% - 1:2,33

Cápsula (N°)	60	85	47	41	7
Peso da Cápsula (g)	7,92	7,65	7,67	7,95	7,65
Amostra + Cáp. + Água (g)	13,05	14,23	11,56	12,06	13,43
Amostra + Cáp. (g)	11,26	11,95	10,26	10,72	11,55
Teor de umidade	53,59%	53,02%	50,19%	48,38%	48,21%

45% - 1:2,33

Cápsula (N°)	22	A09	160	260	292	44	18
Peso da Cápsula (g)	7,87	7,76	8,72	6,27	6,75	7,96	7,66
Amostra + Cáp. + Água (g)	14,98	13,99	14,88	11,76	12,32	15,39	17,10
Amostra + Cáp. (g)	12,97	12,23	13,15	10,21	10,75	13,28	14,45
Teor de umidade	39,41%	39,37%	39,05%	39,34%	39,25%	39,66%	39,03%

30% - 1:1 B

Cápsula (N°)	259	13	4	262	Be09
Peso da Cápsula (g)	6,75	8,03	7,83	7,02	8,12
Amostra + Cáp. + Água (g)	7,66	8,99	8,63	8,09	9,64
Amostra + Cáp. (g)	7,37	8,69	8,39	7,74	9,15
Teor de umidade	46,77%	45,45%	42,86%	48,61%	47,57%

45% - 1:1 B

Cápsula (N°)	1	269	272	21	83
Peso da Cápsula (g)	7,94	6,33	7,27	7,67	8,04
Amostra + Cáp. + Água (g)	8,99	7,45	8,22	8,61	9,07
Amostra + Cáp. (g)	8,67	7,10	7,92	8,33	8,76
Teor de umidade	43,84%	45,45%	46,15%	42,42%	43,06%

Solo Natural

Cápsula (N°)	A05	314	37	77	298
Peso da Cápsula (g)	7,54	6,44	5,43	7,44	6,93
Amostra + Cáp. + Água (g)	8,88	7,41	6,77	8,93	8,29
Amostra + Cáp. (g)	8,57	7,19	6,46	8,60	7,97
Teor de umidade	30,10%	29,33%	30,10%	28,45%	30,77%

..

APÊNDICE G – Dados do lodo anaeróbico inoculado:

Origem do Lodo: Reator anaeróbico de manta de lodo com fluxo ascendente (UASB) da Estação de Tratamento de Esgoto da Barra da Lagoa, operada pela Companhia Catarinense de Água e Saneamento (CASAN).

Sólidos Totais (ST) = 12,37 gST/L

Sólidos Fixos (SF) = 4,87 g SF/L

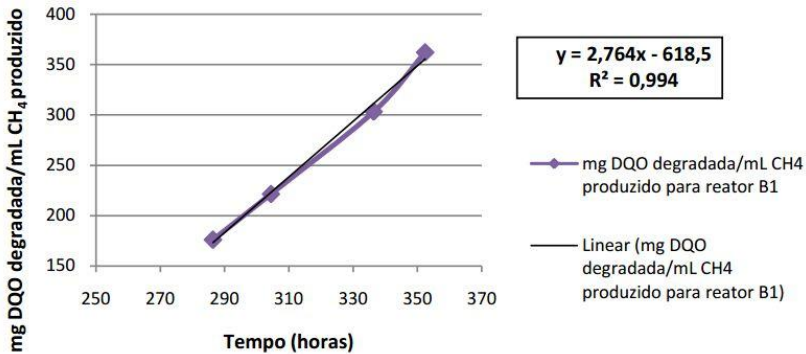
Sólidos Voláteis (SV) = 7,5 g SV/L

DQO = 14,2 g/L de O₂

Atividade Metanogênica Específica:

AME = 49,85 mg DQO-CH₄/g SSV.d

Curva de degradação da DQO em função do volume de CH₄ produzido, desenvolvida no teste AME do inóculo anaeróbico:



APÊNDICE H – Dados do piloto experimental (valores em mg/L)

Data coleta	pH			DQO			DBO			NH3		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
27/06/2011	6,71	7,17	7,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-
04/07/2011	6,60	7,50	7,16	429,3	3867,1	1628,1	64	166	162	2,57	72,10	44,37
11/07/2011	6,72	7,26	6,83	347,5	3246,2	214,6	63	97	101	5,35	17,75	33,73
18/07/2011	6,51	7,38	7,06	454,4	2775,3	177,7	54	147	32	1,93	64,47	69,30
25/07/2011	6,48	7,38	7,02	735,5	1847,5	1078,5	79	64	75	0,73	26,20	58,90
01/08/2011	6,60	7,59	7,13	147,0	994,5	986,8	56	74	173	1,83	11,55	66,13
08/08/2011	6,10	6,98	6,52	397,9	451,5	805,0	34	46	187	5,00	6,73	56,53
15/08/2011	6,57	7,55	6,99	96,1	220,2	696,5	23	-	175	0,00	0,00	53,43
22/08/2011	6,58	7,90	7,09	38,1	230,5	845,7	-	-	100	3,40	7,67	57,43
29/08/2011	6,51	7,70	7,20	341,6	529,6	776,5	2	16	54	5,10	9,60	66,53
05/09/2011	6,65	7,97	7,12	448,2	900,4	1049,6	-	-	-	2,90	9,60	37,40
12/09/2011	6,70	7,84	7,10	462,5	803,7	933,0	26	32	-	9,60	10,93	32,80
19/09/2011	6,44	7,77	7,01	369,7	451,2	345,1	-	42	50	1,13	3,80	10,40
26/09/2011	6,69	7,63	6,97	248,7	584,8	827,8	54	24	70	3,57	5,87	24,37
03/10/2011	6,58	7,83	6,85	618,4	566,7	309,7	32	11	40	1,08	3,56	7,52
10/10/2011	6,69	7,80	6,75	451,9	592,7	213,0	20	32	82	1,42	2,73	5,13
17/10/2011	6,46	7,35	6,83	224,1	419,3	581,9	51	31	54	2,71	6,58	6,73
24/10/2011	6,53	7,31	6,94	133,7	422,1	575,7	15	20	2	2,63	7,35	12,13
31/10/2011	6,81	7,53	6,92	225,0	306,9	305,0	-	-	-	3,63	0,12	4,33
07/11/2011	6,69	8,00	6,92	189,2	369,5	542,6	-	-	-	2,30	2,61	8,16
14/11/2011	6,72	7,89	6,95	153,4	432,1	780,2	50	26	82	0,98	5,10	11,98
21/11/2011	6,80	7,31	6,94	193,0	565,3	587,1	54	24	70	2,60	1,79	1,96
28/11/2011	6,72	7,89	6,77	188,8	334,1	404,8	-	-	-	1,21	5,23	4,38

Data coleta	Fósforo			Alcalinidade			NO3			NO2		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
27/06/2011	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
04/07/2011	53,50	142,00	157,67	14,80	87,05	61,50	39,54	44,22	1,61	0,14	6,00	0,64
11/07/2011	52,00	146,50	73,00	17,40	38,60	42,90	32,80	90,85	70,10	0,03	45,63	5,77
18/07/2011	34,50	110,67	46,33	16,85	71,25	60,65	12,24	0,48	0,56	2,99	9,40	0,30
25/07/2011	13,80	76,13	46,33	14,60	105,85	61,55	3,00	0,00	0,00	0,12	30,50	0,05
01/08/2011	10,00	60,00	29,33	13,55	149,25	73,15	19,66	54,65	33,80	0,44	1,93	0,44
08/08/2011	53,33	45,33	36,67	11,95	146,00	80,25	44,95	93,60	80,70	0,23	4,11	3,28
15/08/2011	11,50	23,60	16,77	14,60	105,35	61,55	81,20	113,55	32,40	0,02	0,18	0,27
22/08/2011	9,63	27,70	17,57	27,05	153,80	97,60	64,93	117,30	24,33	0,01	0,37	0,18
29/08/2011	7,20	30,83	25,40	16,90	156,30	78,55	60,35	139,90	34,25	0,03	0,05	0,07
05/09/2011	12,75	27,90	20,07	19,40	129,75	88,85	46,85	77,35	44,45	0,00	0,03	0,58
12/09/2011	3,35	11,47	14,50	22,00	64,70	39,25	26,37	81,65	26,03	0,00	0,00	0,00
19/09/2011	6,43	10,97	7,40	19,10	82,10	56,75	41,53	29,70	15,90	0,00	0,00	0,42
26/09/2011	9,17	20,77	11,87	26,90	84,40	56,95	29,93	38,67	39,37	0,09	0,07	0,82
03/10/2011	0,00	9,57	6,23	25,30	82,95	48,85	21,23	2,19	22,69	0,06	0,01	0,65
10/10/2011	9,13	18,00	19,13	25,10	84,70	97,45	24,75	50,85	27,65	0,15	0,02	0,86
17/10/2011	11,81	18,42	19,48	22,55	70,55	44,75	35,50	3,81	60,72	0,04	0,06	0,73
24/10/2011	9,71	25,06	20,54	22,80	96,50	57,40	24,88	33,75	36,77	0,06	1,15	2,48
31/10/2011	7,85	25,38	23,33	23,30	99,30	52,50	41,04	67,42	76,02	0,03	0,12	0,21
07/11/2011	1,15	3,63	2,52	22,98	97,53	50,65	-	-	-	-	-	-
14/11/2011	-	-	-	22,65	95,75	48,80	56,96	75,31	96,04	0,16	0,13	0,79
21/11/2011	6,50	32,44	27,81	20,55	98,10	44,65	86,63	105,69	108,08	0,01	0,16	0,27
28/11/2011	9,19	19,46	16,17	16,90	87,75	40,90	31,77	37,23	43,40	0,00	0,37	0,09

Data coleta	Ni			Pb			Cu			Zn		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
18/jul	0,05	0,12	0,30	0,00	0,00	0,01	0,00	0,61	0,09	0,00	0,45	0,14
18/jul	0,06	0,15	0,33	0,00	0,00	0,02	0,00	0,61	0,09	0,24	0,32	0,17
18/jul	0,10	0,17	0,35	0,00	0,01	0,02	0,03	0,57	0,10	0,13	0,33	0,20
08/ago	0,22	0,47	0,43	0,02	0,03	0,05	0,00	0,20	0,03	0,20	-	0,32
08/ago	0,27	0,48	0,43	0,03	0,03	0,05	0,00	0,26	0,01	0,19	-	0,33
08/ago	0,29	0,49	0,44	0,02	0,03	0,06	0,00	0,18	0,05	0,17	-	0,43
22/ago	-	-	-	0,02	0,04	0,08	0,08	0,12	0,01	0,10	0,19	0,11
22/ago	-	-	-	0,03	0,06	0,09	0,10	0,10	0,02	0,10	0,18	0,12
22/ago	-	-	-	0,04	0,06	0,09	0,11	0,01	0,02	0,16	0,09	0,17
05/set	-	-	-	0,09	0,11	0,12	0,00	0,13	0,02	0,14	0,39	0,20
05/set	-	-	-	0,10	0,10	0,13	0,00	0,16	0,03	0,17	0,66	0,23
05/set	-	-	-	-	0,11	0,13	-	0,12	0,03	-	0,40	0,19
19/set	0,10	0,30	0,54	0,01	0,01	0,03	0,00	0,13	0,01	0,06	0,14	0,09
19/set	0,15	0,35	0,60	0,02	0,02	0,02	-	0,07	0,03	0,06	0,11	0,09
19/set	0,22	0,44	0,66	0,01	0,02	0,03	-	0,07	0,02	0,06	0,11	0,12
10/out	0,65	0,90	1,11	0,04	0,05	0,06	0,02	0,10	0,06	0,13	0,35	0,13
10/out	0,74	0,97	1,16	0,04	0,05	0,05	0,02	0,13	0,07	0,12	0,37	0,16
10/out	0,79	1,07	1,20	0,05	0,05	0,06	0,01	0,10	0,05	0,12	0,33	0,12
17/out	-	-	-	-	0,00	0,00	0,04	0,11	0,10	0,14	0,21	0,15
17/out	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,04	0,11	0,11	0,14	0,22	0,15
17/out	-	-	-	0,00	0,00	0,01	0,03	0,11	0,09	0,12	0,23	0,15

APÊNDICE I – Precipitação diária no período monitorado do piloto:

