

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Lucy Anne Cardoso Lobão Gutierrez

**INFLUÊNCIA DA CORBETURA E DOS SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS
NO DESAGUAMENTO DE LODO EM LEITOS DE SECAGEM
INSTALADOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM**

Belém
2003

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Lucy Anne Cardoso Lobão Gutierrez

**INFLUÊNCIA DA CORBETURA E DOS SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS
NO DESAGUAMENTO DE LODO EM LEITOS DE SECAGEM
INSTALADOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM**

Dissertação de Mestrado apresentada para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.
Área de Concentração: Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental.

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira

Belém
2003



**INFLUÊNCIA DA COBERTURA E DOS SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS
NO DESAGUAMENTO DE LODO EM LEITOS DE SECAGEM
INSTALADOS NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM.**

AUTORA:

LUCY ANNE CARDOSO LOBÃO GUTIERREZ

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO CURSO DE
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL DO CENTRO
TECNOLÓGICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA
DE CONCENTRAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANE-
AMENTO AMBIENTAL.

APROVADA EM: 19 / 05 / 2003

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOSÉ ALMIR RODRIGUES PEREIRA
Orientador

Prof. Dr. VALTER LUCIO DE PÁDUA
Membro

Profª. Dra. LUCIA BECKMANN DE CASTRO MENESES
Membro

Prof. Dr. TONY CARLOS DIAS DA COSTA
Membro

Visto:

Profª. Dra. ANA ROSA BAGANHA BARP
Coordenadora do PPGEC / CT / UFPA

Aos meus pais e ao
meu marido

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e perseverança para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Luiz e Lea, que desde que nasci sempre guiaram meus passos na busca de futuro e me ensinaram a jamais desistir de meus sonhos, incentivando-me todos os dias de minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira, pelo imensurável apoio científico, por ter cumprido a sua função de mestre de forma louvável, estando sempre presente com paciência e reforçando meus conhecimentos de forma notável.

Às minhas irmãs, Laura e Ludmila, que estiveram sempre dispostas a me ajudar a qualquer hora do dia e da noite.

Às minhas tias, Nilce, Nilde e Clarice, que mesmo distantes sempre rezaram e torceram pelo desempenho deste trabalho.

Às amigas Luiza e Valéria, pelos momentos de alegria e companheirismo.

Aos colegas, Jaqueline, Ellem e Valdinei, pela colaboração para a realização deste trabalho.

Rose, Luiza, Amanda, Rubens, Rodrigo, Willian, Elizângela e Matheus bolsistas do Laboratório de Controle de Resíduos (Laboratório de Hidráulica), pela ajuda nas fases de experiência.

Meu agradecimento muito especial ao meu marido Antônio, por sua paciência diária e principalmente pela ajuda nas horas de estudo e compreensão nos momentos de cansaço. Por ter me acompanhado até a UFPA nos finais de semana e feriados e por ter feito de seu companheirismo maior fonte de força para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

E também agradecimento a todas as pessoas, que de uma forma ou de outra ajudaram na realização deste trabalho.

SUMÁRIO	p.
LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE FOTOGRAFIAS	ii
LISTA DE QUADROS.....	iv
LISTA DE GRÁFICOS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1. Tratamento dos esgotos.....	5
3.1.1. Tratamento preliminar	7
3.1.2. Tratamento primário	8
3.1.3. Tratamento secundário.....	9
3.1.4. Tratamento terciário.....	10
3.2. Tanque séptico	11
3.3. Lodo de esgoto	20
3.4. Gerenciamento do lodo de esgoto	25
3.5. Desaguamento do lodo	28
3.5.1. Operações mecanizadas de desaguamento.....	30
3.5.2. Sistemas naturais.....	36
3.6. Leitos de secagem	37
3.6.1. Partes constituintes dos leitos de secagem.....	39
3.6.2. Projetos de leitos de secagem	44
3.7. Gerenciamento do lodo de tanques sépticos no Município de Belém.....	49
4. INSTALAÇÕES E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	54
4.1. Descrição do sistema experimental	54
4.2. Seleção do meio filtrante.....	61
4.3. Monitoramento dos ciclos de desaguamento	69
4.3.1. Lodo estudado	69
4.3.2. Líquido drenado	71
4.3.3. Lodo em secagem	72
4.3.4. Determinações Laboratoriais	73
5. RESULTADOS	75
5.1. Primeiro ciclo de secagem	76
5.2. Segundo ciclo de secagem	98
5.3. discussão dos resultados.....	129
5.3.1. Primeiro ciclo de desaguamento	129

5.3.2. Segundo ciclo de desaguamento	131
5.4. Caracterização do líquido drenado	133
6. CONCLUSÕES.....	144
7. RECOMENDAÇÕES.....	146
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Alternativas de tratamento e disposição final para o efluente líquido de tanques sépticos.....	15
Figura 2 - Alternativas de tratamento e disposição final de lodo de tanques sépticos.....	19
Figura 3 - Relação entre o volume de uma batelada de lodo e a sua fração de sólidos ou umidade	28
Figura 4 - Alternativas de disposição final e processos de desaguamento	29
Figura 5 – Pontos de entrada do lodo e saída do filtrado de filtro prensa	32
Figura 6 - Abertura das placas para retirada das tortas secas	32
Figura 7 – Esquema de funcionamento de um filtro esteira.....	33
Figura 8 - Configuração dos leitos de secagem segundo a NBR 12209 (1992).....	40
Figura 9 - Destino de parte dos resíduos (líquido efluente e lodo) gerados em tanques sépticos instalados no município de Belém.....	51
Figura 10 - Disposição dos leitos de secagem no sistema experimental da UFPA.....	54
Figura 11 – Localização dos sistema de drenagem	55
Figura 12 - 1ª Composição prevista para os leitos de secagem.....	56
Figura 13 - Composição dos leitos de secagem do sistema experimental da UFPA	57

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Descarte de lodo da ETE Quilombo - São Paulo.....	22
Fotografia 2 - Filtro prensa.....	31
Fotografia 3 - Filtro esteira.....	33
Fotografia 4 – Centrífuga	35
Fotografia 5 - Colocação da camada de areia em leito de secagem no Aterro Sanitário do Aura	40
Fotografia 6 - Assentamento da camada suporte em leito de secagem no Aterro Sanitário do Aura	42
Fotografia 7 - Crescimento de vegetação em leito de secagem.....	46
Fotografia 8 - Crescimento de vegetação em leito de secagem.....	47
Fotografia 9 - Leitos de secagem cobertos e descobertos do sistema experimental da UFPA.....	55
Fotografia 10 - Leito de secagem impermeabilizado com manta asfáltica	58
Fotografia 11 - Camada de seixo 3 e 4	58
Fotografia 12 - Camada de seixo 1 e 2	59
Fotografia 13 - Camada de seixo 0.....	59
Fotografia 14 - Camada de areia.....	60
Fotografia 15 - Leito de secagem após a colocação do meio filtrante	60
Fotografia 16 - Peneirador Mecânico	64
Fotografia 17 - Peneiras utilizadas na seleção da areia	64
Fotografia 18 - Coleta de líquido drenado no leito de secagem descoberto.....	72
Fotografia 19 - Réguas utilizadas para o monitoramento da altura da lâmina de lodo	73
Fotografia 20 - Lançamento de lodo no leito de secagem descoberto.....	75
Fotografia 21 - Lodo do leito de secagem D45-I no dia 5 (21/10/2003).....	80
Fotografia 22 - Lodo do leito de secagem C45-I no dia 5 (21/10/2003).....	80
Fotografia 23 - Torta seca do leito de secagem D45-I no último dia do experimento.....	82
Fotografia 24 - Torta seca do leito de secagem C45-I no último dia do experimento.....	82
Fotografia 25 - Lodo do leito de secagem D45-II no dia 11 (29/12/2002)	103
Fotografia 26 - Lodo do leito de secagem C45-II no dia 11 (29/12/2002).....	103
Fotografia 27 - Lodo do leito de secagem C45-II no dia 12 (30/12/2002).....	104
Fotografia 28 - Lodo do leito de secagem D45-II no dia 15 (02/01/2002)	105

Fotografia 29 - Lodo do leito de secagem D45-II no dia 32 (19/01/2003)	108
Fotografia 30 - Lodo do leito de secagem D45-II no dia 35 (22/01/2002)	109
Fotografia 31 - Desenvolvimento de moscas no leito de secagem D45-II.....	139
Fotografia 32 - Larvas na tampa do recipiente de coleta do lodo do leito C45-II.....	139
Fotografia 33 - Torta do leito de secagem descoberto dia 28/10/2002 (teor de umidade 75,5)	141
Fotografia 34 - Torta do leito de secagem coberto dia 2/11/2002 (teor de umidade 76,6%)	141
Fotografia 35 - Torta do leito de secagem descoberto dia 16/01/2003 (teor de umidade 81,5%)	142
Fotografia 36 - Torta do leito de secagem coberto dia 22/01/2003 (teor de umidade 81,4%)	142

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características dos principais níveis de tratamento dos esgotos.....	6
Quadro 2 - Percentuais de remoção no esgoto sanitário para as modalidades de tratamento	7
Quadro 3 - Finalidades dos processos de tratamento preliminar.....	8
Quadro 4 - Principais tipos de tratamento anaeróbio	10
Quadro 5 - Valores observados em tanques sépticos bem projetados e mantidos	13
Quadro 6 - Características e quantidade do lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgotos.....	21
Quadro 7 - Características e organismos presentes no lodo bruto.....	24
Quadro 8 - Concentrações de microrganismos no esgoto e lodo bruto observadas nos EUA.....	24
Quadro 9 - Concentração de agentes patogênicos no lodo	25
Quadro 10 - Etapas usuais do processamento de lodo nos principais sistemas de tratamento utilizados em nosso meio.....	27
Quadro 11 - Umidade do lodo x propriedades mecânicas.....	28
Quadro 12 - Classificação da brita de acordo com a sua constituição granulométrica	61
Quadro 13 - Resultado do ensaio granulométrico realizado no seixo da camada inferior.....	62
Quadro 14 - Resultado do ensaio granulométrico realizado no seixo da camada intermediária	63
Quadro 15 - Resultados da análise granulométrica da areia A.....	65
Quadro 16 - Resultados da análise granulométrica da areia B	66
Quadro 17 - Resultados da análise granulométrica da areia C	67
Quadro 18 - Diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade das areia A, B e C, e faixa recomendada pela NBR 12209 (1992).....	68
Quadro 19 – Métodos utilizados nas determinações laboratoriais	74
Quadro 20 - Determinações realizadas no líquido drenado, no lodo bruto e no lodo em secagem.....	74
Quadro 21 - Características do lodo desaguado do primeiro ciclo de secagem	76
Quadro 22 - Altura da lâmina de lodo nos leitos de secagem C45-I e D45-I.....	78
Quadro 23 - Teor de umidade do lodo dos leitos de secagem C45-I e D45-I	79
Quadro 24 - Valores de precipitação, temperatura média e insolação na Fase 1	81
Quadro 25 - Volume de líquido drenado x Redução da altura da lâmina de lodo.....	83

Quadro 26 - Valores de pH e alcalinidade total observados no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I.....	87
Quadro 27 - Valores de cor aparente e turbidez no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I.....	88
Quadro 28 - Concentração de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I.....	90
Quadro 29 - Concentração de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I.....	92
Quadro 30 - Concentração de sólidos dissolvidos fixos e voláteis no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I.....	94
Quadro 31 - DQO do líquido drenado no leito de secagem C45-I e D45-I.....	97
Quadro 32 - Características do lodo desaguado no segundo ciclo de secagem.....	98
Quadro 33 - Altura da lâmina de lodo nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	99
Quadro 34 - Teor de umidade do lodo dos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	102
Quadro 35 - Volume de líquido drenado nos leitos de secagem D45-II e C45-II.....	106
Quadro 36 - Relação entre altura da lâmina de lodo, precipitação e período de insolação.....	109
Quadro 37 - Valores de precipitação, temperatura média e insolação na Fase II.....	110
Quadro 38 - Valores de pH e alcalinidade no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	112
Quadro 39 - Valores de cor aparente e turbidez no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	113
Quadro 40 - Concentração de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	117
Quadro 41 - Concentrações de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem C45-II e D45-II.....	121
Quadro 42 - Concentrações de sólidos dissolvidos fixos e voláteis no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	125
Quadro 43 - DQO do líquido drenado no leito de secagem C45-II e D45-II.....	128
Quadro 44 - Resultados do primeiro ciclo de secagem (18 dias).....	129
Quadro 45 - Resultados do segundo ciclo de desaguamento (40 dias).....	131
Quadro 46 - Concentração média/ litros dos parâmetros avaliados.....	134
Quadro 47 - Concentração média/ litros dos parâmetros avaliados.....	135
Quadro 48- Caracterização do líquido drenado nos leitos de secagem de acordo com o Quadro 18.....	135
Quadro 49 - Carga total dos parâmetros observados no líquido drenado.....	136
Quadro 50 - Cargas totais estimadas no líquido drenado pelo desaguamento de 1250 litros de lodo.....	137

Quadro 51 - Cargas totais do líquido drenado pelo desaguamento do lodo de 26.000 tanques	137
---	-----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Composição granulométrica da camada inferior de seixo	62
Gráfico 2 - Composição granulométrica da camada intermediária de seixo	63
Gráfico 3 - Curva granulométrica da areia A	65
Gráfico 4 - Curva Granulométrica areia B	66
Gráfico 5 - Curva Granulométrica areia C	67
Gráfico 6 - Altura da lâmina de lodo em função do tempo nos leitos de secagem C45-I e D45-I	77
Gráfico 7 - Teor de umidade do lodo dos leitos de secagem C45-I e D45-I	79
Gráfico 8 - Volume de líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I	84
Gráfico 9 - Percentual do volume de líquido drenado no leito de secagem C45-I	84
Gráfico 10 - Percentual do volume de líquido drenado no leito de secagem D45-I	85
Gráfico 11 - Volume de líquido drenado nos leitos de secagem (C45-I e D45-I) do dia 5 ao dia 18.	85
Gráfico 12 - pH e alcalinidade no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I	86
Gráfico 13 - Turbidez no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I	87
Gráfico 14 - Cor aparente no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I	88
Gráfico 15 - Sólidos suspensos no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I	89
Gráfico 16 - Percentual de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem C45-I	90
Gráfico 17 - Percentual de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado do leito de secagem D45-I	91
Gráfico 18 - Sólidos totais no líquido drenado nos leitos de secagem D45-I e C45-I	91
Gráfico 19 - Percentual de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado do leito de secagem C45-I	92
Gráfico 20 - Percentual de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem D45-I	93
Gráfico 21 - Sólidos dissolvidos no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I	93
Gráfico 22 - Percentual de sólidos dissolvidos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem C45-I	94
Gráfico 23 - Percentual de sólidos dissolvidos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem D45-I	95

Gráfico 24 - Percentual de sólidos suspensos e dissolvidos no líquido drenado no leito de secagem C45-I.....	95
Gráfico 25 - Percentual de sólidos suspensos e dissolvidos no líquido drenado no leito de secagem D45-I	96
Gráfico 26 - DQO no líquido drenado nos leitos de secagem D45-I e C45-I	96
Gráfico 27 - Altura da lâmina de lodo nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	101
Gráfico 28 - Teor de umidade do lodo do leito de secagem C45-II e D45-II	101
Gráfico 29 - Volume de líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	107
Gráfico 30 - Percentual do volume de líquido drenado no leito de secagem D45-II.....	107
Gráfico 31 - Percentual do volume de líquido drenado no leito de secagem C45-II.....	107
Gráfico 32 - pH e Alcalinidade no líquido drenado nos leitos de secagem D45-II e C45-II	112
Gráfico 33 - Turbidez no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	114
Gráfico 34 - Cor aparente no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	114
Gráfico 35 - Sólidos totais no líquido drenado no leito de secagem coberto e descoberto	116
Gráfico 36 - Percentual de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem D45-II	118
Gráfico 37 - Percentual de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem C45-II.....	118
Gráfico 38 - Sólidos suspensos no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	120
Gráfico 39 - Percentual de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado do leito de secagem D45-II.....	122
Gráfico 40 - Percentual de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem C45-II	122
Gráfico 41 - Sólidos dissolvidos no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II	124
Gráfico 42 - Percentual de sólidos dissolvidos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem D45-II	126
Gráfico 43 - Percentual de sólidos dissolvidos no líquido drenado no leito de secagem C45-II	126
Gráfico 44 – Percentual de sólidos suspensos e dissolvidos no líquido drenado no leito de secagem D45-II.....	127
Gráfico 45 – Percentual de sólidos suspensos e dissolvidos no líquido drenado no leito de secagem C45-II.....	127

Gráfico 46 – DQO do líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II.....	128
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Cu	-	Coefficiente de uniformidade
COPAM	-	Comissão de Política Ambiental
DBO	-	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	-	Demanda Química de Oxigênio
d _{ef}	-	Diâmetro efetivo
EPA	-	Environmental Protection Agency
ETE	-	Estação de Tratamento de Esgoto
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INIMET	-	Instituto Nacional de Meteorologia
K	-	Coefficiente de permeabilidade
LCC	-	Laboratório de Controle de Resíduos
MS	-	Matéria seca
NBR	-	Norma Brasileira
NCF	-	Número de colônias de fungos
NMP	-	Número mais provável
PR	-	Paraná
RALF	-	Reator anaeróbio de fluxo ascendente
RMB	-	Região Metropolitana de Belém
S.S	-	Sólidos Suspensos
SD	-	Sólidos Dissolvidos
SESAN	-	Secretária Municipal de Saneamento
SESMA	-	Secretária Municipal de Saúde
SF	-	Sólidos Fixos
SST	-	Sólidos Suspensos Totais
ST	-	Sólidos Totais
STF	-	Sólidos Totais Fixos
STV	-	Sólidos Totais Voláteis
SV	-	Sólidos Voláteis
UASB	-	Upflow anaerobic sludge blanket
UFC	-	Unidades Formadoras de Colônias
UFPA	-	Universidade Federal do Pará
uH	-	Unidade Hanzem
uT	-	Unidade de turbidez

RESUMO

GUTIERREZ, L. A. C. L. (2003). Influência da Cobertura e dos Sólidos Sedimentáveis no Desaguamento de Lodo em Leitos de Secagem Instalados na Região Metropolitana de Belém. Belém, 2003. 152 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará.

No presente trabalho foi realizado o monitoramento do desaguamento de lodo de tanques sépticos em dois leitos de secagem (1 m x 1 m x 1,40 m), instalados no setor profissional do Campus Guamá da Universidade Federal do Pará. Na primeira fase de desaguamento foi utilizado lodo com baixa concentração de sólidos suspensos (0,495 e 0,455 kg SS/m²), enquanto na segunda foram aplicadas taxas maiores (3,86 e 9,71 kg SS/m²) e com elevado volume de sólidos sedimentáveis (660 e 780 ml/L). Os resultados obtidos mostraram que, para as condições climáticas reinantes na Região Metropolitana de Belém, é possível a utilização de leitos de secagem sem cobertura e com camada inicial de lodo de 0,45 m; que existe necessidade de tratamento do líquido drenado nestas unidades; e que, apesar de não ser considerado na NBR 12209 (1992) - Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário, o volume de sólidos sedimentáveis é um importante parâmetro para o dimensionamento e a operação de leitos de secagem.

Palavras-chave: lodo de esgoto, desaguamento, leitos de secagem, tanques sépticos, sólidos sedimentáveis.

ABSTRACT

GUTIERREZ, L. A. C. L. (2003). Influence of Covering and of Sedimentable Solids in the sludge drainage in drying bed Installed in the Metropolitan Area of Belém. Belém, 2003. 152 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará.

This paper presents the monitoring of sludge drainage into septic tanks in two drying bed (1 m X 1 m X 1,40 m), installed in the professional area of the Guamá Campus at the Federal University of Pará. In the first phase of drainage, sludge was used in low concentration of suspended solids (0,495 and 0,455 kg SS/m²), whereas in the second phase, higher taxes of sludge (3,86 and 9,71 kg SS/m²) and high volume of sedimentable solids (660 and 780 ml/L) were used. The obtained results showed that for the predominant climatic conditions in the Metropolitan Area of Belém, it is possible to use drying bed with no coverings and with an initial 0, 45 m layer of Sludge, and that although it is not considered in NBR 12209 (1992) – Project of treatment stations of sanitary wastewater, the volume of sedimentable solids is an important parameter for dimensioning and operating drying bed.

Keywords: sewage sludge, drainage, septyc tank, drying beds, sedimentable solids.

1

1. INTRODUÇÃO

O principal agente poluidor dos cursos d'água brasileiros é o esgoto lançado diariamente sem qualquer tipo de tratamento, o que pode ser percebido na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no ano 2000, já que os municípios brasileiros apresentam baixos índices de serviços de coleta e tratamento de esgotos sanitários.

Nesta pesquisa foi constatado que 47,8% dos municípios brasileiros não têm coleta de esgotos e apenas 33,5% dos domicílios são atendidos por rede geral de esgoto. No caso da região Norte, a situação é ainda mais grave, pois em 92,9% dos municípios não há coleta de esgotos e somente 2,4% dos domicílios são atendidos por rede coletora de esgotos.

Quanto ao tratamento dos esgotos, a pesquisa do IBGE mostrou que existe muito a ser feito no Brasil, pois somente 35,3% dos esgotos coletados recebem tratamento. Isso faz com que 9,4 milhões de m³ de esgoto sanitário sejam dispostos diariamente de maneira inadequada no meio ambiente, o que representa 64,5% do volume diário de esgoto coletado no Brasil (14,5 milhões m³/dia).

Essa situação demonstra ser acentuada a degradação ambiental causada pelo lançamento de esgoto bruto nos corpos d'água, ficando evidente a necessidade de investimentos na área do saneamento básico, não apenas para preservação do meio ambiente, mas também por questão de saúde pública, em razão da grande quantidade de microrganismos patogênicos presente nessas águas residuárias.

Paradoxalmente, apesar do incremento dos serviços de coleta e tratamento dos esgotos sanitários ser fundamental para melhorar a qualidade de vida da população, em especial a de baixa renda, esse benefício levará ao aumento significativo na produção de lodo de esgoto.

Este resíduo é um dos subprodutos gerado no tratamento da fase líquida dos esgotos, exigindo tratamento específico e disposição final adequada em razão de apresentar microrganismos patogênicos e grande concentração de matéria orgânica.

Atualmente, os baixos índices de coleta e tratamento de esgoto nos municípios brasileiros, especialmente da região Norte, fazem com que o gerenciamento do lodo de esgoto ainda não seja um grave problema, pelo menos nos locais em que ainda é pouco expressiva a existência de sistemas de tratamento de esgoto.

Contudo, é eminente o acréscimo da produção de lodo com a implantação e operação de novos sistemas de tratamento de esgotos, o que já exige o desenvolvimento de alternativas tecnológicas adequadas, sendo que estas precisam ser economicamente viáveis para o tratamento, reciclagem e disposição final do lodo de esgoto. Caso isso não ocorra, as ETEs poderão solucionar o tratamento da massa líquida e, paralelamente, acarretar uma nova fonte de degradação ambiental, quando inexistir gerenciamento adequado do lodo de esgoto.

O fato de em muitos locais serem utilizados tanques sépticos para o afastamento das águas servidas e dos dejetos, faz com que, atualmente, o lodo removido dessas unidades de tratamento primário seja, em muitos casos, lançado diretamente no meio ambiente, o que, naturalmente, gera poluição / contaminação do meio físico e prejuízos para a biota e para o homem.

O grande número de tanques sépticos instalados em propriedades particulares, o custo do transporte desse material de grande volume e a pequena fiscalização são as principais causas para o lançamento do lodo diretamente nos corpos d'água.

Essa prática incorreta é constantemente observada nos canais do município de Belém, sendo que a tendência é a intensificação da poluição / contaminação dos canais pelo lodo que

será gerado nos cerca de 26.000 tanques sépticos implantadas no Projeto de Recuperação da Bacia do Una (Macro drenagem).

Assim, é preciso definir de que forma será gerenciado (adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento, higienização e destinação final) o lodo dos tanques para reduzir o seu poder impactante no ambiente.

O desaguamento, voltado para a redução do volume já foi testado em outras regiões do Brasil, especialmente no caso do sistema natural (sem equipamentos eletromecânicos) de leitos de secagem.

No caso específico da Região Metropolitana de Belém (RMB), já foram realizadas algumas aplicações de leitos de secagem, sendo, porém, em todas utilizadas valores de projeto e dimensionamento obtidos no Sul e Sudeste.

Desse modo, o presente trabalho pretende contribuir com pesquisas e investigações que venham otimizar o projeto e a operação de leitos de secagem instalados na RMB, especialmente por ser essa solução tecnológica de baixo custo e depender das condições climáticas de cada local, bem como, pela imediata necessidade de responder tecnicamente uma importante questão: o que fazer com o lodo removido dos tanques sépticos em operação em Belém.

2

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é o monitoramento do desaguamento de lodo de tanques sépticos em leitos de secagem instalados na Região Metropolitana de Belém, sendo avaliados os seguintes aspectos:

1. Influência da cobertura no desaguamento de lodo em leitos de secagem;
2. Período de desaguamento para diferentes tipos de lodo;
3. Influência da concentração de sólidos sedimentáveis no desaguamento de lodo em leitos de secagem;
4. Utilização de lâmina inicial maior (0,45 m) que a recomendada pela literatura técnica (0,25 a 0,30 m);
5. Necessidade de tratamento do líquido drenado nos leitos de secagem.

3

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. TRATAMENTO DOS ESGOTOS

Segundo von Sperling (2000), de maneira geral, a produção de esgoto corresponde aproximadamente ao consumo de água, sendo que as características dos esgotos estão relacionadas aos usos à qual a água foi submetida. Esses usos, e a forma com que são exercidos, variam com o clima, situação social e econômica, e hábitos da população.

O mesmo autor comenta que os esgotos domésticos contêm aproximadamente 99,9% de água. A fração restante inclui sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, bem como microrganismos. Portanto, é devido a essa fração de 0,1% que há necessidade de se tratar os esgotos.

Para van Haandel e Lettinga (1994), o objetivo principal do tratamento de esgoto é corrigir as suas características indesejáveis, de tal maneira que o seu uso ou a sua disposição final possam ocorrer de acordo com as regras e critérios definidos pela legislação. Por esta razão o tratamento deve incluir pelo menos a redução da concentração de um dos quatro constituintes mais importantes do esgoto: sólido em suspensão, material orgânico (biodegradável), nutrientes (notadamente nitrogênio e fósforo) e organismos patogênicos.

O tratamento dos esgotos é formado por uma série de processos e operações unitárias, as quais são empregadas para a remoção ou transformação de substâncias indesejáveis.

Dacach (1991) comenta que a modalidade de tratamento a ser utilizada depende do que se pretende remover, alterar ou eliminar, tendo em vista as características do corpo receptor.

Segundo Jordão e Pessoa (1995), os processos de tratamento podem ser classificados em função dos fenômenos de remoção ou transformação e de acordo com o grau de eficiência obtido por um ou mais dispositivos de tratamento.

Em função da eficiência das unidades, o tratamento dos esgotos é geralmente classificado em: preliminar, primário secundário e terciário. No Quadro 1 são mostradas as características dos principais tipos de tratamento dos esgotos.

Quadro 1 - Características dos principais níveis de tratamento dos esgotos

ITEM	NÍVEL DE TRATAMENTO ⁽¹⁾		
	Preliminar	Primário	Secundário
Poluentes removidos	<ul style="list-style-type: none"> Sólidos grosseiros 	<ul style="list-style-type: none"> Sólidos sedimentáveis DBO em suspensão 	<ul style="list-style-type: none"> Sólidos não sedimentáveis DBO em suspensão fina DBO solúvel Nutrientes (parcialmente) Patogênicos (parcialmente)
Eficiência de remoção	-	<ul style="list-style-type: none"> SS: 60-70% DBO: 30 – 40% Coliformes: 30 – 40 % 	<ul style="list-style-type: none"> DBO: 60 a 99% Coliformes: 60 a 99% ⁽³⁾ Nutrientes: 10 a 50% ⁽³⁾
Mecanismo de tratamento predominante	Físico	Físico	Biológico
Cumprir o padrão de lançamento? ⁽²⁾	Não	Não	Usualmente sim
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> Montante da elevatória Etapa inicial de tratamento 	<ul style="list-style-type: none"> Tratamento parcial Etapa intermediária de tratamento mais completo 	<ul style="list-style-type: none"> Tratamento mais completo (para matéria orgânica)

Notas:

(1) Uma ETE a nível secundário usualmente tem tratamento preliminar, mas pode ou não ter tratamento primário (depende do processo).

(2) Padrão de lançamento tal como expresso na legislação. O órgão ambiental poderá autorizar outros valores para o lançamento, caso estudos ambientais demonstrem que o corpo receptor continuará enquadrado dentro da sua classe.

(3) A eficiência de remoção poderá ser superior, caso haja alguma etapa de remoção específica.

Fonte: von Sperling, Costa e Castro (1995 p. 143)

Nessa Tabela não é apresentado o tratamento terciário, que é direcionado para a remoção de nutrientes e/ou microrganismos. É importante ressaltar que as estações modernas de tratamento de esgotos já são projetadas e construídas com unidades de tratamento terciário, sendo, no caso nas ETEs brasileiras, em sua maioria direcionadas para a inativação de microrganismos

Dacach (1991) observa que a eficiência do tratamento é relacionado com a percentagem removida de um determinado parâmetro do esgoto, sendo comumente utilizados os sólidos suspensos, a DBO e os microrganismos coliformes. No Quadro 2 é apresentada a eficiência dos níveis de tratamento segundo este autor.

Quadro 2 - Percentuais de remoção no esgoto sanitário para as modalidades de tratamento

Modalidade de tratamento	Percentual de remoção		
	DBO	Sólidos Suspensos	Bactérias
Preliminar	5 a 10	5 a 20	10 a 20
Primário	25 a 85	40 a 90	25 a 80
Secundário	75 a 97	70 a 95	90 a 98
Terciário	97 a 100	95 a 100	98 a 100

Fonte: Dacach (1991) p. 28

3.1.1. Tratamento preliminar

Normalmente o tratamento preliminar é constituído por grades paralelas ou peneiras, para remoção de material grosseiro; caixas de areia, para a remoção de partículas inorgânicas com peso específico bem superior ao da massa líquida, e, quando necessário, unidade de remoção de óleos, gorduras e graxas, para remoção de material flotante.

No Quadro 3 é mostrada a finalidade de cada unidade do tratamento preliminar

Quadro 3 - Finalidades dos processos de tratamento preliminar

Processos	Finalidades
Remoção de sólidos grosseiros	<ul style="list-style-type: none"> • Proteção dos dispositivos de transportes dos esgotos nas suas diferentes fases, líquida e sólida (lodo), tais como: bombas, tubulações, transportadores e peças especiais; • Proteção dos dispositivos de tratamento dos esgotos, tais como: raspadores, removedores, aeradores, meio filtrante, bem como dispositivos de entrada e saída; • Proteção dos corpos d'água receptores, tanto no aspecto estético como nos regimes de funcionamento de fluxo e de desempenho; e • Remoção parcial da carga poluidora, contribuindo para melhorar o desempenho das unidades subseqüentes de tratamento e de desinfecção.
Remoção de areia	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar abrasão nos equipamentos e tubulações • Reduzir a possibilidade de avarias, obstrução de unidades do sistema, tais como: canalizações, caixas de distribuição ou manobra, poços de elevatórias, tanques, sifões, orifícios, calhas etc; e • Facilitar o manuseio e transporte das fases líquida e sólida, ao longo dos componentes da ETE.
Remoção de gordura	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar obstruções dos coletores; • Evitar a aderência nas peças especiais; • Evitar acúmulo nas unidades de tratamento provocando odores desagradáveis e perturbações no funcionamento dos dispositivos de tratamento; e • Evitar aspectos desagradáveis nos corpos receptores.

Jordão e Pessoa (1995)

3.1.2. Tratamento primário

O objetivo do tratamento primário é retirar dos esgotos sólidos orgânicos e inorgânicos sedimentáveis, mediante operação física de sedimentação que ocorre com a redução da velocidade do fluxo. Nessa etapa do tratamento são removidos por sedimentação cerca de 40% a 60% dos sólidos sedimentáveis. (HERMAN, 1996)

von Sperling (2000) comenta que os sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes são parcialmente removidos em unidades de sedimentação, sendo que parte desses sólidos removidos é constituída de matéria orgânica.

Como a remoção de material orgânico é uma das finalidades do tratamento de esgoto, o tratamento primário por si só não produz um efluente de qualidade aceitável. (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994). Desta forma, existe a necessidade de utilização do tratamento secundário para remover a maior parte da matéria orgânica presente no esgoto

Segundo Dacach (1991) a deposição de partículas pode ser acelerada se no efluente for adicionado coagulante, no entanto, apesar de aumentar a eficiência da decantação primária, este tipo de procedimento é de uso restrito, sobretudo por ser dispendioso.

Normalmente são utilizados tanques Imhoff, tanques sépticos e decantadores primários para realização do tratamento primário.

3.1.3. Tratamento secundário

De acordo com Dacach (1991), o tratamento secundário é um processo biológico de tratamento que, dependendo de sua modalidade, pode atuar sobre o efluente primário, sobre o efluente preliminar ou, até mesmo, sobre o esgoto bruto apenas livre de material grosseiro.

Segundo von Sperling (2000), enquanto nos tratamento preliminar e primário predominam mecanismos de ordem física, no tratamento secundário a remoção da matéria orgânica é efetuada por reações bioquímicas, realizadas por microrganismos.

von Sperling, Costa e Castro (1995) explicam que o tratamento secundário tenta reproduzir os fenômenos naturais de estabilização da matéria orgânica, que ocorrem no corpo receptor, com a vantagem de que esse processo é feito de forma mais rápida, além de ocupar menor espaço. Esses mesmos autores ressaltam que os processos de tratamento secundário são concebidos de forma a acelerar os mecanismos de degradação que ocorrem naturalmente nos corpos receptores, sendo a decomposição de poluentes orgânicos degradáveis alcançada em condições controladas e em intervalos de tempo menores do que os observados nos sistemas naturais. Essa remoção biológica de matéria orgânica pode ocorrer em reatores anaeróbios, aeróbios/anaeróbios e anaeróbios.

Os principais reatores aeróbios são o lodo ativado e suas variações, o filtro biológico, lagoa aerada, reator aeróbio de leito expandido e o biodisco aeróbio. No caso do reator que combina processos aeróbios e anaeróbios pode ser citada a lagoa facultativa, que apresenta na parte média-inferior ambiente anaeróbio e na parte superior ambiente aeróbio. No Quadro 4 são relacionados os principais tipos de tratamento anaeróbio.

Quadro 4 - Principais tipos de tratamento anaeróbio

Reator	Fluxo	Tipo de Biomassa
Fossa Séptica	horizontal e ascendente	Suspenso e Sedimentado;
Decanto - Digestor	horizontal e ascendente	Suspenso e Sedimentado;
Seqüencial em Batelada		Suspenso
UASB	ascendente	Suspenso;
Leito Granular Expandido	ascendente	Suspenso;
Filtro Anaeróbio	ascendente	Aderido em Suporte Fixo;
Compartimentado	ascendente e horizontal	Suspenso;
Lagoa Anaeróbia	horizontal e ascendente	Suspenso e Sedimentado;
Biodisco Anaeróbio	horizontal	Aderido em Suporte Fixo;
Horizontal de Leito Fixo	horizontal	Aderido em Suporte Fixo
Leito Expandido	ascendente	Aderido em Suporte Móvel;
Leito Fluidificado	ascendente	Aderido em Suporte Móvel.

Fonte: Pereira, 1999 p.24

Herman (1996) compara o tratamento secundário à zona de recuperação do processo de autodepuração dos corpos d'água. von Sperling, Costa e Castro (1995) consideram que o tratamento secundário pode produzir um efluente de acordo com o padrão de lançamento da legislação ambiental. No entanto, Campos (1999) ressalta que o efluente deste tratamento ainda possui nitrogênio e fósforo em quantidade, concentração e formas que podem provocar problemas no corpo receptor, dependendo de suas condições específicas, dando origem ao fenômeno da eutrofização.

Além disso, o efluente do tratamento secundário ainda apresenta microrganismos, os quais devem ser removidos ou inativados antes do seu lançamento no corpo receptor.

3.1.4. Tratamento terciário

Dacach (1991) comenta que o tratamento terciário destina-se a remover do efluente secundário as substâncias que o tornam impróprio para determinado fim ou para ser lançado num manancial de água.

Para proteger os corpos d'água receptores de efluentes, tornou-se necessário desenvolver sistemas de tratamento terciário, isto é, sistemas que, além dos sólidos sedimentáveis (tratamento primário) e do material orgânico (tratamento secundário), também pudessem remover os nutrientes, nitrogênio e fósforo.(VAN HAANDEL E MARAIS, 1999).

3.2. TANQUE SÉPTICO

Neste trabalho será dada maior ênfase para os tanques sépticos por ser a solução de tratamento mais utilizada na RMB.

O tanque séptico é um tratamento primário de esgoto, que pode receber contribuição de um ou mais domicílios, sendo implantado principalmente quando não existe rede pública para coleta dos esgotos.

De acordo com Andrade Neto *et al.* (1999), essa unidade de tratamento primário foi inventada em 1860 por Jean Mouras. Jordão e Pessôa (1995) comentam que os tanques sépticos são câmaras convenientemente construídas para reter os despejos domésticos e/ou industriais por um período de tempo especificamente estabelecido, de modo a permitir a sedimentação dos sólidos e retenção do material graxo contido nos esgotos.

Philippi Junior (1988) descreve o tanque séptico como um tanque enterrado, fechado e impermeável, destinado a receber todo o efluente procedente da privada, bem como as águas servidas procedentes de banheiros, lavatórios, tanques de lavar roupa, pias de cozinha, etc. Por sua vez, Chernicharo (1997) cita que o tanque séptico é destinado, principalmente, ao tratamento primário de esgotos de residências unifamiliares e de pequenas áreas não servidas por redes coletoras.

A NBR 7229 (1993) indica a utilização dos tanques sépticos nas seguintes situações: área desprovida de rede pública coletora de esgotos, alternativas de tratamento de esgoto em áreas providas de rede coletora local e retenção prévia dos sólidos sedimentáveis, quando da utilização de rede coletora com diâmetro e/ou declividade reduzidos para transporte de efluente livre de sólidos sedimentáveis.

Para Chernicharo (1997), o tanque séptico comporta-se como um digestor de baixa carga, sem mistura e sem aquecimento. Este autor explica que o digestor de baixa carga é usualmente constituído de um único tanque, onde ocorrem simultaneamente a digestão, o adensamento do lodo e a formação de sobrenadante, sendo possível identificar 4 zonas distintas dentro do reator: zona de espuma, zona de sobrenadante, zona de digestão ativa e zona de lodo estabilizado.

Os tanques sépticos são unidades de fluxo horizontal destinadas ao tratamento de esgotos por processos de sedimentação, flotação e digestão. Andrade Neto *et al.*(1999) explicam que a decantação consiste na separação de fases (sólidos, líquidos e gases) por diferença de massa específica, enquanto a sedimentação é o processo de deposição de sólidos por ação da gravidade, já a flotação ocorre porque pequenas bolhas de gases, produzidas na digestão anaeróbia, aceleram a ascensão de partículas sólidas, distinguindo-se por isso da simples flutuação.

von Sperling (1996) explica que a sedimentação é uma operação física de separação de partículas em suspensão, que apresentam densidade maior que a do líquido que as contém, que se direcionam para o fundo do tanque devido forças gravitacionais. Por sua vez, Andrade Neto *et al.* (1999) comentam que a decantação é tanto maior quanto maior for o tempo de detenção dos esgotos e a tranqüilidade hidráulica.

Desta forma, os tanques sépticos geram três subprodutos: o lodo, que deve ser removido periodicamente; os gases que são desprendidos para atmosfera; e o efluente líquido, que pode passar por tratamento complementar e/ou ser encaminhado para disposição final.

De acordo com Jordão e Pessôa (1995), parte dos sólidos que não sedimentam emerge e é retida na superfície do líquido ainda no interior do tanque séptico, sendo comumente denominados de espuma. Batalha (1989) explica que a espuma é constituída por sólidos em mistura com gases, gorduras e material graxo. Andrade Neto *et al.* (1999) comentam que a espuma é formada preponderantemente, por produtos orgânicos biodegradáveis e que este material pode atingir espessura de 20 a 25 cm.

A velocidade e permanência do líquido na fossa permitem a separação da fração sólida do líquido, proporcionando digestão limitada da matéria orgânica e acúmulo dos sólidos no fundo da fossa, onde ficam retidos e, pela digestão anaeróbia, se transformam em substâncias sólidas parcialmente mineralizadas que se liquefazem e formam gases, sendo observado principalmente a ocorrência de metano e gás carbônico, podendo, no entanto, acontecer pequena produção de gás sulfídrico. (BATALHA, 1989). Chernicharo (1997) coloca que embora seja produzido gás sulfídrico no tanque séptico, dificilmente são

observados problemas como odor, em razão deste combinar-se com metais acumulados no lodo, vindo a formar sulfetos metálicos insolúveis.

De acordo com Dacach (1990), o efluente de tanques sépticos é um efluente perigoso por conter bactérias patogênicas, ovos de vermes e cistos não removidos pelo tanque séptico, por nesta ser curto o período de detenção do esgoto. Este autor também cita que mesmo quando a fossa é bem projetada e satisfatoriamente mantida seu efluente possui de 30 a 40% de sólidos em suspensão e uma DBO não inferior a 30% dos valores referentes ao esgoto afluente. No Quadro 5 são apresentados valores da eficiência de tanques sépticos.

Quadro 5 - Valores observados em tanques sépticos bem projetados e mantidos

Redução da demanda bioquímica de oxigênio	40% a 60%
Redução da demanda química de oxigênio	30% a 60%
Remoção de sólidos sedimentáveis	85% a 95%
Remoção de sólidos em suspensão	50% a 70%
Remoção de graxas e gorduras	70% a 90%

Fonte - Azevedo Netto e Lothar Hess apud Batalha (1989)

De acordo com Chernicharo (1997), a bibliografia especializada indica as seguintes eficiências médias de remoção em tanques sépticos: DBO (30 a 55%), sólidos suspensos (20 a 90%) e óleos e graxas (70 a 90%). Batalha (1989) afirma que o prolongamento do tempo de detenção dos esgotos no tanque séptico aumenta a percentagem de DBO removida

Andrade Neto *et al.* (2000) comenta que dependendo dos requisitos do corpo receptor, o efluente de decanto-digestores deve passar por pós-tratamento, já que esse efluente contém elevadas concentrações de sólidos, matéria orgânica solúvel e nutrientes inorgânicos. Já Philippi Junior (1988) observa que o efluente de um tanque séptico deve receber destinação final adequada por conter materiais putrescíveis e ser potencialmente perigoso à saúde.

A escolha da alternativa para tratamento e disposição final do efluente líquido de tanques sépticos está associado a determinados fatores tais como: taxa de infiltração do solo (grau de permeabilidade), disponibilidade de espaço, inclinação do terreno, altura do lençol freático, variação do fluxo de esgoto, distancia das águas superficiais e poços. (BATALHA, 1989).

Segundo a NBR 7229 (1993) o sistema de tanque séptico é formado pelo tanque séptico para tratamento primário dos esgotos e unidades para tratamento complementar e/ou destinação final do efluente líquido e do lodo. A Figura 1 mostra as alternativas, sugeridos pela mesma norma, de tratamento complementar e disposição final para o efluente líquido gerado nos tanques sépticos.

van Haandel e Lettinga (1994) comentam que a eficiência de retenção de sólidos decantáveis pode ser reduzida pela flotação de parte dos sólidos contidos no fundo, devido à subida de bolhas de gás ocluídas em flocos e pela turbulência provocada pelas bolhas de gás.

De acordo com Jordão e Pessôa (1995), cerca de 60% a 70% dos sólidos em suspensão contidos nos esgotos sedimentam, dando origem a uma substância semilíquida denominada lodo de esgoto. von Sperling (2000) observa que o lodo produzido nestas unidades apresenta alto grau de umidade, em torno de 94 a 97%.

Na NBR 7229 (1993) é recomendado que o período de detenção dos esgotos nos tanques sépticos varie de 12 a 24 horas. Já van Haandel e Lettinga (1994) comentam que a permanência dos esgotos nos tanques sépticos é em torno de 2 dias, tempo suficiente para a remoção de sólidos sedimentáveis.

Chernicharo (1997) coloca que a aplicação de elevadas cargas hidráulicas pode repercutir negativamente em seu funcionamento, podendo levar à uma perda excessiva de sólidos e, conseqüentemente, à deterioração da qualidade do efluente final.

Segundo Andrade Neto (1997), os reatores anaeróbios para tratamento dos esgotos podem ser distinguidos dois grupos em relação à fase líquida: os reatores de lodo passivo e os reatores de lodo ativo. No caso dos sistemas de lodo passivo, como os tanques sépticos, o fluxo da massa líquida é horizontal e passa sobre o lodo decantado, tendo pouco contato com a biomassa sedimentada, onde há maior atividade biológica e degradação da matéria orgânica. Já os sistemas de lodo ativo, a biomassa pode estar dispersa na forma de flocos ou aderida a uma camada suporte, e tem contato constante com a fase líquida que passa através do lodo. (ANDRADE NETO, 1997).

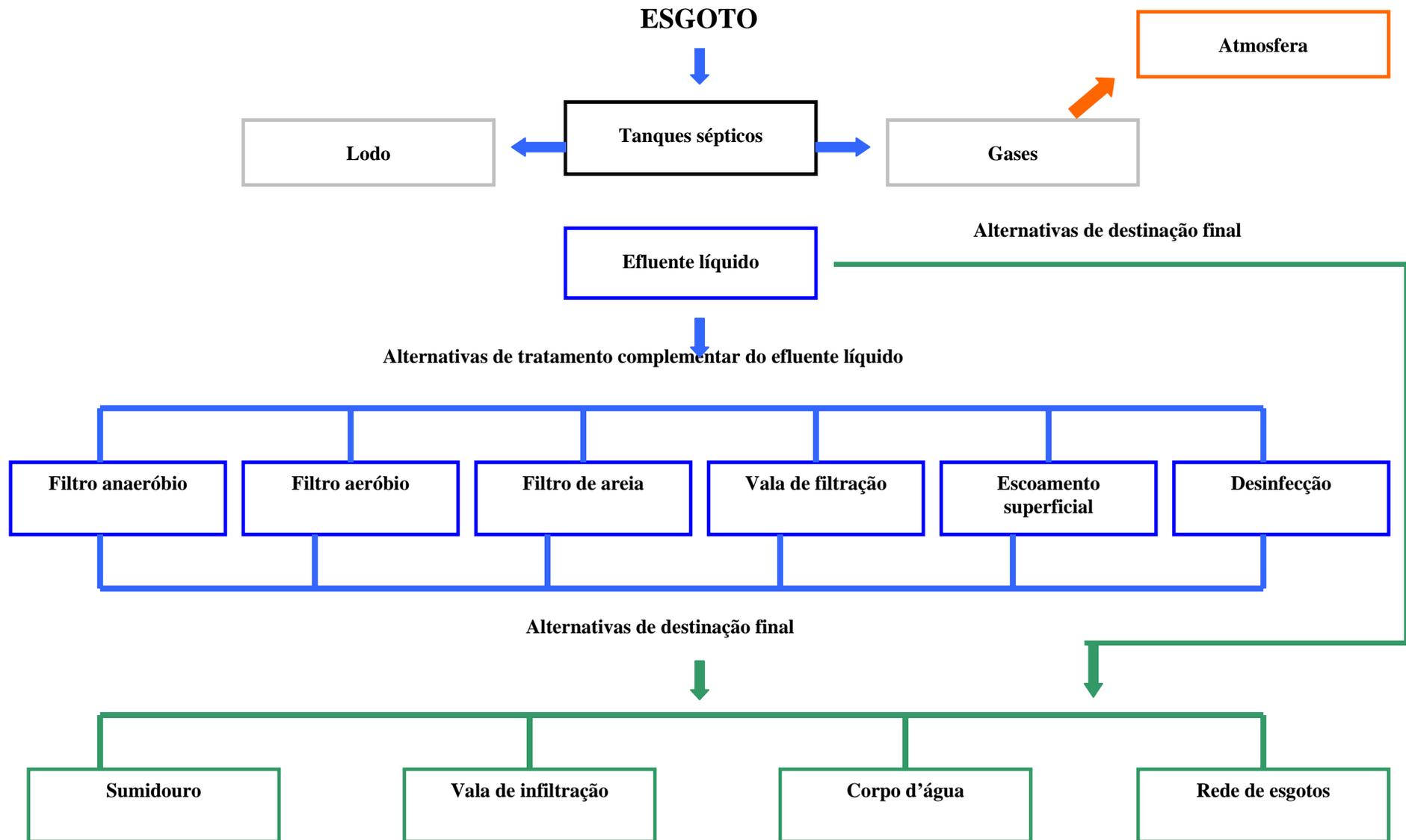


Figura 1 - Alternativas de tratamento e disposição final para o efluente líquido de tanques sépticos

O material orgânico retido no fundo do tanque sofre decomposição facultativa e anaeróbia, sendo que a estabilização e a conseqüente redução do volume de lodo está intimamente relacionada com a temperatura da massa líquida no interior do tanque, já que a atividade biológica é extremante dependente de temperatura, ficando o processo comprometido quando a temperatura é inferior a 20°C. (CHERNICHARO, 1997)

Segundo o autor supracitado, a acumulação de lodo e espuma ao longo do período de operação reduzem o volume útil do tanque, o que torna necessária a remoção periódica deste material, sendo que a não retirada do lodo do período estabelecido leva a sua acumulação excessiva e a redução do volume reacional do tanque, reduzindo o tempo de detenção hidráulica, o que levará a deterioração da qualidade do efluente final, fazendo com que o tanque funcione como simples caixa de passagem, perdendo a sua finalidade de retenção e acumulação de sólidos.

von Sperling, Costa e Castro (1995) comentam que o lodo formado pelos sólidos sedimentáveis pode ser removido num intervalo de 6 meses a 1 ano, este material removido, em razão do longo tempo de permanência (alguns meses), já sai estabilizado, porém contaminado por patogênicos.

Já Philippi Junior (1988) considera que o intervalo entre duas limpezas deve variar de 6 meses a 2 anos, ressaltando ainda que após a limpeza, deve-se deixar 20 litros de lodo, a fim de facilitar o reinício da digestão.

A NBR 7229 (1993) estabelece que o período de limpeza dos tanques sépticos poderá ser prolongado sempre que as vazões do esgoto afluente forem menores do que as determinadas em projeto, da mesma forma, no caso de acréscimo de vazão, o intervalo entre limpezas deve ser diminuído.

Nessa mesma norma é citado que o período de limpeza pode variar de 1 a 5 anos, porém é mais usual o projeto de tanques sépticos com intervalos de limpeza de 1 a 2 anos, pois o aumento do período entre limpezas resultam na construção de maiores tanques, elevando os custos de implantação.

A retirada de lodo em intervalo superior ao estabelecido pode levar ao acúmulo excessivo desse material no interior do tanque séptico, reduzindo o tempo de detenção hidráulica, aumentando a velocidade de escoamento da massa líquida e facilitando o carreamento de sólidos do tanque séptico. Assim, a falta de remoção do lodo de tanques sépticos acaba produzindo efluente de baixa qualidade.

Chernicharo (1997) coloca que no Brasil, na maioria das vezes, a operação dos tanques sépticos é negligenciada, onde os intervalos de limpeza não são observados, sendo a remoção do lodo geralmente realizada quando a unidade apresenta problemas de funcionamento, além do que, dificilmente existe controle do lodo removido dos tanques sépticos, sendo frequentemente lançado em terrenos baldios, lixões, cursos d'água etc.

Cynamon (1986) propõe que o lodo produzido nos tanques sépticos seja removido pelos próprios moradores, desde que sejam orientados por um auxiliar de saneamento, sendo que o lodo removido deverá ser disposto em pequenos leitos de secagem cobertos construídos ao lado dos tanques sépticos.

No entanto, Silva et al (2001) explicam que o manuseio e o emprego de lodo de esgoto de origem doméstica, para os mais variados fins, sem prévio tratamento de estabilização, e sem tratamentos de higienizantes, podem possibilitar infecção do homem e dos animais por agentes patogênicos nele presente. Os autores citam que uma das vias de exposição de homem e animais a organismos patogênicos presentes no lodo é o contato direto, sendo os transportadores, agricultores, espalhadores de lodo e o pessoal que trabalha nas estações de tratamento de esgotos e lodo os mais suscetíveis a este tipo de contaminação.

Meneses *et al.* (2001) caracterizaram os resíduos gerados em tanques sépticos implantadas na cidade de Natal, tendo verificado valores de DBO e de DQO de 1020 a 4800 mg/L e de 2400 a 16000, respectivamente. Segundo os autores, esses valores de DBO e DQO são bem superiores aos encontrados no esgoto doméstico bruto, sendo que foram verificados, provavelmente, em razão da falta de manutenção dos tanque sépticos.

Neste mesmo experimento os autores supracitados encontraram valores elevados de coliformes fecais ($10^5 - 10^8$ UFC/ml), o que confirma a baixa eficiência dos tanques sépticos na remoção de bactérias. Já a contagem dos ovos de helmintos variou de 53 a 837 ovos/L.

De acordo com Bonnet *et al.* (2000), o tempo de sobrevivência de ovos de helmintos no ambiente depende da umidade, luz do sol e outros fatores ambientais. Soccol *et al.* (2000) comentam que os ovos larvados de helmintos e os cistos de protozoários encontrados no lodo são extremamente resistentes no meio ambiente, podendo sobreviver de 6 meses a 7 anos. Pinto (2001) comenta que apenas um ovo de helminto ou cisto de protozoário pode ser suficiente para causar infecção.

Desta forma, em razão do lodo de tanques sépticos apresentar alto poder poluente/contaminante, a NBR 7229 (1993) determina que o lodo e a espuma removidos dos tanques sépticos em nenhuma hipótese sejam lançados em corpos d'água ou galerias de águas pluviais. Na Figura 2 são mostradas as alternativas de tratamento complementar e disposição final para o lodo gerado nos tanques sépticos.

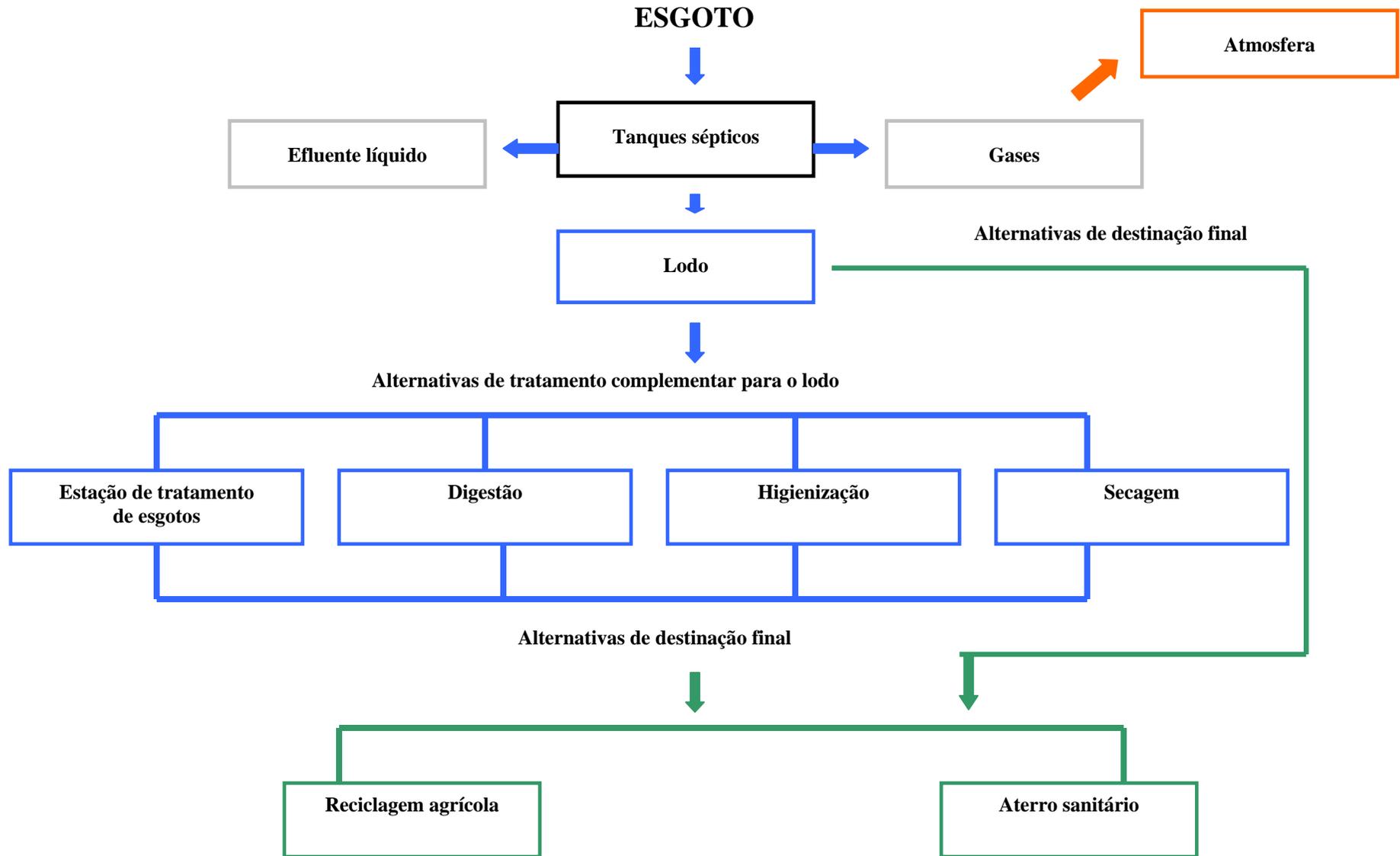


Figura 2 - Alternativas de tratamento e disposição final de lodo de tanques sépticos

3.3. LODO DE ESGOTO

Os sistemas de tratamento de esgoto têm a função de reduzir a carga poluidora dos esgotos, visando a proteção do meio ambiente e da saúde de homens e animais. Segundo Jordão e Pessôa (1995), o tratamento dos esgotos gera subprodutos como: espuma, areia, sólidos grosseiros e o lodo. De acordo com os mesmos autores, o lodo é um subproduto do tratamento da fase líquida denominado fase sólida, e como este produto é formado em meio líquido, apresenta alto teor de umidade, em torno de 99 a 95% em peso.

Aisse *et al.* (1999) consideram que os lodos podem exibir três características indesejáveis, cuja correção é objetivo do tratamento de lodo.

- Instabilidade biológica: no caso de lodo primário e de lodo aeróbio há uma grande fração de material orgânico biodegradável;
- Qualidade higiênica péssima: especialmente no caso de esgoto sanitário há uma grande variedade de vírus, bactérias e parasitas (protozoários, ovos de nematóides e helmintos) que constituem uma ameaça à saúde pública;
- Grande volume: o volume de lodo é considerável e a concentração de sólidos é relativamente baixa, sendo necessário aplicar um processo de separação de fases para reduzir o teor de sólidos.

Fernandes (2000) afirma que a concentração de microrganismos patogênicos, seu potencial de putrefação e a produção de odores desagradáveis serão maiores, quanto mais o lodo se assemelhar à matéria orgânica fresca.

Segundo Ferreira *et al.* (1999), o lodo consiste numa mistura de matéria orgânica e inorgânica que se acumula no sistema e deve ser periodicamente ou continuamente descartado, de acordo com o sistema de tratamento, sendo que a quantidade e a qualidade do lodo produzido por uma ETE está relacionada com a vazão de esgoto tratado, com as características do esgoto, com o tipo de tratamento e da operação da ETE. Imhoff (1996) comenta que quanto mais avançado é o grau de tratamento maior será o volume de lodo produzido. Van Haandel e Marais (1999) comentam que a quantidade e a qualidade do lodo de excesso dependem da vazão e da natureza da água residuária, da configuração do sistema

de tratamento e das condições de operação prevalentes. O Quadro 6 sugere valores para a quantidade e as características dos diversos tipos de lodo de acordo com sua origem.

Quadro 6 - Características e quantidade do lodo produzido em vários sistemas de tratamento de esgotos

SISTEMA	Características do lodo produzido e descartado da fase líquida (dirigido à etapa de tratamento de lodo)			
	kgSS/kgDQO Aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.d) (a)	Volume de lodo (L/hab.d) (b)
Tratamento primário (convencional)	0,35 – 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 – 2,2
Tratamento primário (tanques sépticos)	0,2 – 0,30	3 - 6	20 - 30	0,3 – 1,0
Lagoa facultativa	0,12 – 0,32	5 - 15	12 - 32	0,1 – 0,25
Lagoa anaeróbia – lagoa facultativa				
Lagoa anaeróbia	0,2 – 0,45	15 - 20	20 - 45	0,1 – 0,3
Lagoa facultativa	0,06 – 0,10	7 - 12	6 - 10	0,05 – 0,15
Total	0,26 – 0,55	-	26 - 55	0,15 – 0,45
Lagoa aerada facultativa	0,08 – 0,13	6 - 10	8 - 13	0,08 – 0,22
Lagoa aerada mistura completa – lagoa sediment.	0,11 – 0,13	5 – 8	11 - 13	0,15 – 0,25
Tanque séptico + filtro anaeróbio				
Tanque séptico	0,20 – 0,30	3 - 6	20 0 30	0,3 – 1,0
Filtro anaeróbio	0,07 – 0,09	0,5 – 4,0	7 - 8	0,2 – 1,8
Total	0,27 – 0,39	1,4 – 5,4	27 - 39	0,5 – 2,8
Lodos ativados convencional				
Lodo primário	0,35 – 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 – 2,2
Lodo secundário	0,25 – 0,35	0,6 - 1	25 - 35	2,5 – 6,0
Total	0,60 – 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 – 8,2
Lodos ativados – aeração prolongada	0,50 – 0,55	0,8 – 1,2	40 - 45	3,3 – 5,6
Filtro biológico de alta carga				
Lodo primário	0,35 – 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 – 2,2
Lodo secundário	0,20 – 0,30	1 – 2,5	20 - 30	0,8 – 3,0
Total	0,55 – 0,75	1,5 – 4,0	55 - 75	1,4 – 5,2
Biofiltro aerado submerso				
Lodo primário	0,35 – 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 – 2,2
Lodo secundário	0,25 – 0,35	0,6 - 1	25 - 35	2,5 – 6,0
Total	0,60 – 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 – 8,2
Reator UASB	0,12 – 0,18	3 - 6	12 - 18	0,2 – 0,6
UASB + pós-tratamento aeróbio (c)				
Lodo anaeróbio (UASB)	0,12 – 0,18	3 - 4	12 - 18	0,3 – 0,6
Lodo aeróbio (lodos ativados) (d)	0,08 – 0,14	3 - 4	8 - 14	0,2 – 0,5
Total	0,20 – 0,32	3 - 4	20 - 32	0,5 – 1,1

Nas unidades com longo período de detenção do lodo (ex: lagoas, tanques sépticos, reator UASB, filtro anaeróbio), os valores apresentados incluem a digestão e adensamento que ocorrem na própria unidade (os quais reduzem a massa e o volume de lodo).

(a) Assumindo 0,1 kg DQO/hab. d e 0,06 kg SS/ hab. dia

(b) Litros de lodo por hab. d = $\{(gSS/hab.d)/(sólidos\ secos\ (\%))\} \times (100/1000)$ (assumindo densidade de 1000 kg/m³)

(c) Pós-tratamento aeróbio: lodos ativados, biofiltro aerado submerso, filtro biológico

(d) Lodo ativado do UASB, após redução de massa e volume na digestão e adensamento que ocorrem no próprio reator UASB (o lodo aeróbio excedente afluente ao UASB é também menor, pois neste caso a influência da perda de sólidos no efluente do decantador secundário passa a desempenhar uma maior influência).

Fonte: von Sperling e Gonçalves (2001)

De acordo com Catunda *et al.* (2000), “normalmente o lodo é produzido como uma suspensão relativamente diluída, com teor de sólidos de 20 a 50 g/L (umidade de 95 a 98%), no caso de aeróbios e de 50 a 100 g/L (umidade de 90 a 95 %) para lodo de sistemas anaeróbios.” Na Fotografia 1 pode ser visto o descarte de lodo em uma ETE.



Fotografia 1 - Descarte de lodo da ETE Quilombo - São Paulo
Fonte: <http://www.geocities.com/be3102s2000/americana/americana.html>

Andrade Neto (1997) comenta que os processos aeróbios produzem maior quantidade de lodo em relação aos processos anaeróbios, devido à diferença do metabolismo bacteriano, já que nos processos anaeróbios predomina o catabolismo e nos processos aeróbios anabolismo.

O lodo é considerado matéria prima nos processos biológicos de tratamento, já que a eficiência destes processos está relacionada com quantidade de células vivas, no entanto, no momento que o lodo estiver em excesso, este tem que ser descartado, passando a se tornar um resíduo. (FERNANDES, 2000).

Almeida e Gonçalves (1993), relatam que a estação de tratamento de esgotos de Barueri, que utiliza o processo convencional de lodos ativados, produz 0,50 m³ de lodo desidratado para cada 1000 m³ de esgotos tratados, sendo que esse lodo antes de ser encaminhado para destinação final passa pelas seguintes unidades: adensamento, digestão anaeróbia e filtro prensa.

Ao avaliarem a acumulação de lodo em uma lagoa de estabilização em escala piloto, com várias chicanas, tratando os efluentes de um reator UASB (escala real) Brito *et al.* (1999) verificaram taxa de produção de lodo de 0,04 m³/hab.ano. Gonçalves *et al.* (1997) observaram taxa de acumulação de 0,07 l/hab.dia em lagoa facultativa, enquanto em lagoas anaeróbias o valor foi de 0,023l/hab.dia a 0,026l/hab.dia, esses autores ainda constataram altíssimas concentrações de sólidos totais no lodo das lagoas anaeróbias, sendo verificados com frequência teores superior a 22%.

Segundo Chernicharo *et al.* (1999), o lodo de reatores UASB apresenta elevado grau de estabilização, devido o tempo de residência celular no sistema de tratamento; elevada concentração de sólidos, usualmente da ordem de 3 a 5%; facilidade de desidratação; e possibilidade de utilização do lodo seco como fertilizante na agricultura, desde que tomados os cuidados devido à presença de patógenos.

Andreoli *et al.* (2001) observa que o lodo de esgoto é um produto poluente tanto pelas concentrações de patógenos quanto pelos teores de nutrientes presentes, já que no processo de produção de lodo, junto com as partículas minerais e a matéria orgânica, também, precipitam (diretamente ou adsorvidas a partículas maiores) elementos traço com potencial tóxico e diferentes agentes patogênicos como ovos de helmintos, cistos de protozoários e colônia de bactérias.

O lodo proveniente do tratamento de esgotos pode ser fonte apreciável de nitrogênio, fósforo e potássio para as plantas, tendo, entretanto, às vezes, altos teores de metais, pesticidas, organismos patogênicos e compostos tóxicos. (DEUS *et al.*, 1993). Ide *et al.* (1993) observam que, além de bactérias potencialmente patogênicas, o lodo pode abrigar vírus, helmintos protozoários e fungos que podem causar problemas sanitários em hospedeiros susceptíveis. No Quadro 7 são mostrados o pH, a temperatura e o NMP/ NCF de microrganismos indicadores encontrados no lodo bruto de uma estação de tratamento que utiliza decantação-digestão anaeróbia e filtro biológico aeróbio.

Quadro 7 - Características e organismos presentes no lodo bruto

Parâmetro	Lodo bruto
pH	7,05
Temperatura (°C)	22
Coliforme total (NMP/g)	$4,0 \times 10^7$
Coliforme fecal(NMP/g)	$4,0 \times 10^7$
Estreptococo fecal (NMP/g)	$4,0 \times 10^5$
Fungos (NCF/g)	$2,8 \times 10^6$

Fonte: (IDE *et al.*, 1993, P. 345)

Segundo Fernandes (2000), os sistemas de tratamento de esgoto proporcionam a diminuição de patógenos na fase líquida dos esgotos e a concentração destes na fase sólida, que ocorre devido ao poder de adsorção dos flocos e ao alto peso específico quando os microrganismos sedimentam juntamente com o lodo. A concentração de microrganismos no esgoto e no lodo bruto, observada em algumas ETEs nos Estados Unidos, pode ser verificada no Quadro 8.

Quadro 8 - Concentrações de microrganismos no esgoto e lodo bruto observadas nos EUA

Microrganismo	Esgoto bruto	Lodo primário bruto	Lodo secundário bruto
Coliformes totais	10^5 a 10^6 /ml	$1,2 \times 10^8$ /g	$7,0 \times 10^8$ /g
Coliformes fecais	10^4 a 10^5 /ml	$2,0 \times 10^7$ /g	$8,3 \times 10^6$ /g
Estreptococos	10^3 a 10^4 /ml	$8,9 \times 10^5$ /g	$1,7 \times 10^6$ /g
Salmonella	0 a 10^2 /ml	$4,1 \times 10^2$ /g	$8,8 \times 10^2$ /g

Fonte: EPA e Metcalf & Eddy apud Fernandes, 2000.

De acordo com Silva *et al.* (2001), a quantidade de patógenos presentes no esgoto de uma determinada localidade é bastante variável e depende dos seguintes fatores: condições sócio-econômica da população, condições sanitárias, região geográfica, presença de indústrias agro-alimentares e tipo de tratamento a que o lodo foi submetido. No Quadro 9 são apresentadas estimativas de cargas de patógenos presentes no lodo.

Quadro 9 - Concentração de agentes patogênicos no lodo

Agente patogênico	Tipo de lodo	Número de patógenos
Ovos de helmintos	Lodo primário	10^3 - 10^4 /kg MS
	Lodo digerido	10^2 - 10^3 /kg MS
	Lodo semi desidratado	10^1 - 10^3 /kg MS
	Lodo de tratamento aeróbio, semi desidratado	10^2 - $7,5 \cdot 10^4$ /kg MS
	Lodo anaeróbio	$6,3 \cdot 10^3$ - $1,5 \cdot 10^4$ /kg MS
Cistos de protozoários	Lodo primário	$7,7 \cdot 10^4$ - $3 \cdot 10^6$ /kg MS
	Lodo digerido	$3 \cdot 10^4$ - $4,1 \cdot 10^6$ /kg MS
	Lodo desidratado	$7 \cdot 10^1$ - 10^2 /kg MS
Bactérias	Lodo	10^1 - $8,8 \cdot 10^6$ /kg MS
	Lodo ETE Belém -PR	10^8 kg MS
Vírus	Lodo primário	$3,8 \cdot 10^3$ - $1,2 \cdot 10^5$ /L
	Lodo digerido	10^1 - 10^3 /L
	Lodo semi desidratado	10^1 - $8,8 \cdot 10^6$ /kg Ms

Fonte: Feix e Wiart (1998), Thomaz Soccol *f.* (1997) Apud Silva *et al.* (2001 p. 99)

von Sperling e Gonçalves (2001) classificam o lodo em primário, composto pelos sólidos sedimentáveis do esgoto bruto; biológico ou lodo secundário como formado pela biomassa que cresce as custas do alimento fornecido pelo esgoto afluyente; misto, formado pela mistura do lodo primário e secundário; químico, originário de sistemas que utilizam etapa físico-química de tratamento da fase líquida.

3.4. GERENCIAMENTO DO LODO DE ESGOTO

Segundo van Haandel e Marais (1999), os processos de tratamento do lodo visam reduzir o teor de material orgânico biodegradável, organismos patogênicos e o teor de água no lodo, para que se obtenha um material sólido e estável

O gerenciamento do lodo pode passar por seis etapas (adensamento, estabilização, condicionamento, desaguamento, higienização e disposição final), que podem ser incluídas no processamento do lodo, dependendo das características dos mesmos, bem como da etapa do tratamento do lodo subsequente e da disposição final. (VON SPERLING E GONÇALVES, 2001)

O densamento tem a finalidade de reduzir o volume de lodo, pela diminuição de umidade, que levará a menores custos de implantação e operação das unidades de secagem e digestão do lodo. Já a estabilização é um processo bioquímico que objetiva a redução de matéria orgânica, microrganismos e conseqüentemente redução de odores. A digestão do lodo

confere uma densidade menor que a unitária, o que pode ser verificado pela tendência que o material digerido tem de flutuar durante o processo de secagem localizando-se na parte superior, permitindo o desprendimento do líquido intersticial pela parte inferior. (PULKOW E AISSE *apud* AISSE *et al.*, 2000)

Fernandes (2000) afirma que a estabilização significa biodegradação de parte da matéria orgânica, redução de odores e do nível de microrganismos patogênicos, no entanto, o lodo continua, ainda, com alto teor de patógenos.

O condicionamento é a etapa do tratamento que precede o desaguamento, consistindo da preparação do lodo, com a adição de agentes coagulantes, para proporcionar a maior captura de sólidos. Assim, o condicionamento influencia na eficiência do desaguamento, que é a operação que tem o objetivo de reduzir o volume de lodo, pelo aumento do teor de sólidos. Segundo van Haandel e Marais (1999), o grau desejado de separação sólido/líquido a ser obtido num determinado processo depende muito do uso posterior do lodo.

A higienização é uma etapa complementar, que busca diminuir o número de microrganismos patogênicos, para possibilitar o seu reaproveitamento de forma segura.

A escolha da destinação final do lodo de esgoto é uma tarefa complexa, e depende principalmente das características físicas, químicas e do seu grau de patogenicidade.

As etapas do gerenciamento a serem aplicadas no lodo dependem de suas características, da disponibilidade de recursos (pessoal e equipamentos) e da sua utilização posterior, sendo no Quadro 10 discriminadas as etapas usualmente aplicadas ao lodo, de acordo com o sistema utilizado para o tratamento da fase líquida.

Quadro 10 - Etapas usuais do processamento de lodo nos principais sistemas de tratamento utilizados em nosso meio

SISTEMAS DE TRATAMENTO	LODO PRIMÁRIO				LODO SECUNDÁRIO			
	Processamento usual do lodo				Processamento usual do lodo			
	Adensamento	Digestão	Desidratação	Disposição final	Adensamento	Digestão	Desidratação	Disposição final
Tratamento primário (convencional)	X	X	X	X				
Tratamento primário (tanques sépticos)			X	X				
Lagoa facultativa							X (a)	X
Lagoa anaeróbia – lagoa facultativa							X (a)	X
Lagoa aerada facultativa							X (a)	X
Lagoa aerada mistura completa – lagoa decantação					X (a)		X (a)	X
Lagoa facultativa + lagoa de maturação							X (a)	X
Lagoa facultativa + lagoa de alta taxa							X (a)	X
Lagoa facultativa + remoção físico-química de algas					X (a)		X (a)	X
Infiltração lenta								
Infiltração rápida								X (c)
Escoamento superficial								
Terras úmidas construídas								
Lodos ativados convencional	X	X	X	X	X	X	X	X
Lodos ativados (aeração prolongada)					X		X	X
Reator por batelada (aeração prolongada)							X	X
Lodos ativados conven. c/ remoção biológica de N/P		X	X	X	X	X	X	X
Lodos ativados c/ remoção biológica e química de N/P		X	X	X	X	X	X	X
Filtro biológico (baixa carga)	X	X	X	X	X		X	X
Filtro biológico (alta carga)	X	X	X	X	X	X	X	X
Biofiltro aerado submerso	X	X	X	X	X	X	X	X
Biodisco	X	X	X	X			X	X
Tanque séptico – filtro anaeróbio			X	X			X	X
Tanque séptico – infiltração subsuperficial			X	X				
UASB							X	X
UASB – lagoa de polimento							X	X
UASB – escoamento superficial							X	X
UASB – lodos ativados							X (b)	X (b)
UASB – biofiltros aerados submersos							X (b)	X (b)
UASB – filtro anaeróbio							X	X
UASB – filtro biológico de alta carga							X (b)	X (b)
UASB – flotação							X	X

(a) Opcional, (b) Pressupõe retorno do lodo excedente aeróbio para o UASB, onde sofre adensamento e digestão, (c) raspagem da camada colmatante do leito arenoso (5 cm iniciais)

Fonte: von Sperling e Gonçalves (2001)

3.5. DESAGUAMENTO DO LODO

O desaguamento do lodo tem o objetivo de reduzir o teor de umidade, diminuindo assim consideravelmente o seu volume. A redução de volume trás as seguintes vantagens: melhoria das condições de manejo do lodo, redução do custo de transporte, aumento do poder calorífico do lodo e redução do volume para a disposição final em aterro sanitário.

Catunda *et al.* (2000) citam que a umidade no lodo facilita o desenvolvimento de organismos patogênicos, enquanto van Haandel e Letting, (1994) comentam que a redução de umidade altera as propriedades mecânicas do lodo.

No Quadro 11 são mostradas as propriedades mecânicas com a umidade do lodo, e na Figura 3 é mostrada a variação de volume em função do teor de sólidos.

Quadro 11 - Umidade do lodo x propriedades mecânicas

Umidade de 100 a 75%	Lodo fluido
Umidade de 75 a 65%	torta semi-sólida
Umidade de 65 a 40%	sólido duro
Umidade de 40 a 15%	lodo em grânulos
Umidade de 15 a 0%	lodo desintegrado em pó fino

Fonte: von Sperling & Gonçalves, (2001).

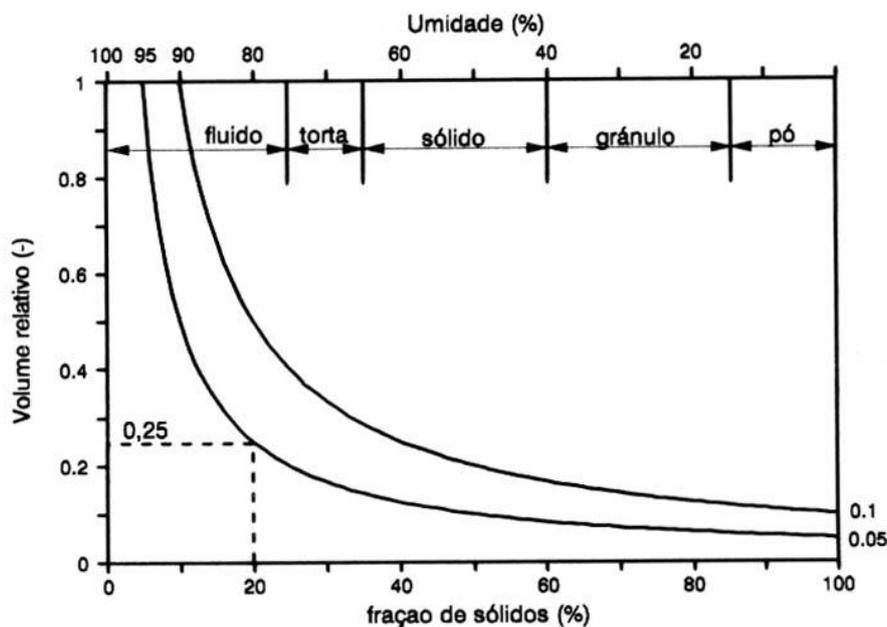


Figura 3 - Relação entre o volume de uma batelada de lodo e a sua fração de sólidos ou umidade
Fonte: van Haandel e Letting, 1994 p.VI-2

A redução de umidade da fase sólida dos esgotos pode ser realizada por operações mecanizadas ou naturais, sendo que a escolha deve levar em consideração o tipo de lodo a ser desaguado, a disponibilidade de área, o custo de operação, as atividades de manutenção, a quantidade de lodo a ser desaguado e o destino final do lodo desaguado.

van Haandel e Letting (1994) explicam que a água no lodo pode ser dividida em quatro classes diferentes, de acordo com a facilidade de separação de fases: água livre, pode ser removida por adensamento e flotação; água adsorvida, fração que pode ser removida por força mecânica ou pelo uso de um flocculante; águas capilares, fração que se mantém absorvida à fase sólida pela força capilar e distingue da água adsorvida pelo fato que a força para separação tem que ser maior; e água celular, parte da fase sólida e só pode ser removida provocando-se uma mudança de estado de agregação da água, isto é, através de congelamento ou evaporação.

Na Figura 4 são mostradas alternativas de disposição final e alguns processos para a separação das fases sólida líquida dos lodos, bem como as frações máximas de sólidos que se pode obter mediante cada processo.

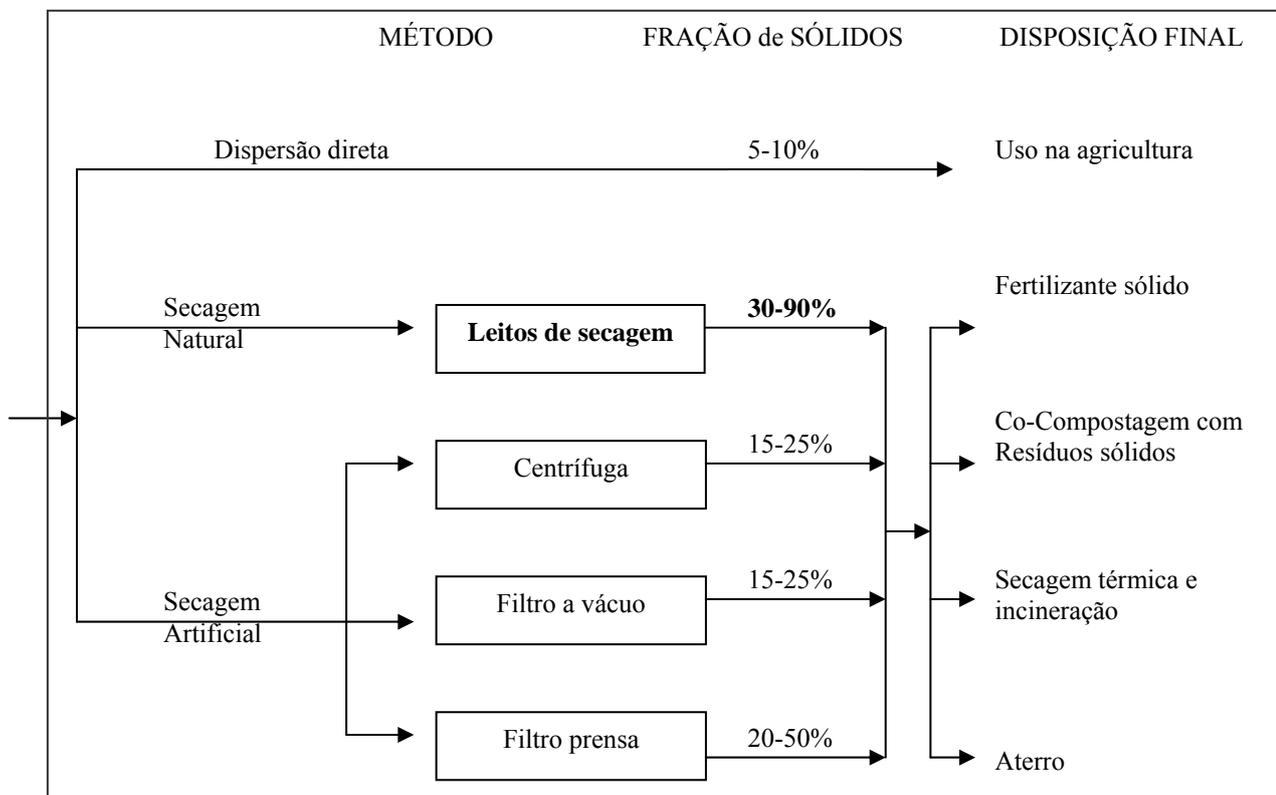


Figura 4 - Alternativas de disposição final e processos de desaguamento (VAN HAANDEL E MARAIS,1999, p. 303)

3.5.1. Operações mecanizadas de desaguamento

Estas unidades são mais compactas e sofisticadas, ocupando pequenas áreas se comparadas com os processos naturais, no entanto exigem mão de obra especializada para sua operação e manutenção, que deve ser realizada periodicamente.

Os sistemas mecanizados de secagem podem ser indicados quando não há disponibilidade de área para a utilização de sistemas de secagem naturais, condições climáticas desfavoráveis ou ainda quando a produção de lodo for excessiva, inviabilizando o uso de processos naturais.

A redução de umidade do lodo em sistemas mecanizados requer o pré-condicionamento do lodo, com a adição de agentes coagulantes para a formação de partículas maiores, mais fáceis de serem capturadas durante a operação de desaguamento, o que facilita a formação de uma torta mais seca e de um filtrado mais clarificado.

De acordo com Gonçalves e Ludovice (2000), o uso de agentes coagulantes está mais relacionado à concentração de sólidos do líquido centrifugado do que ao teor de sólidos da torta.

Os equipamentos mais usados para o desaguamento mecanizado do lodo são: filtro prensa, filtro esteira e centrífuga.

Filtro prensa

O filtro prensa opera em ciclos, utilizando a filtração por pressão para o desaguamento de lodo. Seu ciclo pode ser dividido em três etapas: enchimento do equipamento com lodo; formação da torta seca, pela ação da filtração por pressão crescente; e retirada da torta seca. Na Fotografia 2 é mostrado um filtro prensa.

Essa unidade de desaguamento mecanizada é composta por um conjunto de placas verticais, posicionadas consecutivamente e revestidas com um tecido filtrante, permeável ao líquido.



Fotografia 2 - Filtro prensa.

Fonte: <http://www.netzsch.com.br/filtros/index.php3>

O lodo previamente condicionado pela adição de coagulantes é transferido para o interior do filtro prensa, através da entrada D, preenchendo os “recessos” existentes entre as placas, conforme mostrado na Figura 5.

A placa móvel **B** comprime o conjunto de placas preenchidas com lodo, contra a placa fixa **A**, exercendo uma pressão crescente. Essa pressão faz com que o líquido com baixa concentração de sólidos atravesse o tecido filtrante, sendo o filtrado coletado em coletores específicos (**C**).

O líquido filtrado pode ser encaminhados ao início da estação de tratamento, enquanto que os sólidos ficam retidos no interior das placas, originando as tortas secas. Terminado o processo as placas são abertas (Figura 6) e as tortas secas retiradas.

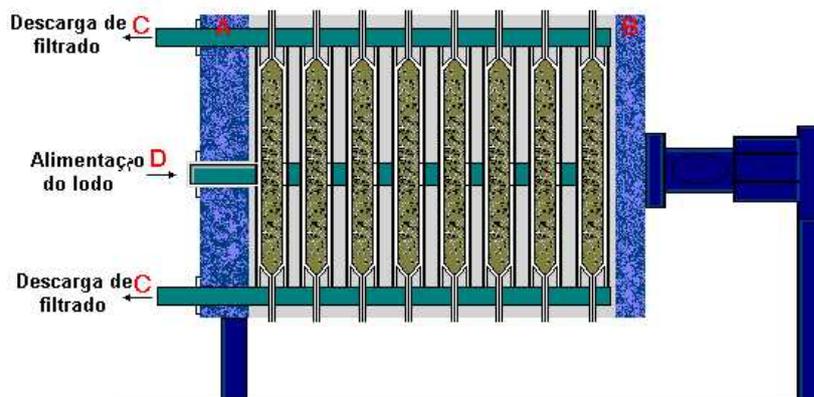


Figura 5 – Pontos de entrada do lodo e saída do filtrado de filtro prensa

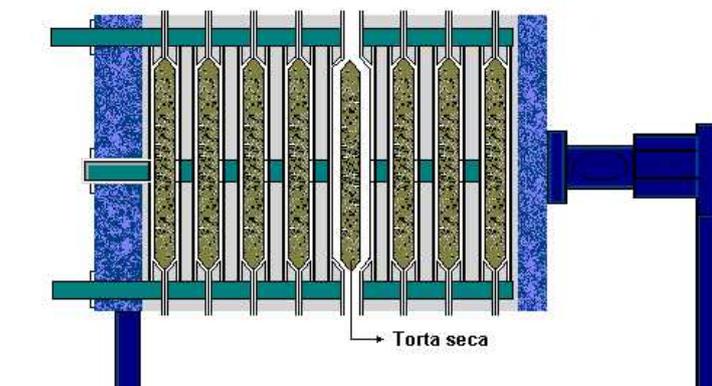


Figura 6 - Abertura das placas para retirada das tortas secas

Em experimentos para verificar o desaguamento de lodo de sistema convencional de lodo ativado, Almeida e Gonçalves (1993) obtiveram torta com teor de umidade de 62%, sendo utilizado cloreto férrico como condicionante químico.

Filtro esteira

O filtro esteira tem funcionamento contínuo, sendo o deságüe do lodo realizado pela ação da gravidade e pela filtração por compressão. Sua operação pode ser dividida em três estágios: drenagem gravitacional, zona de baixa pressão e zona de alta pressão, conforme mostrado na Figura 7.

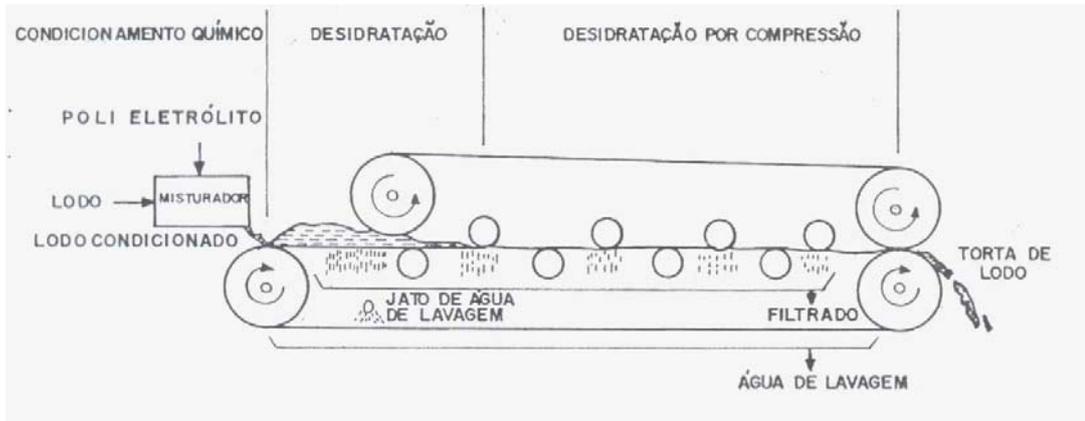


Figura 7 – Esquema de funcionamento de um filtro esteira.
Fonte: Jordão e Pessoa (1995).

Na Fotografia 3 é mostrado um filtro esteira.



Fotografia 3 - Filtro esteira
<http://www.sernagiotto.it/disid.html>

O lodo condicionado é inicialmente aplicado sobre a esteira superior, onde parte da água livre é removida pela ação da gravidade. Em seguida o lodo é comprimido por duas telas que passam por uma série de rolos.

Nesses rolos, primeiramente o lodo passa pela zona de baixa pressão, onde é submetido a uma suave compressão, quando libera uma parcela da água presente.

Em seguida, na zona de alta pressão, o lodo sofre uma compressão maior e crescente, que resulta em redução maior do teor de água.

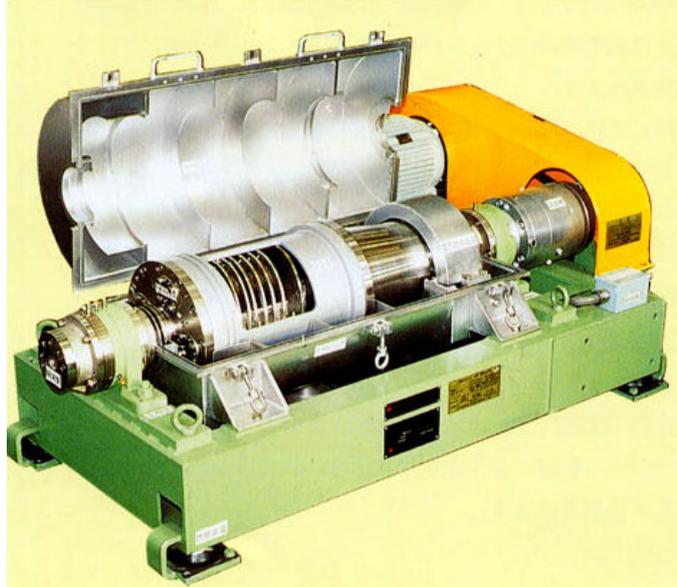
Segundo Richter (2001), a diminuição do diâmetro do rolo proporciona um aumento de pressão. Uma prensa com rolos de igual tamanho terá uma pressão constante e relativamente baixa, o que resultará em um lodo pouco desidratado. Portanto, para a obtenção de uma torta mais seca, o lodo deve ser submetido a uma pressão crescente, que será obtida com o uso de rolos de diâmetros decrescentes.

Almeida e Gonçalves (1993) estudaram o desaguamento em filtro esteira de lodo de sistema convencional de lodo ativado, previamente condicionado com polieletrólito e observaram que: mantendo-se fixa a vazão afluyente de lodo e a pressão da esteira ao aumentar a velocidade da esteira houve redução da concentração de sólidos; e fixando-se a velocidade da esteira e a vazão afluyente do lodo constataram que ao aumentar a pressão da esteira o teor de sólidos da torta aumentou, no entanto, foi verificada menor eficiência em termos de captura de sólidos.

Centrífugas

Segundo Bettiol e Camargo (2000), as centrífugas são equipamentos relativamente compactos que exigem apenas 40 m² de área para instalação de equipamento de grande porte. A vantagem desses equipamentos é que não emitem aerossol ou ruído excessivo, no entanto exigem mão de obra especializada, sendo que o custo de manutenção e o consumo de energia elétrica podem limitar o uso deste equipamento.

De acordo com Imhoff (1996), a centrífuga de carcaça fechada e rosca transportadora consiste em um tambor cônico de um lado, tendo uma rosca em seu interior. O lodo úmido é introduzido axialmente sob a influência da força centrífuga, sendo os sólidos em suspensão depositados na parede interna do tambor. Na Fotografia 4 é mostrada uma centrífuga.



Fotografia 4 – Centrífuga

Fonte: http://nett21.unep.or.jp/JSIM_DATA/WATER/WATER_4/html/Doc_264.html

Uma rosca que gira a uma velocidade um pouco maior empurra os sólidos para a extremidade de menor diâmetro, de onde saem da camada líquida e são então, descarregados. O líquido intersticial deixa o tambor pelo lado do diâmetro maior.

Richter (2001) comenta que aumentando-se a velocidade de rotação, obtém-se uma maior concentração de sólidos na torta e um efluente mais claro, mais acarreta o consumo maior de energia. Já Bettiol e Camargo (2000) observam que este aumento de velocidade provoca maior número de manutenções, devido ao maior desgaste dos rolamentos.

Andreoli (2001) verificou teor de sólidos da torta de 31,31%, ao desaguar lodo em centrífuga tipo decanter sem o uso de polieletrólito. No entanto, ao usar coagulante, o valor observado foi levemente maior (37,2%). Contudo, o uso de polieletrólito proporcionou efluente líquido melhor clarificado, possibilitando diminuição na matéria orgânica e nos sólidos, que sem e com uso polieletrólitos tiveram valor médio de 2821 mg/L e 585 mg/L, respectivamente.

Ao desaguarem lodo (condicionado quimicamente) proveniente de sistema convencional de lodo ativado em centrífuga do tipo decanter, Almeida e Gonçalves (1993) obtiveram torta com teor de umidade de 81%.

3.5.2. Sistemas naturais

Os sistemas naturais utilizam a evaporação e a percolação para a redução de umidade. Estes sistemas requerem grandes áreas e volumes. Em contrapartida, os custos de instalação são menores, a operação é simples e não necessitam de pessoal especializado. Esses sistemas naturais incluem os leitos de secagem e as lagoas de secagem.

Andreoli *et al.* (2000) comentam que dependendo do clima e da estação do ano a secagem do lodo pode levar de algumas semanas a alguns meses.

Lagoas de secagem

Gonçalves *et al.* (2001), comentam que as lagoas de lodo são projetadas para receber continuamente o lodo descartado da fase líquida da ETE por períodos prolongados de tempo (de 3 a 5 anos), durante este período, o lodo é adensado por ação da gravidade, digerido pelos microrganismos presentes no lodo, e desaguado através da água livre, da evaporação e do escoamento superficial.

A lagoa de secagem é uma unidade que recebe e armazena lodo para desaguamento natural por intermédio da evaporação. Segundo Aisse *et al.* (1999), diferem dos leitos de secagem quanto ao funcionamento, por não prever a percolação de água. Em vez disso, há a possibilidade de retirar a camada de água que se forma sobre a batelada do lodo, quando esta é colocada na lagoa. O restante tem que ser evaporado, de modo que em geral a secagem em lagoas demora bem mais que em leitos de secagem, mas em compensação a construção é mais simples.

De acordo com Gonçalves *et al.* (2001), a principal diferença das lagoas e dos leitos de secagem reside no fato de que a evaporação é o principal mecanismo que influencia no desaguamento, tendo a percolação um efeito menor que nos leitos de secagem.

Segundo Nunes (2001), as lagoas de secagem são construídas com profundidade de 3 a 5 metros, sendo que o autor ressalta que na utilização de lagoas de secagem deve ser analisada a possibilidade de contaminação do lençol freático.

3.6. LEITOS DE SECAGEM

Os leitos de secagem são tanques, geralmente de formato retangular, destinados a promover a redução do volume de água de lodos previamente estabilizados. É um método de desaguamento que se dá de dois modos: por percolação do líquido por uma camada drenante e por meio da evaporação natural da água. Para van Haandel e Letting (1994), fisicamente os leitos de secagem não diferem muito dos filtros de areia tradicionais.

Catunda *et al.* (2000) citam que a percolação é influenciada pelos seguintes fatores: granulometria do meio drenante, constituição da superfície, filtrabilidade do lodo e carga de sólidos aplicada. Enquanto a evaporação depende das condições meteorológicas, da carga de sólidos aplicada e da umidade do lodo no leito de secagem. Segundo van Haandel e Lettinga (1994), para lodo biológico, quanto maior for o seu grau de estabilização mais fácil será a sua secagem a uma taxa elevada.

Andreoli *et al.* comentam que a solarização não se relaciona somente com o processo de secagem, mas também com a higienização do lodo. Da mesma forma, van Haandel e Letting (1994) explicam que o prolongado período de exposição ao sol, certamente, promove considerável remoção de organismos patogênicos, sendo esta remoção mais eficiente na medida em que o sol for capaz de elevar a temperatura do lodo.

De acordo com Catunda *et al.* (2000), a maior parte da umidade do lodo é removida por percolação, sendo este processo observado até que o lodo atinja teor de umidade de cerca de 80%; a partir deste ponto, para que seja alcançada uma umidade menor é necessário que a água evapore.

Segundo Bettiol e Camargo (2000), o uso de leitos de secagem é indicado para o desaguamento de lodo, em comunidades de pequeno e médio porte, que tenham estações de tratamento para atender população média de 20.000 habitantes.

Para a utilização desta tecnologia é imperativo o distanciamento dos centros urbanos e a disponibilidade de espaço, já que, de acordo com Aisse *et al.* (2000), os leitos de secagem podem ocupar áreas na razão de 20hab./m². Portanto, o desaguamento de lodos de estações de tratamento que geram grandes quantidades, não é viável em leitos de secagem, devido à necessidade de extensas áreas e ao custo para remoção do lodo seco.

Assim, como desvantagens dos leitos de secagem podem ser citadas a necessidade de grandes áreas para sua implantação, a estabilização prévia do lodo, a possibilidade de emissão de odores desagradáveis, a possibilidade de proliferação de moscas, o número elevado de trabalhadores para a remoção do lodo seco.

Entre as vantagens oferecidas pelos leitos de secagem está o baixo custo de implantação, a simplicidade de operação, a mão de obra pouca qualificada para sua operação, o fato de não consumir energia elétrica, a baixa sensibilidade a variações das características do lodo e a torta com baixo teor de umidade, além do que, segundo Catunda *et al.* (2000), o lodo desaguado em leitos de secagem pode atingir teor de umidade bem mais baixo do que os adquiridos nos sistemas mecanizados.

van Haandel e Marais (1999) comentam que, em termos de qualidade do produto final, o leito de secagem é imbatível quando comparado com outros métodos de secagem, não somente pela obtenção de um produto muito mais seco, mas também pela qualidade higiênica do lodo desaguado em leito de secagem ser muito melhor do que de outros métodos de secagem mecânica, devido ao tempo de exposição (1 a 2 semanas) e a temperatura muito elevada que pode ocorrer pela absorção de raios solares pelo lodo preto.

Ao secarem lodo de reator RALF em leito de secagem coberto e descoberto no Paraná no verão (março de 1997), com carga de 23,7 kg SST/m² e altura da lâmina de lodo de 22 cm, Aisse *et al.* 2000 obtiveram ST de 25,8% e 26,6% no 14º dia e teor de ST de 30,6% e 31,3% no 20º dia, com precipitação acumulada no período de 54mm. Neste experimento o líquido drenado foi superior no leito de secagem descoberto, com uma DQO variando de 218 mg/L

(primeiro dia) a 79 mg/L (décimo dia), sendo que o líquido drenado do leito descoberto foi mais fraco do que o do leito coberto.

Mendonça e Campos (2000) ao avaliarem a secagem de lodo com teor de sólidos inicial de 2,8%, em leitos de secagem cobertos e descobertos, verificaram que após 25 dias de secagem, o leito coberto apresentava teor de sólidos de 34,9%, valor superior ao verificado no leito descoberto que apresentava teor de sólidos de 28,5%, segundo os autores esta diferença foi devido o período de chuvas frequentes.

Mendonça e Campos (2000) ao utilizarem leitos de secagem não convencionais, sendo usada estufa a temperatura de $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ para simular a queima do biogás, obtiveram no 5º e no 10º dia de secagem teor de sólidos de 93,7% e 95,1%, respectivamente.

Catunda *et al.* (2000) ressaltam que, em geral, quanto mais seco o lodo, maior a percentagem de patógenos eliminado, de modo que lodos mais secos terão uma qualidade higiênica maior.

3.6.1. Partes constituintes dos leitos de secagem

Usualmente, as principais partes constituintes dos leitos de secagem são: tanque de armazenamento, cobertura e a camada drenante.

O tanque de armazenamento é normalmente construído em alvenaria ou concreto, podendo ser cobertos ou descobertos, sendo que o uso ou não de cobertura é função das condições climáticas de cada local. Já a camada drenante é formada por: camada suporte, meio filtrante e sistema de drenagem.

De acordo com a NBR 12209 (1992), o meio filtrante deve ser composto de 4 camadas de agregados de granulometrias diferentes arrumados do fundo até a superfície de maneira decrescente. Na Figura 8 é representada graficamente as camadas drenantes.

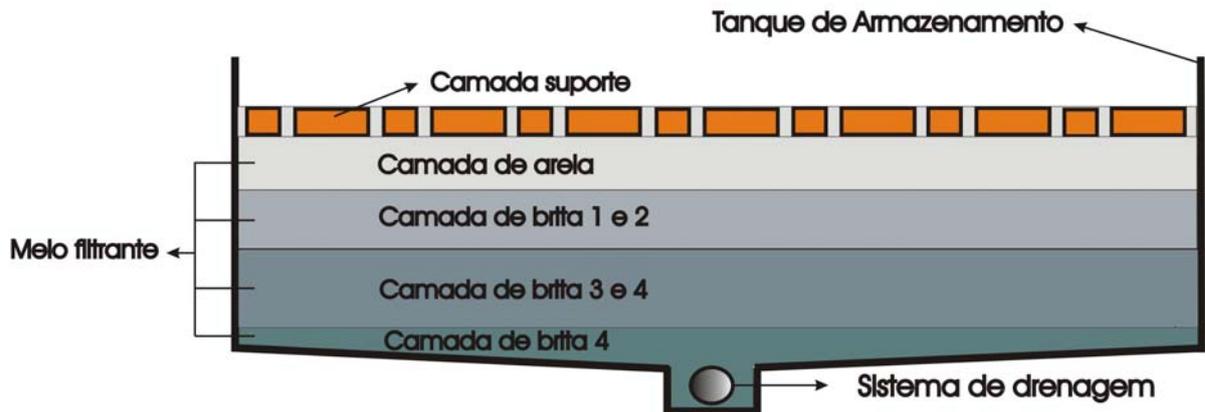


Figura 8 - Configuração dos leitos de secagem segundo a NBR 12209 (1992)

A camada superior de areia deve apresentar espessura de 7,5 a 15 cm, tendo diâmetro efetivo de 0,3mm a 1,2mm e coeficiente de uniformidade igual ou inferior a 5. Na Fotografia 5 é mostrada a colocação da camada de areia.



Fotografia 5 - Colocação da camada de areia em leito de secagem no Aterro Sanitário do Aura
Fonte: Projeto de recuperação da Bacia do UNA

Aisse *et al.* (1999) recomendam para leitos de secagem areia com diâmetro efetivo de 0,43 mm a 2,0 mm, com coeficiente de uniformidade < 3. Segundo os mesmos autores, a granulometria da areia pode influenciar na velocidade do processo de percolação e colmatação do leito de secagem.

Segundo Imhoff (1996), nos Estados Unidos utiliza-se areia com diâmetro efetivo de 0,3 a 0,5 mm e coeficiente de uniformidade inferior a 5, já Bettiol e Camargo (2000) e Richter (2001) comentam que a areia dos leitos de secagem devem ter diâmetro efetivo de 0,3 e 0,75 e coeficiente de uniformidade inferior a 4,0.

O diâmetro efetivo e o grau de uniformidade podem ser definidos com a construção da curva granulométrica. Esta curva é traçada por pontos em um diagrama semilogarítmico, no qual, sobre o eixo das abscissas, são marcados os logaritmos das dimensões das partículas e sobre os eixos das ordenadas as porcentagens, em peso, de material que tem dimensão média menor que a dimensão considerada (Caputo, 1988).

Essa curva granulométrica é utilizada para definir o diâmetro efetivo (d_e) que é o diâmetro correspondente a 10% em peso de todas as partículas menores do que ele; e o coeficiente de uniformidade (C_u) que é a razão entre os diâmetros correspondentes a 60% e 10%, tomados na curva granulométrica. (Caputo, 1988).

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Segundo esse mesmo autor, na realidade o coeficiente de uniformidade indica a falta de uniformidade, pois quanto menor o valor de C_u maior a uniformidade das partículas, podendo-se estabelecer a seguinte relação.

$C_u < 5$ – muito uniforme

$5 < C_u < 15$ - uniformidade média

$C_u > 15$ – desuniforme

A camada de brita é colocada sob a camada de areia sendo subdividida em três estratos decrescentes, de acordo com a dimensão da brita.

- 1) Superior – logo abaixo da camada de areia, constituída de brita 1 e 2 com espessura de 10 a 15 cm.
- 2) Intermediária – formada de brita 3 e 4 com espessura de 20 a 30 cm.
- 3) Inferior – composta de brita 4 ou pedra de mão com espessura mínima de 15 cm.

Camada suporte - Disposta acima da camada de areia, sendo formada de tijolos recozidos. Na Fotografia 6 é mostrada a camada suporte, que deve ser disposta de maneira harmoniosa e assentada de forma nivelada.



Fotografia 6 - Assentamento da camada suporte em leito de secagem no Aterro Sanitário do Aurá
Fonte: Projeto de recuperação da Bacia do UNA

As juntas entre os tijolos devem ter espaçamento de 2 a 3 cm, devendo ser preenchidas, logo após a colocação da camada suporte, com a mesma areia da camada superior do meio filtrante, para que não haja deslocamento dos componentes da mesma.

A área de drenagem formada pelos espaçamentos entre os tijolos não deve ser inferior a 15% da área total do leito de secagem. (NBR 12209, 1992).

Segundo Jordão e Pessoa (1995), a camada suporte tem as seguintes finalidades: manter a espessura do lodo uniforme; evitar que o lodo lançado no leito se misture com a areia do meio filtrante; facilitar a remoção manual do lodo seco; e evitar a formação de buracos devido à operação de remoção de lodo.

Sistema drenante - o sistema de drenagem está localizado na parte inferior do tanque, tendo a finalidade de drenar o líquido que atravessa o meio filtrante. Normalmente são utilizados tubos drenos ou material similar de diâmetro mínimo de 100 mm, distantes entre si não mais de 3,0 metros. (NBR 12209, 1992).

Jordão e Pessoa (1995) comentam que o líquido percolado deverá retornar ao processo, ou quando o corpo receptor permitir, poderá ser lançado com o efluente final da estação.

Ao avaliar o líquido drenado proveniente do desaguamento de lodo de reator UASB, em leitos de secagem cobertos, Mendonça (1999) encontrou valor de DQO mínimo, máximo e médio de 40 mg/L (observado no 25º dia de secagem), 385 mg/L (observado no 5º dia de secagem) e 167 mg/L, respectivamente. Já em leitos de secagem descobertos, essa autora verificou que o valor médio da DQO foi de 157 mg/L, enquanto o máximo e mínimo foram respectivamente de 276 mg/L (observado no 5º dia de secagem) e 63 mg/L (observado no 15º dia de secagem).

Segundo Mecalff & Eddy (1991), valores de DQO de até 250 mg/L caracterizam um esgoto fraco, enquanto DQO de 250 a 500 mg/L caracterizam esgoto médio.

Desta forma, a DQO observada no líquido percolado, por Mendonça (1999) em leitos de secagem cobertos no 25º dia, e em leitos de secagem descobertos no 15º, tinham características de esgoto fraco, enquanto que os valores observados no líquido drenado dos leitos cobertos e descobertos no 5º dia, tinham valores de DQO de esgoto considerado médio.

3.6.2. Projetos de leitos de secagem

Segundo a NBR 12209 (1992), na construção dos leitos de secagem devem ser observados os seguintes aspectos: o fundo do leito de secagem deve promover a remoção do líquido intersticial; não deve ser permitido o emprego de mantas geotêxteis no meio filtrante; o fundo do leito de secagem deve ser plano e impermeável, com inclinação mínima de 1% no sentido de um coletor principal de escoamento do líquido drenado; o dispositivo de entrada do lodo no leito de secagem deve permitir descarga em queda livre sobre placa de proteção da superfície da camada de areia; a altura livre das paredes do leito de secagem, acima da camada de areia deve ser de 0,5 a 1,0 m.

Esta norma também recomenda que a área do leito de secagem deve ser calculada a partir da: produção de lodo, período de secagem para a obtenção do teor de sólidos desejados e teor de sólidos no lodo aplicado, que não deve exceder a carga de 15 kg SST/m² em cada ciclo de operação.

Para Gonçalves *et al.* (2001) o dimensionamento de leitos de secagem pode ser realizado através de taxas empíricas, obtidas em ensaios sob condições controladas e específicas à situação enfocada, tendo como principais variáveis: a produção de lodo na ETE; características do lodo, no que diz respeito ao teor de sólidos totais e sólidos voláteis; o teor de sólidos totais na torta, que determinará o período de secagem e a espessura da camada de lodo por ocasião da descarga.

De acordo com Imhoff (1996), a melhor espessura para a camada líquida de lodo digerido é 20 cm, já Jordão e Pessoa (1995) recomendam espessura de 25 cm para a lâmina inicial de lodo, e ainda comentam que esta altura não deve ser superior a 30 cm.

van Haandel e Letting (1994) explicam que a produtividade de um leito de secagem é dada pela massa máxima de lodo seco por unidade de área de leito e por unidade de tempo. Segundo Aisse *et al.* (1999), a produtividade pode ser expressa pela razão entre a carga de sólidos aplicada a uma batelada e o tempo total de um ciclo de secagem.

Catunda *et al.* (2000) comenta que a produtividade de um leito de secagem pode ser calculada a partir de testes que determinam as velocidades dos processos de percolação e de evaporação em função da carga de sólidos que se aplica.

Para Aisse *et al.* (1999) a produtividade de um leito de secagem depende de vários fatores, tais como: umidade final do lodo desejada, carga de sólidos aplicada, construção do leito, condições climáticas, natureza do leito de secagem e natureza do lodo

- **Umidade final do lodo que deseja:** quanto mais seco o produto final, maior será o tempo de evaporação, portanto a produtividade do leito diminui à medida que o teor de sólidos requerido é maior;
- **Carga de sólidos aplicada na batelada:** tanto a aplicação de baixas cargas como de altas cargas em leitos de secagem levará a baixas produtividades, deste modo, deve haver uma carga intermediária ótima para qual a produtividade é máxima;
- **Natureza do lodo:** quanto melhor a estabilização do lodo, mais fácil será a percolação e mais curto o tempo total de um ciclo;
- **A natureza do leito de secagem:** granulometria do leito pode influenciar a velocidade do processo de percolação e principalmente a facilidade com que se experimenta problemas de colmatar o leito, ou seja, redução da permeabilidade do leito.
- **As condições climáticas:** condições que favorecem uma rápida evaporação são umidade relativa do ar baixa, vento, temperatura elevada e ausência de precipitação.
- **Construção do leito:** a presença de cobertura do leito pode resultar em uma redução da taxa de evaporação porque o vapor de água não pode escapar.

De acordo com Catunda *et al.* (2000), na prática é importante que se reduza ao máximo o teor de água no lodo, porque a massa de água aumenta o custo de transporte e da disposição final do lodo, além de facilitar o desenvolvimento de organismos patogênicos.

No entanto, Gonçalves *et al.* (2001) comenta que após atingir teores de sólidos em torno de 30%, o lodo deve ser retirado do leito de secagem tão rápido quanto possível, para não dificultar a sua remoção posterior. Além do que, segundo o autor, a permanência prolongada do lodo nos leitos de secagem promove o crescimento de vegetação que, além de mostrar indícios de mau planejamento, atrapalha de forma considerável a sua retirada. Nas Fotografias 7 e 8 é mostrado o crescimento de vegetação nos leitos de secagem do Aura (RMB) que é utilizado para o desaguamento do tanques sépticos.



Fotografia 7 - Crescimento de vegetação em leito de secagem



Fotografia 8 - Crescimento de vegetação em leito de secagem

Van Haandel e Lettinga (1994) comentam que a produtividade para lodos com relativamente muita água (umidade de 60 a 70%) é mais que o dobro daquela para lodo com pouca água (umidade de 20 a 30%).

Bettiol e Camargo (2000) explicam que um lodo ativado é mais difícil de ser desaguado do que um lodo primário digerido anaerobiamente. Para os autores esta diferença é devido à variação na capacidade de desaguamento, sendo diretamente relacionada com o tipo de sólido e a forma com que a água está ligada às partículas do lodo.

O lodo digerido, saturado de gás, cede sua água pela base, ou seja, flutua sobre sua própria água por um processo análogo ao da flotação, ao contrário do que acontece com o lodo desgaseificado. (IMHOFF, 1996).

Segundo Jordão e Pessoa (1995), a secagem do lodo digerido não é afetada pelas chuvas, já GALLEGOS apud AISSE *et al.* (1999) comenta que o projeto de leitos de secagem com cobertura representa uma solução extremamente onerosa e de utilidade discutível, já que

as águas de chuva, aproveitando a porosidade da massa em processo de secagem, acabam percolando e sendo retiradas pelo sistema de drenagem.

Para Aisse *et al.* (1999) a presença de cobertura do leito pode resultar em uma redução da taxa de evaporação porque o vapor de água não pode escapar.

Por outro lado, Samúdio (1995) entende que a variação climática influencia significativamente o funcionamento dos leitos de secagem, pois o alto índice de precipitação pluviométrica e a umidade do ar acentuada podem provocar aumento na duração do ciclo de secagem.

Mendonça e Campos (2000) observaram que o teor de sólidos em leitos de secagem cobertos foi superior ao dos leitos de secagem descobertos, devido à ocorrência de chuvas freqüentes no período.

Assim, não existe consenso na literatura técnica quanto à eficácia da cobertura nos leitos de secagem.

O tempo necessário para um ciclo de secagem do lodo (T_t) em um leito se compõe em quatro períodos diferentes: (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994; CATUNDA *et al.*, 2000; AISSE *et al.*, 1999)

$$T_t = T1 + T2 + T3 + T4$$

T1 = tempo para preparação do leito e descarga do lodo

T2 = tempo de percolação

T3 = tempo de evaporação para atingir a fração desejada de sólidos

T4 = tempo para remoção de sólidos secos

O T_t (tempo total do ciclo) é dado pela soma dos tempos necessários para cada uma das quatro operações. van Haandel e Lettinga (1994) explicam que os períodos T1 e T4 dependem, principalmente, do número de trabalhadores e da disponibilidade de equipamentos

mecanizados, no entanto, os autores comentam que o tempo de descarga do lodo a ser tratado e de remoção de sólidos secos também estão relacionados a carga aplicada.

Catunda *et al.* (2000) citam que o tempo T2 e T3 devem ser determinados pelas condições operacionais durante a secagem, ou seja, as condições meteorológicas, a carga aplicada de sólidos e a natureza do lodo e do leite.

3.7. GERENCIAMENTO DO LODO DE TANQUES SÉPTICOS NO MUNICÍPIO DE BELÉM

Na recente pesquisa divulgada pelo IBGE (2002) foi verificado que nos locais que não existe coleta de esgotos sanitários, 48% dos dejetos são encaminhados para tanques sépticos.

No município de Belém também é prática comum a utilização de tanques sépticos para o tratamento de esgotos domésticos. Um exemplo desta situação foi a recente implantação de cerca de 26.000 tanques sépticos pelo Projeto de Recuperação da Bacia do Una. Diante desta informação, constata-se que a quantidade de lodo gerado na cidade de Belém é elevada, devido ao grande número de unidades instaladas.

Na maioria das vezes, o lodo gerado nessas unidades não tem destinação adequada, sendo lançado clandestinamente na rede de drenagem ou diretamente nos corpos d'água da cidade, comprometendo assim a qualidade dos mesmos e pondo em risco a saúde humana. Isso ocorre porque quase sempre os serviços de coleta, tratamento e disposição final dos resíduos gerados na limpeza de tanques sépticos não são de responsabilidade da empresa concessionária dos serviços de água e esgoto, e sim de empresas privadas. Além disso, a descentralização das atividades de limpeza é outro fator que dificulta a fiscalização da remoção e destinação final do lodo de esgoto originário dos tanques sépticos.

Essa dispersão de atividades serve de obstáculo não apenas para a fiscalização das etapas de manuseio, transporte e destinação final de lodo gerado em tanques sépticos, mas também dificulta a estimativa da quantidade de lodo produzido na RMB, onde não é conhecido o número de tanques sépticos em funcionamento. É importante observar que essa

quantificação permitiria a determinação do número necessários de unidades de condicionamento / tratamento, bem como o volume de lodo seco que seria encaminhado para destinação final ou reciclagem.

Uma pequena parte do lodo produzido nos tanques sépticos instalados no município de Belém é desaguado em leitos de secagem e encaminhado para destinação final (células de resíduos sólidos do Aterro Sanitário do Aura). Contudo, a maior parte do lodo gerado ainda é disposta de maneira irregular. No entanto, esta situação é observada em vários outros lugares do Brasil, Meneses *et al.* (2001) relatam que em Natal os resíduos removidos de tanques sépticos por empresas privadas do tipo limpa fossa comumente são dispostos no solo ou em áreas inundáveis, a céu aberto, normalmente localizadas na periferia.

Na Figura 9 é mostrada a destinação de parte dos resíduos (líquido e lodo) gerados em tanques sépticos instalados em Belém, porém, vale ressaltar que grande parcela do lodo removido dos tanques sépticos não é encaminhada para este sistema.

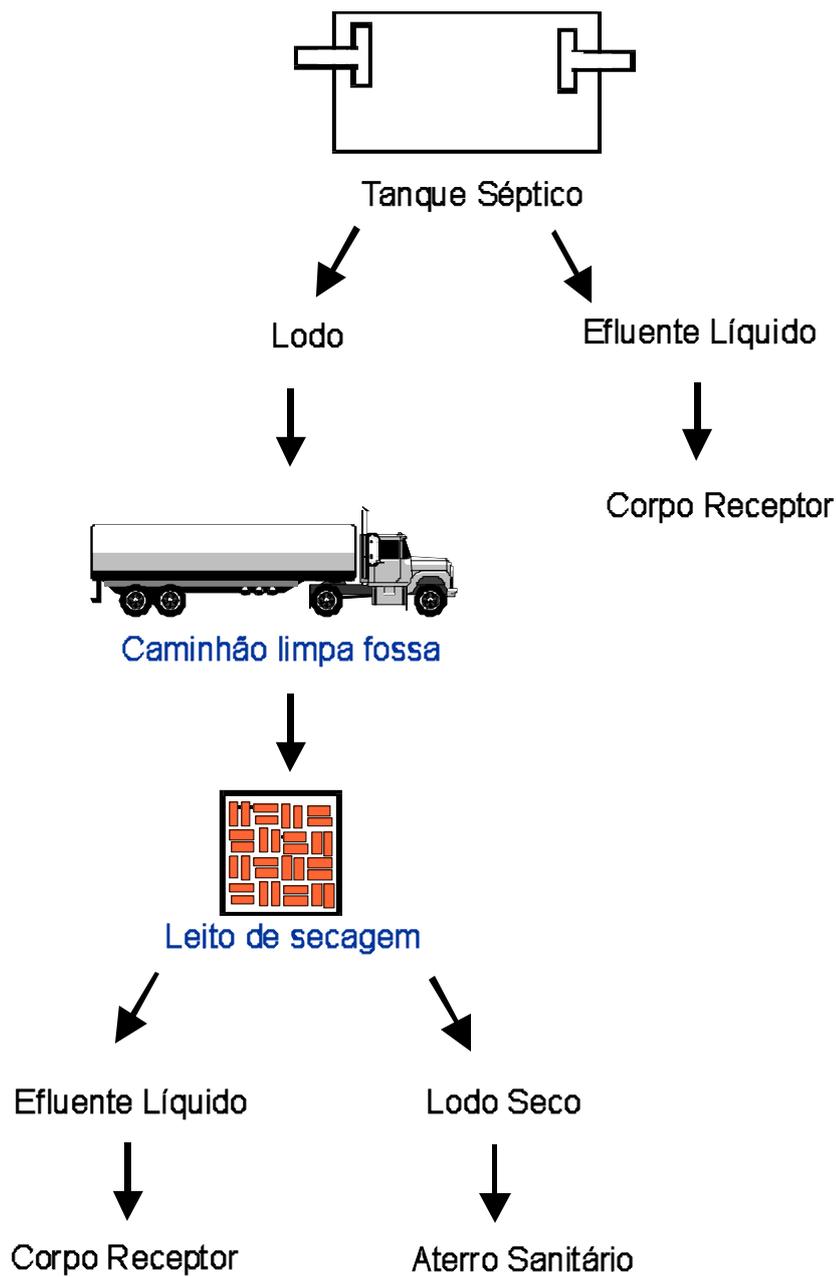


Figura 9 - Destino de parte dos resíduos (líquido efluente e lodo) gerados em tanques sépticos instalados no município de Belém.

O desaguamento de lodo na cidade de Belém ocorre por processo natural em leito de secagem. Uma das finalidades do desaguamento do lodo é a redução dos custos de transporte. No entanto, neste aspecto, no município de Belém o desaguamento não representa uma vantagem, já que as etapas de desaguamento e destinação final ocorrem no mesmo local (aterro sanitário do Aurá).

O desaguamento de lodo produz dois subprodutos: o lodo seco que pode ser encaminhado para aterro sanitário ou reciclado dependendo das suas características físicas, químicas e biológicas; e o líquido drenado, que em estações de tratamento de esgoto deve ser encaminhado ao início da estação e misturado ao esgoto afluyente.

A lei municipal nº 7.597, de 29 dezembro de 1992, disciplina a obrigatoriedade das empresas limpa fossa de determinarem o local de despejo dos dejetos recolhidos, ficando as Secretarias Municipais de Saúde (SESMA) e Saneamento (SESAN) responsáveis pela aprovação por meio de laudo técnico do local escolhido.

Quanto à manutenção dos tanques sépticos, a lei municipal nº 7.940, de 19 janeiro de 1999, que dispõe sobre os serviços e obras para a coleta, tratamento e disposição final de esgoto sanitário no Município de Belém, estabelece que os tanques sépticos deverão sofrer remoção do lodo a cada período de um ano de uso, podendo este período ser ampliado se comprovado pelo dimensionamento um intervalo de tempo maior entre limpezas, sendo que o proprietário, caso não execute a limpeza no período determinado, estará sujeito a sanções estabelecidas pelo órgão competente.

A mesma lei estabelece que o local para a disposição do lodo removido será determinado pelo órgão municipal competente, especificando ainda que estes locais devem ser preferencialmente leitos de secagem, podendo ser adotada também qualquer outra instalação adequada.

A lei Ambiental do Estado do Pará nº 5.887 de maio de 1995, que dispõe sobre a política estadual do meio ambiente, estabelece a obrigatoriedade do tratamento e do destino final adequado dos esgotos sanitários no Estado, sendo que na impossibilidade da implantação de sistema convencional de tratamento de esgoto, em municípios ou localidades de grande e médio porte, a referida lei indica o uso de tanques sépticos e filtros anaeróbios, seguido de destinação final adequada para os efluentes tratados. Já em municípios de pequeno porte a mesma recomenda o uso fossas sanitárias, cujo efluente líquido, quando houver, deverá ter destinação final adequado.

A mesma lei estabelece, quando da adoção de tanques sépticos, que os mesmos deverão ser esgotados periodicamente, cabendo ao poder público a criação de locais adequados para o tratamento e a destinação final do lodo retirado dos tanques sépticos ou similares.

Desta forma verifica-se que tanto o Estado como o Município dispõe de leis que determinam a manutenção de tanques sépticos, e que também prevêm a destinação a ser dada ao lodo gerado nestas unidades. Contudo, ainda é preciso a realização de estudos para determinação de parâmetros de projeto, construção e operação de leitos de secagem adequados às condições climáticas, econômicas e ambientais da RMB, especialmente pelas normas brasileiras terem sido elaboradas com dados de outras regiões do Brasil.

4

4. INSTALAÇÕES E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A pesquisa foi realizada nos leitos de secagem do sistema experimental de desaguamento de lodo do Campus Profissional da Universidade Federal do Pará (UFPA), sendo o monitoramento do desaguamento de lodo realizado em 4 meses (outubro de 2002 a janeiro de 2003) com duas fases experimentais. Antes da realização dos ciclos de secagem foi realizada a seleção e preparação dos leitos de secagem.

4.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

O sistema experimental é constituído por 12 leitos de secagem, sendo 6 cobertos com telhas de barro e 6 descobertos. Na Figura 10 é mostrada a disposição dos leitos de secagem no sistema experimental, e identificados os leitos de secagem utilizados no monitoramento do desaguamento do lodo.

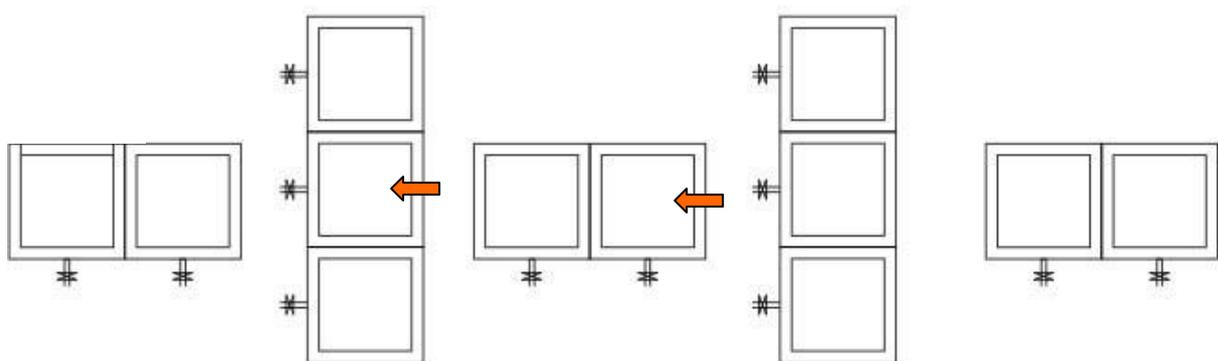


Figura 10 - Disposição dos leitos de secagem no sistema experimental da UFPA

Os leitos de secagem apresentam altura total de 1,4 m e área superficial de 1 m² (1,0 m de largura e 1,0 m de comprimento). Na Fotografia 9 são mostrados leitos de secagem cobertos e descobertos do sistema experimental da UFPA.



Fotografia 9 - Leitos de secagem cobertos e descobertos do sistema experimental da UFPA

Os tanques apresentam fundo com declividade de 2% em direção a tubulação de saída, que apresenta diâmetro de 32 mm (PVC), portanto, menor que o valor mínimo de 100 mm recomendado pela NBR 12209 (1992). Na Figura 11 é mostrada a localização do sistema de drenagem dos leitos de secagem.

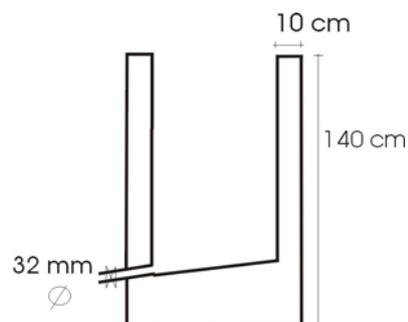


Figura 11 – Localização do sistema de drenagem

De acordo com a NBR 12209 (1992), o meio filtrante dos leitos de secagem deve ser composto de brita e areia com granulometrias específicas, conforme mostrado na Figura 8.

No entanto, na camada inferior do sistema experimental da UFPA foi utilizado seixo ao invés de brita, em razão da brita não ser um material facilmente encontrado na região, logo sua utilização levaria ao aumento dos custos de construção dos leitos de secagem. Os materiais das demais camadas foram mantidas de acordo com as recomendações da NBR 12209 (1992).

Na Figura 12 é apresentada a configuração prevista inicialmente para os leitos de secagem utilizados no experimento.

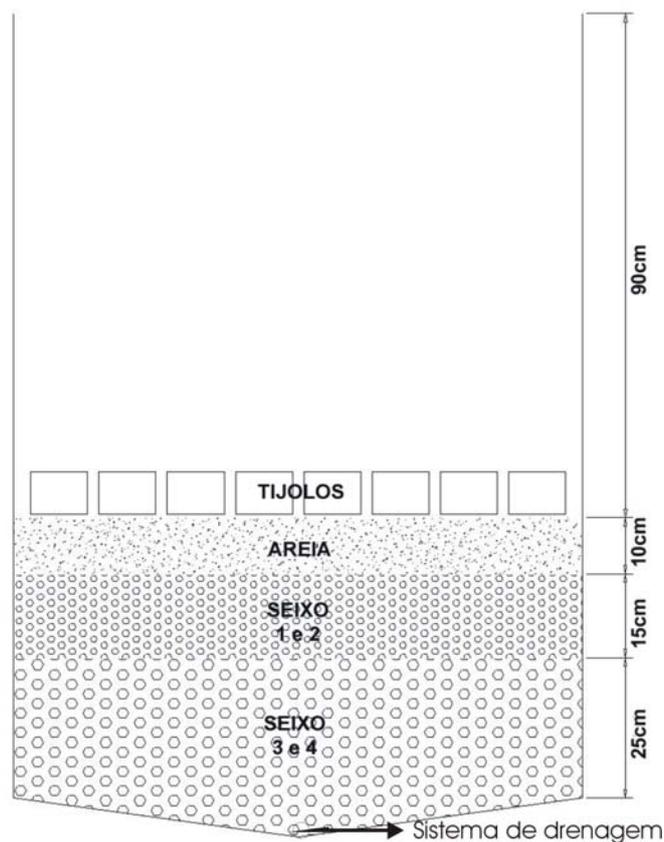


Figura 12 - 1ª Composição prevista para os leitos de secagem

Conforme pode ser observado na Figura 12, não foi utilizada a camada de seixo 5 ou pedra de mão, que é recomendada para nivelar o fundo dos leitos de secagem. Isso ocorreu devido à pequena distância entre as paredes laterais e o fundo do tanque resultar em desnível de apenas 2 cm.

No entanto, essa configuração resultou em trespasse da areia através da camada de seixo 1 e 2. Desta forma, a substituição da brita por seixo de mesma granulometria não se mostrou alternativa eficaz para a composição do meio filtrante dos leitos de secagem.

Na tentativa de evitar a perda de areia foi utilizada uma camada de seixo 0 sobre a camada de seixo 1 e 2. Na Figura 13 é mostrada a configuração dos leitos de secagem utilizados na pesquisa.

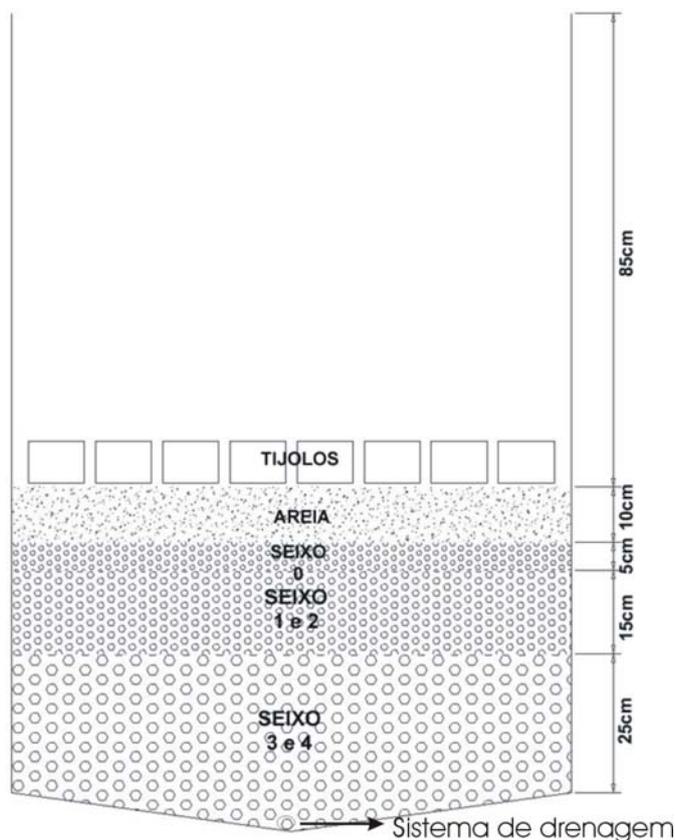


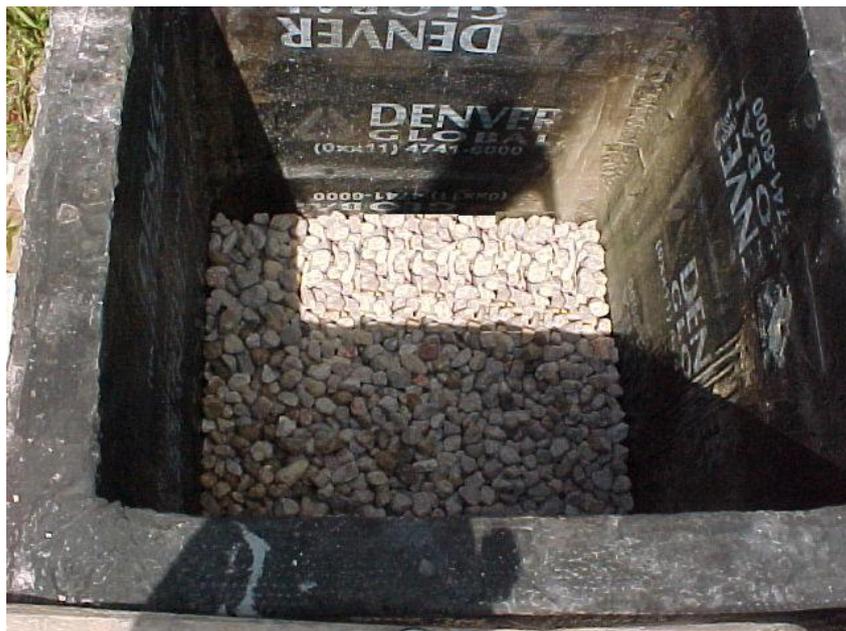
Figura 13 - Composição dos leitos de secagem do sistema experimental da UFPA

Antes da colocação dos materiais componentes do meio filtrante foi realizada a impermeabilização das paredes e do fundo dos leitos de secagem, conforme é mostrado na

Fotografia 10, nessa impermeabilização foi utilizada manta asfáltica de polipropileno com 3 mm de espessura. Para verificar a estanqueidade, os tanques ficaram preenchidos com água até a sua superfície por 48 horas. Nas Fotografias 11, 12, 13 e 14 é mostrado o meio filtrante utilizado no preenchimento dos leitos de secagem. Na Fotografia 15 é mostrado o leito de secagem descoberto após a colocação do meio filtrante e da camada suporte.



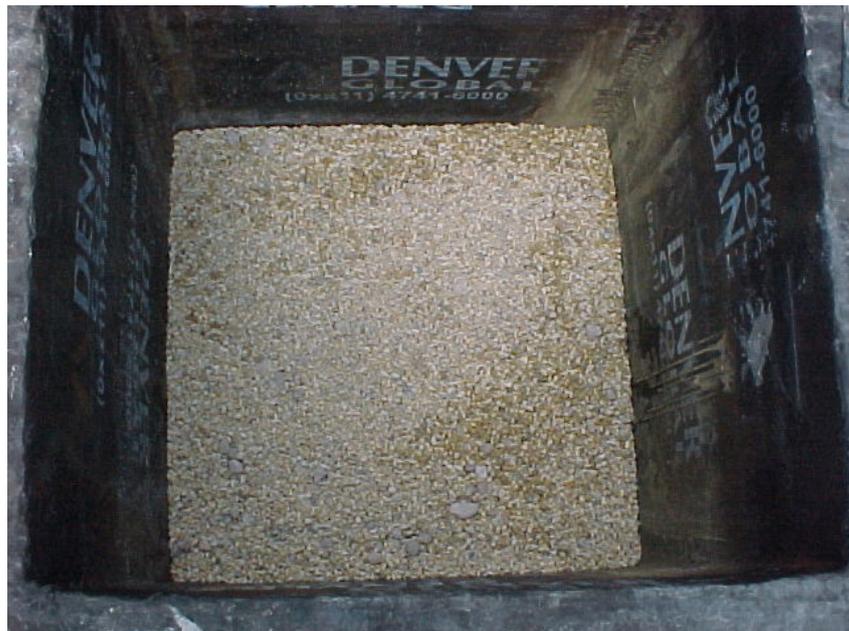
Fotografia 10 - Leito de secagem impermeabilizado com manta asfáltica



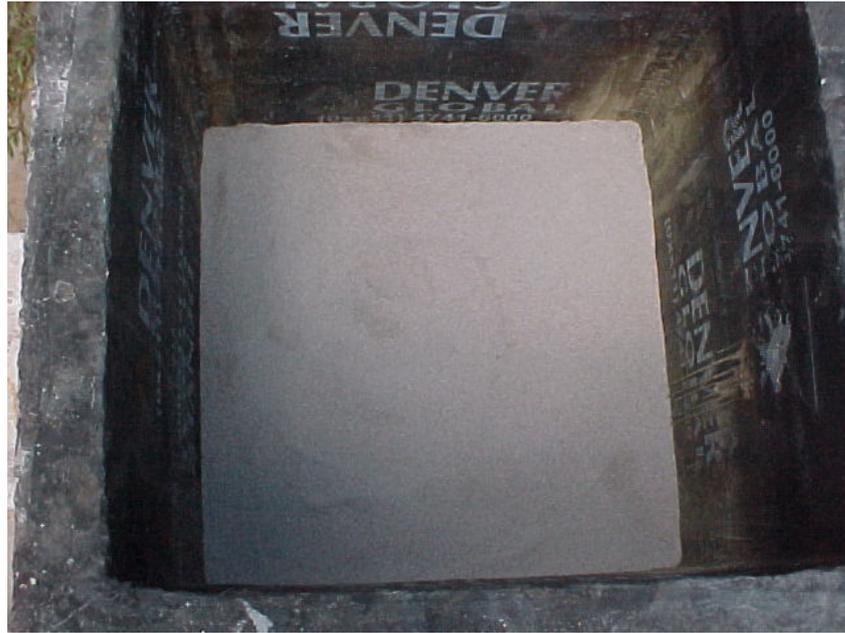
Fotografia 11 - Camada de seixo 3 e 4



Fotografia 12 - Camada de seixo 1 e 2



Fotografia 13 - Camada de seixo 0



Fotografia 14 - Camada de areia



Fotografia 15 - Leito de secagem após a colocação do meio filtrante

Após a colocação do meio filtrante, os leitos de secagem foram preenchidos com água para remoção de pequenas partículas que estivessem agregadas ao seixo e a areia, já que a sua presença certamente influenciaria nas características do líquido drenado.

Após a limpeza, os leitos de secagem receberam a primeira descarga de lodo. Terminado o primeiro ciclo de secagem, o lodo seco foi removido e os leitos de secagem preparados novamente, para o recebimento da segunda descarga de lodo.

Entre um ciclo e outro foi realizada a recomposição dos leitos de secagem no intuito de garantir a mesma permeabilidade do meio filtrante nos dois ciclos de secagem. Essa recomposição consistiu na remoção do lodo que ficou acumulado na superfície do leito de secagem.

Logo em seguida a recomposição da camada de areia foi realizada nova lavagem dos leitos de secagem, sendo utilizado o mesmo procedimento da primeira lavagem.

4.2. SELEÇÃO DO MEIO FILTRANTE

Na seleção do meio filtrante do sistema experimental da UFPA foram realizados ensaios para determinação da granulometria de cada material utilizado nos leitos de secagem.

Camada inferior - seixo

Para a composição da camada inferior do meio filtrante foi utilizado seixo selecionado, que foi adquirido em sacos de 25 litros.

Foi realizado com seixo ensaio para avaliar o percentual da sua composição granulométrica, sendo utilizado para isso a classificação proposta por Bauer (1979) para brita, conforme mostrado no Quadro 12.

Quadro 12 - Classificação da brita de acordo com a sua constituição granulométrica

Brita nº	Malha em mm	
	Mínima	Máxima
0	4,8 mm	9,5 mm
1	9,5 mm	19,0 mm
2	19,0 mm	25,0 mm
3	25,0 mm	38,0 mm
4	38,0 mm	76,0 mm
Pedra de mão	> 76 mm	

No Quadro 13 é mostrado o resultado do ensaio granulométrico que foi realizado no seixo utilizado na camada inferior dos leitos de secagem, para esse ensaio foi utilizado aproximadamente 20 kg de amostra.

Quadro 13 - Resultado do ensaio granulométrico realizado no seixo da camada inferior

Abertura da peneira (mm)	Peso retido (kg)
50	0
38,0	5,86
25,0	13,42
19	0,42
12,5	0,08
9,5	0,02

Comparando com a classificação proposta por Bauer (1979), foi verificado no ensaio que 67% da amostra foi classificada como seixo 3, 30% como seixo 4 e somente 3% apresentou granulometria inferior à estabelecida pela NBR 12209 (1992). Esses valores são apresentados no Gráfico 1.

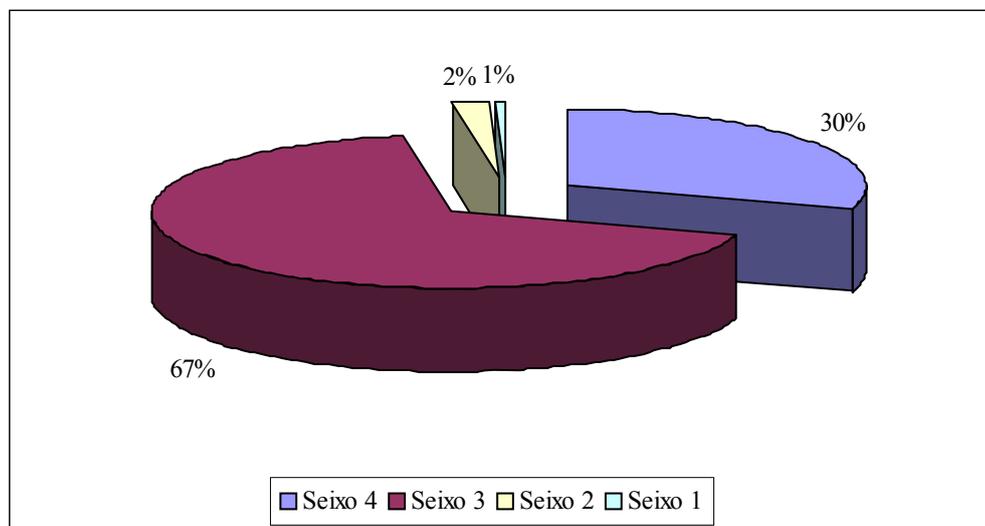


Gráfico 1 - Composição granulométrica da camada inferior de seixo

O resultado do ensaio granulométrico da camada intermediária de seixo é mostrado no Quadro 14. Neste ensaio foram utilizado 12,4 kg de amostra.

Quadro 14 - Resultado do ensaio granulométrico realizado no seixo da camada intermediária

Abertura da peneira (mm)	Peso retido (kg)
19,0	2,88
12,5	7,32
9,5	2,2

No Gráfico 2 é mostrada a composição granulométrica da camada intermediária de seixo, sendo possível observar que a maior parcela (77%) corresponde ao seixo classificado como 1, enquanto o restante (23%) é referente ao seixo 2.

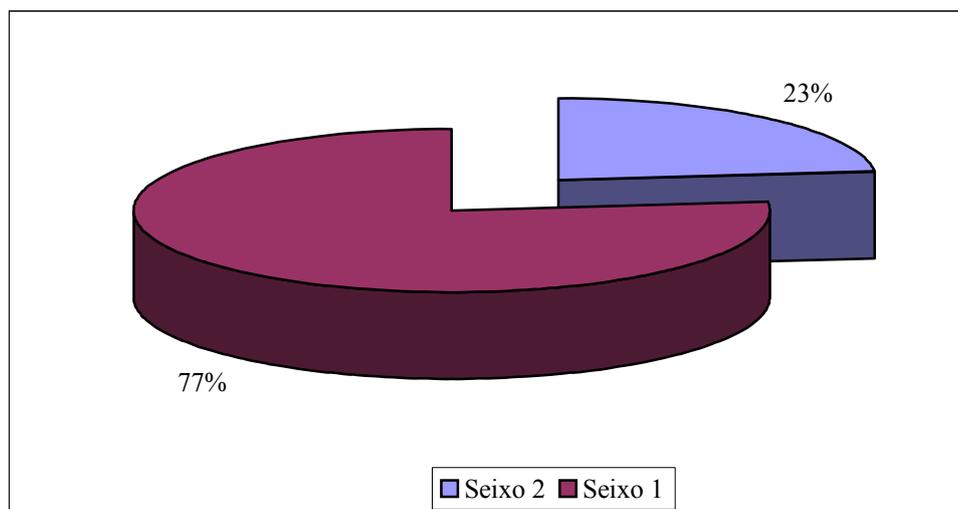


Gráfico 2 - Composição granulométrica da camada intermediária de seixo.

A camada superior composta de seixo 0 (material que passa na peneira com abertura de 9,5 e fica retido na peneira com abertura de 4,8 mm) foi colocada para evitar o trespasse da areia.

Camada superior - areia

A areia utilizada na camada superior dos leitos de secagem foi fornecida em sacos de 25 kg e selecionada de acordo com o seu diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade sendo realizada a análise granulométrica para a determinação destes parâmetros.

Nos ensaios com areia foram utilizados 3 amostras denominadas de A, B e C. Antes de cada ensaio granulométrico, a areia foi previamente seca (ao ar livre) e homogeneizada, e por processo de quarteamo selecionado 1 kg de cada areia para a sua caracterização.

Em todos os ensaios granulométricos foram utilizadas as peneiras de nº 04, 08, 16, 30, 50, 100 e 200 da série americana de peneiras. Nas Fotografias 16 e 17 são mostrados o peneirador mecânico e as peneiras utilizadas nos ensaios, respectivamente.



Fotografia 16 - Peneirador Mecânico



Fotografia 17 - Peneiras utilizadas na seleção da areia

As porções retidas em cada peneira foram registradas e expressas em porcentagem, de acordo com as aberturas das peneiras. A curva granulométrica foi traçada em Gráfico semi-logarítmico, sendo, então, determinado o diâmetro efetivo e o coeficiente de uniformidade de cada amostra.

Nos Quadros 15, 16 e 17 são apresentados os resultados dos ensaios granulométricos das areias A, B e C, respectivamente, sendo nos gráficos 3, 4 e 5 mostradas as curvas granulométricas dessas areias.

Quadro 15 - Resultados da análise granulométrica da areia A

Abertura da peneira (mm)	Peso retido (g)	% retida	% acumulada que passa
Fundo	0,24	0,024	-
0,075	0,13	0,013	0,024
0,15	0,13	0,013	0,037
0,3	3,64	0,364	0,05
0,6	778,56	77,856	0,414
1,2	217,3	21,73	78,27
2,4	0	0	100
4,8	0	0	100

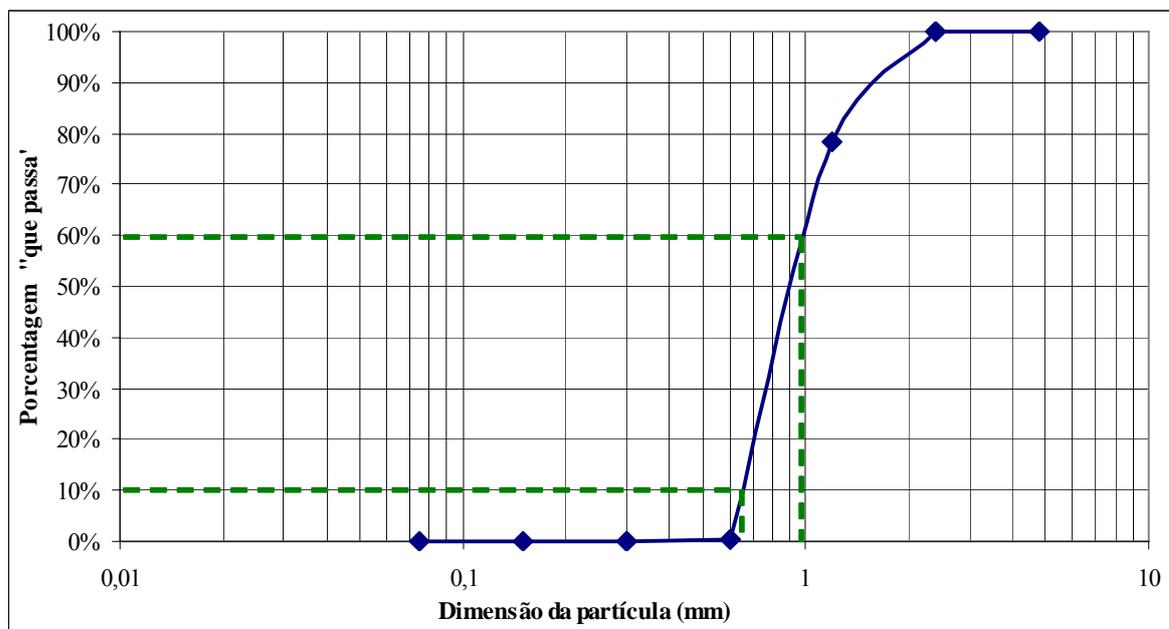


Gráfico 3 - Curva granulométrica da areia A

Diâmetro efetivo (areia A) = 0,67 mm

Coefficiente de uniformidade (areia A) = 1,49

Quadro 16 - Resultados da análise granulométrica da areia B

Abertura da peneira (mm)	Peso retido (g)	% retida	% acumulada que passa
Fundo	0,63	0,063	-
0,075	0,42	0,042	0,063
0,15	0,58	0,058	0,105
0,3	0,87	0,087	0,163
0,6	15,46	1,546	0,25
1,2	918,23	91,823	1,796
2,4	63,81	6,381	93,619
4,8	0	0	100

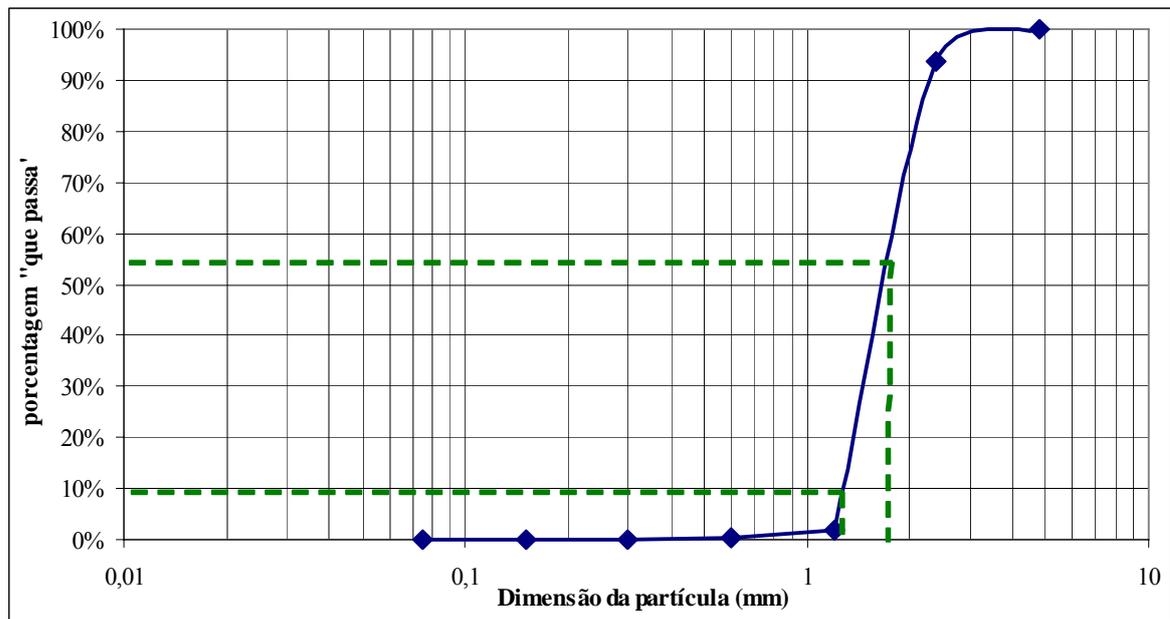


Gráfico 4 - Curva Granulométrica areia B

Diâmetro efetivo (areia A) = 1,3 mm

Coefficiente de uniformidade (areia A) = 1,38

Quadro 17 - Resultados da análise granulométrica da areia C

Abertura da peneira (mm)	Peso retido (g)	% retida	% acumulada que passa
Fundo	0	0	-
0,075	1,42	0,142	0
0,15	1,50	0,15	0,142
0,3	1,77	0,177	0,292
0,6	3,61	0,361	0,469
1,2	13,15	1,315	0,83
2,4	940,13	94,013	2,145
4,8	38,42	3,842	96,158

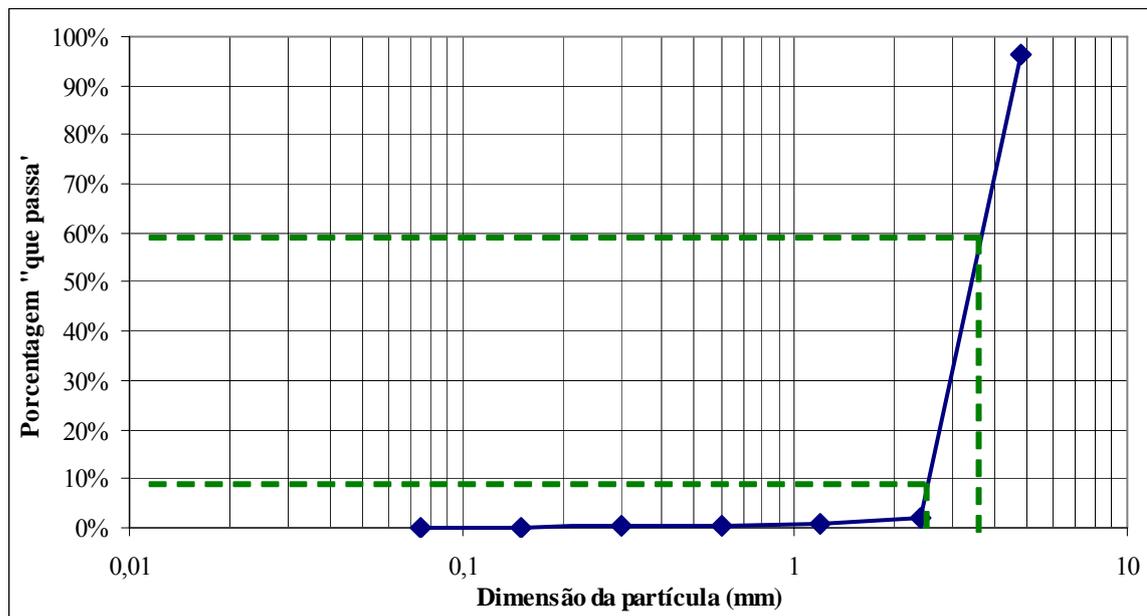


Gráfico 5 - Curva Granulométrica areia C

Diâmetro efetivo (areia A) = 2,6 mm

Coefficiente de uniformidade (areia A) = 1,46

No Quadro 18 são apresentados os resultados das análises granulométricas das areias A, B e C, sendo ainda indicadas as faixas recomendadas pela NBR 12209 (1992).

Quadro 18 - Diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade das areia A, B e C, e faixa recomendada pela NBR 12209 (1992)

Areia	A	B	C	NBR 12209
Diâmetro Efetivo (mm)	0,67	1,3	2,6	0,3 – 1,2
Coeficiente de uniformidade	1,49	1,38	1,46	≤ 5

Desta forma, quanto ao coeficiente de uniformidade, todas as areias estavam de acordo com a NBR 12209 (1992). Já em relação ao diâmetro efetivo, somente a areia **A** atendeu a referida norma, mesmo assim, a areia selecionada para desenvolver o experimento foi a areia **B**, pois segundo Caputo (1986), o diâmetro efetivo é um dos fatores que determina a permeabilidade de uma areia.

Caputo (1986) define a permeabilidade como a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo seu grau de permeabilidade expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade.

O mesmo autor demonstra, pela fórmula de Hazen a relação entre o coeficiente de permeabilidade e o diâmetro efetivo, que como pode ser observado na fórmula abaixo quanto maior o diâmetro efetivo (d_{ef}) maior será o coeficiente de permeabilidade (k).

$$k = C \times (d_{ef})^2$$

k = Coeficiente de permeabilidade (cm/s)

d_{ef} = Diâmetro efetivo

C = Coeficiente que pode variar de 100 a 150.

Assim, apesar de não se enquadrar na faixa sugerida pela NBR 12209 (1992), a areia selecionada foi a areia **B**, já que apresentava diâmetro efetivo (1,3 mm) muito próximo ao máximo estabelecido pela norma (1,2 mm) e devido possibilitar maior permeabilidade do que

da areia **A**, ou seja, a areia **B**, além de acelerar o processo de desaguamento, retarda a colmatação da superfície dos leitos de secagem.

Camada suporte

A escolha dos tijolos maciços para a constituição da camada suporte foi realizada com base na inspeção visual dos mesmos, o que ocorreu no momento da entrega pelo fornecedor. Nesta atividade foram descartados os tijolos que apresentavam rachaduras e irregularidades no seu formato.

4.3. MONITORAMENTO DOS CICLOS DE DESAGUAMENTO

O monitoramento do desempenho dos leitos de secagem foi realizado em duas etapas. O primeiro ciclo de desaguamento teve duração de 18 dias e ocorreu de 16/10/2002 a 03/11/2002, o segundo teve duração de 40 dias e ocorreu de 18/12/2002 à 27/01/2003.

Nos dois ciclos de desaguamento foram utilizados dois leitos de secagem, sendo um coberto e um descoberto, esta configuração permitiu avaliar a influência da cobertura no período de desaguamento do lodo em leitos de secagem instalados na RMB.

Em cada leito de secagem foi realizado o acompanhamento diário das características e do volume do líquido drenado e do lodo em secagem, sendo que as amostras foram coletadas normalmente às 9:00 horas da manhã.

4.3.1. Lodo estudado

Nos dois ciclos de secagem foi utilizado lodo primário proveniente de tanque séptico, sendo em cada descarga utilizado lodo proveniente de uma única residência. Vale ressaltar que não se teve informação do momento da limpeza anterior, ou seja, não foi possível determinar a idade dos lodos removidos dos tanques sépticos.

Esses lodos estudados foram transportados até o campus experimental da UFPA por caminhão limpa-fossa, sendo o preenchimento dos leitos de secagem realizado pelo conjunto motor-bomba do próprio caminhão.

Imediatamente após o lançamento do lodo foi coletada amostra em cada leito de secagem para caracterização laboratorial. Apesar do lodo utilizado em cada ciclo de secagem ser proveniente de um único tanque séptico, a caracterização nos leitos de secagem ocorreu de forma individual em razão do lodo não ter sido homogeneizado antes do seu lançamento, o que permitiu que o lodo apresentasse características diferentes ao longo da descarga.

Essa coleta de amostras foi realizada na superfície da lâmina líquida, tendo sido determinados os seguintes parâmetros: sólidos sedimentáveis, sólidos totais, sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis, sólidos suspensos, sólidos suspensos voláteis, sólidos suspensos fixos e pH

A taxa aplicada (kgSS/m^2) em cada leito de secagem foi calculada como mostrado no exemplo abaixo:

- Considerando lodo com 1010 mg SS/L e leito de secagem com área de 1 m^2 .

- 1 - primeiramente a concentração de sólidos suspensos em mg/L foi transformada para g/L.

$$\text{logo: } 1010 \text{ mg SS/L} = 1,010 \text{ g SS/L}$$

- 2 - posteriormente foi calculada a quantidade de sólidos suspensos para o volume aplicado (450 litros) no leito de secagem.

$$1 \text{ litro} - 1,010 \text{ gSS}$$

$$450 \text{ litros} - 454,5 \text{ gSS ou } 0,455 \text{ kg SS}$$

Os leitos de secagem foram preenchidos com lodo até a altura de 45 cm cima da camada suporte. Para controlar o volume de lodo foi efetuada marcação nas paredes laterais de cada unidade, sendo descarregado lodo até que esta marca fosse atingida.

Desta forma, o volume de lodo lançado em cada leito de secagem foi um pouco superior a 450 litros, já que no momento do lançamento do lodo, parte deste, infiltrou rapidamente pelo meio filtrante limpo.

Nos seus experimentos Catunda *et al* (2000) preencheram os leitos de secagem com água até a superfície do meio filtrante antes do lançamento da carga de lodo desejada. Esse procedimento assegurou o conhecimento da carga exata lançada nos leitos de secagem.

No caso do presente trabalho, a não utilização do procedimento descrito por Catunda *et al*. (2000) é justificada pelo fato do preenchimento do leito de secagem com água influenciar a caracterização do líquido drenado.

4.3.2. Líquido drenado

O volume de líquido drenado foi quantificado diariamente em cada leito de secagem pela medição da quantidade de líquido em um balde graduado. Na Fotografia 18 é mostrada a coleta de líquido.

Para a caracterização do líquido drenado foi coletado diariamente cerca de 2 litros de amostra, com exceção dos dias em que o volume observado foi menor, nestes dias todo volume recolhido passava a representar a amostra.



Fotografia 18 - Coleta de líquido drenado no leito de secagem descoberto

Na amostra de líquido coletada foram realizadas as seguintes determinações: sólidos totais, sólidos fixos, sólidos voláteis, sólidos suspensos, sólidos suspenso fixos, sólidos suspensos voláteis, sólidos dissolvidos, sólidos dissolvidos fixos, sólidos dissolvidos voláteis, pH, alcalinidade, cor aparente, turbidez e DQO.

4.3.3. Lodo em secagem

O desaguamento do lodo (lodo em secagem) foi caracterizado pelos seguintes parâmetros: teor de umidade, teor de sólidos fixos, teor de sólidos voláteis e pH, sendo diariamente coletada cerca de 100 ml de lodo retirado da superfície do leito de secagem.

Além da caracterização laboratorial, diariamente foi determinado o decréscimo da altura da lâmina de lodo, sendo esse acompanhamento realizado com uma régua instalada na parte interna de uma das paredes do leito de secagem, conforme pode ser observado na Fotografia 19.



Fotografia 19 - Régua utilizada para o monitoramento da altura da lâmina de lodo

4.3.4. Determinações Laboratoriais

As amostras coletadas do lodo bruto, lodo em secagem e do líquido drenado foram encaminhadas ao Laboratório de Controle de Resíduos (LCR) da UFPA. As determinações laboratoriais foram realizadas pelos métodos citados no Quadro 19 e descritos no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (1992). No Quadro 20 são relacionados os números de determinações realizadas em cada ciclo de secagem e durante o experimento.

Os resultados obtidos são mostrados na forma de gráficos no capítulo 5. No entanto, mesmo sendo função discreta, alguns parâmetros serão apresentados na forma de função contínua para facilitar a visualização do comportamento de cada parâmetros.

5

5. RESULTADOS

No estudo de desaguamento de lodo de tanques sépticos no sistema experimental da UFPA cada um dos leitos de secagem recebeu camada de lodo com altura inicial de 45 cm. Na Fotografia 20 é mostrado o lançamento do lodo bruto no leito de secagem coberto na 1ª etapa do experimento.

Para proteger a superfície do leito de secagem foi colocado um tapete de borracha na sua superfície sobre o qual o lodo era lançado. Após o preenchimento do leito de secagem este dispositivo foi removido por intermédio de uma corda, conforme mostrado na Fotografia 20.



Fotografia 20 - Lançamento de lodo no leito de secagem descoberto

5.1. PRIMEIRO CICLO DE SECAGEM

O lançamento do lodo nos leitos de secagem ocorreu no dia 16/10/2002 que foi, então, denominado de dia zero. Neste dia foi realizada a coleta do lodo lançado em cada leito de secagem. Isso ocorreu logo após a paralisação do conjunto motor-bomba do caminhão limpa fossa. Vale observar, que apesar do lodo ser proveniente do mesmo tanque séptico, a caracterização físico-química do lodo lançado nos dois leitos de secagem foi justificada, pois o armazenamento do lodo no caminhão limpa fossa, para o transporte do ponto de coleta até o sistema experimental, possibilita variações na sua composição, em razão de parte dos sólidos sedimentar durante o trajeto.

No Quadro 21 são apresentadas as características dos lodos lançados nos leitos de secagem coberto (C45-I) e descoberto (D45- I).

Quadro 21 - Características do lodo desaguado do primeiro ciclo de secagem

Leito de secagem	C45-I*	D45-I**
Sólidos totais (mg/L)	2306	2219
Sólidos totais fixos %	38,5	41,9
Sólidos totais voláteis %	61,5	58,10
Relação STV/ST	0,61	0,58
Sólidos sedimentáveis ml/L	0	0
Sólidos suspensos kg SS/m ²	0,495	0,455
Sólidos suspensos mg/L	1100	1010
Sólidos suspensos fixos %	25,5	12,9
Sólidos suspensos voláteis %	74,5	87,1
Sólidos dissolvidos mg/L	1206	1209
Sólidos dissolvidos fixos %	50,4	66,1
Sólidos dissolvidos voláteis %	49,6	33,9
pH	7,9	7,8

* C45-I – Leito de secagem coberto (C) do 1º ciclo de secagem (I) com lâmina inicial de 45 cm (45)

** D45-I – Leito de secagem descoberto (D) do 1º ciclo de secagem (I) com lâmina inicial de 45 cm (45)

De acordo com von Sperling e Gonçalves (2001), a relação entre os sólidos voláteis e os sólidos totais indica a digestão do lodo, valores de 0,75 a 0,80 são verificados em lodos não digeridos, ao passo que em lodo digeridos estes valores situam-se entre 0,6 a 0,65.

Desta forma, conforme pode ser observado no Quadro 20, a relação no lodo do leito de secagem coberto foi de 0,61, indicando lodo digerido, enquanto que no leito de secagem descoberto foi de 0,58, ficando um pouco abaixo da faixa sugerida pelos autores.

Na primeira etapa foram aplicadas taxas muito inferiores ao valor máximo de 15 kg SS/m² sugerido pela NBR 12209 (1992). No leito de secagem descoberto (D45-I) e coberto (C45-I) foram verificadas taxas de 0,455 kg SS/m² e de 0,495 kg SS/m², respectivamente. Isso demonstra que as taxas aplicadas foram cerca de 30 vezes menor que o máximo recomendado pela NBR 12209 (1992).

Porém, vale observar que o cálculo da taxa aplicada em cada leito de secagem foi efetuado com base em 450 litros, sendo desconsiderado o volume que percolou no momento do lançamento do lodo, devido à dificuldade de quantificar o volume real, sendo essa uma situação comum em leitos de secagem em escala. Desta forma, a taxa aplicada em cada leito de secagem foi um pouco superior às taxas calculadas (0,455 kg SS/m² e 0,495 kg SS/m² real).

Assim, na 1ª etapa foi possível verificar o desempenho de leitos de secagem utilizados para desaguamento de lodo com baixas taxas, sendo ainda aumentada a altura da lâmina para 45 cm, ou seja, maior que a recomendada por alguns autores, como Jordão e Pessoa (1995) que recomendam espessura de 25 cm.

No Gráfico 6 e no Quadro 22 é possível verificar que a secagem de lodo aconteceu rapidamente nos leitos de secagem coberto e descoberto, tendo a maior redução da altura da lâmina líquida ocorrido nos primeiros dias do experimento.

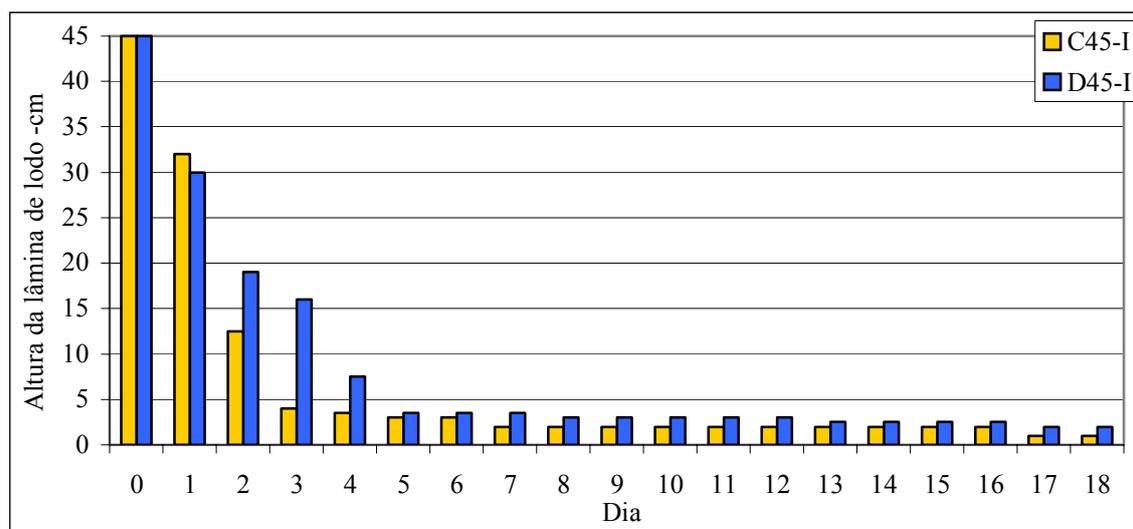


Gráfico 6 - Altura da lâmina de lodo em função do tempo nos leitos de secagem C45-I e D45-I

Quadro 22 - Altura da lâmina de lodo nos leitos de secagem C45-I e D45-I

Dia	Altura da lâmina de lodo (cm)		Dia	Altura da lâmina de lodo (cm)	
	C45-I	D45-I		C45-I	D45-I
0	45	45	10	2	3
1	32	30	11	2	3
2	12,5	19	12	2	3
3	4	16	13	2	2,5
4	3,5	7,5	14	2	2,5
5	3	3,5	15	2	2,5
6	3	3,5	16	2	2,5
7	2	3,5	17	1	2
8	2	3	18	1	2
9	2	3			

Logo no dia 1 houve redução de 13 cm e 15 cm na altura da lâmina de lodo nos leitos de secagem coberto e descoberto, respectivamente, esse foi o único dia em que o leito C45-I apresentou maior altura da lâmina de lodo, sendo que estas alturas corresponderam a reduções de 130 litros no leito de secagem coberto e 150 litros no leito de secagem descoberto, ou seja, foi grande o volume de líquido drenado nas primeiras 24 horas.

Foi verificado que a significativa redução da altura da lâmina de lodo ocorreu até os dias 4 e 5 nos leitos de secagem coberto e descoberto, respectivamente. Sendo observada nesses dias, altura da lâmina de lodo de 3,5 cm, o que representou redução de 92,2% do volume total de lodo lançado nos leitos de secagem, ou seja, o volume de lodo passou de 450 litros para 35 litros no 4º dia no leito de secagem coberto e no 5º dia no leito de secagem descoberto. O rápido desaguamento, pode ser explicado pela baixa taxa de SS/m² verificada no lodo estudado, o que também influenciou no volume final de lodo seco.

No dia 18 (último dia do experimento) foi verificado que o leito de secagem C45-I apresentou torta seca com altura de 1 cm, representando redução volumétrica de aproximadamente 97,8%, já no leito D45-I este valor foi um pouco menor, cerca de 95,5%, tendo a torta seca altura de 2 cm.

No Gráfico 7 e no Quadro 23 é possível verificar que o teor de umidade do lodo no leito de secagem C45-I decresceu ao longo do experimento. No entanto, no leito de secagem descoberto houve variações constantes no teor de umidade.

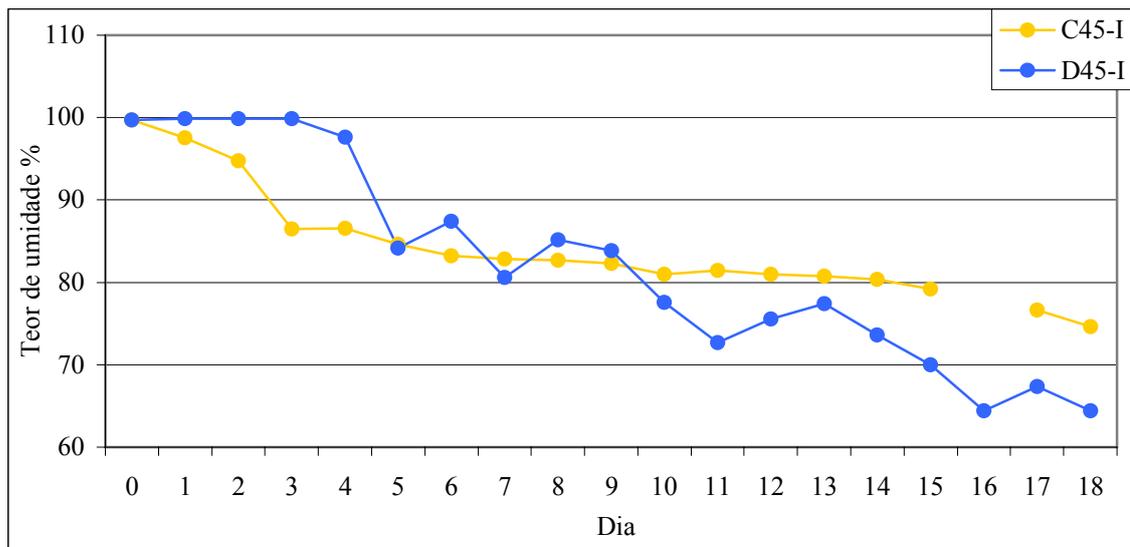


Gráfico 7 - Teor de umidade do lodo dos leitos de secagem C45-I e D45-I

Quadro 23 - Teor de umidade do lodo dos leitos de secagem C45-I e D45-I

Dia	Teor de umidade (%)		Dia	Teor de umidade (%)	
	C45-I	D45-I		C45-I	D45-I
0	99,7	99,7	10	81,0	77,6
1	97,5	99,8	11	81,4	72,7
2	94,7	99,9	12	81,0	75,5
3	86,5	99,8	13	80,78	77,4
4	86,6	97,6	14	80,3	73,6
5	84,6	84,2	15	79,2	70,0
6	83,2	87,4	16	-	64,4
7	82,8	80,6	17	76,6	67,3
8	82,7	85,1	18	74,6	64,4
9	82,3	83,8			

Foi verificado que as precipitações pluviométricas observadas no período tiveram pouca influência no desaguamento do lodo do leito de secagem descoberto, tanto que a partir do dia 10 o teor de umidade nesse leito de secagem foi sempre menor que no coberto.

O aparecimento de fendas na torta de lodo, do leito de secagem descoberto, logo nos primeiros dias do experimento possibilitou a formação de canais preferenciais que drenaram as águas pluviais mais rapidamente, conforme pode ser observado na Fotografia 21. Para efeito de comparação é mostrado na Fotografia 22 o lodo do leito de secagem coberto no mesmo dia.



Fotografia 21 - Lodo do leito de secagem D45-I no dia 5 (21/10/2003)



Fotografia 22 - Lodo do leito de secagem C45-I no dia 5 (21/10/2003)

No entanto, apesar de não ficar acumulada na superfície do leito de secagem descoberto, a chuva umedecia constantemente o lodo em secagem, fazendo com que o teor de umidade do lodo do leito descoberto apresentasse freqüentes variações, conforme pode ser observado no Gráfico 7.

Sendo assim, devido à rápida drenagem das águas pluviais, o leito de secagem descoberto produziu torta com maior teor de sólidos, já que recebeu ação da forte insolação incidente na região.

As temperaturas médias observadas durante o experimento variaram muito pouco, tendo valores mínimo, médio e máximo de 26,4 °C, 26,9 °C e 28,0 °C, respectivamente. No Quadro 24 são apresentados valores da precipitação, da temperatura média e da insolação

Quadro 24 - Valores de precipitação, temperatura média e insolação na Fase 1

Data	Dia	Precipitação (mm)	Temperatura média (°C)	Insolação (horas e décimos)
16/10/2002	0	9,5	26,4	6,3
17/10/2002	1	16,4	26,6	7,4
18/10/2002	2	2,6	26,5	4,7
19/10/2002	3	16,3	27,0	6,6
20/10/2002	4	5,1	27,2	7,8
21/10/2002	5	0,0	26,5	5,7
22/10/2002	6	13,4	27,0	7,8
23/10/2002	7	0,0	27,0	7,1
24/10/2002	8	0,2	27,5	8,8
25/10/2002	9	0,2	27,1	6,6
26/10/2002	10	4,2	27,1	3,5
27/10/2002	11	0,0	26,5	3,7
28/10/2002	12	2,8	26,8	5,4
29/10/2002	13	4,4	27,3	7,7
30/10/2002	14	11,0	27,2	6,4
31/10/2002	15	1,8	26,8	6,8
1/11/2002	16	17,1	27,2	9,6
2/11/2002	17	0,2	28,0	8,9
3/11/2002	18	0,0	26,6	1,6

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia

No Quadro 23 verifica-se que no leito coberto o teor de umidade foi maior 10,2% no último dia do experimento. No entanto, a altura da lâmina de lodo nesse leito foi de 1 cm, correspondendo a metade da altura do leito de secagem descoberto.

Conforme pode ser observado na Fotografia 23, a torta de lodo produzida no leito de secagem descoberto apresentou altura maior (2 cm) e muitas rachaduras de grandes aberturas.

Já a torta do leito de secagem coberto, como é mostrado na Fotografia 24, tinha menor espessura (1 cm) e poucas rachaduras, as quais apresentavam pequenas aberturas.



Fotografia 23 - Torta seca do leito de secagem D45-I no último dia do experimento



Fotografia 24 - Torta seca do leito de secagem C45-I no último dia do experimento

O líquido percolado nos leitos de secagem foi coletado diariamente, sendo no Quadro 25 relacionados os volumes quantificados e as reduções das alturas da lâmina de lodo observadas em cada leito de secagem.

Quadro 25 - Volume de líquido drenado x Redução da altura da lâmina de lodo

Dia	Leito de secagem C45-I		Leito de secagem D45-I	
	Volume (litros)	Redução da Altura (cm)	Volume (litros)	Redução da altura (cm)
1	128	13	119,5	15
2	215	19,5	116	11
3	59	8,5	70	3
4	6,15	0,5	87,5	8,5
5	2	0,5	9	4
6	1	0	5,5	0
7	0,5	1	3,5	0
8	0,5	0	7	0,5
9	0,35	0	2	0
10	0,37	0	0,96	0
11	0,3	0	0,82	0
12	0,25	0	10,5	0
13	0,25	0	1,5	0,5
14	0,3	0	0,7	0
15	0,3	0	0,5	0
16	0,2	0	4,5	0
17	0,25	1	1	0,5
18	0,13	0	0,6	0
Total	414,85	44	441,08	43

Como era esperado, o volume de líquido drenado no leito de secagem descoberto (D45-1) foi maior que do leito coberto (C45-1), devido ao acréscimo sofrido pelas precipitações pluviométricas em quase todos os dias do experimento.

Ao final do experimento, os volumes totais de líquido drenado no leito de secagem coberto e descoberto foram de 414,85 e 441,08 litros, respectivamente.

O maior volume de líquido drenado no leito de secagem coberto aconteceu no dia 2 do experimento, coincidindo com o dia de maior redução da altura da lâmina de lodo. O mesmo ocorreu com o leito de secagem descoberto, que apresentou no dia 1 o maior volume de líquido drenado e a maior redução da lâmina líquida. O que mostra que nessa etapa a maior redução de umidade ocorreu por percolação.

Nos Gráficos 6 e 8 é possível observar que a maior parcela do líquido foi drenada nos primeiros dias, coincidindo com a rápida redução da altura da lâmina de lodo no mesmo período. Também foi possível verificar que quando a quantidade de líquido drenado foi pequena, a altura da lâmina de lodo ficou praticamente constante.

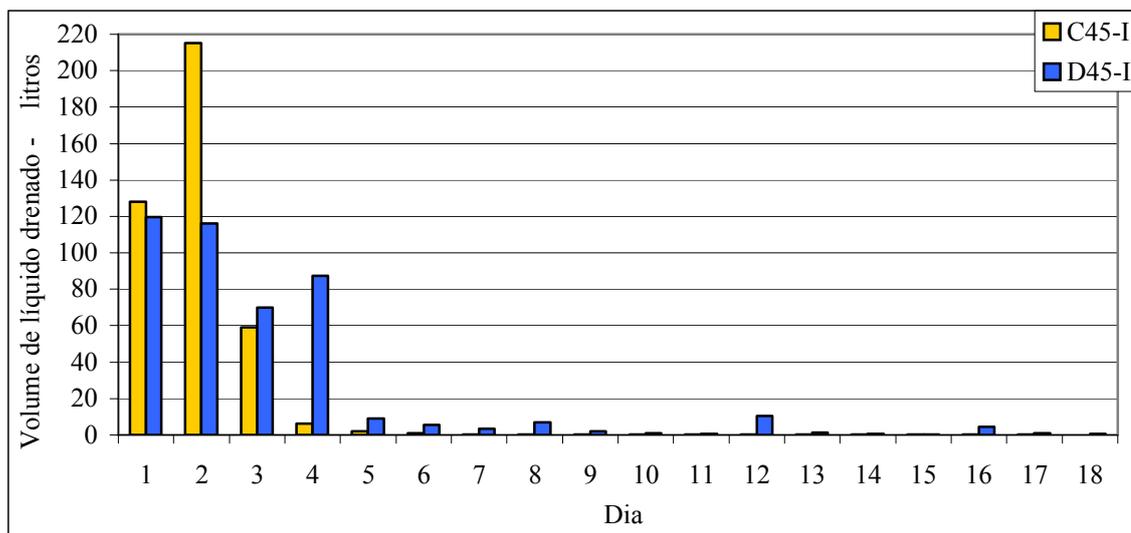


Gráfico 8 - Volume de líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

Conforme pode ser observado no Gráfico 9, o percentual de líquido drenado nos primeiros 4 dias do experimento foi de 98,4% no leito de secagem coberto, sendo muito pequeno (1,6%) no restante dos dias. No dia 5 do experimento foram verificados 2 litros, no dia 6 um litro e nos demais dias quantidades que não ultrapassaram 0,5 litro.

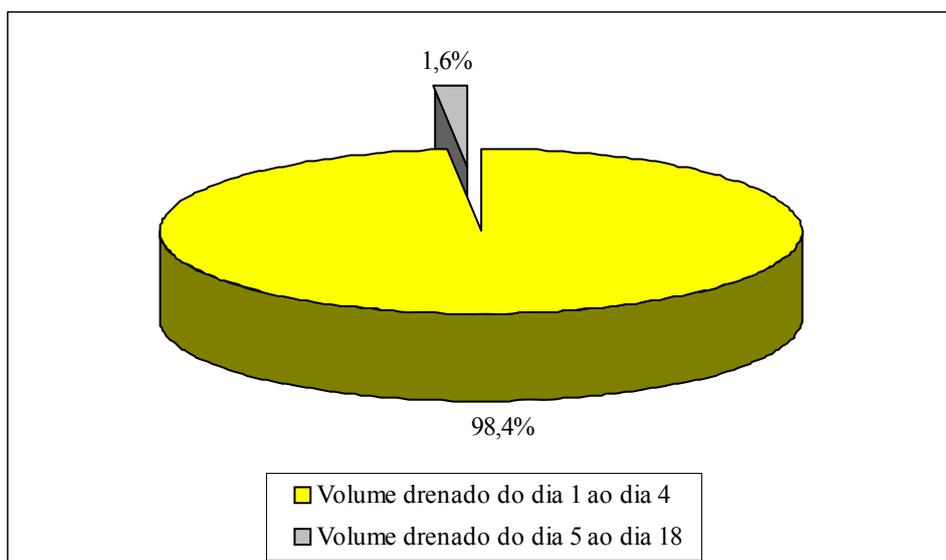


Gráfico 9 - Percentual do volume de líquido drenado no leito de secagem C45-I

Apesar de no leito de secagem descoberto ter ocorrido também grande percolação nos 4 primeiros dias, o percentual de líquido entre os dias 5 e 18 foi maior (10,9%) que no leito de secagem coberto, conforme pode ser observado no Gráfico 10.

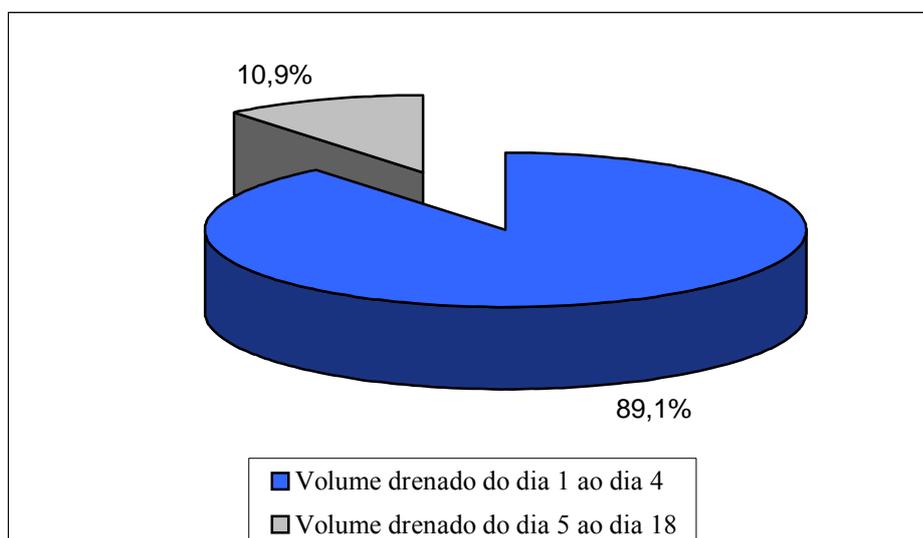


Gráfico 10 - Percentual do volume de líquido drenado no leito de secagem D45-I

No Gráfico 11 e no Quadro 25 é possível observar que a partir do dia 5 do experimento o volume de líquido drenado no leito de secagem descoberto foi sempre maior que do leito de secagem coberto, isso ocorreu devido às contribuições das precipitações pluviométricas no leito D45-I.

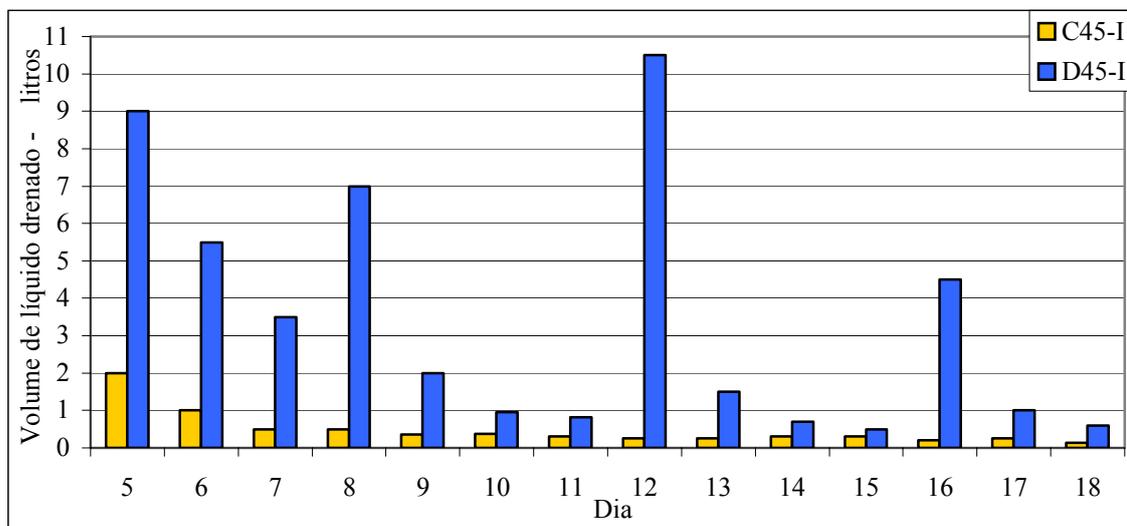


Gráfico 11 - Volume de líquido drenado nos leitos de secagem (C45-I e D45-I) do dia 5 ao dia 18.

Caracterização do líquido drenado – primeiro ciclo de secagem

O líquido drenado dos leitos de secagem foi caracterizado com a finalidade de avaliar o seu potencial poluidor, sendo determinados os seguintes parâmetros: DQO, sólidos totais, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, pH, alcalinidade total, cor aparente e turbidez.

O Gráfico 12 mostra que o pH e a alcalinidade tiveram tendência ao decréscimo nos dois leitos de secagem, provavelmente devido à atividade anaeróbia no lodo. Durante todo o experimento, os valores de pH do líquido drenado do leito de secagem descoberto foram menores do que o do leito de secagem coberto, sendo observada a maior diferença a partir do dia 7 do experimento. Por sua vez, a alcalinidade no líquido drenado do leito de secagem coberto teve valores maiores que no leito de secagem descoberto, com exceção do primeiro dia e dos três últimos dias do experimento, conforme pode ser verificado no Gráfico 12 e no Quadro 26.

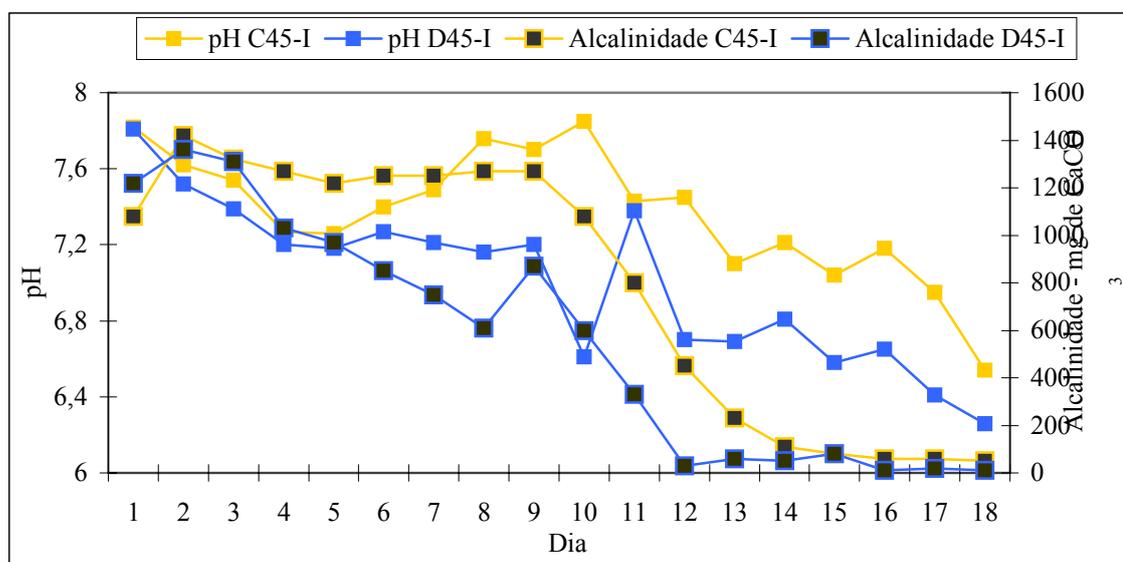


Gráfico 12 - pH e alcalinidade no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

Quadro 26 - Valores de pH e alcalinidade total observados no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

Dia	pH		Alcalinidade total (mg CaCO ₃ /L)	
	C45-I	D54-I	C45-I	D54-I
1	7,82	7,81	1.080	1.220
2	7,62	7,52	1.420	1.360
3	7,54	7,39	1.320	1.310
4	7,27	7,2	1.270	1.030
5	7,26	7,18	1.220	970
6	7,4	7,27	1.250	850
7	7,49	7,21	1.250	750
8	7,76	7,16	1.270	610
9	7,7	7,2	1.270	870
10	7,85	6,61	1.080	600
11	7,43	7,38	800	330
12	7,45	6,7	450	30
13	7,1	6,69	230	60
14	7,21	6,81	110	50
15	7,04	6,58	80	80
16	7,18	6,65	60	10
17	6,95	6,41	60	20
18	6,54	6,26	50	10

Nos Gráficos 13 e 14 e no Quadro 27 é possível verificar que a turbidez e a cor aparente foram em geral menores no líquido do leito de secagem descoberto, provavelmente devido à água da chuva ter ocasionado diluição do líquido drenado.

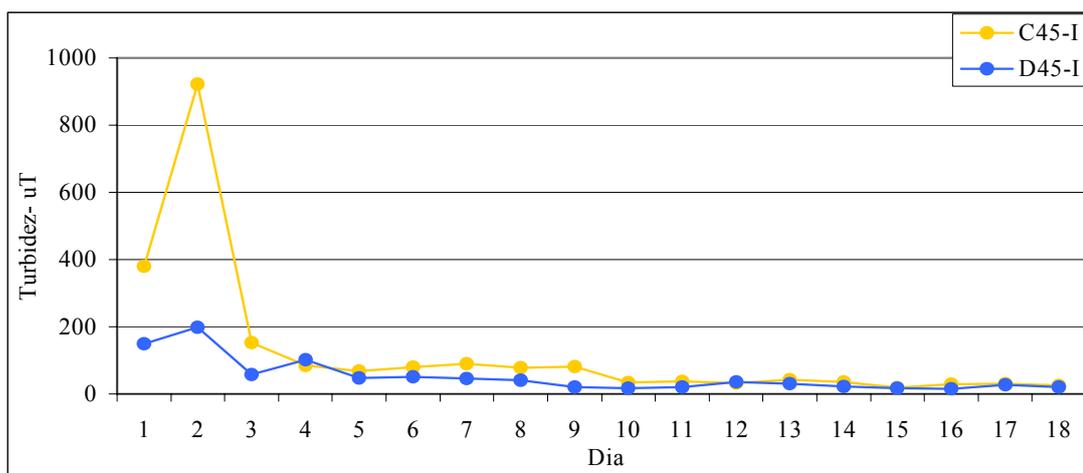


Gráfico 13 - Turbidez no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

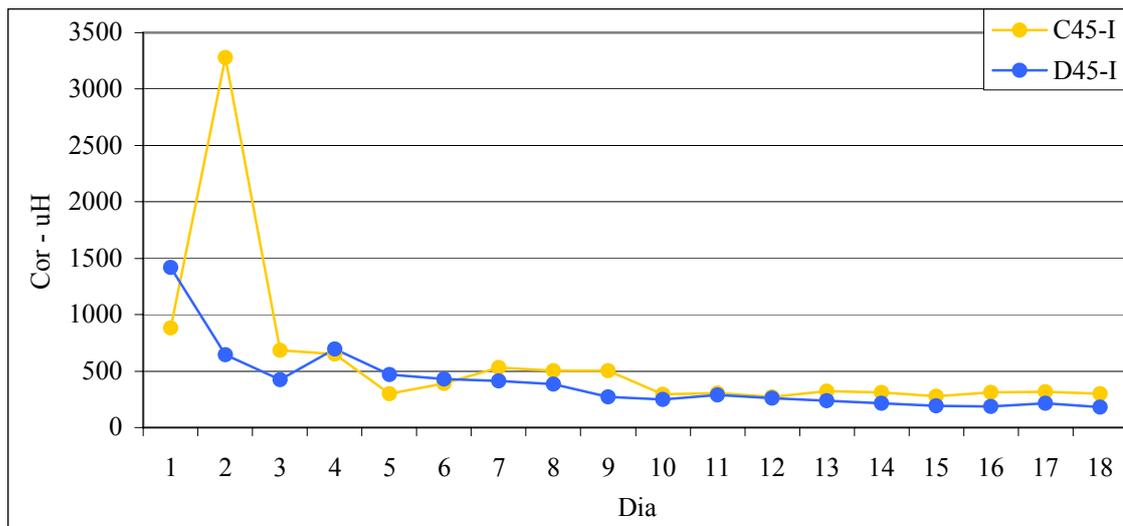


Gráfico 14 - Cor aparente no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

No dia 2 do experimento foram verificados os maiores valores de cor aparente (3280 uH) e turbidez (922 uT) no líquido drenado no leito de secagem coberto. Esses valores ocorreram no dia em que foi verificado maior volume de líquido drenado, cerca de 51,83% do volume total drenado durante todo o ciclo e secagem.

Quadro 27 - Valores de cor aparente e turbidez no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

Dia	Turbidez (uT)		Cor aparente (uH)	
	C45-I	D45-I	C45-I	D45-I
1	380	150	880	1.420
2	922	199	3.280	645
3	152	58	686	424
4	84	102	650	695
5	68	48	300	470
6	80	51	390	432
7	90	46	533	412
8	78	40	505	383
9	82	20	506	273
10	34	17	295	249
11	38	20	306	289
12	32	36	273	261
13	42	30	320	236
14	35	22	309	213
15	18	17	277	191
16	29	16	312	188
17	31	27	318	213
18	25	20	300	180

É importante observar que os maiores valores de turbidez e sólidos suspensos no líquido drenado do leito de secagem descoberto também ocorreram no dia 2 do experimento, porém o maior valor de cor aparente foi verificado nas primeiras 24 horas de operação. Um outro aspecto importante é que os dois leitos de secagem tiveram valores de cor aparente inferiores a 100 uH a partir do dia 5, tendo valores praticamente constantes (30 uH) do dia 11 até o final do experimento.

No Gráfico 15 é possível observar que a concentração de sólidos suspensos teve praticamente o mesmo comportamento nos leitos de secagem coberto e descoberto.

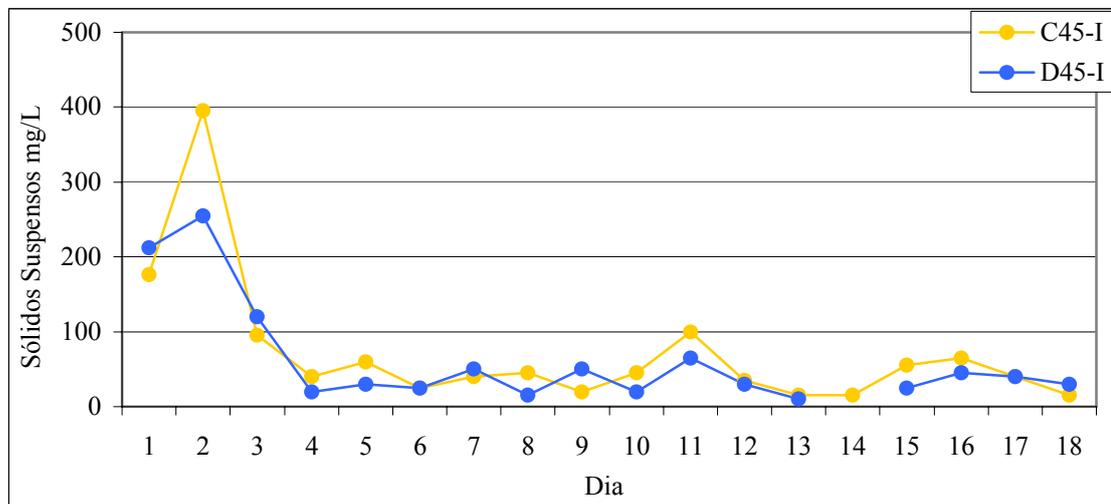


Gráfico 15 - Sólidos suspensos no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

No Quadro 28 e nos Gráficos 16 e 17 é possível verificar que a fração inorgânica foi normalmente maior do que a volátil nos sólidos suspensos, o que pode indicar que o lodo em desaguamento estava em avançado grau de estabilização, o que confirma os valores do Quadro 21 e a classificação como lodo digerido proposta por von Sperling e Gonçalves (2001).

Quadro 28 - Concentração de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

Dia	Sólidos suspensos (mg/L)		Sólidos suspensos fixos (mg/L)		Sólidos suspensos Voláteis (mg/L)	
	C45	D45	C45	D45	C45	D45
1	176	212	156	196	20	16
2	395	255	330	245	65	10
3	95	120	50	85	45	35
4	40	20	25	15	15	5
5	60	30	40	20	20	10
6	25	25	5	10	20	15
7	40	50	35	40	5	10
8	45	15	20	5	25	10
9	20	50	15	15	5	35
10	45	20	30	15	15	5
11	100	65	35	55	65	10
12	35	30	25	20	10	10
13	15	10	10	-	5	-
14	15	-	5	-	10	-
15	55	25	30	20	25	5
16	65	45	10	-	55	-
17	40	40	10	30	30	10
18	15	30	5	15	10	15

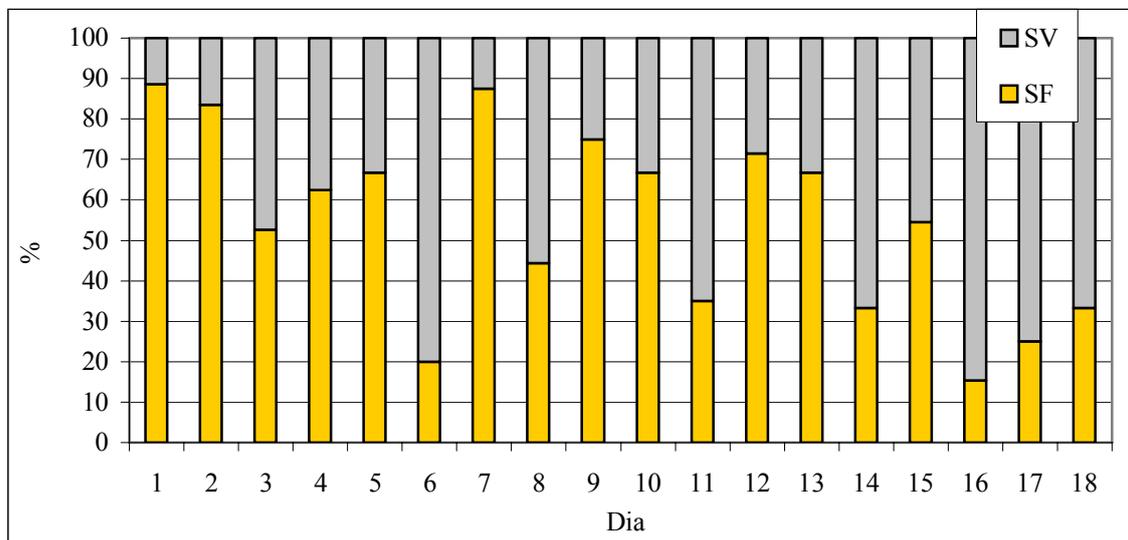


Gráfico 16 - Percentual de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem C45-I

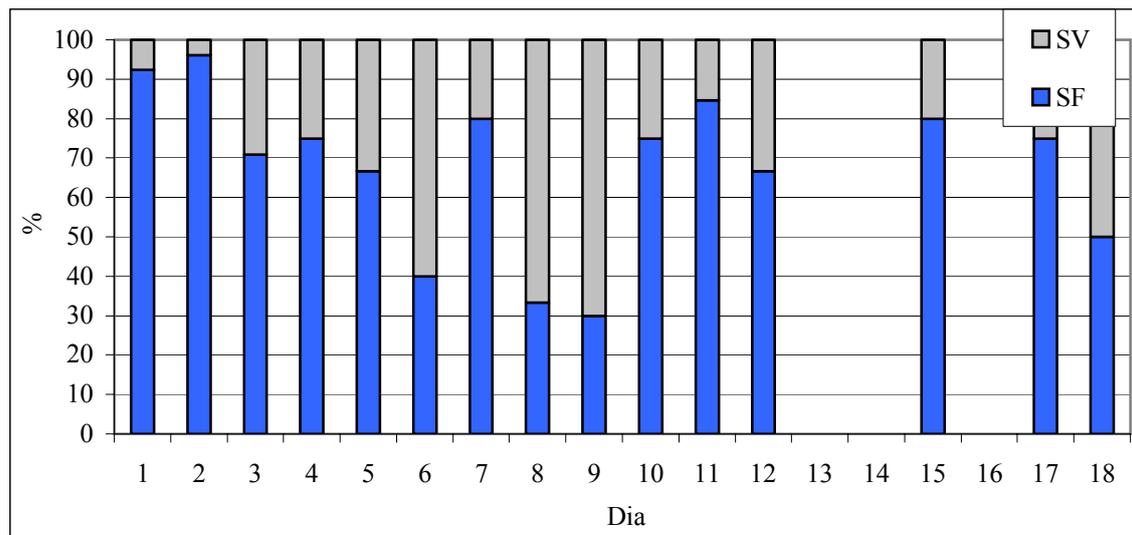


Gráfico 17 - Percentual de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado do leito de secagem D45-I

O teor de sólidos totais observado no líquido drenado não seguiu a mesma tendência, tendo no leito de secagem coberto o seguinte comportamento: picos crescentes nos dias 2, 4 e 6; valores da ordem de 1100 mg/L do dia 7 ao dia 12; e o menor valor no último dia do experimento.

O líquido drenado do leito de secagem descoberto teve grande aumento no teor de sólidos totais nos dias 5 e 18, sendo nos demais dias observados valores inferiores a 2400 mg/L, como pode ser verificado no Gráfico 18 e no Quadro 29.

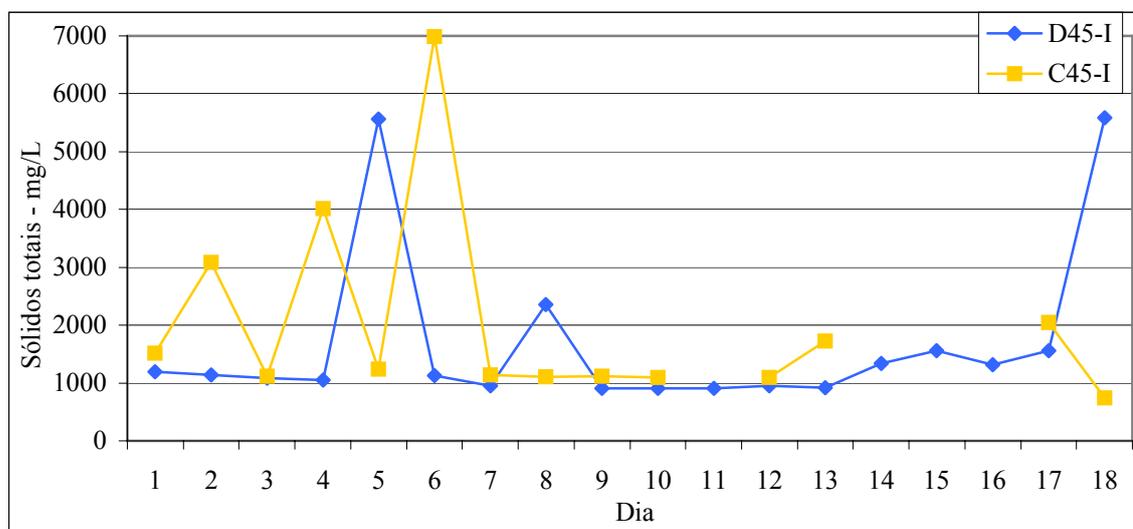


Gráfico 18 - Sólidos totais no líquido drenado nos leitos de secagem D45-I e C45-I

Quadro 29 - Concentração de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

Dia	Sólidos totais (mg/L)		Sólidos totais fixos (mg/L)		Sólidos totais voláteis (mg/L)	
	C45-I	D45-I	C45-I	D45-I	C45-I	D45-I
1	1.512	1.192	755	754	757	438
2	3.083	1.137	821	779	2.262	358
3	1.119	1.086	865	767	254	319
4	4.015	1.047	726	813	3.289	234
5	1.238	5.563	962	721	276	4.842
6	6.990	1.130	548	747	6.442	383
7	1.134	951	953	758	181	193
8	1.110	2.360	942	2.317	168	43
9	1.114	902	1.043	732	71	170
10	1.100	911	937	778	163	133
11	-	911	-	716	-	195
12	1.095	949	395	794	700	155
13	1.724	917	1.125	737	599	180
14	-	1.343	-	828	-	515
15	-	1.562	-	1.075	-	487
16	-	1.313	-	767	-	546
17	2.042	1.562	1.400	834	642	728
18	739	5.584	573	684	166	4.900

A maior fração dos sólidos totais foi de natureza inorgânica, tendo os valores máximos e mínimos da relação STV/ST de 92,2% e 6,4% no leito de secagem coberto, e 87,7% e 1,8% no leito de secagem descoberto, nos Gráficos 19 e 20 são mostrados os respectivos percentuais de STF e STV nos leitos de secagem coberto e descoberto.

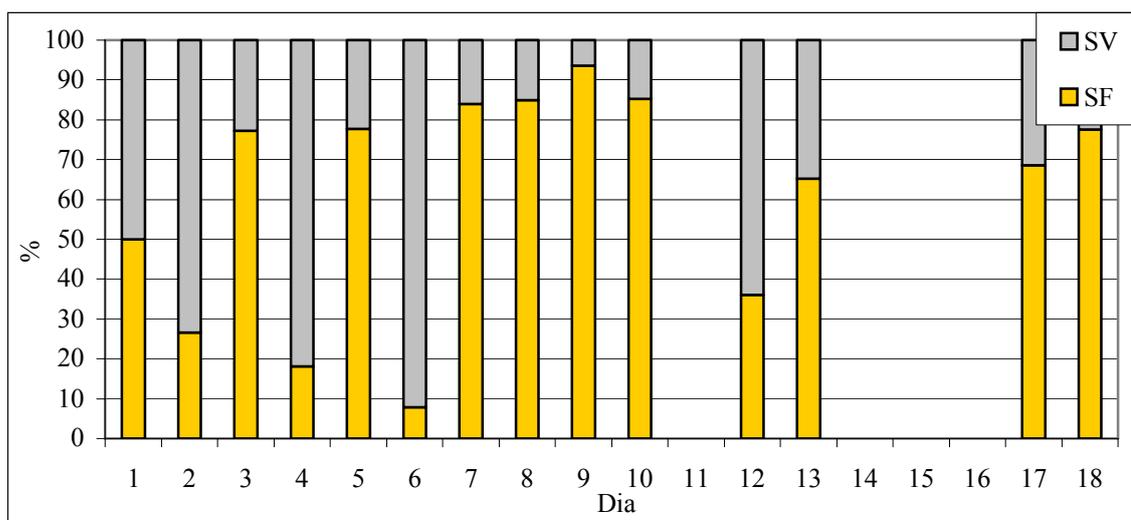


Gráfico 19 - Percentual de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado do leito de secagem C45-I

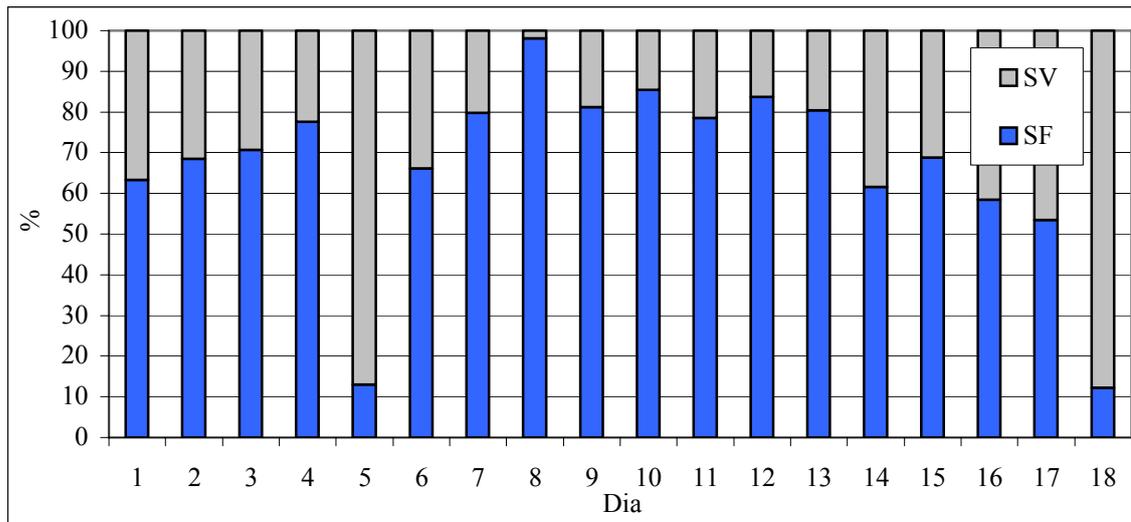


Gráfico 20 - Percentual de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem D45-I

No líquido drenado no leito de secagem descoberto foram observadas altas concentrações de sólidos dissolvidos nos dia 5 e 18, conforme pode ser observado no Gráfico 21.

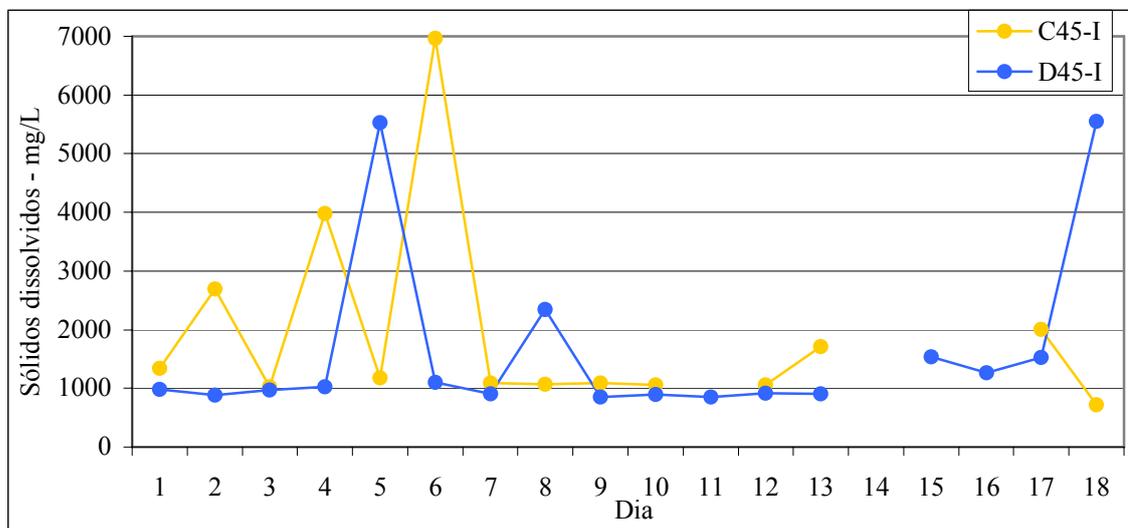


Gráfico 21 - Sólidos dissolvidos no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

Os sólidos dissolvidos no líquido drenado dos leitos de secagem coberto e descoberto tiveram maior fração de sólidos inorgânicos, conforme pode ser observado no Quadro 30 e nos Gráficos 22 e 23.

Quadro 30 - Concentração de sólidos dissolvidos fixos e voláteis no líquido drenado nos leitos de secagem C45-I e D45-I

Dia	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)		Sólidos dissolvidos fixos (mg/L)		Sólidos dissolvidos voláteis (mg/L)	
	C45-I	D45-I	C45-I	D45-I	C45-I	D45-I
1	1.336	980	735	738	601	242
2	2.688	882	756	769	1.932	113
3	1.024	966	820	732	204	234
4	3.975	1.027	711	808	3.264	219
5	1.178	5.533	942	711	236	4.822
6	6.965	1.105	528	732	6.437	373
7	1.094	901	948	748	146	153
8	1.065	2.345	917	2307	148	38
9	1.094	852	1.038	697	56	155
10	1.055	891	922	773	133	118
11	-	846	-	706	-	140
12	1.060	919	385	784	675	135
13	1.709	907	1.120	-	589	-
14	-	-	-	-	-	-
15	-	1.537	-	1.070	-	467
16	-	1.268	-	722	-	546
17	2.002	1.522	1.370	824	632	698
18	724	5.554	563	669	161	4.885

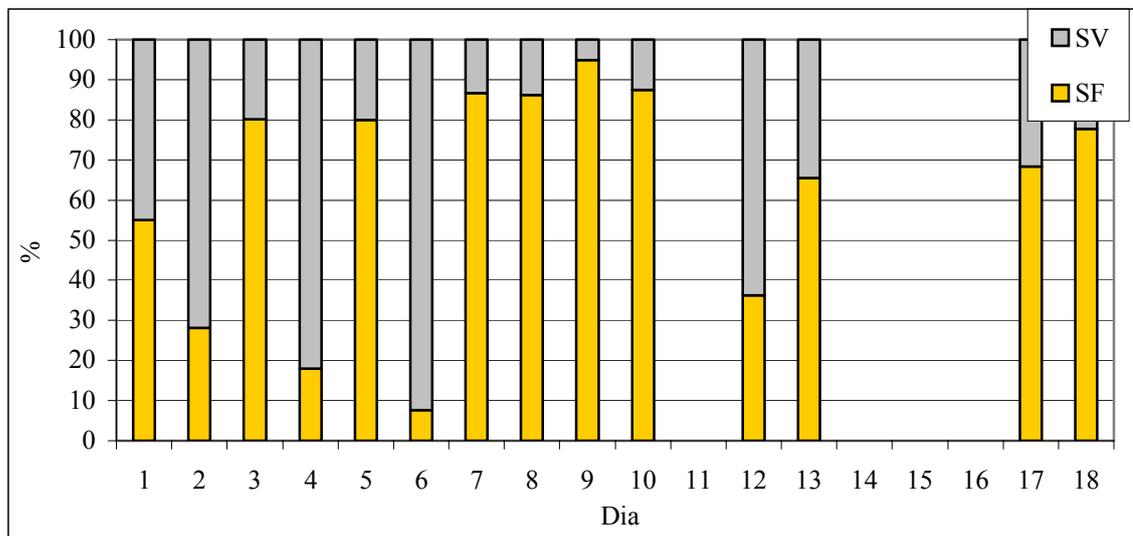


Gráfico 22 - Percentual de sólidos dissolvidos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem C45-I

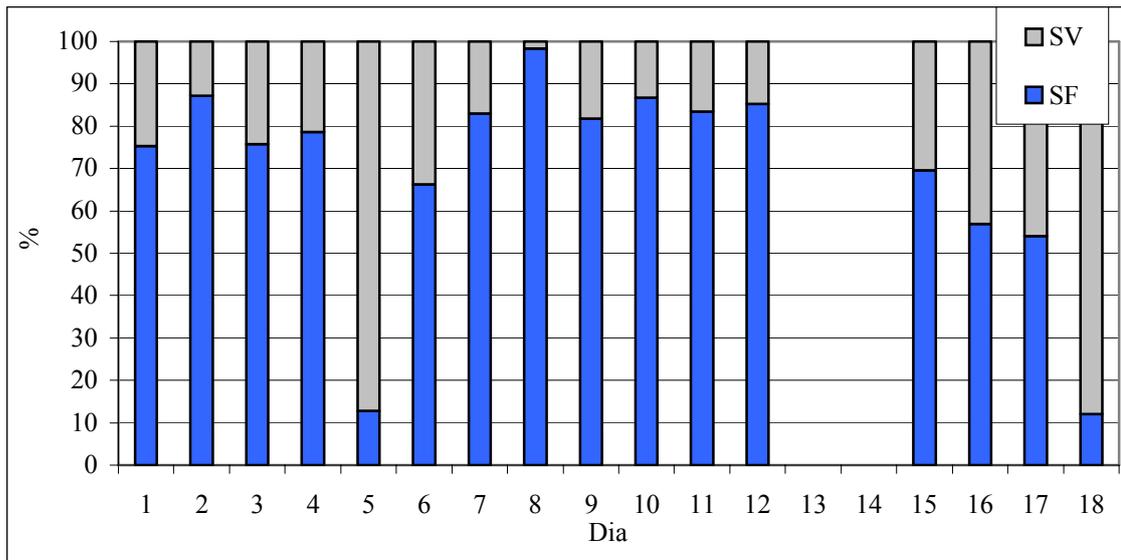


Gráfico 23 - Percentual de sólidos dissolvidos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem D45-I

A concentração de sólidos dissolvidos variou entre 724 mg/L e 6965 mg/L no leito de secagem coberto e de 846 mg/L a 5554 mg/L no leito de secagem descoberto. Nos Gráficos 24 e 25 são apresentados os valores percentuais dos sólidos suspensos e dissolvidos em relação aos sólidos totais nos efluentes líquidos dos leitos de secagem coberto e descoberto, respectivamente. Estes gráficos demonstram que a maior fração dos sólidos totais é formada por sólidos dissolvidos

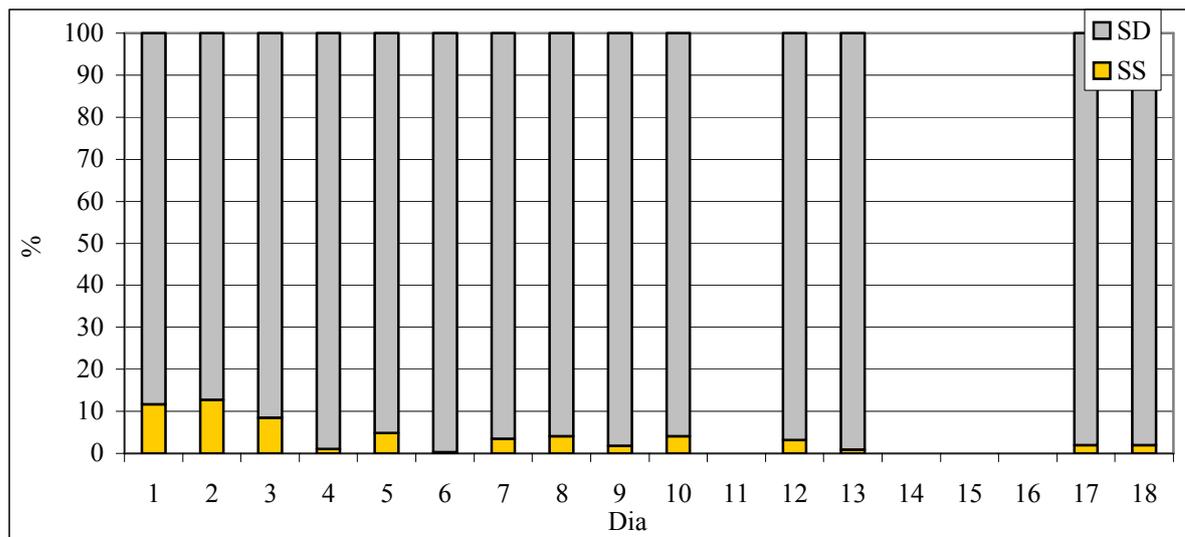


Gráfico 24 - Percentual de sólidos suspensos e dissolvidos no líquido drenado no leito de secagem C45-I

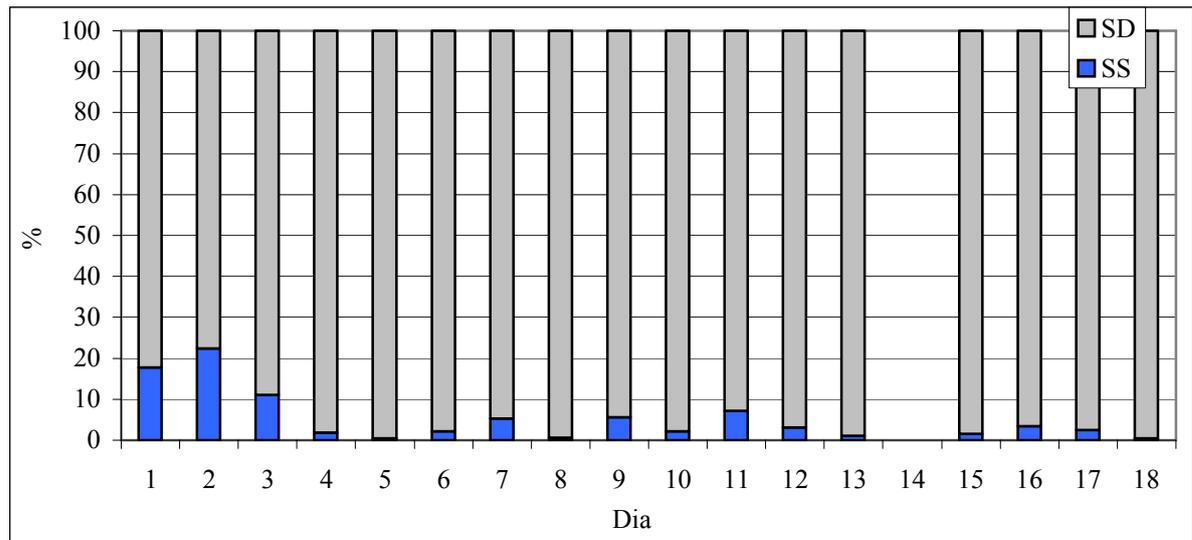


Gráfico 25 - Percentual de sólidos suspensos e dissolvidos no líquido drenado no leito de secagem D45-I

No líquido do leito de secagem descoberto foi verificada tendência decrescente nos valores de DQO do início para o final do experimento, sendo esse comportamento diferente do leito de secagem coberto, que apresentou crescimento na concentração de DQO a partir do dia 8 (55 mg/L) até o dia 18 (233 mg/L), conforme pode ser observado no Gráfico 26.

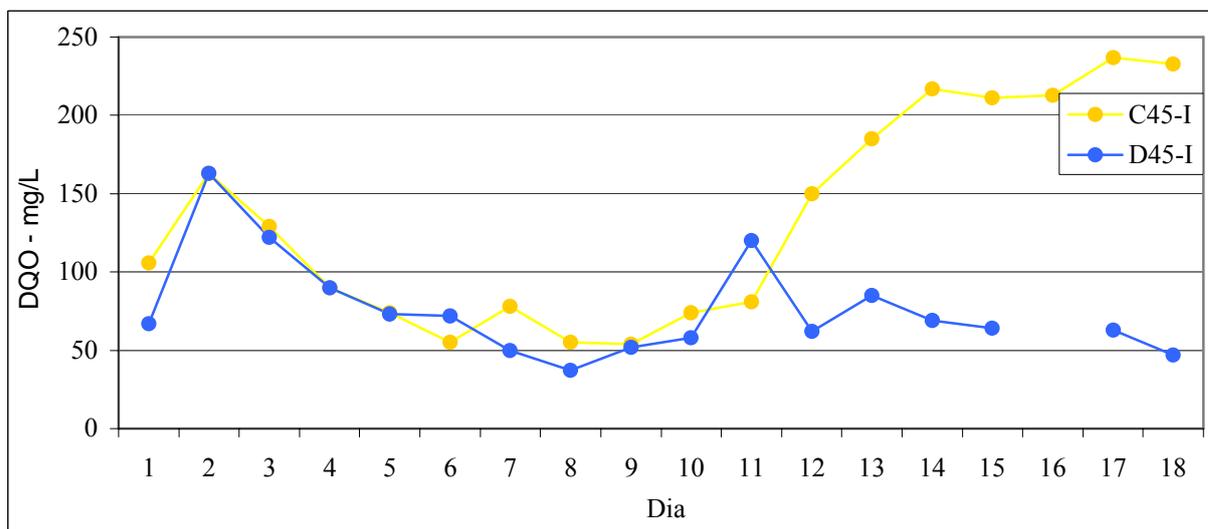


Gráfico 26 - DQO no líquido drenado nos leitos de secagem D45-I e C45-I

Assim como a cor aparente, a turbidez e os sólidos suspensos, a DQO do líquido drenado foi menor no leito de secagem descoberto, provavelmente devido à diluição do líquido com a água da chuva. No leito de secagem descoberto o maior valor de DQO ocorreu no dia 2 do experimento, no qual foi drenado cerca de 26,3% do total do líquido drenado durante todo o experimento, conforme pode ser observado no Quadro 31.

Quadro 31 - DQO do líquido drenado no leito de secagem C45-I e D45-I

Dia	DQO (mg/L)	
	C45-I	D45-I
1	106	67
2	163	163
3	129	122
4	90	90
5	74	73
6	55	72
7	78	50
8	55	37
9	54	52
10	74	58
11	81	120
12	150	62
13	185	85
14	217	69
15	211	64
16	213	
17	237	63
18	233	47

5.2. SEGUNDO CICLO DE SECAGEM

Assim como no primeiro ciclo de secagem, o desaguamento do lodo ocorreu em dois leitos de secagem, com e sem cobertura, que receberam as seguintes denominações C45-II e D45-II, respectivamente. Nos dois leitos de secagem foi aplicada altura inicial da lâmina de lodo de 45 cm.

Da mesma maneira, no segundo ciclo de secagem também foi realizada caracterização do lodo de forma individual nos dois leitos, sendo coletada amostra de lodo logo após a sua descarga. No Quadro 32 são apresentadas as características do lodo lançado na segunda descarga nos leitos de secagem coberto (C45-II) e descoberto (D45-II).

Quadro 32 - Características do lodo desaguado no segundo ciclo de secagem

Leito de secagem	C45-II*	D45-II**
Sólidos totais (mg/L)	15.770	22.427
Sólidos totais fixos %	32,2	36,3
Sólidos totais voláteis %	67,8	63,7
Relação STV/ST	0,67	0,63
Sólidos sedimentáveis ml/L	660	780
Sólidos suspensos kg SS/m ²	3,861	9,71
Sólidos suspensos mg/L	8.580	21.580
Sólidos suspensos fixos %	34,0	35,1
Sólidos suspensos voláteis %	66,0	64,9
Sólidos dissolvidos mg/L	7.190	847
Sólidos dissolvidos fixos %	30,1	66,9
Sólidos dissolvidos voláteis %	69,9	33,1
pH	7,8	7,8

* C45-II – Leito de secagem coberto (C) do 2º ciclo de secagem (II) com lâmina inicial de 45 cm (45)

** D45-II – Leito de secagem descoberto (D) do 2º ciclo de secagem (II) com lâmina inicial de 45 cm (45)

Conforme pode ser observado no Quadro 32, as cargas aplicadas nos leitos de secagem na segunda etapa experimental foi bem maior que as aplicadas na primeira etapa, mesmo assim, ainda ficaram abaixo do valor máximo (15 kg SS/m²) sugerido pela NBR 12209 (1992). O teor de SS/m² aplicado no leito de secagem descoberto (9,71 kg SS/m²) foi cerca de 2,5 vezes maior que o aplicado no leito de secagem coberto (3,861 kg SS/m²).

A diferença de concentração de sólidos suspensos do lodo lançado nos leito de secagem, pode ser explicada pela variação das características do lodo durante a sua descarga. Primeiramente foi preenchido o leito de secagem coberto e posteriormente o leito de secagem

descoberto, e portanto, a maior concentração de sólidos ocorre no final da descarga. Desse modo, o lodo do leito de secagem D45-II apresentou maior volume de sólidos sedimentáveis e maior concentração de sólidos totais e suspensos.

Essas distintas concentrações / volumes de sólidos aplicada nos leitos de secagem influenciaram no desaguamento do lodo nos leitos de secagem D45-II e C45-II, que ocorreu de maneira desigual na segunda etapa experimental. No Quadro 33 são mostradas as alturas da lâmina de lodo nos leitos de secagem C45-II e D45-II durante a segunda fase experimental, sendo possível observar que a altura da lâmina de lodo no leito de secagem coberto foi sempre menor que do leito descoberto, provavelmente por influência da menor carga aplicada.

No Gráfico 27 é possível verificar que, até o dia 6 do experimento, ocorreu decréscimo da altura da lâmina de lodo de forma proporcional nos dois leitos de secagem, sendo essa redução de 12,7 cm e 7,5 cm nos leitos de secagem coberto e descoberto, respectivamente.

Quadro 33 - Altura da lâmina de lodo nos leitos de secagem C45-II e D45-II

Dia	C45-II	D45-II	Dia	C45-II	D45-II
0	45	45	21	15	18,5
1	41,2	44,5	22	15	18,5
2	37,8	43	23	14,5	18,5
3	37,5	41	24	14	18,5
4	35	40	25	14	19
5	33	39	26	13,5	18,5
6	32,3	37,5	27	13	16,5
7	31	37,5	28	13	16,5
8	28	37,5	29	13	16
9	27	37,5	30	13	16
10	24	37	31	13	15
11	24	39	32	13	15
12	22,7	38	33	12,5	15
13	20	35,5	34	12,5	15
14	19	32,5	35	12,5	15
15	19	29,5	36	12	17
16	18,5	24	37	12	17
17	17	22	38	12	17
18	16	21	39	12	17
19	16	20	40	11,5	16
20	16	19,5			

Do dia 7 ao dia 17 a altura da lâmina de lodo no leito C45-II continuou decrescendo, sendo que o decréscimo ocorreu de forma menos intensa a partir do dia 18. No final do período experimental foi observado valor de 11,5 cm na altura da lâmina de lodo no leito C45-II.

Já no leito de secagem descoberto, não houve redução da altura da lâmina de lodo do dia 7 ao dia 9, sendo no dia 11 observado aumento de 2 cm, o que pode ser explicado pelas intensas precipitações pluviométricas.

Do dia 12 ao dia 19 foi verificado maior decréscimo do volume de lodo no leito de secagem D45-II, já nos dias 21, 22, 23 e 24 não houve decréscimo na altura da lâmina de lodo.

Nos dias 25 e 36 foi verificado novamente aumento da altura da lâmina de lodo no leito D45-II. A menor altura verificada durante a segunda etapa do experimento foi de 15 cm que aconteceu no dia 31 e se manteve constante até o dia 35, sendo que a altura observada no final do período foi de 16 cm. Nos gráficos 27 e 28 são mostradas as alturas da lâmina de lodo e o teor de umidade do lodo nos leitos de secagem, coberto e descoberto.

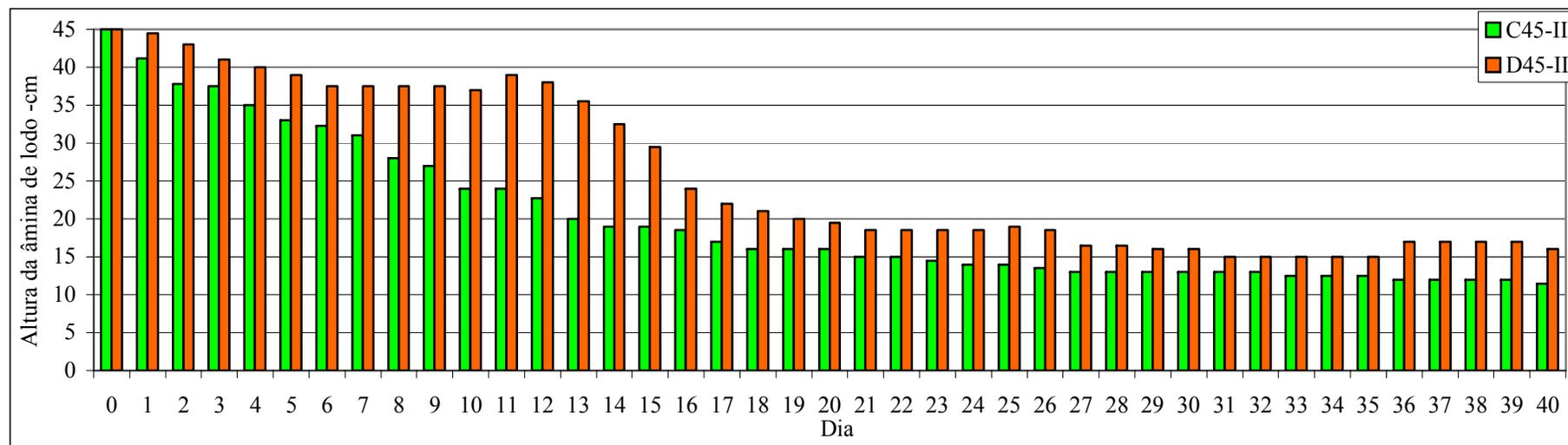


Gráfico 27 - Altura da lâmina de lodo nos leitos de secagem C45-II e D45-II

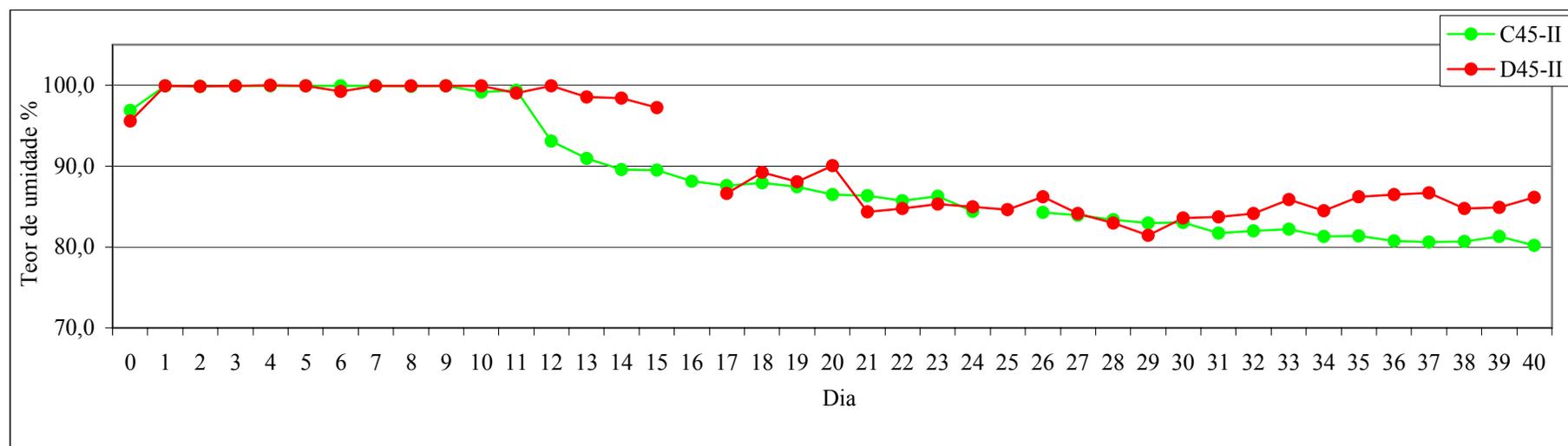


Gráfico 28 - Teor de umidade do lodo do leito de secagem C45-II e D45-II

No Quadro 34 é possível verificar que o lodo do leito de secagem coberto e descoberto apresentaram no dia zero do experimento teor de umidade de 96,6% e 95,5%, respectivamente. No entanto, logo no dia 1 este valor ficou maior, passando para 99,9% nos dois leitos de secagem.

Quadro 34 - Teor de umidade do lodo dos leitos de secagem C45-II e D45-II

Dia	C45-II	D45-II	Dia	C45-II	D45-II
0	96,9	95,5	21	86,3	84,3
1	99,9	99,9	22	85,7	84,8
2	99,8	99,8	23	86,3	85,3
3	99,9	99,9	24	84,4	84,9
4	99,9	99,9	25	-	84,6
5	99,9	99,9	26	84,3	86,2
6	99,9	99,2	27	83,9	84,1
7	99,9	99,9	28	83,4	82,9
8	99,9	99,9	29	83,0	81,5
9	99,9	99,9	30	83,0	83,6
10	99,1	99,9	31	81,7	83,7
11	99,4	99,0	32	82,0	84,1
12	93,1	99,9	33	82,2	85,8
13	90,9	98,5	34	81,3	84,5
14	89,6	98,4	35	81,3	86,2
15	89,5	97,2	36	80,7	86,5
16	88,1	-	37	80,6	86,7
17	87,5	86,6	38	80,7	84,7
18	87,9	89,2	39	81,3	84,9
19	87,4	88,0	40	80,2	86,1
20	86,4	90,1			

Este aumento pode ser justificado devido à primeira amostra para a caracterização do lodo apresentar maior quantidade de sólidos, já que foi coletada logo após o lançamento do lodo nos leitos de secagem, ou seja, a turbulência gerada na descarga proporcionou a homogeneização do lodo descarregado.

É importante ressaltar que no dia 1, em razão da maior parte dos sólidos ter sedimentado, e como a coleta de amostras era sempre realizada na superfície do lodo em secagem, o teor de sólidos apresentou-se menor.

Os pequenos acréscimos observados no teor de umidade no lodo do leito de secagem coberto ocorreram provavelmente devido à pequena massa utilizada nas determinações laboratoriais, aproximadamente 30 g, ou seja, cada 0,1 % no teor de umidade é representado por 0,03 g.

O teor de umidade do dia 1 ao dia 11 permaneceu praticamente constante no lodo dos dois leitos de secagem, isso ocorreu porque até esse dia havia líquido na superfície do lodo, conforme pode ser observado nas Fotografias 25 e 26.



Fotografia 25 - Lodo do leito de secagem D45-II no dia 11 (29/12/2002)



Fotografia 26 - Lodo do leito de secagem C45-II no dia 11 (29/12/2002)

No entanto, apesar dos teores de umidade do lodo dos dois leitos de secagem serem praticamente iguais no dia 11, a altura da lâmina de lodo no leito de secagem C45-II teve até esse dia redução volumétrica de 46,7%, apresentando nesse dia altura de 24 cm, enquanto que no leito de secagem D45-II a redução da altura verificada no mesmo período foi de apenas 13,3%, apresentando neste dia altura de 39 cm.

No dia 12 do experimento começaram aparecer as primeiras placas de material sólido no leito de secagem coberto, conforme pode ser verificado na Fotografia 27. Nesse dia a altura da lâmina e o teor de umidade verificados foram de 22,7cm e 93,1%, respectivamente.



Fotografia 27 - Lodo do leito de secagem C45-II no dia 12 (30/12/2002)

Já no leito de secagem D45-II as primeiras placas de material sólido começaram a aparecer somente no dia 15 (02/01/2003), conforme pode ser observado na Fotografia 28. É importante notar que neste dia a altura da lâmina de lodo e o teor de umidade no leito de secagem descoberto foram de 29,5 cm e 97,2%, respectivamente.

Desta maneira, a altura em que apareceram as primeiras placas de material sólido no leito de secagem descoberto foi maior em 6,8 cm em relação à altura do leito de secagem

C45-II. Essa diferença ocorreu devido ao maior volume / concentração de sólidos verificado no lodo do leito de secagem descoberto, o que mostra ser possível relacionar o volume final e o teor de sólidos do lodo.



Fotografia 28 - Lodo do leito de secagem D45-II no dia 15 (02/01/2002)

Até o dia 15 foi pequena a redução no teor de umidade do leito de secagem descoberto que teve redução de apenas 2,7%, apresentando portanto neste dia valor de 97,3%.

A maior redução no teor de umidade do lodo no leito de secagem descoberto ocorreu do dia 15 ao dia 29, sendo no dia 29 verificado o menor teor de umidade (81,5%). No entanto, no último dia do experimento o teor de umidade verificado foi de 86,1%, portanto 4,6% maior que o valor observado no dia 29, o que pode ser explicado pela ação das águas pluviais.

No Quadro 35 são apresentados os volumes de líquido percolado nos leitos de secagem coberto e descoberto no segundo ciclo de secagem. Assim como na primeira etapa, o volume de líquido percolado no leito de secagem descoberto foi maior.

Quadro 35 - Volume de líquido drenado nos leitos de secagem D45-II e C45-II

Dia	C45-II	D45-II	Dia	C45-II	D45-II
1	39	15	21	3,5	6,5
2	16	13,7	22	2,5	6,5
3	18,5	19	23	2	6,7
4	15,5	10,5	24	2	8,5
5	11	6,3	25	1,70	10,2
6	11	6	26	1,50	4,5
7	15	15	27	1,5	3
8	13	11	28	1,5	2
9	10	8	29	1,3	3
10	16,5	10	30	1	2,3
11	15,5	15	31	0,6	2,3
12	14	9,5	32	1	2,5
13	15	15	33	0,5	2,5
14	36	10,3	34	0,5	2,5
15	10	19	35	1	1,5
16	7,8	16,3	36	0,8	2,5
17	6,5	9	37	0,5	4
18	6	57	38	0,2	2,9
19	4	9	39	0,6	3
20	3	6	40	0,3	2,5
Total			307,8	360	

No Gráfico 29 são mostrados os volumes de líquido percolado diariamente nos leitos de secagem D45-II e C45-II. O total de líquido percolado no leito de secagem coberto e descoberto foi de 307,8 litros e 360 litros, respectivamente. O maior volume de líquido percolado no leito de secagem coberto ocorreu no dia 1, coincidindo com o dia em que houve a maior redução da altura da lâmina de lodo (3,8 cm).

Conforme mostrado no Gráfico 30, o maior percentual de líquido drenado (90%) ocorreu entre os dias 1 e 18 no leito de secagem coberto, o que resultou na redução da altura da lâmina de lodo de 45 para 16 cm.

Do dia 19 ao dia 40, o volume de líquido drenado foi de 10%, sendo de 5 cm a redução da altura da lâmina neste período.

Como demonstrado no Gráfico 31, no leito de secagem descoberto 74% do volume de líquido foi drenado entre os dias 1 e 18, tendo nesse período reduzido em 61% a altura da lâmina de lodo. Do dia 19 ao dia 40, o volume de líquido drenado foi de 26%, sendo de apenas 4 cm a redução da altura da lâmina líquida no mesmo intervalo.

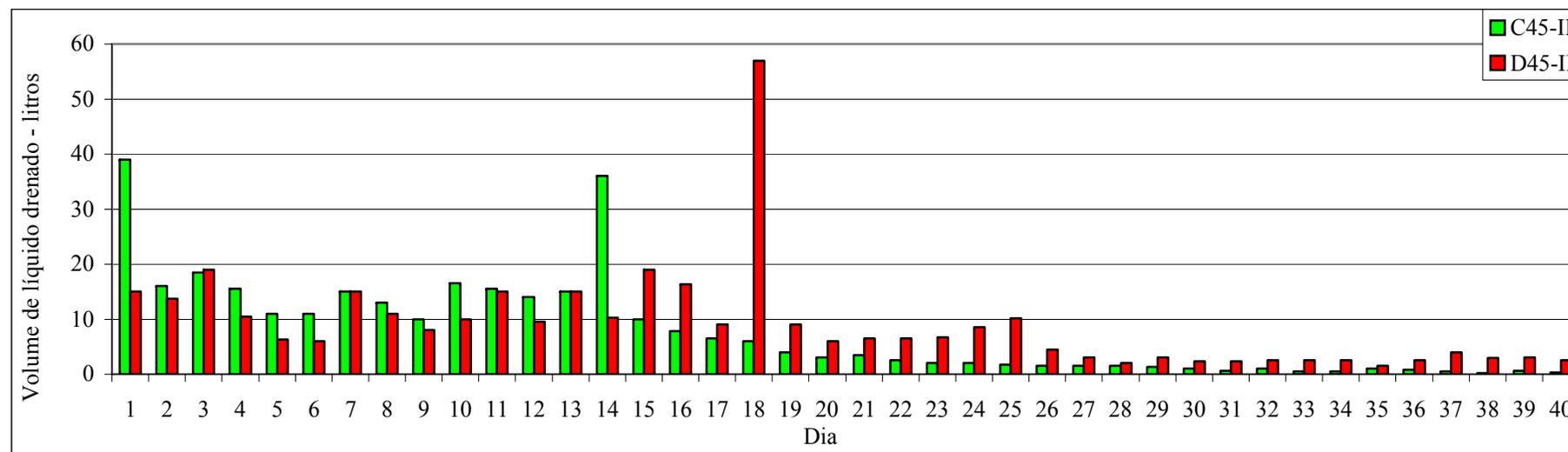


Gráfico 29 - Volume de líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II

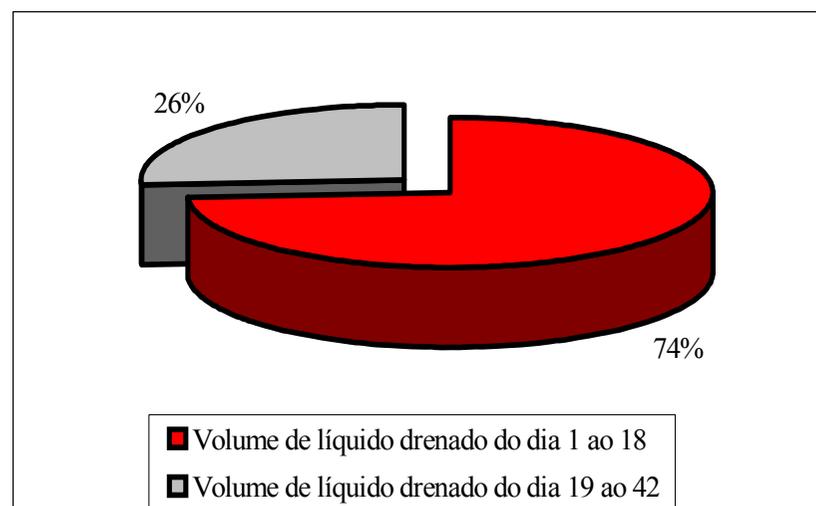


Gráfico 30 - Percentual do volume de líquido drenado no leito de secagem D45-II

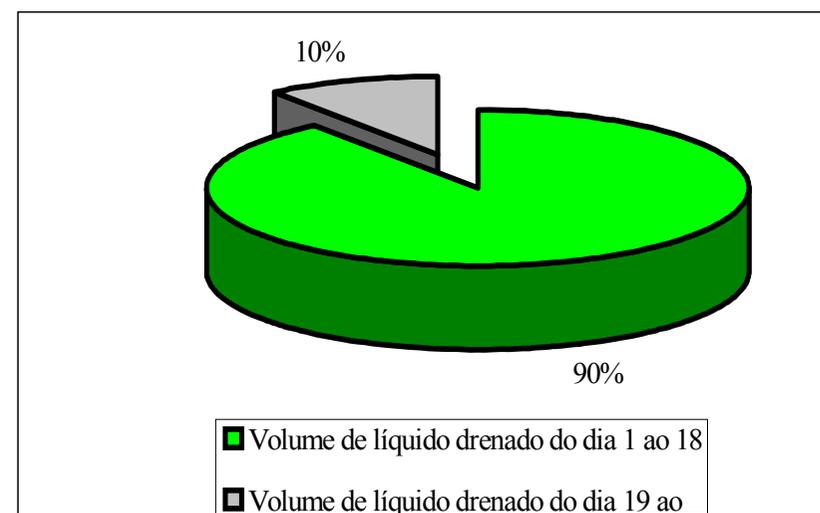


Gráfico 31 - Percentual do volume de líquido drenado no leito de secagem C45-II

Diferentemente da primeira etapa, as precipitações pluviométricas tiveram grande influência no desaguamento do lodo no leito de secagem descoberto, sendo verificado diversas vezes acúmulo de água da chuva na superfície do lodo em secagem.

Na Fotografia 29 pode ser verificado que a superfície do lodo já apresentava rachaduras no dia 32. No entanto, a Fotografia 30 (dia 35) mostra o acúmulo de água na superfície do lodo logo após uma forte precipitação.



Fotografia 29 - Lodo do leito de secagem D45-II no dia 32 (19/01/2003)



Fotografia 30 - Lodo do leito de secagem D45-II no dia 35 (22/01/2002)

No Quadro 36 são relacionados o comportamento da altura da lâmina líquida no leito de secagem descoberto com os dias em que foram verificadas as maiores precipitações.

Quadro 36 - Relação entre altura da lâmina de lodo, precipitação e período de insolação

Dia - data	Observação	Precipitação / insolação observada no dia anterior
8 - 26/12/2002	Não foi verificada redução na altura da lâmina	32,5 mm
11 - 29/12/2002	Aumento da lâmina de lodo em 2 cm	30,5 mm
22 - 09/01/2003	Não houve redução da altura da lâmina	32,0 mm
25 - 12/01/2003	Aumento da altura em 0,5 cm	12,7 mm
27 - 14/01/2003	Não houve redução da altura da lâmina	17,8 mm
36 - 23/01/2003	Aumento da altura da lâmina de lodo em 2 cm	14,3 mm

Portanto, na segunda etapa experimental as precipitações pluviométricas tiveram maior influência no desaguamento do lodo no leito de secagem descoberto. No Quadro 37 são apresentados os valores da precipitação, temperatura e insolação observados em cada dia do experimento.

Quadro 37 - Valores de precipitação, temperatura média e insolação na Fase II

Data	Dia	Precipitação (mm)	Temperatura média (oC)	Insolação (horas e décimos)
18/12/2002	0	13,6	27,5	3,4
19/12/2002	1	0,1	27,0	2,7
20/12/2002	2	2,8	26,1	1,0
21/12/2002	3	0,1	25,9	2,7
22/12/2002	4	3,1	27,3	4,3
23/12/2002	5	1,6	27,4	0,8
24/12/2002	6	0,0	26,6	2,8
25/12/2002	7	32,5	26,1	1,0
26/12/2002	8	4,3	26,7	0,2
27/12/2002	9	9,0	26,1	4,0
28/12/2002	10	30,5	26,5	1,6
29/12/2002	11	11,3	27,2	4,3
30/12/2002	12	6,4	26,7	0,7
31/12/2002	13	5,6	27,9	8,2
1/01/2003	14	0,3	26,8	4,8
2/01/2003	15	2,7	26,7	3,4
3/01/2003	16	4,6	27,9	8,9
4/01/2003	17	0,0	27,1	8,7
5/01/2003	18	5,3	27,0	7,2
6/01/2003	19	1,8	27,7	6,3
7/01/2003	20	4,5	27,8	6,9
8/01/2003	21	32,0	27,7	6,8
9/01/2003	22	7,4	27,1	3,7
10/01/2003	23	5,5	27,2	4,8
11/01/2003	24	12,7	27,7	6,4
12/01/2003	25	0,0	26,6	6,0
13/01/2003	26	17,8	27,2	5,1
14/01/2003	27	0,0	27,5	7,8
15/01/2003	28	0,0	27,4	6,5
16/01/2003	29	0,3	27,5	5,5
17/01/2003	30	0,0	27,5	6,1
18/01/2003	31	0,0	26,6	4,2
19/01/2003	32	3,5	26,5	2,0
20/01/2003	33	5,0	25,0	1,3
21/01/2003	34	5,7	26,0	3,0
22/01/2003	35	14,3	25,5	0,0
23/01/2003	36	0,6	25,6	0,3
24/01/2003	37	0,0	26,1	0,2
25/01/2003	38	0,3	26,8	7,6
26/01/2003	39	8,1	26,8	3,5

Caracterização do líquido drenado – segundo ciclo de secagem

No Gráfico 32 são mostradas as variações do pH e da alcalinidade no líquido drenado do leito de secagem coberto e descoberto na segunda etapa experimental. Nesse Gráfico é possível observar que tanto a alcalinidade quanto o pH, igualmente como verificado na primeira etapa, tiveram, em geral, os menores valores no leito de secagem descoberto.

O comportamento do pH no líquido drenado ocorreu de forma diferente nas duas etapas experimentais, sendo na primeira etapa observado o decréscimo dos valores de pH ao longo do período experimental nos dois leitos de secagem. Na segunda fase foi verificado nos primeiros dias do experimento um decréscimo dos valores de pH, sendo que a partir do dia 6, o pH do leito de secagem descoberto apresentou variações. Já os valores observados no leito de secagem coberto apresentaram tendência ao crescimento, conforme pode ser observado no Gráfico 32 e no Quadro 38.

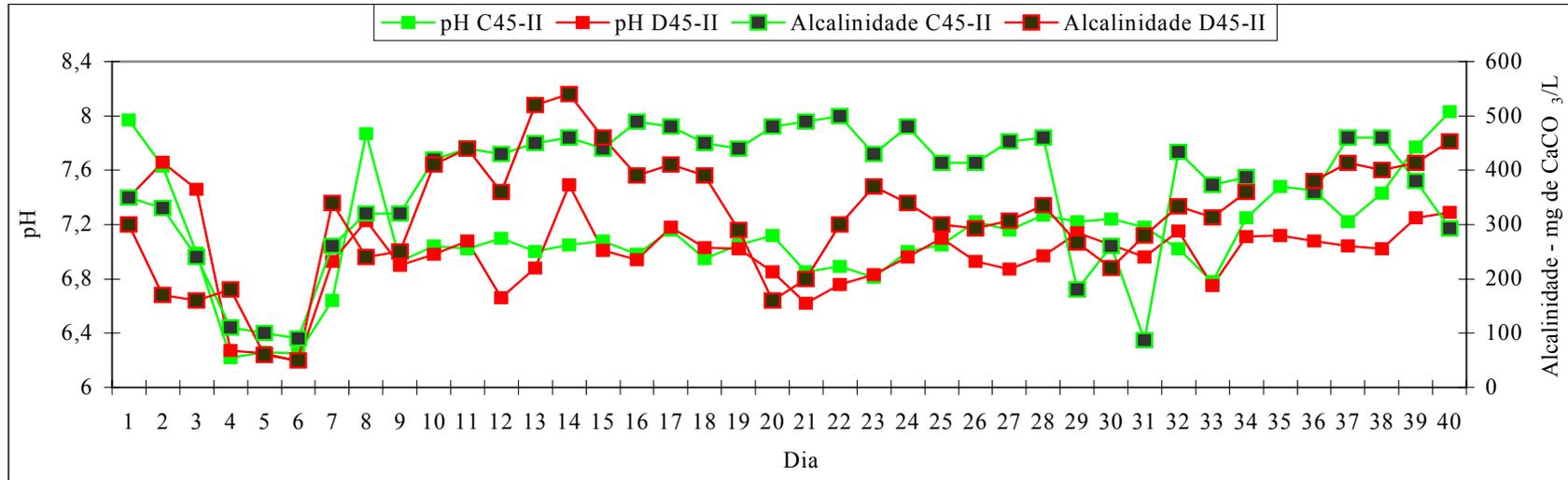


Gráfico 32 - pH e Alcalinidade no líquido drenado nos leitos de secagem D45-II e C45-II

Quadro 38 - Valores de pH e alcalinidade no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II

Dia	pH		Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)		Dia	pH		Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)		Dia	pH		Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	
	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II		C45-II	D45-II	C45-II	D45-II		C45-II	D45-II	C45-II	D45-II
	7,97	7,4	350	300	14	7,05	7,49	460	540	29	7,27	6,97	460	335
1	7,63	7,66	330	170	15	7,08	7,01	440	460	30	7,22	7,14	180	266,7
2	6,99	7,46	240	160	16	6,98	6,94	490	390	31	7,24	7,05	260	220
3	6,22	6,27	110	180	17	7,16	7,18	480	410	32	7,18	6,96	86,7	280
4	6,26	6,25	100	60	18	6,95	7,03	450	390	33	7,02	7,15	433,3	333,3
5	6,25	6,19	90	50	19	7,05	7,02	440	290	34	6,78	6,75	373,3	313,3
6	6,64	6,93	260	340	20	7,12	6,85	480	160	35	7,25	7,11	386,7	360
7	7,87	7,23	320	240	21	6,85	6,62	490	200	36	7,48	7,12		
8	6,93	6,9	320	250	22	6,89	6,76	500	300	37	7,45	7,08	360	380
9	7,04	6,98	420	410	23	6,81	6,83	430	370	38	7,22	7,04	460	413,3
10	7,02	7,08	440	440	24	7	6,96	480	340	39	7,43	7,02	460	400
11	7,1	6,66	430	360	25	7,05	7,1	413,3	300	40	8,03	7,2	293,3	453,3
12	7	6,88	450	520	26	7,22	6,93	413,3	293,3					
13	7,97	7,4	350	300	27	7,16	6,87	453,3	306,7					

Assim como o pH, a alcalinidade também apresentou comportamento distinto nas duas fases experimentais, sendo observado na primeira o decréscimo na alcalinidade durante o período experimental, o que não ocorreu na segunda, que apresentou tendência ao crescimento, como pode ser observado nos gráficos 12 e 32.

No Quadro 39 e nos gráficos 33 e 34 são mostrados os comportamentos da turbidez e da cor aparente ao longo da segunda etapa experimental, sendo possível observar, que assim como na primeira etapa, houve redução da turbidez e da cor aparente no líquido drenado nos leito de secagem C45-II e D45-II.

Quadro 39 - Valores de cor aparente e turbidez no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II

Dia	Cor aparente (uH)		Turbidez (uT)		Dia	Cor aparente(uH)		Turbidez (uT)	
	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II		C45-II	D45-II	C45-II	D45-II
1	1.680	321	230	44	21	306	282	19	23
2	1.054	372	118	31	22	285	260	15	21
3	674	347	86	30	23			8	28
4	454	259	43	19	24	251	269	15	24
5	392	209	37	18	25	250	238	9	16
6	392	301	41	27	26	259	225	9	25
7	688	660	101	89	27	284	199	14	14
8	948	520	120	65	28	303	200	19	13
9	716	474	99	60	29	320	184	18	
10	984	604	112	71	30	312	165	19	7
11	1.400	720	170	105	31	287	164	13	6
12	1.060	830	59	59	32	285	169	16	7
13	876	650	106	108	33	281	208	18	14
14	842	590	122	131	34	284	187	20	10
15	778	834	93	107	35	289	170	22	8
16	610	918	76	138	36	294	273	19	22
17	464	884	59	125	37	295	259	18	7
18	475	748	38	104	38	294	227	20	17
19	396	330	28	48	39	300	271	22	36
20	313	292	15	24	40	297	274	21	34

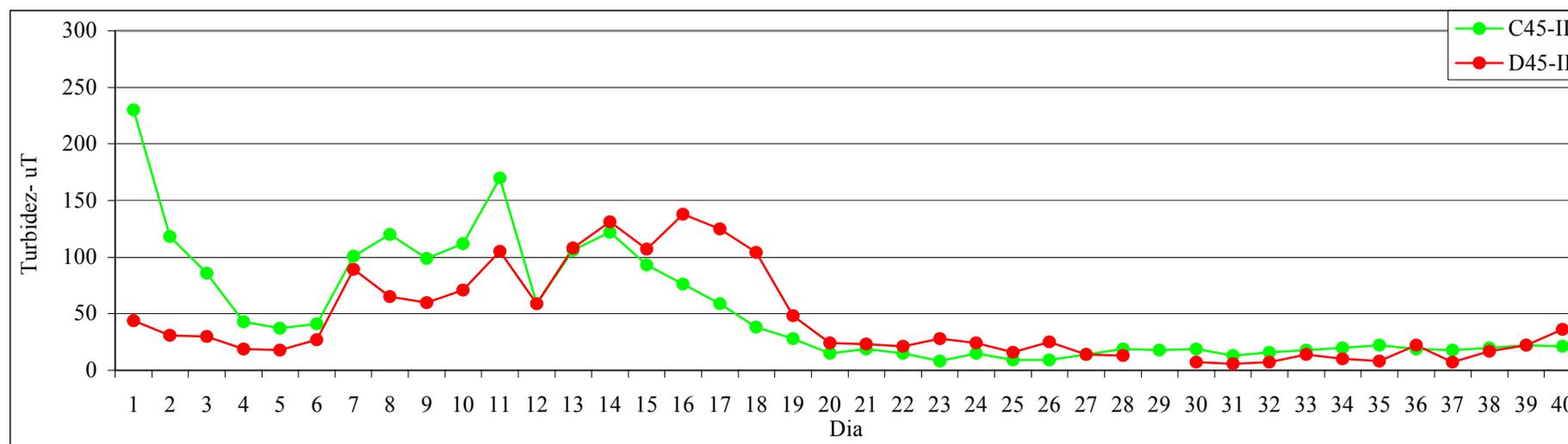


Gráfico 33 - Turbidez no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II

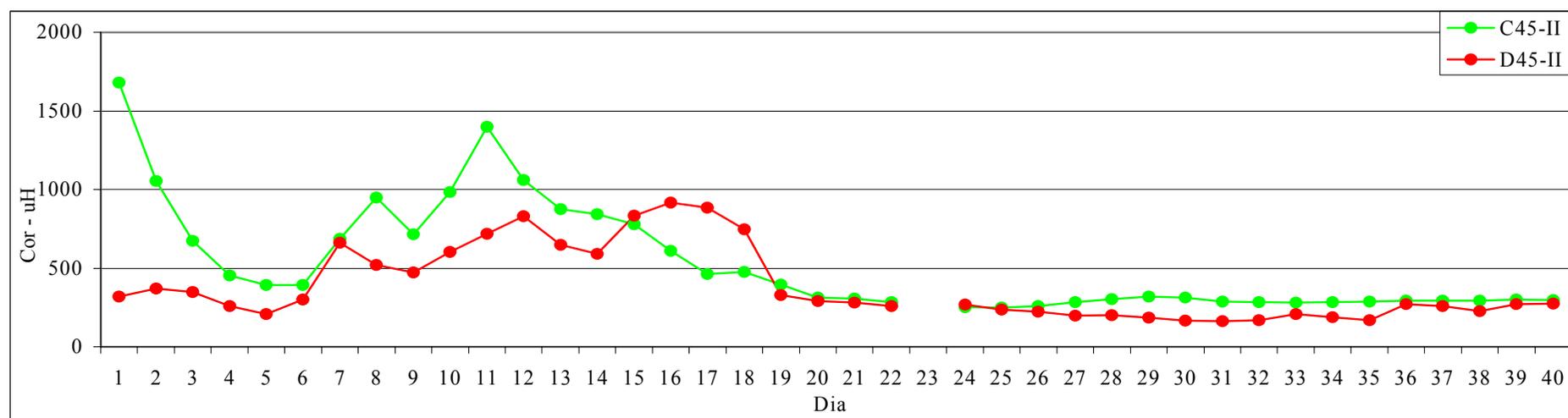


Gráfico 34 - Cor aparente no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II

O Gráfico 35 mostra a variação da concentração de sólidos totais no líquido drenado na segunda etapa experimental, sendo possível observar que a concentração de sólidos foi praticamente a mesma nos dois leitos de secagem até o dia 22. A partir deste dia foram verificadas oscilações no teor de sólidos no líquido drenado no leito de secagem descoberto.

O Quadro 40 e os gráficos 36 e 37 demonstram os percentuais de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado dos leitos D45-II C45-II, sendo possível observar que teor de sólidos fixos e voláteis apresentou grande variação nos dois leitos de secagem.

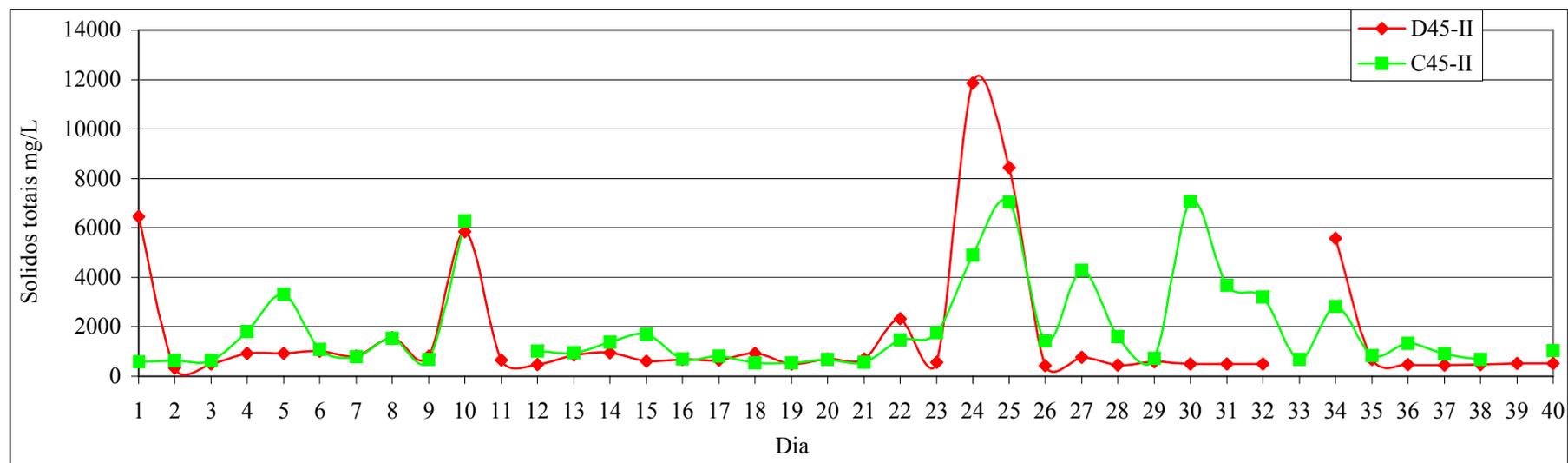


Gráfico 35 - Sólidos totais no líquido drenado no leito de secagem coberto e descoberto

Quadro 40 - Concentração de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II

Dia	Sólidos totais		Sólidos fixos		Sólidos Voláteis		Dia	Sólidos totais		Sólidos fixos		Sólidos Voláteis	
	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II		C45-II	D45-II	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II
1	592	6.456	313	154	279	6302	21	559	701	360	366	199	335
2	622	329	356	236	266	93	22	1.460	2.327	388	92	1.072	2.235
3	624	487	370	354	254	133	23	1.760	570	-	309	-	261
4	1.810	922	378	386	1.432	536	24	4.895	11.863	227	2.161	4.668	9.702
5	3.312	937	275	496	3.037	441	25	7.048	8.435	220	166	6.828	8.269
6	1.075	1023	483	403	592	620	26	1.421	419	492	317	929	102
7	787	816	478	352	309	464	27	4.285	767	563	324	3.722	443
8	1.535	1.566	271	357	1.264	1.209	28	1.599	449	249	300	1.350	149
9	681	818	446	400	235	418	29	731	589	410	-	321	-
10	6.284	5.845	437	133	5.847	5.712	30	7.058	501	443	361	6.615	140
11	-	646	-	409	-	237	31	3.689	500	505	323	3.184	177
12	1.005	467	381	347	624	120	32	3.217	501	375	282	2.842	219
13	943	854	421	532	522	322	33	683	-	402	-	281	-
14	1.376	952	401	392	975	560	34	2.816	5.574	357	284	2.459	5.290
15	1.703	612	-	310	-	302	35	830	675	559	318	271	357
16	703	670	295	278	408	392	36	1.331	469	-	285	-	184
17	824	645	476	273	348	372	37	899	447	439	269	460	178
18	549	928	363	299	186	629	38	687	484	466	315	221	169
19	552	495	403	286	149	209	39	-	518	-	321	-	197
20	683	690	348	372	335	318	40	1.038	527	469	288	569	239

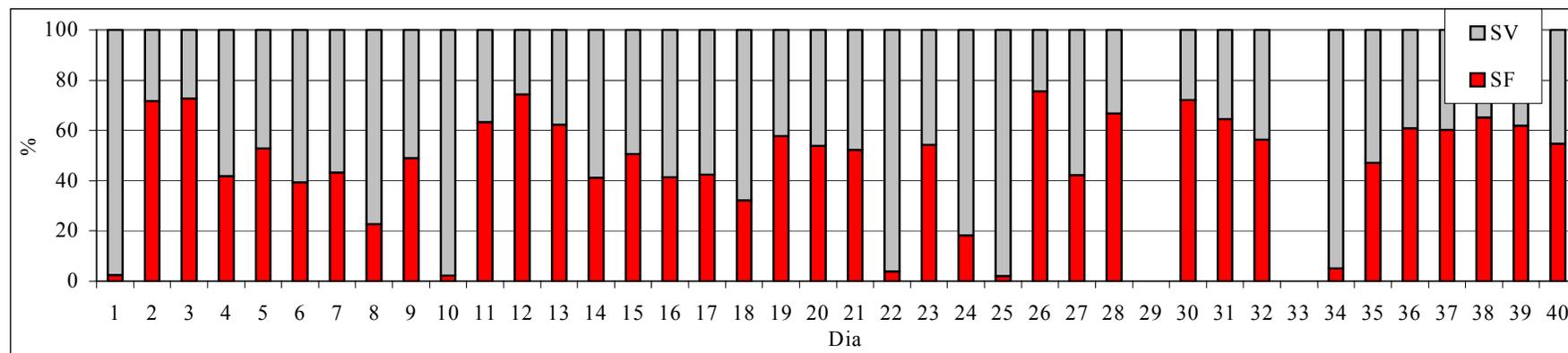


Gráfico 36 - Percentual de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem D45-II

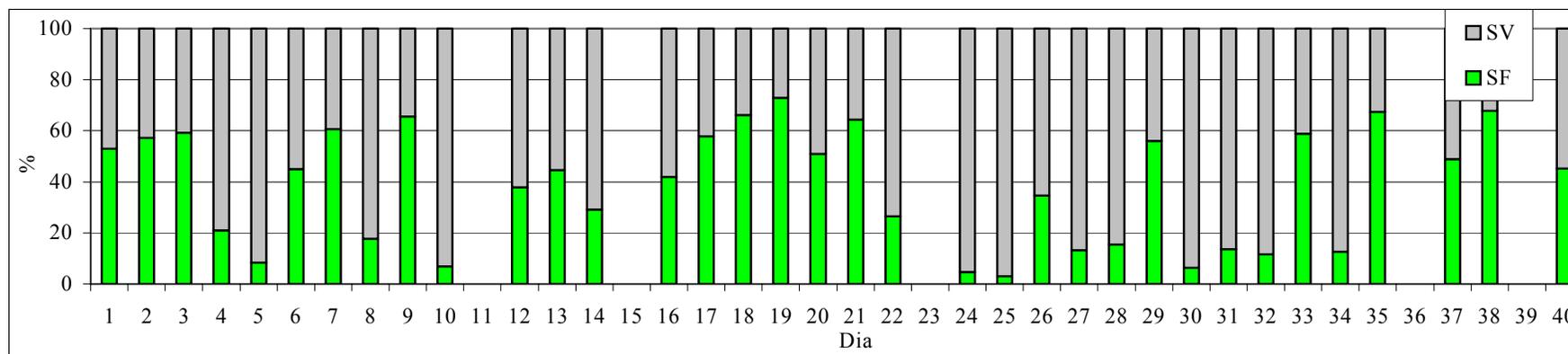


Gráfico 37 - Percentual de sólidos totais fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem C45-II

Como pode ser observado no Gráfico 36 e 37, o líquido drenado do leito de secagem descoberto apresentou teor máximo (75,6%) e mínimo (1,9%) de sólidos totais fixos nos dias 26 e 25, respectivamente. No leito de secagem coberto o valor máximo (73%) e mínimo (3,1%) ocorreu nos dias 19 e 25, respectivamente.

No Gráfico 38 pode ser observado que a concentração de sólidos suspensos apresentou praticamente o mesmo comportamento nos leitos de secagem coberto e descoberto. No Quadro 41 verifica-se que o teor máximo e mínimo de sólidos suspensos verificado no leito de secagem descoberto foi observado no dia 7 (105 mg/L) e no dia 40 (8 mg/L), respectivamente. No leito de secagem C45-II a concentração máxima e mínima foi observada no dia 1 (105 mg/L) e no dia 28 (8 mg/L).

O teor de sólidos suspensos fixos, tanto no leito de secagem coberto como no descoberto, foi menor em quase todos os dias do experimento, conforme pode ser observado nos gráficos 39 e 40.

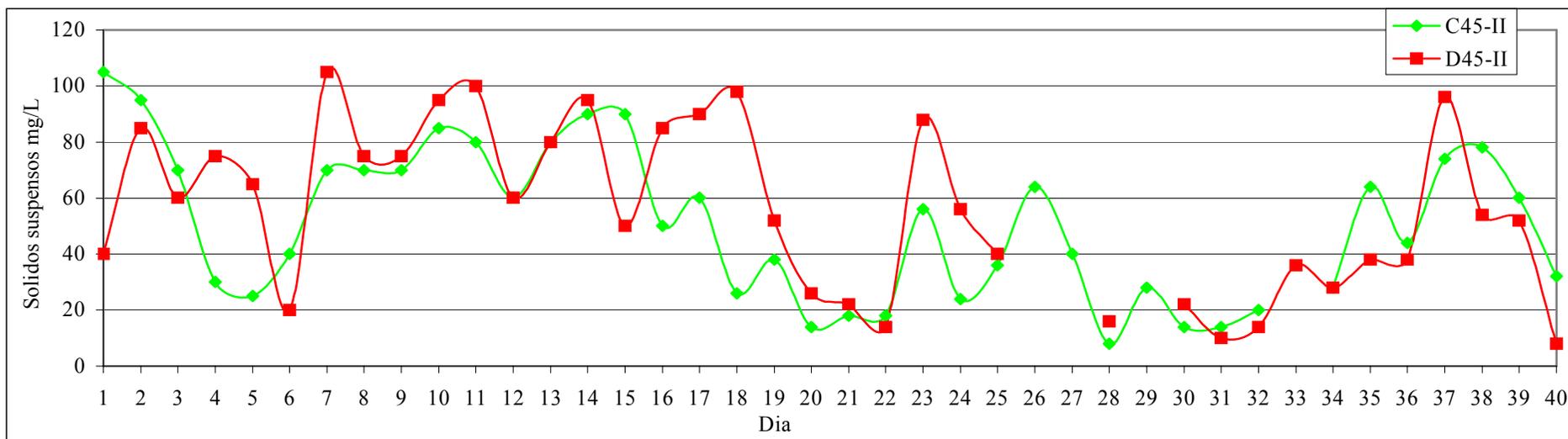


Gráfico 38 - Sólidos suspensos no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II

Quadro 41 - Concentrações de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem C45-II eD45-II

Dia	Sólidos suspensos (mg/L)		Sólidos sus. fixos (mg/L)		Sólidos sus voláteis (mg/L)		Dia	Sólidos suspensos (mg/L)		Sólidos sus. fixos (mg/L)		Sólidos sus voláteis (mg/L)	
	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II		C45-II	D45-II	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II
1	105	40	10	35	95	5	21	18	22	8	8	10	14
2	95	85	45	20	50	65	22	18	14	6	4	12	10
3	70	60	20	30	50	30	23	56	88	6	30	50	58
4	30	75	15	40	15	35	24	24	56	2	16	22	40
5	25	65	10	45	15	20	25	36	40	14	18	22	22
6	40	20	25	10	15	10	26	64	-	28	-	36	-
7	70	105	35	40	35	65	27	40	-	14	-	26	-
8	70	75	50	55	20	20	28	8	16	-	4	-	12
9	70	75	65	65	5	10	29	28	-	10	-	18	-
10	85	95	25	25	60	70	30	14	22	2	8	12	14
11	80	100	25	30	55	70	31	14	10	10	4	4	6
12	60	60	25	20	35	40	32	20	14	12	6	8	8
13	80	80	25	20	55	60	33	-	36	-	14	-	22
14	90	95	20	25	70	70	34	28	28	6	6	22	22
15	90	50	20	20	70	30	35	64	38	36	8	28	30
16	50	85	20	35	30	50	36	44	38	28	18	16	20
17	60	90	15	15	45	75	37	74	96	38	72	36	24
18	26	98	4	12	22	86	38	78	54	38	12	40	42
19	38	52	10	8	28	44	39	60	52	26	10	34	42
20	14	26	2	4	12	22	40	32	8	4	4	28	4

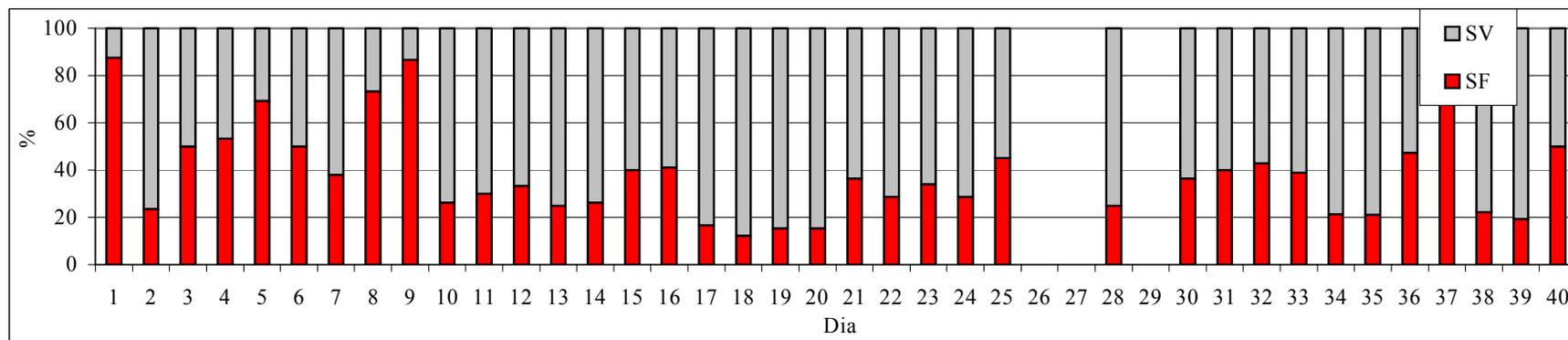


Gráfico 39 - Percentual de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado do leito de secagem D45-II

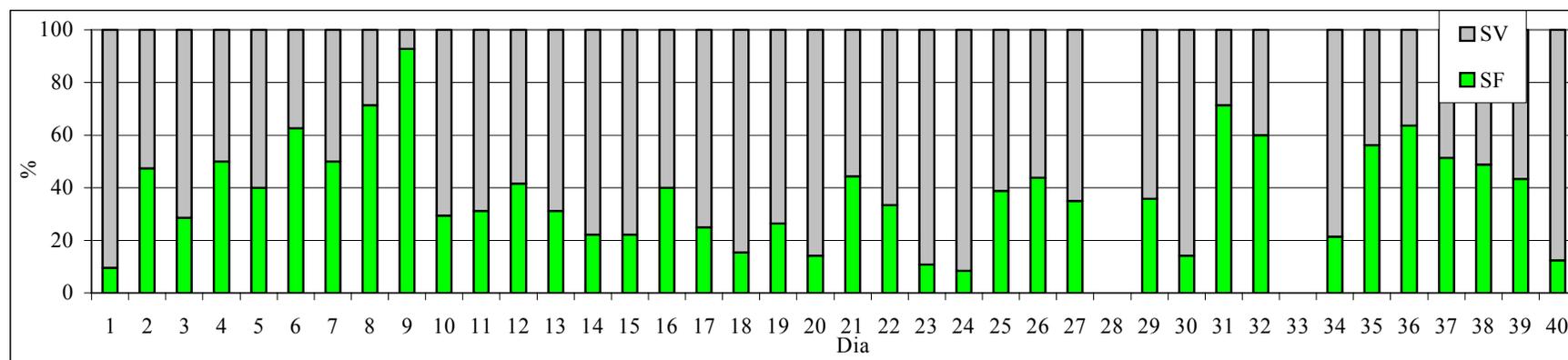


Gráfico 40 - Percentual de sólidos suspensos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem C45-II

No Gráfico 41 é mostrado o comportamento da concentração de sólidos dissolvidos no líquido drenado dos leitos de secagem coberto e descoberto. Nesse Gráfico é possível observar que a maior variação da concentração de sólidos dissolvidos ocorreu a partir do dia 24.

O Quadro 42 mostra os valores de sólidos dissolvidos fixos e voláteis observados na segunda etapa experimental nos leitos de secagem coberto e descoberto. Nesse Quadro é possível notar que maior concentração de sólidos dissolvidos no leito de secagem descoberto e coberto ocorreu nos dias 24 (11.807 mg/L) e 30 (7.044 mg/L), respectivamente. A menor concentração de sólidos dissolvidos no leito de secagem descoberto ocorreu no dia 2 (244 mg/L), sendo observado no leito de secagem coberto no dia 1 (487 mg/L).

Nos gráficos 42 e 43 é mostrado o teor de sólidos dissolvidos fixos e voláteis nos leitos de secagem coberto e descoberto, respectivamente, onde é possível observar a grande variação destes parâmetros durante o período experimental.

A relação entre os sólidos suspensos e os sólidos totais teve variação de 0,2% a 28,7% no líquido drenado do leito de secagem coberto e de 0,5% a 57,3% no líquido drenado do leito de secagem descoberto, conforme mostrado nos gráficos 44 e 45.

No Gráfico 46 e no Quadro 43 é possível verificar que a DQO do líquido drenado dos dois leitos de secagem apresentou grande variação a partir do dia 22.

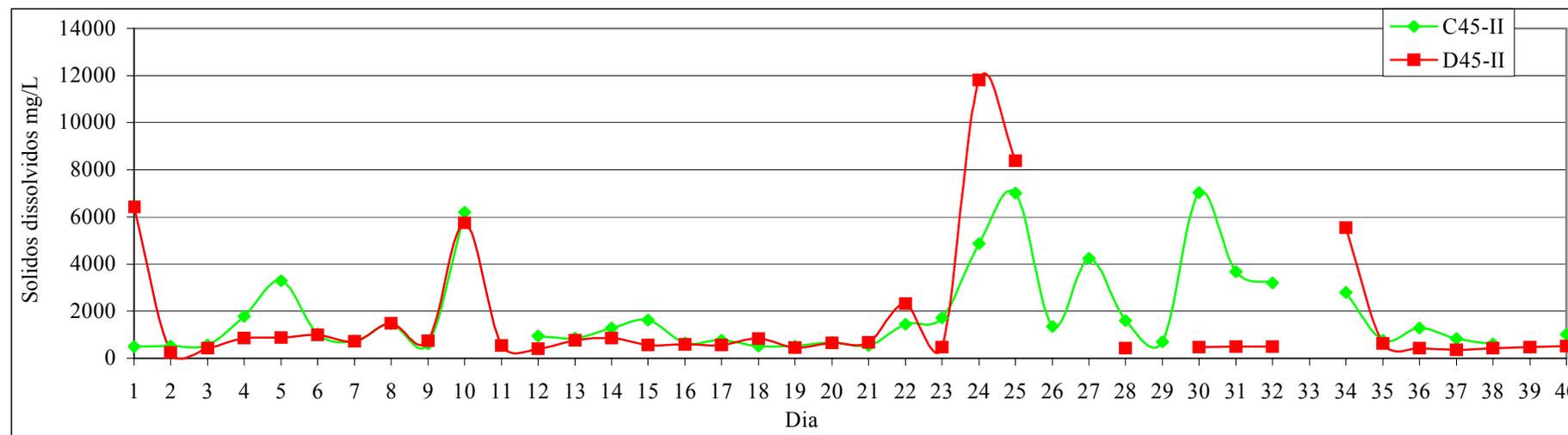


Gráfico 41 - Sólidos dissolvidos no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II

Quadro 42 - Concentrações de sólidos dissolvidos fixos e voláteis no líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II

Dia	Sólidos dissolvidos (mg/L)		Sólidos dissolvidos fixos (mg/L)		Sólidos dissolvidos voláteis (mg/L)		Dia	Sólidos dissolvidos (mg/L)		Sólidos dissolvidos fixos (mg/L)		Sólidos dissolvidos voláteis (mg/L)	
	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II		C45-II	D45-II	C45-II	D45-II	C45-II	D45-II
1	487	6.416	303	119	184	6.297	21	541	679	352	358	189	321
2	527	244	311	216	216	28	22	1.442	2.313	382	88	1.060	2.225
3	554	427	350	324	204	103	23	1.704	482	-	279	-	203
4	1.780	847	363	346	1.417	501	24	4.871	11.807	225	2.145	4.646	9.662
5	3.287	872	265	451	3.022	421	25	7.012	8.395	206	148	6.806	8.247
6	1.035	1.003	458	393	577	610	26	1.357	-	464	-	893	-
7	717	711	443	312	274	399	27	4.245	-	549	-	3.696	-
8	1.465	1.491	221	302	1.244	1189	28	1.591	433	-	296	-	137
9	611	743	381	335	230	408	29	703	-	400	-	303	-
10	6.199	5.750	412	108	5.787	5.642	30	7.044	479	441	353	6.603	126
11	-	546	-	379	-	167	31	3.675	490	495	319	3.180	171
12	945	407	356	327	589	80	32	3.197	487	363	276	2.834	211
13	863	774	396	512	467	262	33	-	-	-	-	-	-
14	1.286	857	381	367	905	490	34	2.788	5.546	351	278	2.437	5.268
15	1.613	562	-	290	-	272	35	766	637	523	310	243	327
16	653	585	275	243	378	342	36	1.287	431	-	267	-	164
17	764	555	461	258	303	297	37	825	351	401	197	424	154
18	523	830	359	287	164	543	38	609	430	428	303	181	127
19	514	443	393	278	121	165	39	-	466	-	311	-	155
20	669	664	346	368	323	296	40	1.006	519	465	284	541	235

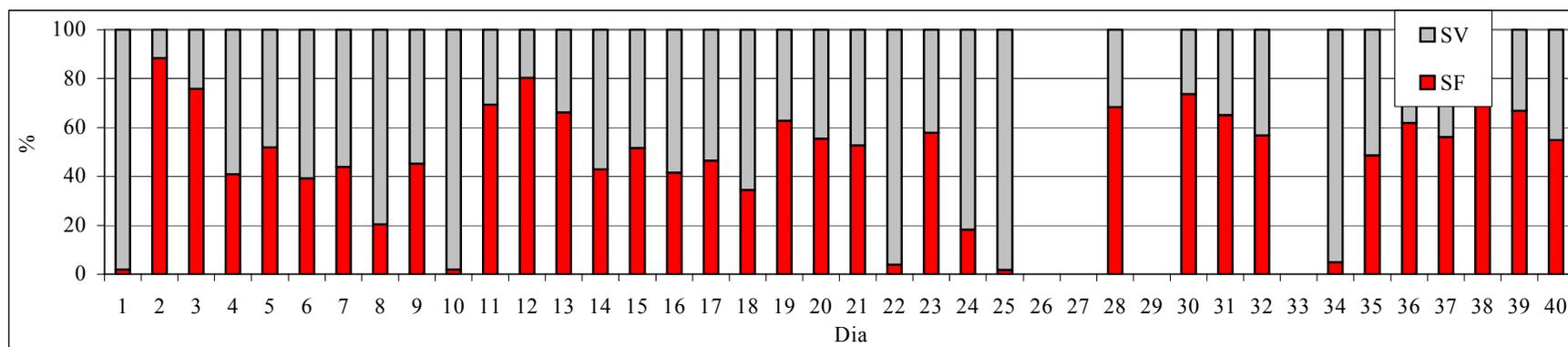


Gráfico 42 - Percentual de sólidos dissolvidos fixos e voláteis no líquido drenado no leito de secagem D45-II

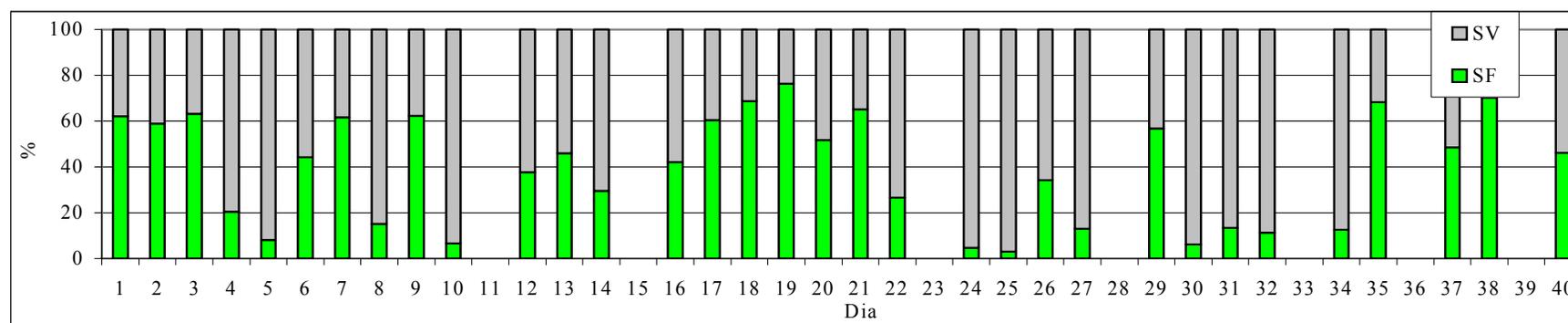


Gráfico 43 - Percentual de sólidos dissolvidos no líquido drenado no leito de secagem C45-II

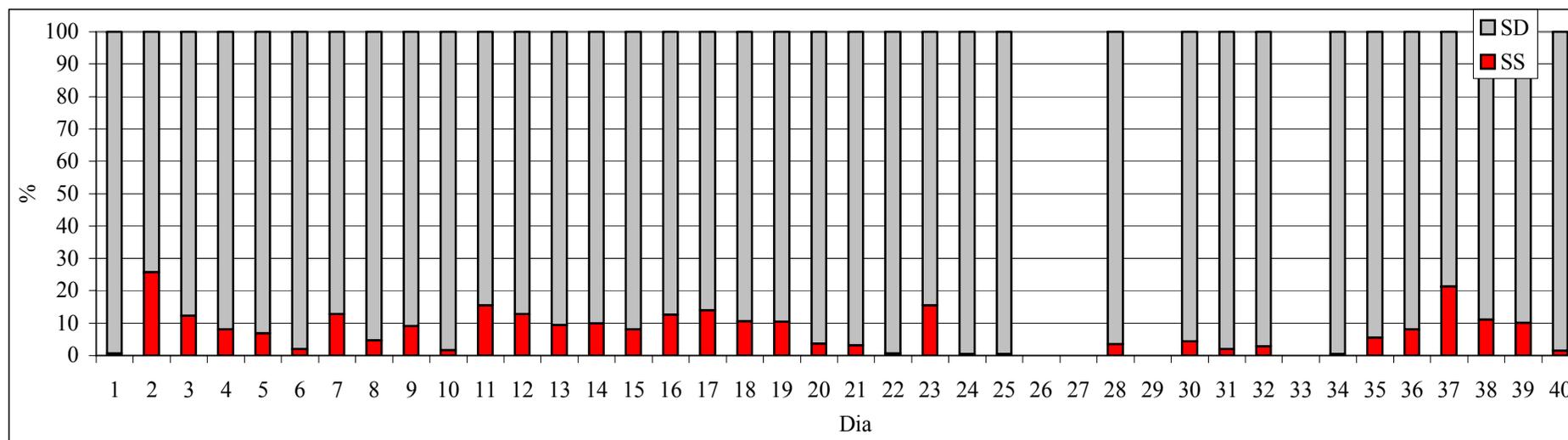


Gráfico 44 - Percentual de sólidos suspensos e dissolvidos no líquido drenado no leito de secagem D45-II

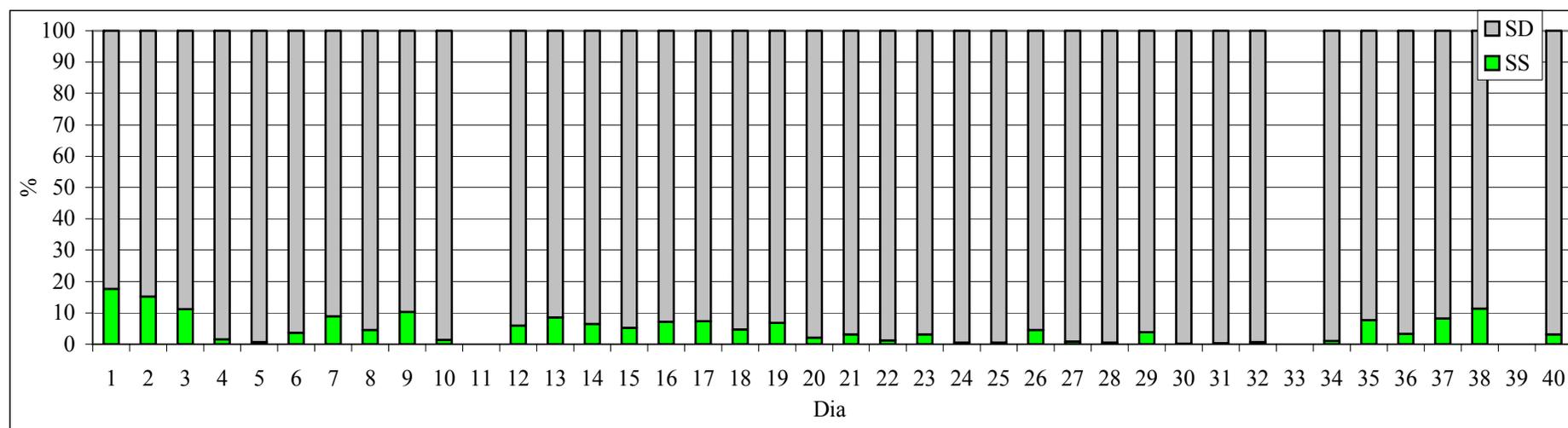


Gráfico 45 - Percentual de Sólidos suspensos e dissolvidos no líquido drenado no leito de secagem C45-II

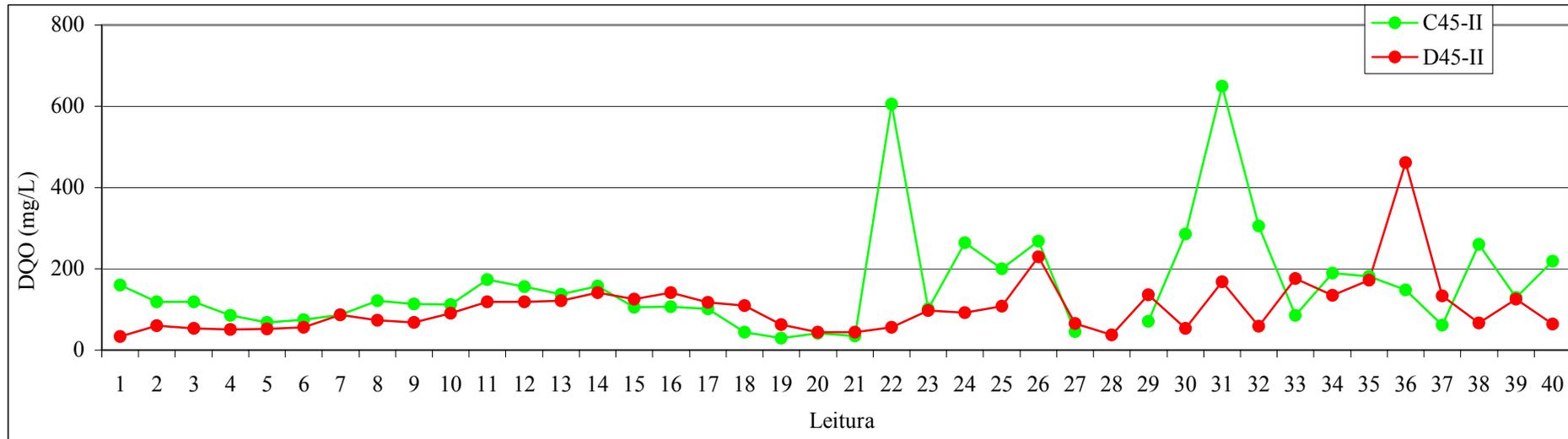


Gráfico 46 - DQO do líquido drenado nos leitos de secagem C45-II e D45-II

Quadro 43 - DQO do líquido drenado no leito de secagem C45-II e D45II

Dia	DQO (mg/L)		Dia	DQO (mg/L)		Dia	DQO (mg/L)	
	C45-II	D45-II		C45-II	D45-II		C45-II	D45-II
1	160	34	16	107	141	31	649	168
2	119	60	17	101	118	32	306	59
3	119	53	18	44	109	33	85	176
4	85	51	19	30	63	34	189	135
5	68	52	20	42	44	35	181	172
6	75	56	21	35	44	36	148	462
7	87	87	22	606	56	37	62	133
8	122	74	23	102	98	37	260	67
9	113	68	24	264	92	39	129	126
10	112	91	25	200	108	40	269	64
11	174	119	26	268	230			
12	156	119	27	46	66			
13	137	122	28		37			
14	157	141	29	71	136			
15	106	125	30	285	53			

5.3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.3.1. Primeiro ciclo de desaguamento

No Quadro 44 são apresentados os teores de umidade inicial e final, a redução volumétrica do lodo, o volume total de líquido percolado e precipitado durante o primeiro ciclo de secagem.

Quadro 44 - Resultados do primeiro ciclo de secagem (18 dias)

Parâmetro observado	Unidade	C45-I	D45-I
Taxa de sólidos suspensos aplicada	kgSS/m ²	0,495	0,455
Volume inicial de lodo	litro	450	450
Teor de umidade final	%	74,6	64,4
Volume de lodo final	litro	10	20
Redução do volume de inicial de lodo	%	97,8	95,56
Total de líquido drenado	litros	414,85	441,08
Volume total das precipitações pluviométricas	litro	-	105,2

O volume final de lodo foi estimado pela multiplicação da área pela altura final da torta, sendo desconsiderada a área das rachaduras, devido a grande dificuldade para quantificar suas áreas. Logo, o volume de lodo final calculado de 10 litros no leito de secagem coberto e 20 litros no leito de secagem descoberto foram superiores aos volumes reais.

A carga aplicada nos leitos de secagem na primeira etapa experimental foi praticamente a mesma, porém, como mostrado no Gráfico 6, a redução volumétrica ocorreu de forma mais acelerada no leito de secagem coberto, que com exceção do dia 1, sempre apresentou menor altura da lâmina de lodo.

Nesse Gráfico é possível observar que 48 horas após o lançamento do lodo, o volume de lodo no leito de secagem descoberto foi de 190 litros (redução de 57,8%), enquanto o leito de secagem coberto apresentou 125 litros (redução de 72,2%). Já no dia 4, o leito de secagem D45-I apresentou somente 16,7% (75 litros) da quantidade inicial de lodo, neste dia o residual de lodo observado no leito C45-I foi de 7,8% (35 litros), portanto, menos da metade do volume verificado no mesmo dia no leito D45-I.

Ao final do ciclo de desaguamento, o volume final de lodo no leito de secagem descoberto foi de aproximadamente 20 litros, o que representou redução volumétrica de 95,56%. O leito de secagem coberto teve redução volumétrica da ordem de 97,8%, apresentando volume final de 10 litros, ou seja, a metade do volume residual verificado no leito de secagem descoberto.

No entanto, apesar de apresentar maior volume final, o leito de secagem descoberto apresentou lodo com menor teor de umidade (64,4%) no final do período de desaguamento, enquanto o lodo do leito de secagem coberto teve teor de umidade de 74,4%.

Sendo assim, o desaguamento de lodo no leito de secagem descoberto apresentou na primeira etapa experimental melhor desempenho, tendo teor de umidade final menor em 10,18%, em relação ao leito de secagem coberto.

O desaguamento de lodo em leitos de secagem é influenciado diretamente pelas condições climáticas locais, em especial a evaporação e a precipitação, sendo a evaporação responsável por acelerar o processo de desaguamento, enquanto as precipitações pluviométricas podem retardar a secagem do lodo.

No entanto, neste experimento mesmo ficando exposto às precipitações pluviométricas que somaram no período 105,2 litros, o lodo do leito de secagem descoberto apresentou maior teor de sólidos, o que pode ser explicado pela baixa taxa aplicada ter favorecido a formação de torta com pequena espessura e com rachaduras logo nos primeiros dias.

Essas características da torta (pequena altura e com rachaduras) permitiram a passagem das chuvas quase que diretamente, fazendo com que estas tivessem pouca influência no desaguamento do lodo.

Assim, apesar da insolação ser fundamental para o melhor desempenho do leito de secagem descoberto, a percolação foi responsável pela maior redução volumétrica, já que a altura da lâmina de lodo tornou-se praticamente constante quando o volume de líquido drenado ficou pequeno.

5.3.2. Segundo ciclo de desaguamento

No Quadro 45 são apresentados os teores de umidade inicial e final, a redução volumétrica do lodo, o volume total de líquido percolado e precipitado durante o segundo ciclo de desaguamento.

Quadro 45 - Resultados do segundo ciclo de desaguamento (40 dias)

Parâmetro observado	Unidade	C45-II	D45-II
Taxa de sólidos suspensos aplicada	kgSS/m ²	3,861	9,71
Volume inicial de lodo	litro	450	450
Teor de umidade final	%	81,3	84,9
Volume de lodo final	litro	115	160
Redução do volume de inicial de lodo	%	74,4	64,4
Total de líquido drenado	litros	307,5	357,5
Volume total das precipitações pluviométricas	litro	-	253,3

A taxa aplicada no leito de secagem coberto foi quase 8 vezes maior que a aplicada na primeira fase experimental, enquanto que a taxa aplicada no leito de secagem descoberto foi 20 vezes maior que a aplicada no primeiro ciclo de secagem.

Na segunda etapa experimental, diferentemente da primeira, as precipitações pluviométricas tiveram forte influência no desaguamento do lodo. Isto ocorreu em razão do elevado teor de sólidos verificado no lodo descarregado nos leito de secagem (nos primeiros dezoito dias do 2º ciclo experimental foi verificado 133,8 litros de águas pluviais, o que é 27% maior do que no 1º ciclo experimental) em especial os sólidos sedimentáveis que foram 660 ml/L no leito de secagem coberto e 780 ml/L no descoberto. Vale ressaltar, que no 1º ciclo de secagem o volume de sólidos sedimentáveis foi zero ml/L, tendo sido observado flotação de sólidos no cone Imhoff.

Essa alta concentração de sólidos sedimentáveis favoreceu a estratificação do lodo em secagem, que teve duas fases: uma formada pela parcela sedimentável e outra formada pela parcela líquida, localizada logo acima.

A espessa camada de sólidos sedimentáveis na parte inferior dificultou a passagem da parcela líquida que se encontrava acima. A observação do Gráfico 28 mostra que até o dia 11

do experimento, uma parcela líquida ainda estava retida na parte superior, já que o teor de umidade até este dia foi de 99,9% nos dois leitos de secagem.

Além de dificultar a passagem da parcela líquida, a concentração de sólidos sedimentáveis favoreceu o acúmulo da água da chuva, que no segundo ciclo de secagem apresentou volume total de 253 litros. No Gráfico 27 é possível observar o aumento da altura da lâmina de lodo em alguns dias do experimento, em razão das precipitações pluviométricas.

Além de aumentar o teor de umidade, o acúmulo de água da chuva na superfície do lodo impediu a ação direta da insolação no lodo em secagem, conforme pode ser observado na Fotografia 30.

Desta forma, a formação de sobrenadante no 2º ciclo de secagem retardou o desaguamento do lodo, ficando clara a necessidade da remoção da massa líquida sobrenadante, o que poderia ter melhor o desempenho da unidade.

No entanto, a concentração de sólidos sedimentáveis influenciou não só na redução do período de desaguamento do lodo, mas também no volume final de lodo, que foi de 115 litros no leito coberto e 160 litros no leito descoberto no final do experimento.

Vale ressaltar que a maioria dos autores e a própria NBR não considera os sólidos sedimentáveis como parâmetro de dimensionamento e operação de leitos de secagem. Contudo, nesse segundo ciclo de desaguamento ficou claro que os sólidos sedimentáveis exercem forte influência no desaguamento de lodo. Pereira (2001) ao realizar experimento com leitos de secagem em iguais condições (mesmas dimensões, meio filtrante e taxa de sólidos aplicada 50 kgSS/m²) verificou diferentes volumes de líquido percolado. Desta forma, verifica-se que o volume de sólidos sedimentáveis deve ser considerado no dimensionamento de leitos de secagem.

Ao final do segundo ciclo de secagem, o leito coberto apresentou menor teor de umidade (81,3%), que foi 3,6% menor que o verificado no leito de secagem descoberto (84,9%), o que resultou em redução volumétrica de 74,5% e 64,4%, nos leitos de secagem coberto e descoberto, respectivamente.

Apesar do lodo do leito de secagem coberto ter apresentado no último dia do experimento (dia 40) menor teor de umidade (81,3%), o fato do leito de secagem descoberto ter recebido taxa 2,5 vezes maior que a do leito de secagem coberto e ter 11 dias antes (dia 29) apresentado lodo com teor de umidade (81,5%) próximo ao valor final do leito de secagem coberto, demonstra que, definida a produtividade requerida, é possível afirmar, ser dispensável a cobertura para essas condições na RMB.

Ao avaliarem o desaguamento de lodo de lagoas anaeróbias em leitos de secagem cobertos e descobertos, Lima *et al.* (1999) verificaram que a cobertura instalada sobre os leitos de secagem não pareceram influenciar significativamente na desidratação do lodo. No entanto, vale ressaltar que os autores utilizaram sólidos totais como parâmetro para determinar a taxa aplicada nos leitos de secagem

Por sua vez, Mendonça e Campos (2000) observaram teores de umidade de 34,9% e 28,5% nos leitos de secagem coberto e descoberto, respectivamente, nos estudos realizados com lodo de reator UASB com teor de sólidos inicial de 2,8%.

Deste modo, não existe uma regra única para avaliar o desempenho e a necessidade de cobertura nos leitos de secagem, sendo preciso atentar para as peculiaridades da cada local.

Pelo exposto, na presente pesquisa é possível considerar que o leito de secagem descoberto na segunda etapa, assim como na primeira, apresentou melhor desempenho, sendo, portanto, o mais indicado para a RMB nas condições experimentais.

5.4. CARACTERIZAÇÃO DO LÍQUIDO DRENADO

Conforme mostrado nos gráficos 8 e 29, o volume diário de líquido drenado nos dois ciclos de secagem apresentou grande variação, tanto no leito de secagem coberto como no descoberto. Do mesmo modo, a concentração do teor de sólidos totais, suspensos, fixos e voláteis, também apresentou grande variação durante o ciclo experimental.

Estas variações de volume e concentração dificultaram a avaliação do líquido drenado, sendo assim, foi calculada a média ponderada de cada parâmetro para que fosse possível definir o seu potencial poluidor, já que a simples média das concentrações levaria certamente a falsas conclusões, visto que houve dias em que a concentração de certo parâmetro foi alta, em compensação o volume de líquido observado foi baixo, sendo da mesma forma, o inverso observado.

No Quadro 46 é apresentada a concentração média (média ponderada) em mg/L dos parâmetros observados no líquido drenado nos leitos de secagem coberto e descoberto durante os ciclos de secagem do lodo.

Quadro 46 - Concentração média/ litros dos parâmetros avaliados

Parâmetro	Unidade	Ciclo de secagem 1		Ciclo de secagem 2	
		C45-I	D45-I	C45-II	D45-II
Volume de líquido drenado	litros	414,85	441,08	307,8	360
Sólidos totais	mg/L	2.319,7	1.236,5	1.495,2	1.668,1
Sólidos totais fixos	mg/L	806,3	799,9	378,9	360,3
Sólidos totais voláteis	mg/L	1.513,5	436,6	1.107,4	1.316,9
Sólidos suspensos totais	mg/L	273,8	151,07	69,9	70,5
Sólidos suspensos fixos	mg/L	227	137,8	22,8	23,7
Sólidos suspensos voláteis	mg/L	46,8	14,84	47,4	46,8
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	2.045,3	1.085,3	1.427,2	1.625,9
Sólidos dissolvidos fixos	mg/L	759,4	784,9	356,7	337,4
Sólidos dissolvidos voláteis	mg/L	1.285,9	301,0	1.061,3	1.293,2
DQO	mg/L	138,5	105,42	129,6	97,5

Para o lançamento, direto ou indireto, de efluentes em corpos d'água das classes 1 a 4, a deliberação normativa do COPAM (Comissão de Política Ambiental) nº 010/86 no seu Art. 15 estabelece como um dos parâmetros a DQO, sendo 90 mg/L o valor máximo permitido. Desta forma, o líquido drenado nos leitos de secagem, segundo o COPAM, não pode ser lançado nos corpos d'água, já que apresenta DQO superior à estabelecida.

O líquido drenado também foi classificado de acordo com o Quadro 47, que mostra a composição típica de esgoto bruto fraco, médio e forte, sugerida por Metcalf e Eddy (1991).

Quadro 47 - Concentração média/ litros dos parâmetros avaliados

Contaminante	Unidade	Concentração		
		Fraco	Médio	Forte
Sólidos totais	mg/L	350	720	1200
Sólidos suspensos totais	mg/L	100	200	325
Sólidos suspensos fixos	mg/L	20	55	75
Sólidos suspensos voláteis	mg/L	80	165	275
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	250	500	850
Sólidos dissolvidos fixos	mg/L	145	300	525
Sólidos dissolvidos voláteis	mg/L	105	200	325
DQO	mg/L	250	500	1000

Metcalf e Eddy (1991).

Assim é possível verificar no Quadro 46 que o líquido do leito coberto no primeiro ciclo de secagem apresentou maior concentração de quase todos os parâmetros, já no segundo ciclo ocorreu o inverso, tendo o líquido do leito de secagem descoberto apresentado, no geral, maiores concentrações.

No Quadro 48 é apresentada a classificação do líquido drenado nos leitos de secagem C45-I, D45-I, C45-II e D45-II de acordo com o Quadro 46.

Quadro 48- Caracterização do líquido drenado nos leitos de secagem de acordo com o Quadro 18

Parâmetro	Ciclo de secagem 1		Ciclo de secagem 2	
	C45-I	D45-I	C45-II	D45-II
Sólidos totais	forte	forte	forte	forte
Sólidos suspensos totais	médio	fraco	fraco	fraco
Sólidos suspensos fixos	forte	forte	médio	médio
Sólidos suspensos voláteis	fraco	fraco	fraco	fraco
Sólidos dissolvidos totais	forte	forte	forte	forte
Sólidos dissolvidos fixos	forte	forte	médio	médio
Sólidos dissolvidos voláteis	forte	forte	forte	forte
DQO	fraco	fraco	fraco	fraco

Além da utilização da Tabela de concentrações proposta por Metcalf e Eddy (1991), também foi calculada a carga diária de cada parâmetro avaliado no líquido drenado durante o ciclo de secagem.

$$\text{carga(kg/d)} = \frac{\text{concentração (g/m}^3\text{)} \times \text{vazão(m}^3\text{/d)}}{1000(\text{g/kg})}$$

A carga total por leito de secagem foi obtida pela soma das cargas diárias, sendo utilizada para estimativa da carga poluidora do líquido drenado nos leitos de secagem. No Quadro 49 são apresentadas as cargas totais do líquido drenado do primeiro e do segundo ciclo de secagem. As cargas apresentadas no Quadro 49 são referentes ao desaguamento de 450 litros de lodo, sendo na última coluna deste Quadro mostrada a média de cada carga nos quatro leitos de secagem.

Quadro 49 - Carga total dos parâmetros observados no líquido drenado

Parâmetro	Unidade	1º ciclo de secagem		2º ciclo de secagem		Carga média para 450 litros de lodo
		C45-I	D45-I	C45-II	D45-II	
Sólidos totais	g/ciclo de secagem	959,8	545,4	436,2	596,3	634,4
Sólidos totais fixos	g/ciclo de secagem	333,6	352,8	105,7	127,7	230,0
Sólidos totais voláteis	g/ciclo de secagem	626,2	192,6	308,9	466,2	398,5
Sólidos suspensos totais	g/ciclo de secagem	113,6	66,6	21,5	24,7	56,6
Sólidos suspensos fixos	g/ciclo de secagem	94,2	59,9	7,0	8,3	42,4
Sólidos suspensos voláteis	g/ciclo de secagem	19,4	6,4	14,5	16,4	14,2
Sólidos dissolvidos totais	g/ciclo de secagem	846,3	477,9	415,6	565,8	576,4
Sólidos dissolvidos fixos	g/ciclo de secagem	314,2	344,5	98,8	117,1	218,7
Sólidos dissolvidos voláteis	g/ciclo de secagem	532	132,1	293,9	448,7	351,7
DQO	g/ciclo de secagem	57,5	46	39,7	35,1	44,6

Com exceção da carga de sólidos totais fixos, todos os outros parâmetros apresentaram maior carga no leito de secagem coberto.

De acordo com Jordão e Pessoa (1995), o volume mínimo de um tanque séptico fixado pela NBR 7229 (1993) é de 1.250 litros. Sendo assim, com os valores encontrados no Quadro 50 é possível estimar o potencial poluidor do líquido drenado gerado pelo desaguamento do lodo de um tanque séptico.

Para este cálculo foi utilizado como parâmetro a média das cargas do líquido drenado dos leitos de secagem coberto e descoberto (última coluna do Quadro 49). O volume de lodo considerado para um tanque séptico foi de 1250 litros, devido ser prática comum em Belém a remoção de todo material presente nos tanques sépticos, no momento da sua limpeza.

No Quadro 50 é apresentada estimativa da carga total de DQO, sólidos totais, suspensos, fixos e voláteis referente ao líquido drenado gerado pelo desaguamento do lodo removido de um tanque séptico, ou seja, pelo desaguamento de 1.250 litros de lodo.

Quadro 50 - Cargas totais estimadas no líquido drenado pelo desaguamento de 1250 litros de lodo

Parâmetro	Unidade	Carga do líquido drenado de um tanque séptico (1.250 litros)
Sólidos totais	g/ciclo de secagem	1.762,3
Sólidos totais fixos	g/ciclo de secagem	638,8
Sólidos totais voláteis	g/ciclo de secagem	1.106,9
Sólidos suspensos	g/ciclo de secagem	157,2
Sólidos suspensos fixos	g/ciclo de secagem	117,6
Sólidos suspensos voláteis	g/ciclo de secagem	39,4
Sólidos dissolvidos totais	g/ciclo de secagem	1.601,1
Sólidos dissolvidos fixos	g/ciclo de secagem	607,4
Sólidos dissolvidos voláteis	g/ciclo de secagem	976,9
DQO	g/ciclo de secagem	123,8

Conforme pode ser observado no Quadro 50, a descarga do líquido drenado pelo desaguamento do lodo de um tanque séptico no corpo receptor, representa o lançamento de aproximadamente 2 kg de sólidos, sendo destes 250 g de sólidos suspensos, que presentes na água inibem a passagem da luz, reduzindo a fotossíntese e, conseqüentemente, prejudicando a autodepuração do corpo receptor.

Assim, a carga de DQO lançada no corpo receptor seria de 123,8 g. Segundo Campos (1999), o teor de oxigênio dissolvido em um corpo receptor sadio é de 7mg/L, isto significa dizer que o líquido drenado do leito de secagem pelo desaguamento do lodo de um tanque séptico, consumiria o oxigênio de aproximadamente 17,7 m³ de água.

Extrapolando estes valores para os cerca de 26.000 tanques sépticos instalados pelo Projeto da Recuperação de Bacia do Uma na RMB, verifica-se a necessidade do tratamento do líquido drenado dos leitos de secagem, em razão das altas cargas geradas, conforme pode ser observado no Quadro 51.

Quadro 51 - Cargas totais do líquido drenado pelo desaguamento do lodo de 26.000 tanques

Parâmetro	Unidade	Carga do líquido drenado de 26.000 tanques sépticos
Sólidos totais	kg	45.819,6
Sólidos totais fixos	kg	16.607,5
Sólidos totais voláteis	kg	28.778,8
Sólidos suspensos totais	kg	4.087,8
Sólidos suspensos fixos	kg	3.058,6
Sólidos suspensos voláteis	kg	1.023,8
Sólidos dissolvidos totais	kg	41.628,9
Sólidos dissolvidos fixos	kg	15.791,4
Sólidos dissolvidos voláteis	kg	25.398,8
DQO	kg	3.219,3

Conforme apresentado no Quadro 51, o lançamento do líquido drenado pelo desaguamento do lodo dos 26.000 tanques sépticos representaria o lançamento anual de 45.819,6 kg de sólidos no corpo receptor, enquanto a DQO gerada consumiria o oxigênio de cerca de 459.900 m³ de água.

Sendo assim, no caso da RMB, onde o número de tanques sépticos é elevado, é necessário não só avaliar o gerenciamento adequado do lodo, mas também, do líquido drenado pelo seu desaguamento em leitos de secagem.

Observações operacionais dos leitos de secagem

Proliferação de moscas

Gonçalves *et al.* (2001) citam que uma das desvantagens dos leitos de secagem é o elevado risco de proliferação de moscas e de liberação de maus odores. Neste experimento, em nenhum das duas fases experimentais foi observado a liberação de maus odores. No entanto, na segunda fase foi verificado a proliferação de moscas nos dois leitos de secagem, conforme mostrado nas Fotografias 31 e 32.



Fotografia 31 - Desenvolvimento de moscas no leito de secagem D45-II



Fotografia 32 - Larvas na tampa do recipiente de coleta do lodo do leito C45-II

Características da torta seca

Imhoff (1996) considera que é possível avaliar o grau de digestão do lodo a partir das características finais da torta seca, deste modo, segundo o autor:

- Fendilhamento escasso e fino indica lodo bem digerido e com baixo teor de água;
- Fendas numerosas de largura mediana, indicam lodo digerido com elevado teor de água;
- Fendas em pequena quantidade e de grande largura indicam lodo mal digerido, pegajoso, que requer longos períodos de tempo para secagem por evaporação.

No entanto, a caracterização da torta seca proposta por Imhoff pode ser questionada, pois existem significativas diferenças entre as tortas desaguadas em leitos de secagem com e sem cobertura, conforme pode ser observado nas Fotografias 33, 34, 35 e 36.

Nas Fotografias 33 e 34 são mostradas as tortas do leito de secagem descoberto e coberto, apresentando teor de umidade de 75,5% (28/10/2002) e 76,6% (dia 2/11/2002), respectivamente.

Na segunda descarga, como pode ser observado nas Fotografias 35 e 36, a torta do leito de secagem coberto e descoberto, apesar de ser proveniente do mesmo tanque séptico, também apresentou características diferentes.

A Fotografia 35 mostra a torta do leito de secagem descoberto com teor de umidade de 81,5% (dia 16/01/2003), já na Fotografia 36 é mostrada a torta do leito de secagem coberto com teor de umidade de 81,4% (dia 22/01/2003)

Desta forma, ao comparar as Fotografias (33 e 34) e (35 e 36) verifica-se que apesar do teor de umidade ser praticamente o mesmo, nas duas situações a torta do leito de secagem descoberto apresentava maior espessura e muitas rachaduras, enquanto a torta do leito de secagem coberto apresentava menor espessura e poucas rachaduras.



Fotografia 33 - Torta do leito de secagem descoberto dia 28/10/2002 (teor de umidade 75,5)



Fotografia 34 - Torta do leito de secagem coberto dia 2/11/2002 (teor de umidade 76,6%)



Fotografia 35 - Torta do leito de secagem descoberto dia 16/01/2003 (teor de umidade 81,5%)



Fotografia 36 - Torta do leito de secagem coberto dia 22/01/2003 (teor de umidade 81,4%)

Assim, com o experimento foi possível observar que o lodo desaguado apresenta as seguintes características:

- Leito de secagem coberto – torta com menor espessura e poucas rachaduras de pequenas aberturas
- Leito de secagem descoberto – torta de lodo com maior espessura e com muitas rachaduras de grandes aberturas.

6

6. CONCLUSÕES

Com o trabalho foi possível concluir que para projeto e operação de leitos de secagem instalados na Região Metropolitana de Belém:

- Nas condições do experimento é dispensável a cobertura dos leitos de secagem utilizados no desaguamento de lodo de tanques sépticos;
- É possível utilizar altura da camada inicial de lodo maior do que a normalmente recomendada na literatura técnica (0,30 m), sendo que a altura testada no experimento (0,45 m) permitiu bons resultados no desaguamento de lodo nos leitos de secagem coberto e descoberto;
- Existe necessidade de tratamento do líquido drenado nos leitos de secagem, já que as cargas de DQO e de sólidos ainda são elevadas nessa massa líquida residual;
- O período de desaguamento foi menor que dez dias na primeira fase experimental (sólidos sedimentáveis = zero ml/L), tendo sido 4 vezes maior quando o volume de sólidos sedimentáveis foi da ordem de 650 ml/L no segundo ciclo de secagem. Portanto, o volume de sólidos sedimentáveis é um importante parâmetro para o dimensionamento de leitos de secagem, apesar de não ser considerado na NBR 12209 (1992) (Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário).
- As precipitações pluviométricas não tiveram grande influência no primeiro ciclo de desaguamento de lodo, o que pode ser explicado pela rápida percolação das águas pluviais através rachaduras na torta de lodo, logo nos primeiros dias do experimento.

- A pesar do período de desaguamento de lodo no segundo ciclo de secagem (40 dias) ter sido maior do que o do primeiro ciclo de secagem (18 dias), não foi suficiente para obtenção do mesmo teor de umidade, o que pode ser explicado pelo grande volume de sólidos sedimentáveis ter dificultado a percolação do líquido, e no caso do leito de secagem descoberto ter tornado mais significativa a influência das águas pluviais.
- A substituição da camada de brita por seixo de mesma granulometria permite o trespasse da areia, razão para ser necessário a utilização de uma camada adicional de seixo 0.
- Deve ser previsto dispositivo hidráulico para remoção da massa líquida acumulada na parte superior do leito, especialmente quando ocorrer estratificação do lodo em decorrência do grande volume de sólidos sedimentáveis.

7

7. RECOMENDAÇÕES

- Determinar a evaporação no lodo em secagem;
- Comparar o desempenho de leitos de secagem no período do inverno e do verão;
- Estudar a influência da granulometria e da espessura da camada de areia no período de desaguamento e na qualidade do efluente líquido;
- Avaliar parâmetros microbiológicos e parasitológicos no lodo;
- Estimar a higienização do lodo causada pela exposição ao sol.

8

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 7229**: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. 1993. 15 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **NBR 12209**: Projeto de estação de tratamento de esgotos sanitários. 1992.

AISSE, M. M.; ANDREOLI, F.N.; SOVIERZOSKI, A.; AMARAL, C.; ALVES, H. B. **Estudo da desidratação de lodo anaeróbio, obtido em reatores tipo RALF, através do uso de leitos de secagem e de centrifuga tipo decanter**. In: CAMPOS, J. R. (Org.). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, PROSAB, 1999.

AISSE, M. M.; van HAANDEL, A. C; MEDEIROS, U. T. de P. **Um método experimental para o dimensionamento e a otimização de leitos de secagem de lodo**. In: CAMPOS, J. R. (Org). Tratamento de esgotos sanitários por processos anaeróbios e disposição controlada no solo. São Carlos: PROSAB, 2000.

ALMEIDA, G. N. de; GONÇALVES, M. C. **Eficiência e teor de umidade da torta na desidratação de lodos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17.,1993, Natal. Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 2, tomo IV. Rio de Janeiro. 1993.

American Public Health Association – APHA. **Standard Methods** for the Examinations of Water and Wastewater, 18 Edition, New York, 1992.

ANDRADE NETO, C. O. de. **Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: Ed. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997.

ANDRADE NETO, C. O. de; SOBRINHO, P. A.; MELO, H. N. de S.; AISSE, M. M. **Decanto digestores**. In: CAMPOS, J. R. (Org). Tratamento de esgotos sanitários por processos anaeróbios e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: Ed. Rima Artes e Textos, 1999.

ANDRADE NETO, C. O. de; GUIMARÃES, P.; PEREIRA, M. G.; MELO, H. N. de S. **Decanto-digestores e filtros anaeróbios**. In: CAMPOS, J. R. (Org). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. 1ª ed. São Carlos: PROSAB, 2000.

ANDREOLI, C. V. **Otimização do processo de secagem e desinfecção do lodo de esgoto anaeróbio utilizando leitos de secagem aliados à estufa plástica e biogás.** In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2000.

ANDREOLI, C. V.; HOPPEN, C.; MÄDER NETO, O. S. **Desidratação do lodo aeróbio e séptico através do uso de centrífuga tipo decanter, com e sem o uso de polieletrólitos.** In: 21º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2001.

BATALHA, B. H. L. **Fossa Séptica.** 2ª. Ed. São Paulo:CETESB, 1989. 20 P.

BAUER, F. Materiais de construção. Rio de Janeiro-RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A, 1979.

BELÉM. Lei nº 7.597, de 29 de dezembro de 1992. Diário Oficial do Município de Belém, Belém, dez. 1992.

BELÉM. Lei nº 7.940, de janeiro de 1999. Diário Oficial do Município de Belém, Belém, jan. 1999.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariuna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.

BONNET A.I.; DOMASZAK, S. C.; BÁRBARA R. P.; LARA, A. I. **Indicadores biológicos de qualidade sanitária do lodo de esgoto.** In: ANDREOLI, C. V.; BONNET, B. R. P. (Org.). Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola de lodo de esgoto. Curitiba: SANEPAR, 2000.

BRITO, M. C. de S. O. M.; SPERLING, M. von; CHERNICHARO, C. A. de L. **Características do lodo acumulado em uma lagoa chincaneada tratando efluentes de um reator UASB.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20.,1999, Rio de Janeiro. CD-ROM do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia sanitária e Ambiental.

Comissão de Política Ambiental. Estabelece Normas e Padrões para Qualidade das Águas, Dá outras providências. Deliberação Normativa nº 10/86.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** 1 ed. Rio de Janeiro: ABES, PROSAB,1999.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6 ed. Rio de Janeiro: livros Técnicos e Científicos, 1988. V-1.

CATUNDA, P. F.C; van HAANDEL, A. C; MEDEIROS, U. T. de P. **Um método experimental para o dimensionamento e a otimização de leitos de secagem de lodo.** In: CAMPOS, J. R. (Org.) Tratamento de esgotos sanitários por processos anaeróbios e disposição controlada no solo. São Carlos: PROSAB, 2000.

CHERNICHARO, C. A. de L.; van HAANDEL, A.; AISSÉ, M. M.; CAVALCANTI, P. F. F. **Reatores anaeróbios de manta de lodo.** In: CAMPOS, J. R. (Org). Tratamento de esgotos

sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABES, PROSAB, 1999.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte-MG: SEGRAC, v - 5 1997.

CYNAMON, S. E. **Sistema não convencional de esgoto sanitário a custo reduzido, para pequenas coletividades e áreas periféricas**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Escola Nacional de Saúde Pública Fundação Osvaldo Cruz, 1986.

DACACH, N. G. **Saneamento Básico**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Editora Didática e Científica Ltda, 1990.

DACACH, N. G. **Tratamento primário de esgoto**. Rio de Janeiro: Editora Didática e Científica Ltda, 1991.

DEUS, A. B. S. de; LUCA, S. J. de; IDE C. N.; MONTEGGIA, L. O. **Qualidade de lodos de ETE's**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17.,1993, Natal. Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, V - 2, tomo I. Rio de Janeiro. 1993.

FERNANDES, F. **Estabilização e higienização de biossólidos**. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Org.). A. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariuna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.

FERREIRA, A. 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.

GONÇALVES, R. F.; NASCIMENTO, C. G. do; FERRARI, G. F.; MULLER, P. S. G. **Lodos de lagoas de estabilização em operação no Espírito Santo: Formação e característica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19.,1997. CD-ROM do 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 1997.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M. **Alternativas de minimização da produção e desaguamento de lodo de esgoto**. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. (Org.). A. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariuna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; von SPERLING, M. **Remoção da umidade de lodos de esgoto**. In: ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.). Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Ed. FCO, 2001.

IDE C. N.; DEUS, A. B. S. de; LUCA, S. J. de; BIDONE, F. R. **Tratamento de lodo bruto com cal influência na sobrevivência de patógenos e na imobilização de metais pesados**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17.,1993, Natal. Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia sanitária e Ambiental, V - 2, tomo I. Rio de Janeiro. 1993.

IMHOFF, K.; IMHOFF, K. R. **Manual de Tratamento de Águas Residuárias**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1996.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. Rio de Janeiro: Ed. ABES, 1995.

LIMA, M. R. P.; MULLER, P. S. G.; GONÇALVES, R. F. **Taxas de aplicação de lodo de lagoas anaeróbias de estabilização para desidratação em leitos de secagem**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17.1999, Rio de Janeiro. CD-ROM do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro. 1999.

HERMAN, E. H. **Manual de tratamento de águas negras**. México-D.F.:Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores, 1996.

MENDONÇA, L. C.; CAMPOS, J. R. **Comparação do desempenho de rês concepções de leitos de secagem na desidratação de lodo de reator UASB**. In: IX SILUBESA; Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Seguro. 2000

MENDONÇA, L. C. **Desidratação térmica e desinfecção química com cal de lodo de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando esgotos sanitários**. 1999. 130 p. Dissertação – (Mestrado) em Hidráulica e Saneamento – Universidade de São Paulo, São Carlos.

MENESES, C. G. R. **Caracterização Físico-química e Biológica dos Resíduos de Sistemas Tipo Tanque Séptico-sumidouro da Cidade de Natal**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21. 2001. CD-ROM do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia sanitária e Ambiental. 2001.

METCALF e EDDY. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse**. 3ª . Ed. Nova York; Estados Unidos: McGraw – Hill, 1991.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 3ª ed. Aracaju-Sergipe: Gráfica e Editora Triunfo Ltda, 2001.

PARÁ. Lei no 5.887, de 09 de maio de 1995. Diário Oficial do Estado do Pará. Maio de 1995.

PEREIRA, J. A. R. **Concepção, construção e operação de reator anaeróbio de leito expandido, em secagem real, para tratamento de esgoto sanitário**. 1999. 340 p. Tese – (Doutorado) – Hidráulica e saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

PEREIRA, M. L. F.; NASCIMENTO, R. S. do; CAVALCANTI, P. F. F.; van HAANDEL, A. **Percolação de lodo de esgoto em leitos de secagem convencionais e não convencionais revestidos com o biotéxtil bidim XT-4**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, Paraíba. CD-ROM do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

PINTO, M. T. **Higienização de lodos**. In: ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNADES, F. (Org.) Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Ed. FCO, 2001.

PHILIPPI JUNIOR, A. **Águas residuárias**. In: PHILIPPI JUNIOR, A. (Org.) Saneamento do meio. São Paulo: Fundacentro, 1988.

PHILIPPI, L. S. **Funcionamento de Fossas Sépticas em condições reais: volume e acumulação de lodo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17.,1993, Natal. Anais do 17º Congresso Brasileiro de Engenharia sanitária e Ambiental, v - 2, tomo I. Rio de Janeiro. 1993.

RICHTER, C. A. **Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2001.

SAMÚDIO, E. M. M. **Critério Racional para Dimensionamento de Leitões de Secagem de Lodos de ETE's Convencionais e do Reator UASB**. Dissertação – (Mestrado) – Engenharia Hidráulica – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993

SILVA, S. M. C. P. da; FERNANDES, F.; SOCCOL, V. T.; MORITA, D. M. **Principais contaminantes do lodo**. In: ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNADES, F. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Ed. FCO, 2001.

SOCCOL, V. T.; PAULINO, R. C.; CASTRO, E. A. **Metodologia para Análise Parasitológica em Lodo de Esgoto**. In: Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em reciclagem agrícola do lodo de esgoto. Curitiba: PROSAB, 2000.

van HAANDEL, A.; MARAIS, G. **O comportamento do sistema de lodo ativado teoria e aplicações para projeto e operação**. Campina Grande – PB: EPGRAF. 1999.

van HAANDEL, A.; LETTINGA G. **Tratamento anaeróbio de esgotos – um manual para regiões quentes**. Campina Grande – PB: EPGRAF. 1994.

von SPERLING, M. V. e GONÇALVES, R. F. **Lodo de Esgoto: Características e Produção**. In: ANDREOLI, C. V.; von SPERLING, M.; FERNADES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Ed. FCO, 2001.

von SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Ed. SEGRAC, 2000.

von SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

von SPERLING, M.; COSTA, A. M. L. da; CASTRO, A. da A. **Esgotos sanitários**. In: von SPERLING, M.; COSTA, A. M. L. da; CASTRO, A. da A. (Org.). Manual de Saneamento e proteção ambiental para os municípios. Belo Horizonte:SEGRAC, 1995.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em:30 out 2002.

Aproveitamento de lodo resultante do tratamento de esgoto. Disponível em: <<http://www.geocities.com/be3102s2000/americana/americana.html>>. Acesso em 23 set 2002.

Sernagiotto. Disponível em:< <http://www.sernagiotto.it/disid.html>>. Acesso em 19 nov 2002.

http://nett21.unep.or.jp/JSIM_DATA/WATER/WATER_4/html/Doc_264.html>. Acesso em 20 mar 2003

Netzsch do Brasil. Disponível em: <<http://www.netzsch.com.br/filtros/index.php3>>. Acesso em 25 fev. 2002.