

COMPOSTAGEM ATRAVÉS DE LEIRAS REVOLVIDAS DA ETE LIMOEIRO/PRESIDENTE PRUDENTE COMO ALTERNATIVA DE TRATAMENTO DO LODO

Marcelo Kenji Miki⁽¹⁾

Engenheiro civil pela Escola Politécnica da USP/EPUSP e Mestre em Engenharia Hidráulica pela e Sanitária pela EPUSP. Engenheiro do Departamento de Controle Sanitário Ambiental/ROA da Diretoria de Sistemas Regionais - R.

Júlio Chizzolini Júnior

Engenheiro civil do Setor de Produção de Água e Tratamento de Esgotos de Presidente Prudente/RBRP9, responsável pela operação da ETE Limoeiro em Presidente Prudente.

Fernando Carvalho Oliveira

Engenheiro agrônomo, Mestre e Doutor pela ESALQ/USP.

Jonas Jacob Chiaradia

Engenheiro agrônomo, Mestre pela Universidade Federal de Lavras/UFLA e Doutor pela ESALQ/USP.

Endereço⁽¹⁾: Av. do Estado, nº 561, Unidade ROA, Prédio 3 - Bairro Bom Retiro - São Paulo - SP - CEP: 01107-900 - Brasil - Tel: +55 (11) 3388-7497 - Fax: +55 (11) 3388-7477 - e-mail: mmiki@sabesp.com.br

RESUMO

A utilização agrícola do lodo de ETE é uma forma sustentável de se reciclar a matéria orgânica e nutrientes. Para que isto ocorra de forma é necessário o correto tratamento do lodo de forma a não trazer impactos ambientais. A compostagem é um dos tratamentos de lodo que vem ganhando projeção devido a resultar num produto final muito atrativo para o usuário agrícola. Este trabalho procurou investigar a compostagem do ponto de vista operacional para efeitos de dimensionamento e de avaliação econômica.

Os resultados mostraram-se interessantes e verificou-se a geração de custos atraentes quando comparados a estabilização com cal.

PALAVRAS-CHAVE: compostagem, lodo de ETE, biossólido

INTRODUÇÃO

A ETE Limoeiro, localizada no município de Presidente Prudente, foi inaugurada em 2004 e desde então vem buscando soluções relativas ao lodo.

A questão do tratamento e disposição final do lodo não foi devidamente equacionada. O atual tratamento do lodo através de estabilização com cal resulta num produto muito fluido e de difícil manipulação. Para que o lodo seja manipulável, são necessárias novas extensões de área para realizar esta secagem adicional e que não foram previstas em projeto.

Devido a esta falha na técnica com a calagem, vários esforços vêm sendo realizados de forma a se estudar a compostagem como alternativa de tratamento do lodo para disposição final agrícola.

Este estudo veio somar estes esforços de forma a aprofundar na questão de parâmetros operacionais e de projeto, de forma a subsidiar o processo de escolha de alternativas de tratamento de lodo.

1 OBJETIVO

Avaliar a compostagem como alternativa de tratamento do lodo da ETE Limoeiro, tomando como parâmetro de comparação o método atual de calagem.

Esta avaliação foi feita com base em resultados de ensaios piloto com o lodo da ETE Limoeiro em campo experimental.

2 ALTERNATIVAS DE DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DE ETE

A disposição final do lodo de ETE é uma tarefa freqüentemente desprezada na etapa de planejamento e a sua devida adequação só é feita na etapa operação propriamente dita, levando a muitas dificuldades logísticas. Antigamente na etapa de projeto de uma ETE, a solução de disposição final do lodo limitava-se a uma flecha e um caminhão.

Sabe-se hoje que a fase sólida de uma ETE é responsável por 40% dos custos de investimento, 50% dos custos operacionais e 90% dos problemas operacionais, conforme VESILIND (1980) apud SPELLMAN (1997).

A dificuldade da definição da disposição final esbarra também na dificuldade de se prever a qualidade do lodo e a inexistência de caracterização deste lodo, não sendo possível checar a possibilidade de disposição agrícola. Desta forma, a primeira opção a ser levada em conta na etapa de projeto para disposição final do lodo deveria ser a utilização de aterro sanitário. Sabe-se, no entanto, que muitos municípios do Estado de São Paulo não possuem aterros sanitários, o que inviabilizaria esta alternativa. Caberia desta maneira a adoção de aterros exclusivos para resolver a solução do problema de lodos na fase inicial de operação da ETE. Em segunda etapa, buscar-se-iam soluções que privilegiassem a reutilização, como por exemplo, o uso agrícola.

Para o problema de lodo da ETE Limoeiro, a etapa de curto prazo escolhida foi a implantação do aterro exclusivo de lodo. Em paralelo, estuda-se a viabilidade técnica e econômica de utilização agrícola do lodo. Para realizar este uso agrícola, o lodo deve sofrer um processo de tratamento, que pode ser tanto a compostagem como a estabilização química com cal.

Tanto um tipo de tratamento como outro dependem ainda de estudos mais aprofundados para torná-lo operacional.

Este estudo procurou aprofundar mais especificamente a compostagem como alternativa de tratamento do lodo para a ETE Limoeiro.

3.1 GENERALIDADES SOBRE A COMPOSTAGEM

De acordo com GOLUEKE (1977) apud SPINOSA;VESILIND (2001) a compostagem é um método controlado de decomposição biológica dos componentes orgânicos do lodo em determinadas condições e cujo produto final pode ser manipulado, estocado e/ou aplicado ao solo sem afetar de forma adversa o meio ambiente.

De acordo com WEF (1996), os principais objetivos da compostagem são:

- Conversão biológica da matéria orgânica putrescível numa forma estabilizada;
- Destruição de patógenos. O calor gerado durante a compostagem resulta numa desinfecção (e não esterilização) do produto final.
- Redução da massa total de lodo através da remoção de água e sólidos voláteis (embora a introdução de um agente estruturante feita para facilitar o processo de compostagem possa resultar num volume maior que o original de lodo);
- Produção de produto final utilizável.

KROGMANN (2001), autor do capítulo de compostagem de SPINOSA;VESILIND (2001), cita as vantagens e desvantagens deste processo, conforme tabela 3.1. A maior vantagem da compostagem é a obtenção de um produto final de uso imediato, ou, após estocagem, ser utilizado como condicionador de solo, ou como substrato de planta.

Tabela 3.1: Vantagens e desvantagens do processo de compostagem em relação a outros tratamentos de lodo

Vantagens	Desvantagens
Produto final estocável	Necessita de um teor de sólidos do lodo entre 18 a 30%
Produto final com potencial para venda	Necessita agentes estruturantes
Pode ser combinado com outros processos	Pode necessitar de grandes áreas
Baixos custos comparados com a incineração	Altos custos em comparação com a aplicação direta no solo
	Potencial geração de bioaerossóis
	Potencial geração de maus odores

Cabe em primeiro lugar definir certos conceitos utilizados na agronomia, de modo possibilitar uma visão mais clara do processo aos profissionais pertencentes a engenharia sanitária.

Os produtos derivados de lodo de ETE (como por exemplo, lodo compostado e lodo estabilizado com cal) são categorizados como fertilizantes, de acordo com a Instrução Normativa/IN nº 23, 31/08/2005, publicada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA.

No artigo 1º, do Anexo I, da IN 23, tem-se a seguinte definição:

- **fertilizante orgânico:** produto de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais;

E mais adiante no inciso d:

- **lodo de esgoto:** fertilizante orgânico composto, proveniente do sistema de tratamento de esgotos sanitários, que resulte em produto de utilização segura na agricultura, atendendo aos limites estabelecidos para contaminantes;

No artigo 2º, do Anexo I, da IN 23, cita-se que os fertilizantes orgânicos são classificados de acordo com as matérias primas utilizadas. E no inciso IV temos:

- Classe “D”: fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura.

Antes destas definições, o lodo de esgoto recaía na definição de corretivo, como foi o caso do registro do biossólido de Franca, realizado em 1999 e documentado em TSUTIYA (2001). A definição atual de fertilizante pode dar a falsa idéia de que o lodo de esgoto possui todos os nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas, erro este que não ocorria quando o lodo era categorizado como condicionador de solo.

Ainda segundo KROGMANN (2001), os custos de investimento e de operação podem ser maiores ou menores que outras formas de tratamento e disposição final. As maiores desvantagens da compostagem de lodo são o possível aumento de volume devido ao acréscimo de agentes estruturantes e emissões de maus odores e bioaerossóis (partículas com bactérias, fungos ou vírus). Devido à adição de agentes estruturantes, o volume do composto final pode ser o mesmo ou mesmo maior que o volume original de lodo. Agentes estruturantes, como o cavaco de madeira, são misturados com o lodo de forma a ajustar as propriedades da mistura. A adição de um agente estruturante pode ser cara caso não haja outros resíduos disponíveis, como por exemplo, podas de árvore. Outra desvantagem da compostagem é a necessidade de grandes áreas para a sua implantação.

3.2 PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Na compostagem, adiciona-se ao lodo um material, conhecido com o nome de agente estruturante. Na realidade este termo não exprime completamente a sua função, pois além de proporcionar uma estrutura à mistura com o lodo, este material tem a função de adicionar carbono para ajustar o balanço de energia e a relação carbono/nitrogênio (C/N).

De acordo com KROGMANN (2001), a compostagem pode processar todos os tipos de lodo. No entanto, a compostagem de um lodo não digerido tem maiores chances de desprender maus odores do que a compostagem de um lodo digerido e aproximadamente 40% a mais de área de pátio de processo. Por outro lado, um lodo não digerido irá produzir muito mais calor e conseqüentemente um teor de sólidos final mais alto. Durante o processo de compostagem, os microorganismos degradam a matéria orgânica do lodo e, numa menor proporção, do agente estruturante. Os produtos finais da degradação aeróbica são em sua maioria água, dióxido de carbono, biomassa (microorganismos) e o composto estabilizado.

De acordo com METCALF & EDDY (2003), aproximadamente 20 a 30% dos sólidos voláteis são convertidos em dióxido de carbono e água. À medida que a matéria orgânica no lodo se decompõe, o composto atinge temperaturas na faixa de pasteurização (50 a 70°C) e conseqüentemente destruindo os organismos patogênicos. Na compostagem, a destruição de matéria orgânica em conjunto com a produção de ácido húmico produz o composto final estabilizado. Os microorganismos envolvidos recaem em três categorias: bactérias, actinomicetos (particular grupo de bactérias) e fungos. Embora a inter-relação destas populações microbiológicas não seja totalmente entendida, a atividade bacteriana aparenta ser responsável pela decomposição de proteínas, lipídios e gorduras a temperaturas termofílicas, assim como também pela maior parte do calor gerado. Os fungos e actinomicetos estão também presentes nas fases mesofílica (abaixo de 40°C) e termofílica (acima de 40°C) da compostagem e aparentemente são responsáveis pela destruição de compostos orgânicos complexos e a celulose fornecida na forma de agente estruturante. Durante o processo de compostagem, são observados 3 estágios de atividade a associado à temperatura: mesofílica, termofílica e maturação conforme ilustrado na figura 3.1. No estágio inicial mesofílico, a temperatura na pilha de compostagem sobe da temperatura ambiente a aproximadamente 40°C com o surgimento de fungos e bactérias produtoras de ácidos. A medida que a temperatura da massa de composto sobe para a região termofílica de 40 a 70 °C, estes microorganismos dão lugar às bactérias termofílicas, actinomicetos e fungos termofílicos. É na faixa termofílica de temperatura que ocorre a máxima degradação e estabilização de matéria orgânica. A fase de maturação caracteriza-se pela redução da atividade microbiana e a troca dos organismos termofílicos pelos fungos e bactérias mesofílicas. Durante a fase de maturação, ocorrerá uma evaporação adicional de água do

composto, assim como o pH se estabilizará e se completará a formação de ácido húmico.

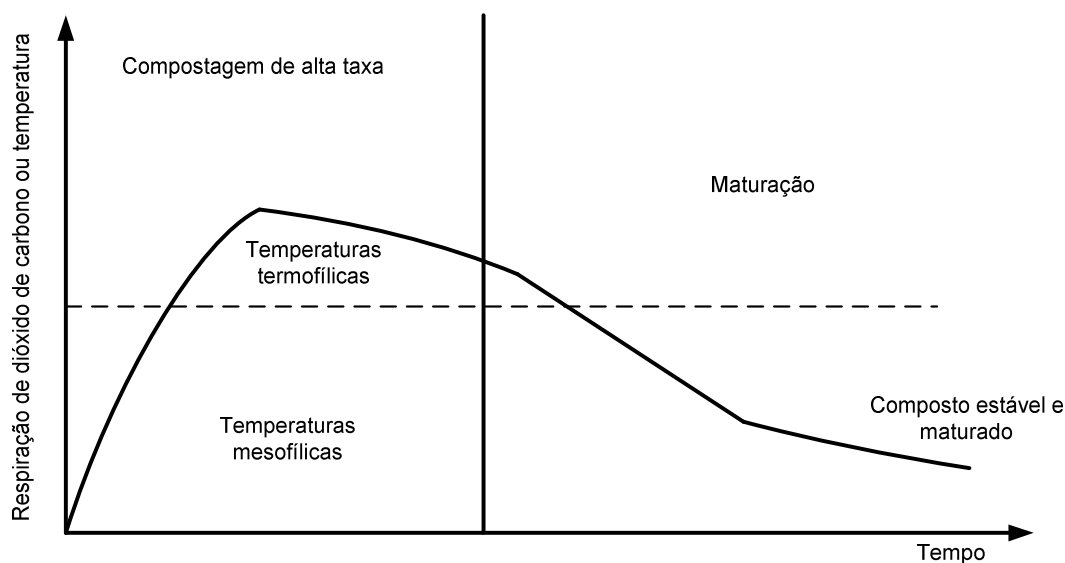


Figura 3.1: Fases durante a compostagem relatadas em função da respiração de dióxido de carbono e temperatura

Fonte: EPSTEIN (1997) apud METCALF & EDDY (2003)

A descrição do processo de compostagem a seguir também foi retirada de METCALF & EDDY (2003).

A maior parte das operações de compostagem segue as seguintes etapas: 1) pré-processamento através da mistura do lodo desidratado com agente estruturante; 2) decomposição a alta taxa através da aeração da pilha de composto tanto por adição de ar como por revolvimento mecânico; 3) recuperação de agente estruturante (no final da decomposição de alta taxa ou na fase de maturação, se praticável); 4) maturação e estocagem, que permite uma maior estabilização e uma diminuição da temperatura do composto; 5) pós-processamento através de gradeamento para remoção de material não degradável como metais e plásticos ou ainda trituração para redução de tamanho e 6) disposição final. Algumas vezes, uma porção do produto final retorna para a etapa de pré-processamento para condicionar a mistura do composto.

O estágio de decomposição a alta taxa vêm sofrendo melhorias de engenharia e de controle de processo devido à necessidade de redução de odores, suprimento de maiores taxas de aeração e manutenção de controle de processo. O processo de maturação sofre menor atenção da engenharia, menor controle e também pequena consideração nos projetos. De acordo com HAUG (1993) apud METCALF & EDDY (2003), a maturação é parte integrante de um projeto de compostagem e da operação, e a produção de um composto bem maturado depende destas considerações.

Os principais métodos de compostagem nos EUA são classificados como agitado ou estático. No método agitado, o material a ser compostado é agitado periodicamente para a introdução de oxigênio, para o controle de temperatura e para misturar o material e obter um produto uniforme. No método estático, o material a ser compostado permanece parado e o ar é succionado através dele. A leira revolvida é o método mais comum do tipo agitado, enquanto a pilha estática é o método mais comum do tipo estático. Também há compostagem em reatores fechados com registro de propriedade.

De acordo com VESILIND (2003), o termo maturação refere-se à conversão dos componentes rapidamente biodegradáveis do lodo e do agente estruturante em substâncias similares ao húmus do solo que se decompõe de forma devagar. Um composto sem a adequada maturação irá se reaquecer e gerar odores na estocagem sob nova adição de água. Também pode inibir a germinação de sementes através da geração de ácidos orgânicos e inibir o crescimento de plantas através da remoção de nitrogênio a medida que se decompõe.

De acordo com PEREIRA NETO (2000), cita que a prática do uso de composto não maturado a partir de lixo doméstico tem levado a compostagem a grande descrédito, pois acreditam, erroneamente, ser este um problema associado ao uso de composto orgânico proveniente da fração orgânica do lixo urbano. Na verdade, qualquer composto não maturado leva à produção de toxinas no solo, o que inibe a germinação de sementes e atrofia as plântulas, leva à liberação de amônia (que é tóxica aos vegetais) e pode provocar uma redução bioquímica do nitrogênio do solo, etc. Ou seja, o composto não maturado só trará malefícios aos solos e plantas.

3.3 PARÂMETROS DE PROJETO DE COMPOSTAGEM COM LEIRAS REVOLVIDAS

Dentre os sistemas existentes de compostagem, damos destaque para o sistema de leiras revolvidas devido à maior experiência prática no Brasil. Foram realizados alguns testes de leira estática com o lodo de São José dos Campos, mas os testes não se mostraram promissores devido a grande quantidade de agente estruturante a ser incorporado.

De acordo com METCALF & EDDY (2003), neste método as leiras são revolvidas e misturadas durante o período de compostagem. Sob condições típicas operacionais, a leira é revolvida no mínimo 5 vezes enquanto a temperatura é mantida em temperatura igual ou maior a 55°C. Numa leira de compostagem, as condições aeróbicas são difíceis de serem mantidas ao longo da seção da leira. Desta forma, a atividade microbiana dentro da pilha pode ser aeróbia, facultativa, anaeróbia, ou várias combinações, dependendo da frequência de revolvimento da leira. O revolvimento da leira normalmente é acompanhado do desprendimento de odores. O desprendimento de maus odores ocorre tipicamente quando são desenvolvidas condições predominantemente anaeróbicas dentro da leira. Para realizar a mistura do lodo com o agente estruturante são necessários equipamentos especialmente desenvolvidos para esta função. Em alguns casos, as operações de leira revolvidas são feitas de forma coberta.

Os parâmetros de projeto e de operação para leira revolvida são apresentados a seguir.

Leiras de 1 a 2 m de altura e 2 a 4,5 m de largura de base;*

Tempo de detenção de 21 a 28 dias;*

Tempo de cura: 30 dias**,

Revolvimento mínimo de 5 vezes;*

Temperatura acima de 55 ° C,*

Teor de sólidos inicial da mistura: 40 a 45%;**

* Fonte: Wastewater engineering, Metcalf and Eddy, 2003.

** Fonte: Wastewater treatment plant design, Vesilind, WEF, IWA, 2003.

De acordo com WEF (1998) o teor de sólidos inicial da mistura de lodo com o agente estruturante numa faixa de 40 a 45%.

3.4 VARIÁVEIS OPERACIONAIS

As principais variáveis operacionais de um processo de compostagem por leira revolvida são: umidade resultante, aeração da pilha, temperatura, relação C/N e pH (faixa ótima entre 7 e 8).

De acordo com KROGMANN (2001), a umidade é essencial para o processo de decomposição, pois a maior parte da atividade microbiana ocorre nas finas camadas de líquido situada sobre a superfície das partículas. Os microrganismos absorvem os nutrientes dissolvidos oriundo do substrato do composto. Durante o processo de compostagem, o conteúdo mínimo de umidade depende das demandas dos microorganismos pela água, onde a máxima umidade para compostagem é determinada pela competição entre ar e água nos poros (suprimento de O₂). A faixa mínima de umidade requerida para a degradação microbiológica ocorrer situa-se entre 12 a 25%. De acordo com a WEF (1995), a umidade inicial da mistura de lodo com agente estruturante deve se situar entre 55 a 60%.

De acordo com KROGMANN (2001), a aeração, além de fornecer oxigênio, tem a função de secar o composto e controlar a temperatura, que pode ser prejudicial aos microrganismos, caso não for controlada. No começo do processo de compostagem, a alta taxa de degradação resulta numa alta demanda de oxigênio comparada com a demanda média. Uma maior oxigenação pode ser obtida através uma frequência maior de revolvimento da leira.

De acordo com KROGMANN (2001), a maior parte dos experimentos concluiu que a temperatura ótima de compostagem na fase de alta degradação é de aproximadamente 55°C. Em temperaturas acima de 60°C, a diversidade de microrganismos é extremamente reduzida. A 70°C a atividade microbiológica total é aproximadamente de 10 -15% da atividade a 60°C. Já entre 75 a 80°C, não há atividade biológica significativa. Durante a maturação, a temperatura é baixa. Por exemplo, a temperatura ótima para nitrificação ocorre em aproximadamente 30 °C.

De acordo com KROGMANN (2001), a quantidade de nutrientes necessários para a compostagem depende da composição química dos microorganismos decompositores e doa elementos adicionais que são envolvidos no metabolismo. Com exceção do nitrogênio, os resíduos normalmente contém macro-nutrientes o suficiente incluindo carbono, compostos sulfurosos, enxofre, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, e micronutrientes para manter o processo de compostagem. No começo do processo de compostagem a relação de C/N deve se situar entre 20:1 a 30:1. Muitas vezes a relação C/N é negligenciada. Uma relação C/N muito alta diminui a velocidade de degradação microbiana e uma relação C/N muito baixa resulta no desprendimento de amônia. O método mais importante de controle desta relação é através da variação da composição de agente estruturante e lodo.

De forma a auxiliar no estabelecimento desta proporção inicial de C/N apresentamos a tabelas as seguir.

Tabela 3.1: Cálculo da proporção de agente estruturante e lodo desidratado

Teor de sólidos do lodo desidratado (%)	Teor de sólidos do Agente estruturante (%)	Proporção Volumétrica de agente estruturante / lodo desidratado
Função do Teor de Sólidos do lodo desidratado		
16	55	3,3
18	55	3,02
20	55	2,75
22	55	2,47
24	55	2,2
26	55	1,92
Função do Teor de Sólidos do agente estruturante		
20	45	8,33
20	50	4,17
20	55	2,75
20	60	2,08

Premissas:

Teor de sólidos da mistura: 40%

Massa específica da mistura: 978,95 kg/m³

Massa específica do agente estruturante: 474,64 kg/m³

Esta tabela aplica-se para uma pilha estática utilizando-se cavacos de madeira. A extrapolação para maiores teores de sólidos pode levar a uma insuficiência de material agregante de forma a proporcionar porosidade.

Fonte: WEF (1998)

Tabela 3.2: Características de alguns resíduos vegetais utilizados como agentes estruturantes na compostagem do lodo

Resíduo estruturante	pH	% água	SF/ST (%)	P %	N %	C %	C/N
Resíduos de podas de árvore	6,9	30	9	0,09	1,1	51	46
Bagaço de cana de açúcar	3,7	20-40	3	0,1	0,20	47	235
Serragem de madeira	8,0	30	2	0,50	0,10	49	490
Sabugo de milho	7,5	10	7	0,30	0,40	46	115
Palha de trigo	7,5	6	5	0,50	0,50	43	86
Cascas de café	5,1	10	5	0,08	1,20	46	38

Fonte: PROSAB (1999) apud Silva et Fernandes, 1998; Fernandes et Soares, 1992; Fernandes et al, 1988.

Tabela 3.3: Comparação entre dimensões das leiras e áreas necessárias para a compostagem, pelo sistema de leira reviradas

Parâmetro	Baixo	Médio	Alto
Altura (m)	0,9	1,4	2,1
Base (m)	3,7	4,3	7,0
Volume por comprimento (m ³ /m)	2,3	3,1	8,8
Relação superfície/volume (m ² /m ³)	2,6	1,6	0,8

Fonte: PROSAB (1999) apud Hay et al, 1985.

4 ENSAIOS UTILIZADOS

Para checar os valores citados na literatura, foi realizado um teste piloto de forma a obter dados operacionais e assim confrontá-los com os de literatura de forma a poder se estabelecer parâmetros específicos de projeto para o caso da ETE Limoeiro de Presidente Prudente.

4.1 LODO

O lodo utilizado foi gerado na ETE Limoeiro do município de Presidente Prudente e cujo fluxograma está apresentado na figura 4.1. O lodo é do tipo secundário, gerado no tanque de aeração de um sistema de lodos ativados. No sistema existente não há decantador primário e nem digestor anaeróbico de lodo. De forma a tornar o lodo menos agressivo, a ETE está operando com uma idade de lodo mais alta que a proposta originalmente em projeto, em torno de 18 dias.

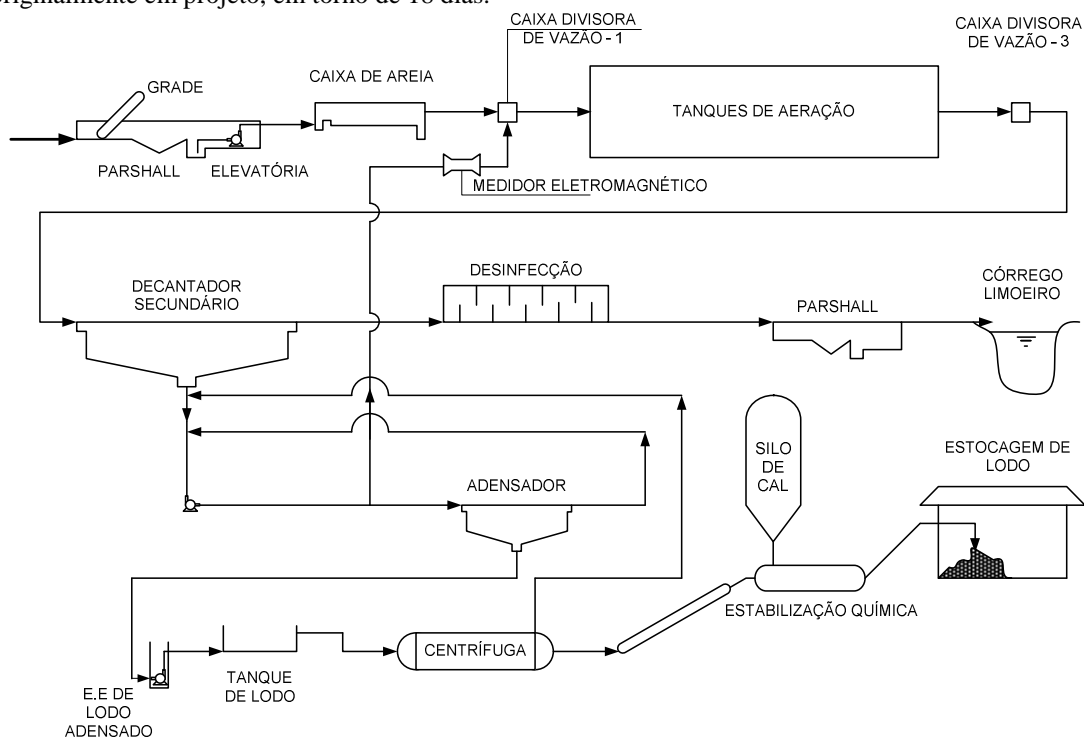


Figura 4.1: fluxograma da ETE Limoeiro

Para efeitos de dimensionamento, a produção de lodo adotada será de 9,2 t em base seca por dia. Este horizonte refere-se à ampliação de recebimento de vazão da ETE Limoeiro de 478 L/s prevista para chegar neste ano de 2008. Foi adotado como regime operacional a idade de lodo de 12 dias.

Adotando-se um teor de sólidos da torta de 16% e massa específica de $1,1 \text{ t/m}^3$, teremos uma produção de lodo de $57,5 \text{ t/dia}$ ou $52,3 \text{ m}^3/\text{dia}$.

4.2 BAGAÇO DE CANA

O bagaço de cana utilizado possuía as seguintes características:

Massa específica: $0,2 \text{ t/m}^3$

Teor de sólidos: 70%;

4.3 TESTE PILOTO EM JUNDIAÍ DE SISTEMA DE LEIRAS REVOLVIDAS

A metodologia operacional adotada para a realização do teste de compostagem foi a seguinte.

Estabeleceu-se uma proporção inicial de volumétrica de bagaço/lodo. A proporção inicial adotada foi próxima de 1:1, o que levou a anaerobiose após 2 horas.

A segunda proporção volumétrica estabelecida foi de 2:1 e iniciou-se o acompanhamento e monitoramento.

No dia da mistura de lodo com bagaço de cana, foi revolvida a pilha duas vezes por período (manhã e tarde).

No 2º dia, a mistura foi revolvida por duas vezes, uma de manhã e outra no período final da tarde.

Do 3º dia até o 5º dia o composto foi revolvido apenas uma vez ao dia.

A partir do 6º dia até o 11º dia, o revolvimento foi feito uma vez por dia em dias alternados. A partir do 12º dia em seguida, o revolvimento ocorreu uma vez por semana para deixar maturar.

4.3.1 DADOS INICIAIS

a) Caracterização do lodo

Parâmetro	Unidade ⁽¹⁾	Valor
pH		6,9
Umidade, a 60 – 65°C	% (m/m)	83,9
Sólidos Totais	% (m/m)	16,1
Sólidos Voláteis	% (m/m)	65,8
Carbono orgânico	g de C/kg	386
Nitrogênio Kjeldahl	g de N/kg	48,5
Nitrogênio, amoniacal	mg de N/kg	313
Nitrogênio, nitrato-nitrito	mg de N /kg	11,9
Alumínio	mg de Al/kg	9240
Arsênio	mg de As/kg	<0,5 ⁽²⁾
Bário	mg de Ba/kg	461
Boro	mg de B/kg	10,3
Cádmio	mg de Cd/kg	<0,5 ⁽²⁾
Cálcio	g de Ca/kg	5,2
Chumbo	mg de Pb/kg	4,7
Cobre	mg de Cu/kg	194
Cromo	mg de Cr/kg	572
Enxofre	g de S/kg	9,0
Ferro	mg de Fe/kg	12720
Fósforo	g de P/kg	10,0
Magnésio	g de MG/kg	2,3
Manganês	mg de Mn/kg	78,8
Mercurio	mg de Hg/kg	<0,5(2)
Molibdênio	mg de Mo/kg	0,8
Níquel	mg de Ni/kg	29,6
Potássio	mg de K/kg	3350
Selênio	mg de Se/kg	<0,5(2)
Sódio	mg de Na/kg	817
Zinco	mg de Zn/kg	534

Tabela 4.1: caracterização físico-química do lodo

b) Lodo

- massa inicial: 15,5 t;
- volume inicial: 14,1 m³
- teor de sólidos: 16%;
- SF/ST: 34,2%;
- massa específica: 1,1 kg/L;
- massa seca inicial: 2,5 t;

c) Bagaço de Cana

Características:

- massa específica: 0,2 kg/L;
- teor de sólidos: 70%

Para proporção aproximada de 1:1

- massa total: 3,2 t;

- volume: 16 m³;

- massa seca inicial: 2,2 t;

Para esta proporção o teste não deu prosseguimento.

Para proporção aproximada de 1: 2

- massa total: 5,2 t;
- volume: 26 m³;
- massa seca inicial: 3,6 t;
- Proporção volumétrica: $26/14,10 = 1,8$ bagaço/lodo;
- Proporção em massa: 3 lodo/bagaço;
- Proporção em massa seca: 1,4 bagaço/lodo
- Leira Resultante de 1,1 de altura com 3,0 m de base, largura do topo superior de 0,8 m e comprimento de 16 m, conforme ilustrado na figura 3.2.

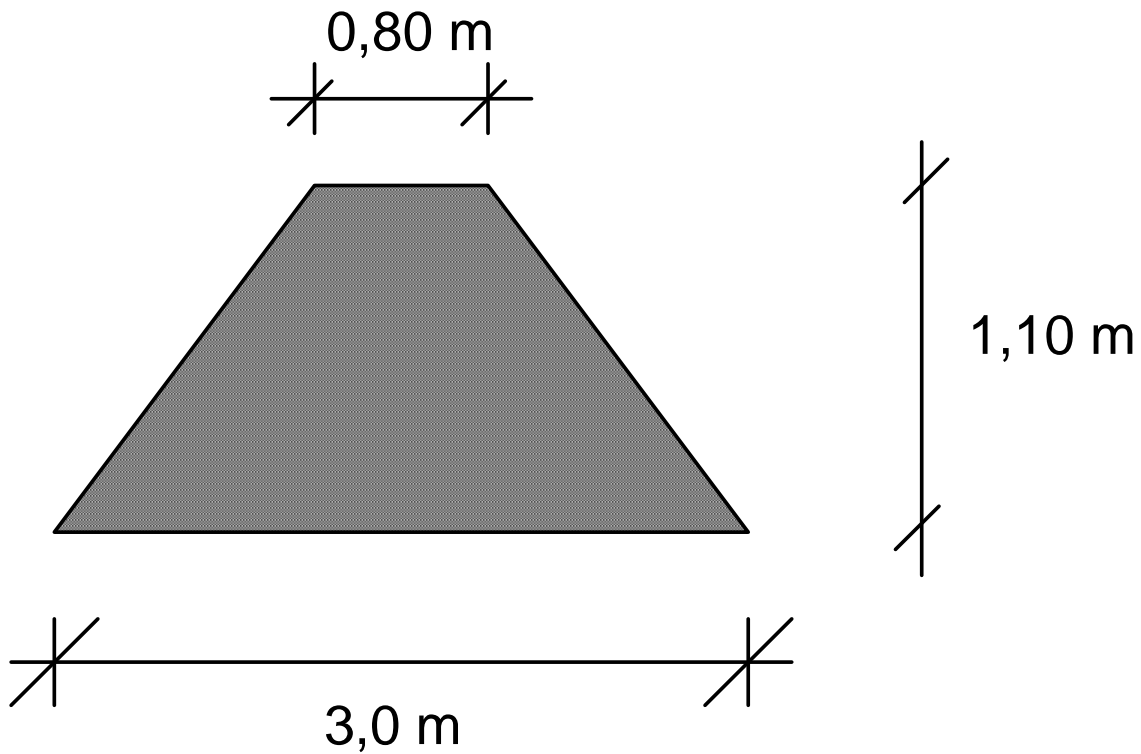


Figura 4.2: Seção da leira inicial formada

- Volume da Leira de Composto (Lodo + Bagaço)

$$(3,0 + 0,8) \times (1,10/2) \times 16 = 33,4 \text{ m}^3$$

- Cálculo da massa específica resultante da mistura inicial de lodo mais bagaço:

$$\text{Massa total: } 15,5 + 5,2 = 20,7 \text{ t}$$

$$\text{Massa específica da mistura inicial: } 20,7/33,4 = 0,6 \text{ t / m}^3$$



Figura 4.3: Preparação da mistura lodo com bagaço de cana



Figura 4.4: Mistura lodo com bagaço de cana



Figura 4.5: Revolvimento com o enleirador



Figura 4.6: Revolvimento com o enleirador com liberação de vapor d'água

4.3.2 DADOS FINAIS

- tempo de processamento: 30 dias
- massa resultante final de composto: 6,576 toneladas (base úmida);
- teor de sólidos final: 70%;
- massa específica do composto: 0,5 t/m³;
- volume final de composto: 13,2 m³;

De forma resumida, apresentamos a seguir a tabela 4.2 com os volumes e massas envolvidas no teste piloto.

Item	Massa específica (t/m ³)	Teor de Sólidos (%)	Volume (m ³)	Massa (t)	Massa seca (t)
Lodo original	1,1	16%	14,1	15,5	2,5
Bagaço de cana	0,2	70%	26	5,2	3,6
Composto inicial	0,6	30%	33,4	20,7	6,1
Composto final	0,5	70%	13,2	6,6	4,6

Tabela 4.2: Quadro resumo de massas e volumes envolvidos na compostagem

4.3.3 DADOS DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA

O monitoramento da temperatura da leira foi feito em três seções e em cada seção em três pontos. Os dados monitorados estão apresentados na Tabela 4.3. O respectivo gráfico está ilustrado na figura 4.7. A figura 4.8 ilustra o monitoramento de temperatura.

Dia	Início: 05/12									Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação
	Seção 01			Seção 02			Seção 03					
Dezembro	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3			
5	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30,0	0	
6	62	39	52	51	40	63	48	48	43	49,6	8,62	17,39
7	68	71	66	70	69	72	72	63	70	69,0	2,96	4,29
8	66	72	68	71	70	73	71	60	69	68,9	3,95	5,74
9												
10	59	72	69	70	68	68	69	64	67	67,3	3,81	5,66
11	62	70	71	73	70	72	68	69	71	69,6	3,21	4,61
12	56	68	70	66	69	68	70	68	67	66,9	4,28	6,41
13	66	65	63	61	71	69	58	66	56	63,9	4,91	7,69
14	62	60	60	60	63	62	60	64	60	61,2	1,56	2,55
15	60	62	61	61	60	61	59	61	59	60,4	1,01	1,68
16												
17	65	66	63	60	64	57	58	62	60	61,7	3,12	5,06
18	68	70	66	65	70	66	62	68	60	66,1	3,41	5,15
19	66	71	67	66	68	64	61	67	62	65,8	3,07	4,67
20	67	69	60	60	66	62	59	66	61	63,3	3,67	5,80
21	69	68	64	62	64	63	62	62	58	63,6	3,32	5,23
22	63	65	65	60	62	64	60	60	59	62,0	2,35	3,78
23												
24												
25												
26	56	62	60	58	60	61	56	54	58	58,3	2,65	4,54
27	54	51	55	50	47	50	50	52	50	51,0	2,40	4,70
28	52	50	56	51	48	53	49	51	52	51,3	2,35	4,57
29	53	50	58	49	50	51	48	50	51	51,1	2,93	5,74
30												
31												
Janeiro												
1												
2	43	50	44	41	47	38	39	44	40	42,9	3,89	9,06
3												
4	Encerramento do teste											

Tabela 4.3: Monitoramento de temperatura na leira

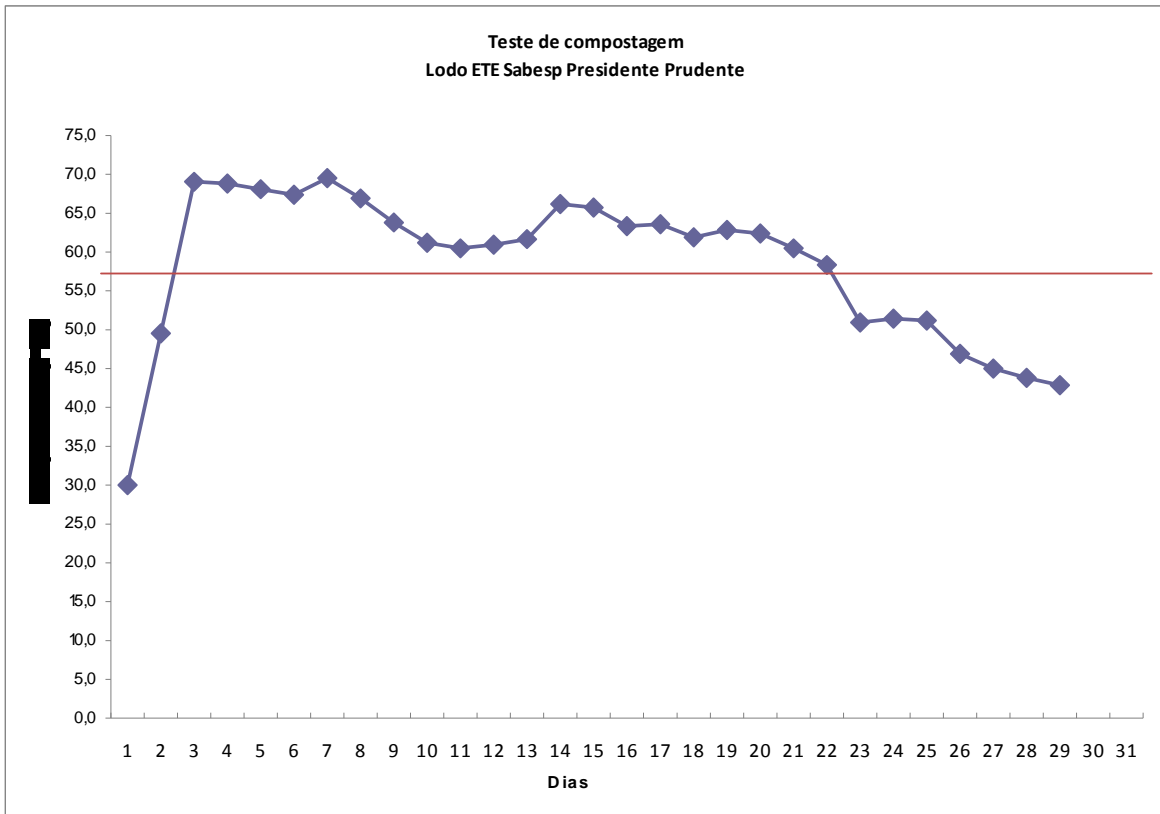


Figura 4.7: Gráfico de temperatura média na leira ao longo do tempo

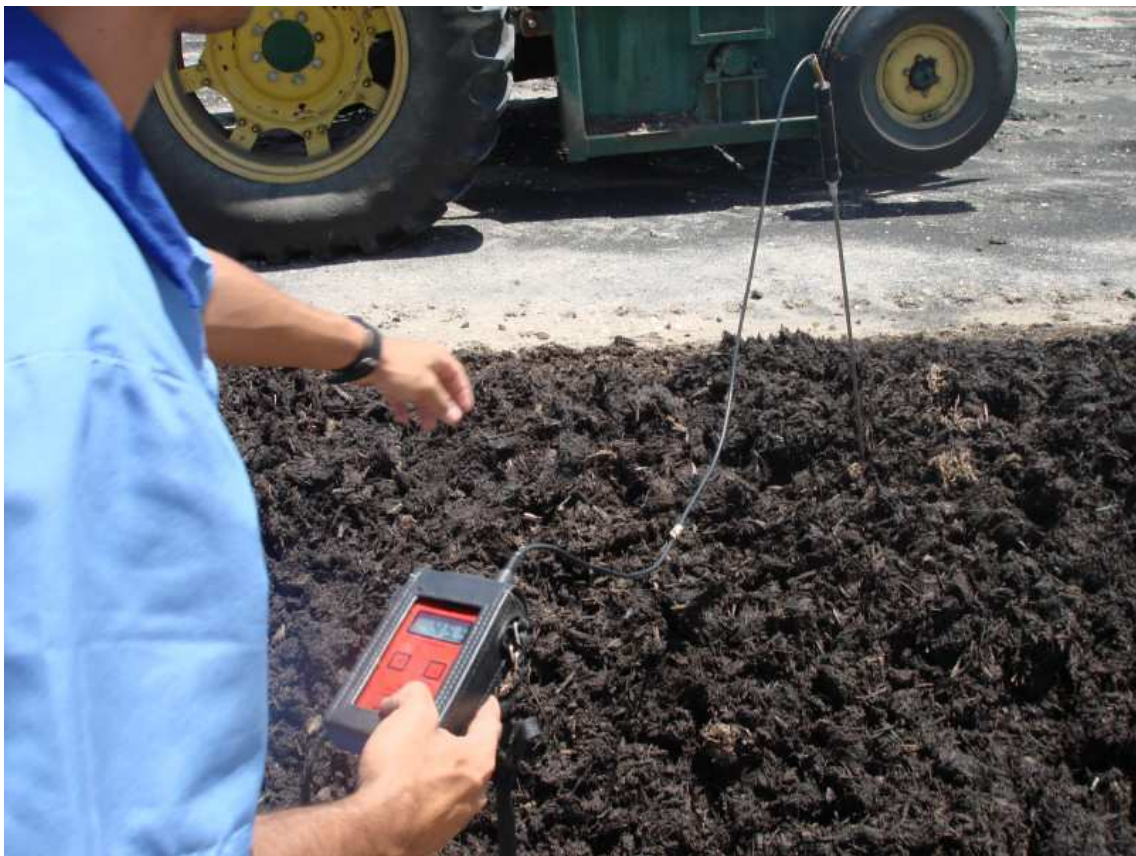


Figura 4.8: Monitoramento da temperatura da leira

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 ATENDIMENTO AOS CRITÉRIOS DE REDUÇÃO DE ATRATIVIDADE DE VETORES E REDUÇÃO ADICIONAL DE PATÓGENOS

A Resolução CONAMA nº 375 (29/08/2006) e sua respectiva alteração, CONAMA nº 380 (31/10/2006) estabelecem as condições aceitas de redução adicional de patógenos (necessários para a obtenção de lodos de esgoto ou produto derivado tipo A) e redução da atratividade de vetores.

Para compostagem por leiras revolvidas têm-se condições específicas estabelecidas nestas resoluções.

Para a redução de atratividade de vetores, tem-se a seguinte condição:

“critério 5 - relacionado à compostagem ou outro processo aeróbio: durante o processo, a temperatura deve ser mantida acima de 40° C por pelo menos 14 dias. A temperatura média durante este período deve ser maior que 45°C”.

Para a redução adicional de patógenos, tem-se a seguinte condição:

“compostagem confinada ou em leiras aeradas (3 dias a 55°C no mínimo) ou com revolvimento das leiras (15 dias a 55°C no mínimo, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias ao longo dos 15 do processo);

O critério de redução de atratividade de vetores foi atendido através da constatação de uma temperatura média na leira acima de 45°C do 2º ao 26º dia durante 25 dias.

O critério de redução de adicional de patógenos foi atendido através da constatação de uma temperatura média na leira acima de 45°C do 3º ao 22º dia durante 20 dias.

A fase mesofílica (acima de 40 °C) foi extremamente rápida, ocorrendo em menos de 12 horas da montagem da leira. Até o fim do experimento a temperatura permaneceu na fase termofílica (acima de 40°C).

Desta forma, o processo adotado atendeu aos critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA.

Um aspecto que merece ser levantado refere-se à ênfase dada a questão de higienização do composto pela Resolução nº 375 (29/08/2006) e a total ausência de requisito operacional na questão de maturação do composto. Se for levada em conta apenas a etapa de higienização, a demanda de área será menor em relação à demanda conjunta de higienização e maturação. No entanto esta demanda não chega a ser o dobro da área, conforme vai ser calculado mais a frente. Na fase de maturação, parte da matéria orgânica já terá sido convertida em gás carbônico, diminuindo-se o volume e as pilhas podem ser feitas com alturas bem maiores que as da fase de higienização.

5.2 CHEGAGEM DA PROPORÇÃO C/N

A relação C/N deve ficar entre 20 a 30%. A checagem foi feita tanto para a proporção volumétrica (lodo/bagaço) inicial de 1: 1 como de 1: 2.

a) proporção volumétrica aproximada de 1: 1

Lodo: C = 38,60%; N = 4,85%

Bagaço de Cana: C = 45,30%; N = 0,30%;

Massa seca de lodo (t) = 16% x 15,5 t = 2,5 t

Massa seca de bagaço de cana (t) = 70% x 3,2 = 2,2 t

$C/N = (2,5 \times 38,60\% + 2,2 \times 45,30\%) / (2,5 \times 4,85\% + 2,2 \times 0,30\%) = 15$

Ou seja, a proporção de 1:1 não atendeu ao critério C/N.

b) proporção volumétrica aproximada de 1 (lodo):2 (bagaço)

Massa seca de lodo (t) = 16% x 15,5 t = 2,5 t

Massa seca de bagaço de cana (t) = 70% x 5,2 = 3,6 t

$C/N = (2,5 \times 38,60\% + 3,6 \times 45,30\%) / (2,5 \times 4,85\% + 3,6 \times 0,30\%) \cong 20$

A tabela 4.1 apresentada a seguir resume estes dados.

Item	Teor de Sólidos (%)	Massa específica (t/m ³)	Massa (t)	Massa seca (t)	Volume (m ³)	C (%)	N (%)	C/N (%)
Lodo	16%	1,1	15,5	2,5	14,1	38,60%	4,85%	20%
Bagaço	70%	0,2	5,2	3,6	26,0	45,30%	0,30%	

Tabela 4.1: Relação C/N para o teste com proporção volumétrica aproximada de 1:2

O valor de C/N de 20% foi bem no limite inferior da faixa recomendável. Podemos considerar aceito, pois a operação foi satisfatória com relação à temperatura atingida na leira.

Outra questão interessante a ser abordada é a influência do teor de sólidos na proporção C/N, para uma mesma proporção volumétrica de bagaço/lodo.

Caso a fase de desidratação de lodo apresentasse valores maiores ou menores que o desempenho atual de 16% de teor de sólidos da centrífuga, podemos calcular, para uma mesma proporção volumétrica de bagaço/lodo, os diferentes valores de C/N. Estes cenários estão apresentados na Tabela 4.2 a seguir.

Teor de Sólidos do Lodo (%)	C/N (%)
13%	22%
16%	20%
18%	19%
25%	16%

Tabela 5.2: Relação C/N (%) para uma mesma dosagem de bagaço e diferentes teores de sólidos do lodo

Com os valores apresentados na Tabela 5.2, podemos observar que a relação C/N fica prejudicada quanto maior for o teor de sólidos do lodo original. Ou seja, quanto maior o teor de sólidos do lodo original, maior será a dosagem de bagaço de cana em proporção volumétrica, de modo a preservar a relação C/N.

Por outro deve-se ressaltar que há um limite operacional do baixo teor de sólidos do lodo de forma a resultar numa pilha com aeração. Para o teor de sólidos de 16% foi ainda possível montar uma pilha aerada.

5.3 CHECAGEM DO TEOR DE SÓLIDOS DA MISTURA INICIAL DE LODO DESIDRATADO + AGENTE ESTRUTURANTE

O teor de sólidos da mistura resultante deve ser entre 55 e 65%. A checagem também foi feita tanto para a proporção volumétrica (lodo/bagaço) inicial de 1: 1 como de 1: 2.

a) proporção volumétrica aproximada de 1: 1

massa inicial de lodo: 15,5 t

massa seca de lodo: 2,5 t

teor de sólidos do lodo: 16%

massa de bagaço: 3,2 t

massa seca de bagaço: 2,2 t

teor de sólidos do bagaço: 70%

massa total de lodo e bagaço: 18,7 t

massa seca de lodo e bagaço: 4,7 t

teor de sólidos da mistura de lodo e bagaço: $4,7/18,7 = 25\%$

Não atendeu ao critério de teor de sólidos entre 45 a 40.

b) proporção volumétrica aproximada de 1: 2

massa inicial de lodo: 15,5 t

massa seca de lodo: 2,5 t

teor de sólidos do lodo: 16%

massa de bagaço: 5,2 t

massa seca de bagaço: 3,6 t

teor de sólidos do bagaço: 70%

massa total de lodo e bagaço: $15,5 + 5,2 = 20,7$ t

massa seca de lodo e bagaço: $2,5 + 3,6 = 6,1$ t

teor de sólidos da mistura de lodo e bagaço: $6,1/20,7 = 29\%$

De acordo com o critério de umidade, o teor de sólidos da mistura de 29% não atendeu a faixa recomendada de teor de sólidos entre 45 a 40%. No entanto, este teor de sólidos baixo não prejudicou o processo de compostagem e possibilitou uma estrutura na pilha com a criação de poros suficientes para permitir a aeração.

Isto foi devido ao tipo de agente estruturante utilizado (bagaço de cana), bem como do adequado ajuste da máquina de revolvimento de leira e sua adequada operação. Podemos considerar, para este caso, que a relação C/N seria o fator mais limitante que a o teor de sólidos da mistura inicial resultante.

5.4 AUMENTO OU DIMINUIÇÃO DO VOLUME E DA MASSA NA COMPOSTAGEM

A tabela 4.2 permite que se desenvolvam cálculos comparativos com base na quantidade original de lodo e em relação às condições iniciais da compostagem.

Em relação às condições iniciais de compostagem temos, a redução conforme a Tabela 5.3.

Item	Massa específica (t/m ³)	Teor de Sólidos (%)	Volume (m ³)	Massa (t)	Massa seca (t)
1) Composto inicial	0,6	30%	33,4	20,7	6,1
2) Composto final	0,5	70%	13,2	6,6	4,6
Variação			-61%	-68%	-25%

Tabela 5.3: Comparação de massa e volume das massas inicial e final de composto no teste

Em relação à quantidade original de lodo temos, a redução conforme a Tabela 5.4.

Item	Massa específica (t/m ³)	Teor de Sólidos (%)	Volume (m ³)	Massa (t)	Massa seca (t)
1) Lodo original	1,1	16%	14,1	15,5	2,5
2) Composto final	0,5	70%	13,2	6,6	4,6
Variação			-7%	-58%	86%

Tabela 5.4: Comparação de massa e volume do lodo original e do composto final no teste

Desconsiderando a ocorrência de mudanças significativas de massa e volume na fase de maturação, podemos analisar os dados somente nesta fase de higienização a favor da segurança.

O processo de compostagem apesar de incorporar uma significativa parcela de sólidos secos ao lodo, não leva necessariamente a um aumento de volume ou de massa no produto final. Durante o processo de compostagem, ocorrem simultaneamente a perda de água (ou umidade) e de sólidos através da digestão da matéria orgânica com geração de gás carbônico.

Cabe observar que este balanço de massa foi específico para o lodo da ETE Limoeiro, que é um lodo do tipo secundário e digerido de forma precária. Este tipo de lodo é um dos mais difíceis de manipulação de processo. A alta proporção de SV/ST do lodo da ETE Limoeiro de 65,8% tem como consequência uma desidratação de lodo menos eficiente devido a alta proporção de água intra-celular. Esta estabilização deficiente também gera problemas de alta atração de vetores e odores, levando à necessidade de uma estabilização deste lodo.

Por outro lado esta mesma deficiência de estabilização favoreceu a alta reatividade do lodo com o bagaço de cana, levando-se a atingir altas temperaturas num curto espaço de tempo, significativa perda de massa em base seca e grande perda de umidade.

6 AVALIAÇÃO DE CUSTOS OPERACIONAIS E DE INVESTIMENTO

Neste item iremos avaliar os custos operacionais e de investimento para a alternativa de compostagem e de estabilização com cal.

6.1 INVESTIMENTOS NECESSÁRIOS PARA COMPOSTAGEM

Para a leira inicial admitiremos as mesmas dimensões obtidas no teste piloto, ou seja, altura de 1,10 m, base de 3,0 m e topo com largura de 0,8 m. Admitiremos que cada leira terá 200 m.

- Comprimento da leira: 200 m;
- Volume total de 1 leira: $(3,0 + 0,8)/2 * 1,10 * 200 = 418$ m³ por leira;
- áreas de borda: 10 m cabeceira;
- teor de sólidos do lodo: 16%;
- produção de lodo: 57,5 t/dia ou 52,3 m³/dia;
- Proporção volumétrica de bagaço de cana por lodo desidratado: 2;
- teor de umidade do bagaço de cana: 30% (ou 70% de teor de sólidos);
- massa específica do bagaço de cana: 200 kg/m³;

- tempo de compostagem/higienização: 28 dias;
- Bagaço de cana: C = 45,30%; N = 0,30%;
- Lodo: C = 38,60%; N = 4,85%;
- tempo de maturação: 28 dias;
- Produção semanal de lodo: $7 \times 52,3 \text{ m}^3/\text{dia} = 366,1 \text{ m}^3/\text{semana} \times 1,1 \text{ t/m}^3 = 402,71 \text{ t/semana}$;
- Necessidade semanal de bagaço de cana: $2 \times 366,1 \text{ m}^3 = 732,2 \text{ m}^3/\text{semana}$;
- Massa semanal de bagaço: $732,2 \text{ m}^3 \times 0,2 \text{ t/m}^3 = 146,4 \text{ t/semana}$;
- Adotando-se a massa específica da mistura inicial igual a $0,6 \text{ t/m}^3$, tem-se:
 Massa total inicial de lodo e bagaço por semana: $402,71 + 146,4 = 549,11 \text{ t por semana}$
 Volume total inicial de lodo mais bagaço por semana: $549,11 / 0,6 = 915,18 \text{ m}^3$

$915,18/418 = 2,2$ leiras por semana ou aproximadamente 2 leiras por semana

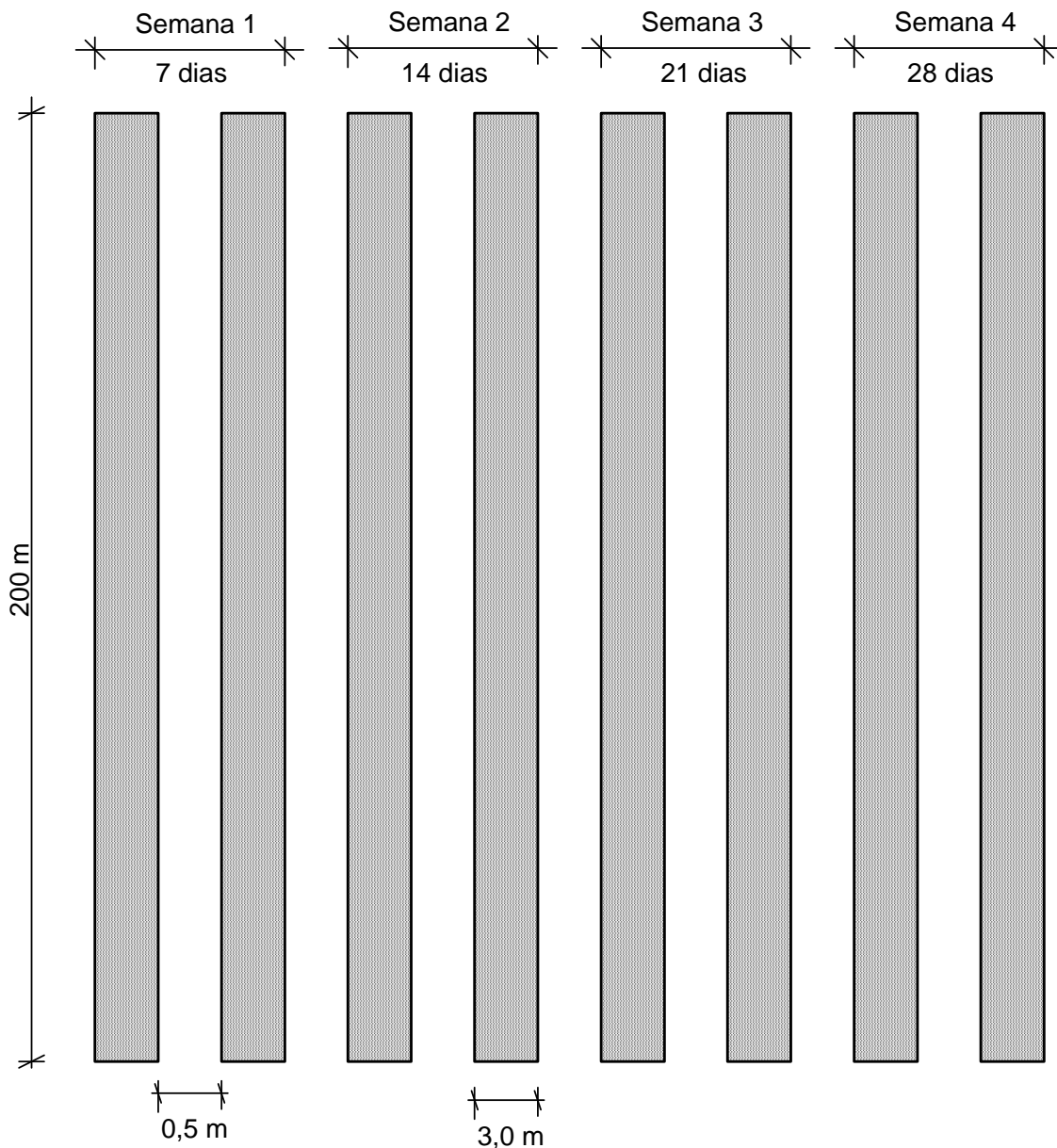


Figura 6.1: configuração das leiras de compostagem/higienização com 200 m de comprimento e 28 dias de processamento

Área Coberta para etapa de higienização da compostagem
 Comprimento: 200 m;

Largura: $8 \times 3,0\text{m} + 7 \times 0,5 = 27,5 \text{ m}$
Área total: $200 \times 27,5 = 5500 \text{ m}^2$;

Como as coberturas são modulares, escolheremos um tipo de módulo de forma a determinar a quantidade de módulos.

Módulo (200 m)

Módulos de: 12,8 m de largura x 5,2 m altura livre e 200 m de comprimento;

Para a compostagem adotaremos inicialmente 4 módulos de 200 m de comprimento.

Módulos de: 12,8 m de largura x 5,2 m altura livre e 200 m de comprimento;

Largura total do pátio: $4 \times 12,8 \text{ m} = 51,2 \text{ m}$

Largura necessária para etapa de higienização: $8 \text{ pilhas} \times 3,0 \text{ m por pilha} + 7 \text{ entre pilhas} \times 0,5 \text{ m entre pilhas} = 27,5 \text{ m}$

Durante o processo de compostagem ao longo de 28 dias, irá ocorrer a transformação da matéria orgânica do lodo em gás carbônico e água. Assumindo que ocorrerá uma redução de volume igual ao que ocorreu no experimento piloto, teremos um novo volume final para maturação:

- Volume inicial de lodo + bagaço de cana por semana: $798,7 \text{ m}^3$
- Redução de 40% em volume;
- Volume final de lodo + bagaço de cana por semana: $319,5 \text{ m}^3$
- Volume final de lodo + bagaço de cana em 4 semanas: 1278 m^3

Considerando uma pilha de maturação com base de 12m, base menor de 3,2 m, altura de 4,4 m e 200 m de comprimento teremos:

- volume da pilha de maturação: $(12+3,2) \times (4,4/2) \times 200 = 6688 \text{ m}^3$;
- volume final do composto calculado de 1278 m^3 ;
- como há um volume sobrando devido a incorporação de mais 1 módulo, podemos utilizar esta área excedente para aumentar o período de maturação ou ainda utilizar esta área para estocar agente estruturante.

Para 4 módulos a largura total é de:

$L = 12,8\text{m} \times 4 \text{ unidades} = 51,2 \text{ m}$;

$L1 = \text{largura necessária para higienização} = 8 \times 3 + 7 \times 0,5 = 27,5 \text{ m}$;

$L2 = \text{largura necessária para maturação} = 12 \text{ m}$;

Espaço entre L1 e L2 = 0,5 m;

Borda Lateral = $51,2 - 27,5 - 12 - 0,5 = 11,2 \text{ m}$ ou 5,6m de cada lado;

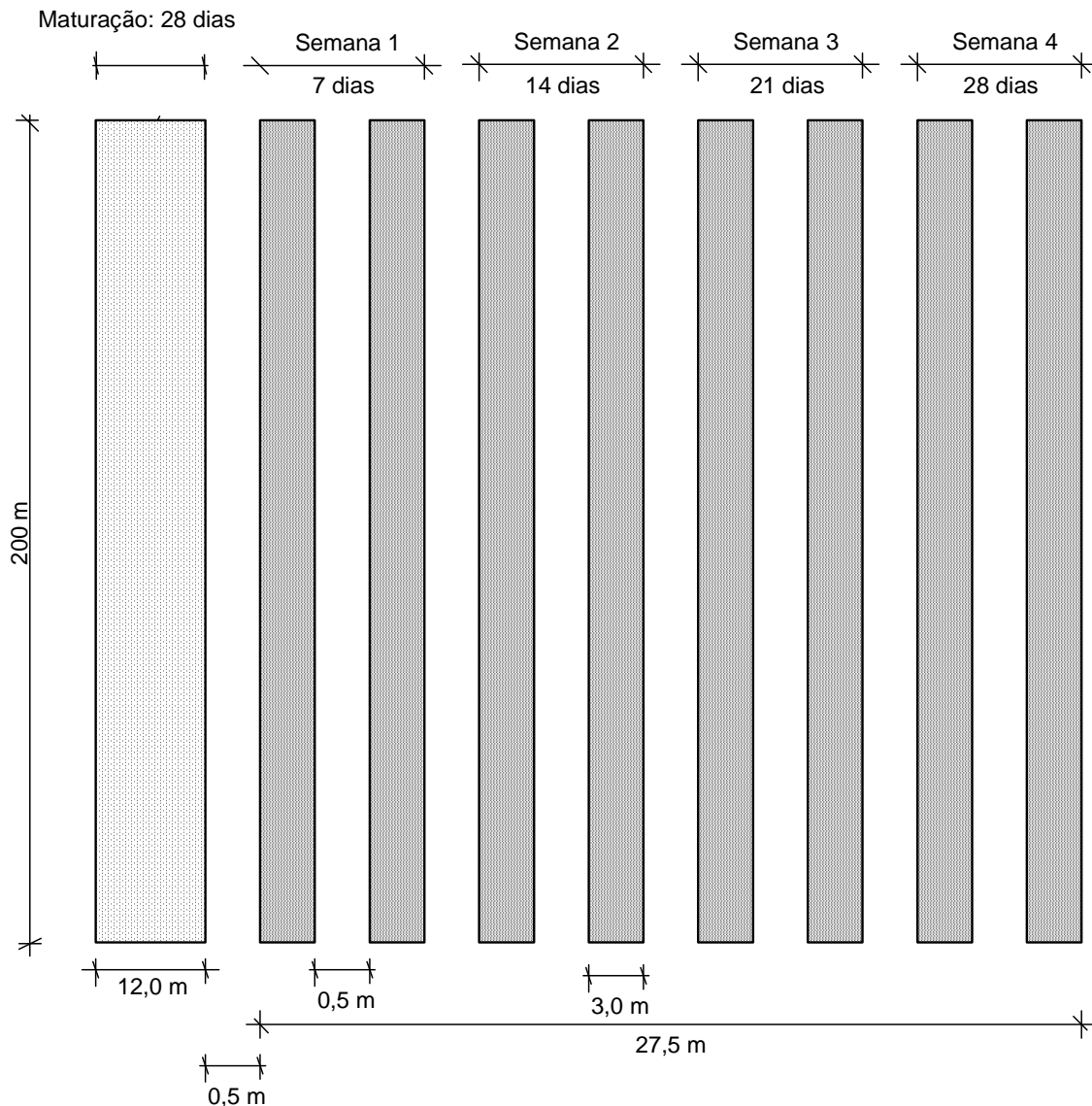


Figura 6.2: configuração das leiras de compostagem com fase de maturação

Cobertura do pátio de compostagem: R\$ 67 / m²

Área útil de m² = 200 x 4 x 12,8 = 10.240 m²

Custo de cobertura: 10.240 m² x R\$67/m² = R\$ 686.080

Para a operação das máquinas e dos caminhões, necessita-se uma borda lateral. Para as extremidades superior e inferior, recomenda-se uma borda de 10,0 m e para as faixas laterais uma borda de 7,0 m.

Também se necessita prever uma área de estocagem para o bagaço de cana, o que pode ser uma faixa lateral de 200 m por 15 m, totalizando 2500 m².

6.2 CUSTOS DE AGENTE ESTRUTURANTE E DE TRANSPORTE FINAL PARA COMPOSTAGEM

Produção diária de lodo: 57,5 t/dia ou 52,3 m³/dia;

Necessidade diária de bagaço de cana: 2 x 52,3 = 104,6 m³/dia ou 21 t/dia;

Adotando-se uma redução aproximada de 15% em relação ao volume original de lodo temos:

Volume de composto: 0,85 x 52,3 = 44,5 m³/dia x 30 = 1335 m³/mês

Massa específica do composto = 0,5 t/m³;

Massa de composto: 667,5 t/mês

Conforme levantamentos preliminares na região de Presidente Prudente, o preço do bagaço de cana é de R\$ 15/m³.

O custo diário de bagaço de cana será de:

Custo diário de bagaço de cana: $104,6 \text{ m}^3 \times \text{R\$ } 15/\text{m}^3 = \text{R\$ } 1569/\text{dia}$

Custo mensal de bagaço de cana = R\$ 47.070/mês

Foi feito um levantamento do custo de transporte do composto para uma propriedade localizada a 60 km da ETE. O preço de mercado para o transporte de composto com uma massa específica de $0,5 \text{ t/m}^3$ é de $\text{R\$ } 0,20/\text{km.m}^3$. Para uma distância de 60 km resulta em $\text{R\$ } 12/\text{m}^3$ de composto.

O custo diário de transporte de composto será de:

Custo diário de transporte de composto: $1335 \text{ m}^3/\text{mês} \times \text{R\$ } 12/\text{m}^3 = \text{R\$ } 16.020/\text{mês}$.

6.3 CUSTO DE DOSAGEM E TRANSPORTE FINAL DA ESTABILIZAÇÃO COM CAL

Produção diária de lodo: $57,5 \text{ t/dia}$ ou $52,3 \text{ m}^3/\text{dia}$;

Produção diária de lodo em massa seca: $16\% \times 57,5 \text{ t/dia} = 9,2 \text{ t/dia}$

Dosagem de 40% de cal;

Pureza da cal: 90%

Preço da cal: $\text{R\$ } 0,37/\text{kg}$

Teor de sólidos final após 60 dias: 50%

Massa específica após 60 dias: $1,2 \text{ t/m}^3$

Massa diária de cal utilizada: $9,2 \text{ t} \times 40\% = 3,7 \text{ t}$ de cal pura = $4,1 \text{ t}$ de cal/dia

Massa seca total inicial: $9,2 \text{ t} + 4,1 \text{ t} = 13,3 \text{ t/dia}$

Custo diário da cal: $4,1 \text{ t/dia} \times \text{R\$ } 370/\text{t} = \text{R\$ } 1517$ por dia = $\text{R\$ } 45.510$ por mês

Transporte diário de lodo + cal

Massa final após 60 dias a 20%, conforme PEGORINI ET AL(2006): $13,3/0,20 = 66,5$ toneladas por dia ou 1995 t/mês ou $1813 \text{ m}^3/\text{mês}$

O custo de transporte de lodo até uma propriedade agrícola é de $\text{R\$ } 0,42/\text{m}^3 \text{ km}$, conforme último contrato estabelecido na ETE Limoeiro. Para uma propriedade localizada a uma distância de 60 km, teremos um preço de $\text{R\$ } 25,20/\text{m}^3$.

Custo do transporte por mês:

= $1813 \text{ m}^3/\text{mês} \times \text{R\$ } 25,20/\text{m}^3 = \text{R\$ } 45.687,60$ por mês

6.4 INVESTIMENTO PARA REVOLVIMENTO DO LODO COM CAL

Para tornar o lodo manipulável necessita-se dispor este lodo em estufa e provocar periodicamente um revolvimento.

Foi feita uma tentativa de revolver o lodo com cal através do equipamento enleirador. Ao se dispor o lodo no pátio, o lodo apresentou uma consistência muito fluida e com extrema dificuldade de formar pilhas. A lâmina de lodo formada foi extremamente baixa, demandando muita área para manipulação.

Uma possível explicação para a ocorrência deste lodo extremamente fluido pode ser dada à reação de um material extremamente úmido com uma grande quantidade de cal, o que poderia levar à incorporação de uma grande quantidade de gases devido a reação exotérmica. Ou seja, a fluidez do lodo calado seria inicialmente devido a quantidade de gases dissolvidos na massa de lodo mais cal.

Esta fluidez excessiva dificulta a manipulação deste lodo da ETE Limoeiro. Há a necessidade de se pesquisar novas formas de tornar este lodo mais manipulável.

Uma alternativa de curto prazo para o pós-tratamento do lodo com cal é a disposição temporária no aterro exclusivo de resíduos da ETE Limoeiro (em forma de lagoas), de forma a permitir a um aumento no teor de sólidos e torná-lo mais manipulável.



Figura 6.3: despejo de lodo com cal em pátio para tentativa de revolvimento

Apesar de, na prática, não se conseguir realizar este revolvimento com o equipamento enleirador, iremos adotar uma espessura de lodo no pátio de 30 cm para efeitos comparativos. O tempo de detenção a ser adotado será de 60 dias.

De acordo com o IAP a área necessária para estocagem de lodo deve ser dimensionada em função da capacidade de empilhamento do material. Podem ser utilizados como parâmetros de projeto:

- Para biossólidos que tenham "comportamento semelhante ao de sólidos" (teor de ST igual ou superior a 40%): 1,50 a 0,80 m³ de biossólidos/m² de área de armazenagem;
- Para biossólidos na forma pastosa (teor de ST superior a 10% e inferior a 30%) recomenda-se 0,80 a 0,40 m³ de biossólidos / m² de pátio;
- Para os "biossólidos mais líquidos" (teor de ST < 10%) o projeto deverá definir especificamente a forma de armazenagem a ser adotada.

Desta forma a área necessária será de:

- teor de sólidos inicial da mistura lodo + cal: $= (13,3)/(57,5+4,1) = 21,5\%$;
- Massa inicial de lodo + cal: $(57,5 + 4,1) = 61,6$ t/dia;
- Volume inicial de lodo + cal: $(61,6/1,1) = 56$ m³/dia;
- área necessária: $(56 \text{ m}^3/\text{dia}) \times 60 \text{ dias}/0,30 \text{ m} = 11.200 \text{ m}^2$;

Custo estimativo do pátio de calagem: $11.200 \text{ m}^2 \times \text{R\$ } 67 / \text{m}^2 = \text{R\$ } 750.400$;

6.5 CUSTOS OPERACIONAIS DOS EQUIPAMENTOS

Não foi possível a obtenção dos custos operacionais de equipamentos para as operações de revolvimento do lodo para compostagem e para a calagem.

A operação dos equipamentos para compostagem está bem dominada quanto à questão operacional, devido à realização dos testes piloto. Já o revolvimento do lodo com cal, ainda permanecem sérias dúvidas quanto a sua operação devido à falta de dados práticos e confiáveis.

A hipótese que iremos adotar é de que ambos os custos estejam na mesma ordem de grandeza, não prevalecendo nem uma nem outra solução.

Para efeitos de estimativa iremos adotar um preço de R\$ 30.000/mês para o enleirador e o revolador do lodo com cal.

Este preço é aproximadamente uma vez e meia o preço de aluguel de um trator com pá carregadeira, que hoje está em R\$ 20.000/mês.

6.6 CUSTOS OPERACIONAIS DE TRANSPORTE INTERNO

Para calcular os custos operacionais de transporte interno, devemos retornar aos volumes originais de lodo produzido na desidratação e o lodo imediatamente estabilizado com cal. O transporte interno refere-se ao transporte do lodo gerado na desidratação até o pátio de compostagem ou de secagem adicional. No caso da estabilização com cal, há uma incorporação de massa logo após a desidratação neste local.

O transporte do local de desidratação até o pátio coberto deverá ser feito com os caminhões do tipo toco, que possuem uma capacidade volumétrica de m^3 .



Figura 6.4: caminhão para transporte interno do lodo

Para a compostagem o volume a ser considerado no transporte interno será o próprio volume original de lodo produzido. Ou seja, o volume será de $52,3 m^3/\text{dia}$ ou $1569 m^3/\text{mês}$.

Na Sabesp, o preço de transporte interno está em R\$1,43/ m^3 para uma distância de 150 m e de R\$ 5,11/ m^3 para uma distância de 1500 m. A distância aproximada entre a desidratação de lodo e o pátio de manejo de lodo para compostagem ou secagem adicional é de 500 m.

Fazendo-se uma interpolação chegamos no preço de R\$ 2,38/ m^3 . Para efeitos de cálculo iremos considerar um preço de R\$ 2,50/ m^3 .

Custo total do transporte interno para compostagem = R\$ 2,50/ m^3 x 1569 $m^3/\text{mês}$ = R\$3922,50 /mês

Para a estabilização com cal, o volume a ser considerado será o do lodo original produzido mais a dosagem de cal. Para efeitos de cálculo, iremos adotar que o teor de sólidos após a dosagem de cal irá passar de 16% para 21,5 % e não haverá alteração significativa de massa específica.

Dosagem de 40% de cal;

Pureza da cal: 90%

Teor de sólidos imediatamente após a dosagem: 21,5%

Massa específica após dosagem: $1,1 t/m^3$

Massa diária de cal utilizada: $9,2 t \times 40\% = 3,68 t$ de cal pura = $4,1 t$ de cal/dia

Massa inicial de lodo + cal: $(57,5 + 4,1) = 61,6 t/\text{dia}$;

Produção diária de lodo: 56 m³/dia ou 1680 m³/mês;

Custo total do transporte interno para calagem = R\$ 2,50/m³ x 1680 m³/mês = R\$4200/mês

6.7 CUSTOS DE MONITORAMENTO

Produção mensal de composto: 667,5 t/mês

Teor de sólidos do composto de 70%

Produção de composto em base seca: 467,25 t/mês ou 5607 t/ano

Produção mensal de lodo estabilizado com cal: 1995 t/mês ou 1813 m³/mês

Teor de sólidos do lodo estabilizado com cal de 20%

Produção de lodo estabilizado com cal em base seca: 399 t/mês ou 4788 t/ano

Tanto para um caso como para outro, a produção de lodo de esgoto ou produto derivado se situará na faixa de monitoramento bimestral estabelecida no Art. 10 da Resolução CONAMA nº 375 (29/08/2006).

O monitoramento do lodo deve incluir os seguintes aspectos:

- potencial agrônômico;
- substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas;
- indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos;
- estabilidade.

A Tabela 6.6 apresenta os preços estimativos para as análises de monitoramento de lodo.

Ensaio de laboratório/Lodo	Preço (R\$)
Caracterização físico - química (Inorgânicos)	R\$ 200,00
Caracterização físico - química (Nutrientes)	R\$ 290,00
Caracterização – Orgânicos	R\$ 3.100,00
Caracterização microbiológica – coliformes termo.	R\$ 98,00
Caracterização microbiológica – salmonellas	R\$ 98,00
Caracterização parasitológica – ovos de helmintos	R\$ 170,00
Caracterização parasitológica – Vírus Enterovírus	R\$ 1.129,73
	R\$ 5.085,73

Tabela 6.6: preços estimativos para caracterização do lodo por amostra

Por ano teríamos para o monitoramento do lodo 6 amostras, o que totalizaria um custo de R\$ 30.514,38 por ano.

Já tabela 6.7 apresenta os preços estimativos da caracterização do solo.

Ensaio de laboratório/Solo	Preço (R\$)
Ensaio de laboratório –IAC-(alteração do pH do solo)	R\$ 3.500,00
Análises de solo para fins de fertilidade + sódio e CE.	R\$ 40,00
Análises de solo quanto a granulometria	R\$ 15,00
Determinação de metais pesados no solo agrícola	R\$ 200,00
	R\$ 3.755,00

Tabela 6.7: preços estimativos para caracterização de solo por amostra

Para o monitoramento do solo, para a produção estimada da ETE Limoeiro prevemos uma quantidade aproximada de 10 amostras por ano, o que totalizaria um custo de R\$37.550/ano.

6.7 RESUMO DE CUSTOS

Para o horizonte de projeto de Q = 478 L/s (2008), temos:

- produção original de lodo: 57,5 t/dia ou 53,5 m³/dia, com 16% de teor de sólidos;

Na tabela 6.8 a seguir apresentamos um resumo dos custos para posterior discussão.

Item	Compostagem	Estabilização com cal
Produção mensal de lodo/composto (m ³)	1335 m ³ /mês 667,5 t/mês	1813 m ³ /mês ou 1995 t/mês
Custo do transporte final por mês	R\$ 16.020/mês R\$ 192.240,00/ano	R\$ 45.687,60/mês R\$ 548.251,20/ano
Custo do aditivo (cal ou cana) por mês	R\$ 47.070/mês R\$ 564.840,00/ano	R\$ 45.510/mês R\$ 546.120,00/ano
Custo do equipamento de pá carregadeira por mês	R\$ 20.000/mês R\$ 240.000,00/ano	R\$ 20.000/mês R\$ 240.000,00/ano
Custo do equipamento enleirador/revolvedor por mês	R\$ 30.000/mês R\$ 360.000,00/ano	R\$ 30.000/mês R\$ 360.000,00/ano
Custo do transporte interno por mês	R\$ 3922,50 /mês R\$ 47.070,00/ano	R\$4200/mês R\$ 50.400,00/ano
Custo de ensaios de caracterização do lodo por ano	R\$ 30.514,38/ano	R\$ 30.514,38/ano
Custo de ensaios de caracterização do solo por ano	R\$37.550/ano	R\$37.550/ano
Total por ano – Despesa Operacional	R\$ 1.472.214,38/ano	R\$ 1.812.835,58 /ano
Custo por tonelada original de lodo (Produção de 20.987 t por ano)	R\$ 70,15/t	R\$ 86,37 /t
Preço da cobertura do pátio – Investimento	R\$ 686.080	R\$750.400

Tabela 6.8: Tabela resumo de custos envolvidos na compostagem e estabilização com cal

7 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para o caso da ETE Limoeiro de Presidente Prudente, a compostagem apresentou vantagens econômicas em relação à estabilização com cal.

Para a cobertura do pátio, não houve uma diferença significativa de praticamente o dobro do preço de investimento da alternativa da estabilização da cal sobre a compostagem. Há ainda o problema de não se saber se esta cobertura seria o suficiente para realizar a secagem adicional do lodo com cal, devido à falta de parâmetros de projeto confiáveis.

Tendo em conta uma possível deficiência de argumentação devido a falta de uma informação técnica, podemos comparar os outros custos de forma a buscar outros embasamentos.

Com relação aos transportes do produto final, quer seja interno como externo, a compostagem também apresentou vantagens. O custo de transporte total (interno e externo) para compostagem resultou em R\$ 19.942,50 por mês e para a estabilização com cal resultou em R\$ 49.887,6 por mês, ou seja, o transporte de lodo com cal representou 2,5 vezes o transporte de composto.

Já em relação ao custo de agentes adicionados (cal e bagaço de cana), não houve diferença significativa.

Os outros custos foram iguais, como monitoramento de lodo, solo, e aluguel de equipamentos.

Esta vantagem da compostagem sobre a calagem para o caso da ETE Limoeiro foi influenciada pela questão geográfica favorável, próximo a centros produtores de bagaço de cana e centros receptadores do composto e também devido ao tipo de lodo produzido. O lodo do tipo secundário resulta numa desidratação com alta umidade e uma proporção alta de SV/ST, favorecendo que se alcance altas temperaturas por um longo período e conseqüentemente significativa perda de massa.

A metodologia adotada para dimensionamento do pátio de compostagem baseou-se nos resultados práticos obtidos em escala piloto e devidamente otimizados, com o menor consumo de agente estruturante.

Há outros fatores de difícil estimativa, mas que merecem ser citados de forma a embasar a solução adotada de compostagem para a ETE Limoeiro.

A compostagem descrita para a ETE Limoeiro ainda é passível de uma otimização operacional. Por exemplo, na questão do transporte do composto até a propriedade agrícola, pode-se vislumbrar uma possível eliminação deste custo, a exemplo do que ocorreu com o emblemático caso de Franca, aonde os agricultores vinham até a ETE para buscar o lodo para as plantações de café. Como o composto possui um valor agregado maior, esta é uma possibilidade bem factível.

Ainda em relação ao transporte, a própria carreta que leva o bagaço de cana poderia ser aproveitada para levar o composto já produzido para a propriedade agrícola. Pelo menos em 50% das viagens de bagaço de cana até a ETE, estaria aberta esta possibilidade de aproveitamento de viagens, pois a proporção de bagaço de cana para lodo original é de 2:1. Nas estimativas de cálculo, por segurança não se considerou este cenário, devido à necessidade de um acerto logístico.

Em relação à aplicação agrícola há várias implicações logísticas a seguir listadas entre a adoção do composto versus o lodo estabilizado com cal. O composto apresenta uma condição bem mais favorável de manipulação, sendo perfeitamente assimilado pelos implementos agrícolas disponíveis. Já o lodo estabilizado com cal esta utilização ainda é incerta, sendo necessário o desenvolvimento de implementos agrícolas. Na ETE Belém do Paraná, a companhia de saneamento foi obrigada a comprar equipamentos para se fazer a disposição agrícola do lodo estabilizado com cal. Esta facilidade de manipulação do composto favorece ainda mais a atratividade deste produto, de forma a potencializar que o agricultor venha a buscar o composto na própria ETE.

A utilização de um lodo estabilizado com cal também poderia limitar a aplicação numa determinada área agrícola devido à maciça contribuição de cálcio no solo. Isto poderia levar a ampliar as extensões de terra para disposição final em relação à compostagem.

8 RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÕES

- Para a realização de um projeto de compostagem recomenda-se, sempre que possível, a realização de ensaios piloto com o lodo existente ou similar ao que vai ser produzido na ETE conjuntamente com o agente estruturante da região. Isto possibilitará a execução de um projeto com dados mais próximos da realidade e evitará potenciais ociosidades ou limitações.
- Deve-se observar que na fase de maturação alguns aspectos levam a um dimensionamento do pátio diferente na fase de higienização, dos quais podemos citar: menor volume de composto nesta fase devido à conversão da matéria orgânica em gás carbônico e água; teor de sólidos do composto mais alto devido ao aumento da temperatura no interior da pilha; alturas maiores da pilha de maturação devido às propriedades do composto mais seco. Optou-se por incluir explicitamente a fase de maturação de forma a garantir a viabilidade até a disposição final no solo propriamente dita. Caso o dimensionamento do processo de compostagem se limitasse tão somente ao atendimento da legislação, a fase de maturação poderia ser descartada, pois a ênfase presente na lei refere-se à higienização do composto. Cabe recomendar ainda qual seria o tempo mínimo de maturação adequado de forma a não prejudicar o solo devido a liberação de substâncias deletérias e conseqüentemente diminuir o tamanho do galpão e custos operacionais.
- A montagem inicial da leira mostrou-se crítica no processo, pois a partir daí que se criam condições para o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica. Para que isto ocorra é necessário que se criem condições de porosidade suficiente na leira de modo a torná-la predominantemente aeróbia. Uma umidade excessiva da mistura de lodo e agente estruturante pode inviabilizar estas condições aeróbias. Outros fatores operacionais que influenciam este desenvolvimento aeróbio inicial são referentes ao equipamento enleirador. Para o caso do teste piloto realizado, o equipamento enleirador utilizado foi objeto de vários ajustes e possibilitou a execução de uma leira adequada. Outra consideração importante nesta fase inicial refere-se a um maior número de revolvimentos do equipamento enleirador na mistura inicial, propiciando uma estrutura devidamente porosa que permitiu a sua aeração.
- O processo de compostagem apesar de incorporar uma significativa parcela de sólidos secos ao lodo, não leva necessariamente a um aumento de volume ou de massa no produto final. Para o estudo realizado houve uma redução de 58% de massa em relação a quantidade original de lodo.
- Uma das maiores críticas em relação à compostagem refere-se à geração de maus odores, ocasionados principalmente devido a falhas operacionais. PEREIRA NETO (2000), relatou que um dos principais entraves na operação de usinas de compostagem de lixo no país é a falta de mão de obra capacitada e raramente encontra-se coordenando uma usina de compostagem, pessoas especializadas ou treinadas para tal função. Recomenda-se que a operação de compostagem seja devidamente coordenada por um profissional treinado e capacitado, caso este tipo de tratamento seja o escolhido para a ETE Limoeiro.
- O agente estruturante escolhido para a compostagem do lodo da ETE Limoeiro foi o bagaço de cana. Este material ainda é considerado resíduo em muitas regiões, no entanto, há indícios de que algumas usinas vêm desenvolvendo tecnologias de reaproveitamento deste bagaço de cana para geração de energia elétrica. Recomenda-se sempre a busca permanente de outros agentes estruturantes de forma a tornar a solução dependente de uma única matéria prima. Pode-se recomendar, por exemplo, a utilização de podas de árvores oriundas do trabalho das prefeituras municipais como agente estruturante. Para isto tornar-se operacional, deve-se disponibilizar uma máquina trituradora para tornar as podas de árvores em agente estruturante.
- Os agentes estruturantes utilizados em compostagem são gerados de forma sazonal. Por outro lado a produção de lodo é contínua e dificilmente pode ser acumulada por muitos meses. É muito difícil estimar a compatibilização entre a demanda e a oferta, devido a esta sazonalidade e também devido a possibilidade de se trabalhar com diferentes agentes estruturantes. Esta sazonalidade pode levar a

custos operacionais flutuantes. A prática desta compostagem poderá fornecer subsídios locais para checar se esta viabilidade econômica se sustentará.

- As características do lodo da ETE Limoeiro de alta umidade e de alta proporção de SV/ST tornaram a compostagem uma alternativa interessante de tratamento do lodo. Uma recomendação que pode ser derivada das observações deste trabalho é checar num sistema de lodos ativados convencional (decantador primário, tanque de aeração, decantador secundário e digestor anaeróbio de lodo), a influência de “by-pass” do lodo secundário nos digestores. Este lodo secundário seria então misturado ao lodo primário (que permaneceria um tempo maior de degradação no digestor anaeróbio de lodo) e seguiria daí para a desidratação. Acredita-se que estes sólidos voláteis do lodo secundário favoreceriam o desenvolvimento de bactérias termofílicas na compostagem e conseqüentemente favorecendo a destruição de organismos patogênicos. No entanto, deveria se fazer a checagem das dosagens de agente estruturante em função do teor de sólidos da torta resultante da mistura de um lodo secundário com o lodo primário digerido. E partir daí fazer o balanço econômico de uma possível vantagem econômica.
- Independente de a solução ser de estabilização com cal ou compostagem é necessário a instalação de um galpão de processamento de lodo. Para o caso da ETE Limoeiro, o galpão de compostagem resultou numa menor área, sendo a opção adotada para o tratamento do lodo.
- Apesar da compostagem para ETE Limoeiro ser mais atraente, recomenda-se um desenvolvimento técnico em escala real para tornar o lodo estabilizado com cal mais manipulável. Uma alternativa de curto prazo para o pós-tratamento do lodo com cal é a disposição temporária no aterro exclusivo de resíduos da ETE Limoeiro (em forma de lagoas), de forma a permitir a um aumento no teor de sólidos e torná-lo mais manipulável. Recomenda-se realizar este tipo de pós-tratamento de lodo com cal e checar as condições de secagem adicional, bem como estudar formas de se retirar o lodo destas lagoas de forma a não comprometer a integridade física das lagoas, principalmente o fundo com impermeabilização. Desta forma haveria uma flexibilidade operacional de se trabalhar com um material ou outro, e não se criar uma dependência para uma única solução.
- A solução de tratamento de lodo através da compostagem possui o atrativo ambiental de se dar um destino adequado para 2 tipos de resíduos (lodo e agente estruturante). Já a estabilização de lodo com cal, utiliza-se um material nobre para realizar o tratamento do resíduo/lodo. Deste ponto de vista, a estabilização com cal é menos atrativa do que a compostagem. Na compostagem, o processo de mistura de 2 resíduos leva necessariamente a uma diminuição na massa final. Já na estabilização com cal, o que ocorre de fato é um aumento na massa final de resíduos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. METCALF & EDDY. Wastewater engineering: treatment and reuse, 4th edition. Mc Graw Hill, 2003.
2. PEGORINI, E.S.; TAMANINI, C.R.; HOPPEN, C.; LEITE, B. Z.; WEIGERT, G. Aperfeiçoamento do processo de higienização através da caleação: I potencial de pasteurização, in: anais do VIII Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, SIBESA, 2006.
3. PEREIRA NETO, J. T. Usinas de compostagem de lixo: aspectos técnicos, operacionais, econômicos e de saúde pública. In: Anais do Seminário Reciclagem de resíduos sólidos domiciliares, SMA, maio de 2000. Internet: http://www.ambiente.sp.gov.br/residuos/ressolid_domoc/inicio.htm
4. PROSAB. Manual prático para compostagem de biossólidos. 1999.
5. SPELLMAN, F.R. Dewatering biosolids, Technomic Publishing Company, 1997.
6. SPINOSA; VESILIND. Sludge into biosolids: processing, disposal, utilization. IWA Publishing, 2001.
7. TSUTIYA et al. Biossólidos na agricultura. SABESP, 2001.
8. VESILIND, A. Wastewater treatment plant design. WEF; IWA (2003)
9. WEF. Design of municipal wastewater treatment plants, 4th edition, Volume 3, 1998.
10. WEF. Operation of municipal wastewater treatment plants, 5th edition, Volume 3, 1996.