

**VINICIO COSTA BRUNI**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO OPERACIONAL DE COMPOSTAGEM AERADA DE  
LODO DE ESGOTO E PODA VEGETAL EM REATORES FECHADOS**

**Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia de  
Recursos Hídricos e Ambiental do Programa de  
Pós-Graduação da Universidade Federal do  
Paraná.**

**Orientação: Profª Maria Cristina Borba Braga, PhD**

**CURITIBA  
2005**

## TERMO DE APROVAÇÃO

VINICIO COSTA BRUNI

### AVALIAÇÃO DO PROCESSO OPERACIONAL DE COMPOSTAGEM AERADA DE LODO DE ESGOTO E PODA VEGETAL EM REATORES FECHADOS

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos professores:

PRESIDENTE:

---

Orientadora: **Profª Dra. Mª Cristina Borba Braga**  
Universidade Federal do Paraná

MEMBROS:

---

Prof Dr **Luiz Antonio C. Lucchesi**  
Universidade Federal do Paraná

---

Prof Dr **Miguel Mansur Aisse**  
Universidade Federal do Paraná

---

Profª Drª. **Sandra Mara Alberti**  
Universidade Federal do Paraná

Curitiba, 06 de outubro de 2005

Aos meus pais Edda e Vinício pelo apoio,  
e minhas filhas Bruna e Bárbara, os  
grandes amores da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Quando iniciamos nossa jornada não imaginamos quanto trabalho vamos ter. Ao concluí-la, a preocupação é lembrar de todos que colaboraram com este trabalho.

Quando pensei em fazer este agradecimento, a primeira coisa foi tentar ser justo e para isto adotei um critério, pelo menos lógico, já que foram necessários vários critérios para desenvolver esta pesquisa. Assim a ordem será a família, professores, amigos e colaboradores.

Agradeço aos meus pais, a quem dedico este título, pela compreensão, motivação, apoio e incentivo em todos os momentos.

Às minhas filhas Bruna e Bárbara, agradeço a paciência e o tempo compartilhado no computador, amor incondicional e razão da minha vida; a Simone pela grandeza, pelo aprendizado e companhia neste tempo todo. Obrigado Mariana, pela ajuda e torcida.

Aos nossos coordenadores, pelos grandes conselhos do Prof. Cristóvão, e o apoio da Professora Mirian, e a lista espetacular de professores: Carlos, Sandra Mara, Janissek, Fill, Pawloski, e o Professor Eloy, que foi aquele que teve mais paciência para me suportar, pois foram três disciplinas, com sua genialidade, a quem passei mais que respeitar, admirá-lo.

Alguns professores colaboraram de maneira indireta e não sabem, Professor Francisco Gomide e Professor Camil Gemael, meus ídolos da graduação e exemplos de profissionais. Também, a Professora Dulce, neste caso o tempo foi fantástico ao me fazer entender e refletir, e o Professor Henrique, mais que contemporâneo da graduação, ambos, além das conversas, permitiram praticar a didática que estava de lado desde os tempos de monitoria.

Acredito que agradecer a orientadora não será nenhuma novidade, mas à

professora Maria Cristina Borba Braga dedico este parágrafo, pois mais que orientadora, foi professora, crítica, conselheira, e principalmente amiga, sempre nos momentos certos, com muito equilíbrio, e lógico, mantendo seu bom humor. Caso este agradecimento contenha algum erro, foi o único documento que ela não revisou, muitas vezes.

Aos meus amigos, estes sim, uma lista infinda, que não me arriscaria a citar todos os Andrés, Joões, Marias, Pedros e Sonias Iaras, que sozinhos, em dupla ou grupos, estudaram e trabalharam horas e horas comigo, que trocaram livros e informações preciosas, co-orientaram, e principalmente, todos os dias torceram por mim. Neste documento não poderia faltar um dos meus melhores amigos, o famoso Hélio. Ele foi, e ainda é, um exemplo de parceiro e companheiro para qualquer luta.

A equipe da Tibagi Sistemas comandada pelo seu Diretor Engenheiro Bruno Lacombe Miraglia pela liberdade de trabalho e horário, apoio técnico e financeiro, visão estratégica e empresarial, além da enorme confiança depositada, e pelo Engenheiro Hudson, com sua fantástica inteligência, amizade, cumplicidade e ainda, respeito à hierarquia adquirida nos tempos de quartel. Estagiários e hoje engenheiros, Lawrence e André, Engenheiro Nivaldo, pela colaboração. Os demais funcionários da Unidade de Valorização de Orgânicos e os demais funcionários da Tibagi Engenharia.

A equipe do CEFET no apoio aos ensaios, representada pelas Professoras Fátima, Valma, Edilsa e suas alunas Cristiane, Luiza, Yara, Tássia e Bárbara, e recentemente Juliana e Fran, pela ajuda na impressão final e Antonio Fernandes, grande amigo e parceiro comercial, todos da Nateec.

Alguns colaboradores como a bióloga Adriana, do Instituto Ambiental do Paraná, Engenheiro Eduardo Pegorini, pela atenção e informações, e outros mais distantes como a Dr<sup>a</sup> Cláudia Coutinho Nóbrega da Paraíba, o Engenheiro Valter da Prefeitura de São Paulo e Olívio Britto, de Fortaleza.

Deixei propositalmente por último, mas não menos importante, a homenagem para um personagem maravilhoso de nossa Universidade. Uma pessoa genial, simples, respeitada por todos e enorme em todos os sentidos, que há mais de 30 anos acompanha minha vida estudantil e profissional. Responsável direto pela transformação da minha vida, colocando-me novamente no caminho acadêmico, caminho que eu nunca devia ter abandonado. Através do seu convite e indicação iniciei esta caminhada e, neste momento, não existem palavras para expressar a alegria, gratidão e emoção que sinto ao concluir este Mestrado. Muito obrigado Professor Doutor, Diretor do Setor de Tecnologia, o Meu Amigo Mauro Lacerda Santos Filho.

“O homem precisa SABER SER”

*Zezeito Bahls (1924 – 1989)*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiv
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	xvi
<b>RESUMO</b> .....	xviii
<b>ABSTRACT</b> .....	xix
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 VISÃO GERAL DO PROBLEMA .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	4
1.2.1 Objetivo Geral .....	4
1.2.2 Objetivos Específicos .....	4
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	6
2.1 ESTADO DA ARTE .....	6
2.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos e Reciclagem .....	6
2.1.2 Legislação sobre Resíduos Sólidos.....	12
2.2 DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	15
2.2.1 Aterros Sanitários .....	15
2.2.2 Problemas em Aterros Sanitários .....	16
2.3 TRATAMENTO DE ESGOTOS .....	19
2.3.1 Esgoto .....	19
2.3.2 Processos de Tratamento .....	20
2.4 COMPOSTAGEM.....	21
2.4.1 Histórico .....	21
2.4.2 Definição .....	22
2.4.3 Classificação .....	24
2.4.3.1 Biologia .....	24
2.4.3.2 Temperatura.....	24
2.4.3.3 Ambiente .....	24
2.4.3.4 Processo .....	24
2.4.4 Métodos de Compostagem.....	25

2.4.4.1	Compostagem Natural .....	25
2.4.4.1.1	Artesanal em Leiras com Revolvimento Manual ou Mecânico .....	25
2.4.4.2	Compostagem Acelerada.....	26
2.4.4.2.1	Leiras Estáticas com Aeração Forçada.....	26
2.4.4.2.2	Reatores Fechados com Aeração Forçada.....	29
2.4.5	Fases da Compostagem .....	30
2.4.6	Fatores que Influenciam no Processo de Compostagem .....	32
2.4.6.1	Temperatura.....	32
2.4.6.2	Aeração.....	33
2.4.6.3	Umidade.....	33
2.4.6.4	pH.....	33
2.4.6.5	Granulometria.....	34
2.4.6.6	Relação Carbono / Nitrogênio .....	34
2.4.6.7	Matéria Orgânica e Sólidos Voláteis .....	35
2.4.6.8	Microbiologia do Processo .....	36
2.4.7	Composto Orgânico.....	38
2.4.7.1	Qualidade.....	38
2.4.7.2	Contaminantes Químicos e Biológicos.....	39
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>44</b>
3.1	LOCALIZAÇÃO DA UNIDADE OPERACIONAL.....	44
3.2	A TECNOLOGIA KNEER® .....	44
3.2.1	Descrição do Funcionamento da Unidade.....	44
3.2.2	Componentes do Sistema .....	47
3.3	MATÉRIAS-PRIMAS .....	49
3.3.1	Lodo de Esgoto .....	49
3.3.2	Poda Vegetal .....	49
3.4	MISTURA .....	50
3.4.1	Caracterização da Mistura.....	50
3.4.2	Dosagem da Mistura .....	52
3.4.3	Amostragem .....	52
3.4.3.1	Tamanho Amostral.....	52

3.4.3.2	Amostrador e Ponto de Coleta .....	52
3.4.3.3	Frequência da Amostragem .....	53
3.4.4	Parâmetros Físico-Químicos .....	53
3.4.4.1	Peso Específico .....	53
3.4.4.2	Umidade.....	53
3.4.4.3	Granulometria .....	53
3.4.4.4	Temperatura.....	54
3.4.4.5	pH .....	54
3.4.4.6	Sólidos Voláteis e Fixos .....	54
3.4.4.7	Carbono Orgânico.....	54
3.4.4.8	Matéria Orgânica.....	55
3.4.4.9	Nitrogênio Total.....	55
3.4.4.10	Relação Carbono / Nitrogênio .....	55
3.4.5	Microorganismos .....	55
3.4.6	Metais Pesados .....	56
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>57</b>
4.1	PROBLEMAS DETECTADOS NO FORNECIMENTO DA MATÉRIA PRIMA	57
4.2	ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA.....	59
4.3	PROCESSAMENTO DA MISTURA DENTRO DOS REATORES .....	61
4.3.1	Umidade .....	63
4.3.2	Relação Carbono / Nitrogênio .....	64
4.3.3	Temperatura .....	65
4.3.4	pH.....	67
4.3.5	Matéria Orgânica e Sólidos Voláteis.....	68
4.3.6	Microorganismos .....	69
4.3.7	Metais Pesados .....	71
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>73</b>
5.1	OPERAÇÃO DO SISTEMA E QUALIDADE DO COMPOSTO .....	73
5.2	SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES .....	74
5.2.1	Fornecimento de Matéria-Prima .....	74
5.2.2	Alimentação do Sistema .....	74

5.2.3	Processamento da Mistura.....	75
5.2.4	Organização e Métodos .....	75
5.2.5	Pesquisa.....	76
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>83</b>
ANEXO 1	"LAY OUT" DA UNIDADE .....	84
ANEXO 2	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE TODAS AS AMOSTRAS	86
ANEXO 3	PLANILHAS DE CONTROLE ADMINISTRATIVO – RASTREABILIDADE .....	89
ANEXO 4	FLUXOGRAMA DO CONTROLE DE QUALIDADE E DO PROCESSO	94

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	SAÍDA DE CHORUME – ATERRO DA CAXIMBA CURITIBA: A) CANALETA COM CHORUME, B) MEDIDOR DE VAZÃO DE CHORUME .....	17
FIGURA 2.2	VISTA GERAL – ATERRO DA CAXIMBA CURITIBA.....	18
FIGURA 2.3	LEIRA ESTÁTICA AERADA – SANEPAR .....	27
FIGURA 2.4	DETALHE DE AERAÇÃO – SANEPAR.....	28
FIGURA 2.5	USINA DE COMPOSTAGEM DE VILA LEOPOLDINA, SP - SISTEMA DANO: A) CAIXÕES ALIMENTADORES, B) DETALHE DA ENTRADA DO REATOR, C) VISTA EXTERNA DOS REATORES HORIZONTAIS, D) DETALHE DA SAÍDA DO REATOR .....	30
FIGURA 2.6	ESQUEMA DAS FASES DA COMPOSTAGEM .....	31
FIGURA 2.7	CURVA-PADRÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DURANTE O PROCESSO DE COMPOSTAGEM .....	32
FIGURA 3.1	CARREGAMENTO DOS SILOS-DOSADORES COM PÁ-CARREGADEIRA .....	45
FIGURA 3.2	ESTEIRAS TRANSPORTADORAS, MISTURADOR E REATORES	46
FIGURA 3.3	FLUXO DE AR DENTRO DO REATOR.....	46
FIGURA 3.4	FLUXOGRAMA DA UNIDADE.....	48
FIGURA 4.1	DETALHE DA APLICAÇÃO DO COMPOSTO PRODUZIDO APÓS APLICAÇÃO SUPERFICIAL EM GRAMADO .....	59

FIGURA 4.2	DETALHE DA APLICAÇÃO DO COMPOSTO PENEIRADO APÓS APLICAÇÃO SUPERFICIAL EM GRAMADO .....	60
FIGURA 4.3	INTERVENÇÃO EMERGENCIAL - ABERTURA PARA SAÍDA DO MATERIAL NO APARELHO MISTURADOR .....	61
FIGURA 4.4	RETIRADA DA PRIMEIRA AMOSTRA DA BATELADA 1 .....	63
FIGURA 4.5	VARIAÇÃO DA UMIDADE NAS BATELADAS 1 E 3 .....	63
FIGURA 4.6	VARIAÇÃO DA RELAÇÃO CARBONO / NITROGÊNIO NAS BATELADAS 1 E 3 .....	64
FIGURA 4.7	VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA BATELADA 1 .....	65
FIGURA 4.8	VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA BATELADA 3.....	66
FIGURA 4.9	VARIAÇÃO DO pH NAS BATELADAS 1 E 3.....	68
FIGURA 4.10	VARIAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA NAS BATELADAS 1 E 3....	69
FIGURA 4.11	VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS VOLÁTEIS NAS BATELADAS 1 E 3 ..	69
FIGURA 4.12	DESCARGA BATELADA 3 – PRESENÇA DE ACTINOMICETOS..	72
FIGURA A.1.1	“LAY OUT“ DA UNIDADE .....	85
FIGURA A.4.1	FLUXOGRAMA DO CONTROLE DE QUALIDADE E DO PROCESSO .....	95

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	QUANTIDADE DE LIXO COLETADO EM TONELADAS POR DIA NO BRASIL E SUAS REGIÕES – 2000 .....	7
TABELA 2.2	CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS GRUPOS DE MICROORGANISMOS ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE COMPOSTAGEM .....	37
TABELA 2.3	ESPECIFICAÇÕES, GARANTIAS E CARACTERÍSTICAS DOS FERTILIZANTES ORGÂNICOS, MISTO E COMPOSTO .....	38
TABELA 2.4	CONCENTRAÇÕES DE METAIS PESADOS EM LODO DA ETE BELÉM E EM RALF EXPRESSO EM mg/kg EM RELAÇÃO AO PESO SECO.....	40
TABELA 2.5	NÍVEL MÉDIO DE PATÓGENOS E DE INDICADORES ENCONTRADOS NO LODO DA ETE BELÉM – CURITIBA.....	41
TABELA 2.6	TEMPERATURAS E TEMPOS DE EXPOSIÇÃO PARA A DESTRUIÇÃO DE MICROORGANISMOS PATOGÊNICOS.....	42
TABELA 2.7	NÍVEIS DE ALERTA E MÁXIMO ADMISSÍVEL DE METAIS PESADOS EM LODOS DE ESGOTOS DESTINADOS A UTILIZAÇÃO AGRÍCOLA .....	43
TABELA 3.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO LODO DE ESGOTO	49
TABELA 3.2	CARACTERÍSTICAS MÉDIAS DO RESÍDUO VEGETAL USADO COMO ESTRUTURANTE NA PESQUISA .....	50
TABELA 3.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA MISTURA NO DIA ZERO DAS BATELADAS 1 E 2 .....	51

TABELA 4.1	RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS DAS BATELADAS 1 E 3 REFERENTE À PRESENÇA DE TERMOTOLERANTES, COLIFORMES TOTAIS E ENTEROCOCCUS FECALIS .....	70
TABELA 4.2	RESULTADO DAS ANÁLISES DE METAIS PESADOS.....	71
TABELA A.2.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE TODAS AS AMOSTRAS DA BATELADA 1 .....	87
TABELA A.2.2	CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE TODAS AS AMOSTRAS DA BATELADA 3.....	88
TABELA A.3.1	CONTROLE DE RECEBIMENTO E CARREGAMENTO DE RESÍDUO .....	90
TABELA A.3.2	CONTROLE DE RECEBIMENTO E CARREGAMENTO DE MATERIAL ESTRUTURANTE .....	91
TABELA A.3.3	CONTROLE DE PRODUÇÃO DE COMPOSTO.....	92
TABELA A.3.4	VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE DO COMPOSTO.....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- APHA - American Public Health Association
- ART. – Artigo
- CAP. – Capítulo
- Cd – Cádmiio
- CEFET – PR - Centro de Educação Tecnológica do Paraná
- CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem
- CETESB – Companhia de Tecnologia em Saneamento Básico
- CFSA – Composto Fino Seco ao Ar
- CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- Cr - Cromo
- CTC – Capacidade de Troca Catiônica
- Cu – Cobre
- DLP – Departamento de Limpeza Pública
- ECO 92 – Conferência Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas – Rio de Janeiro, 1992
- EIA – Estudo de Impacto Ambiental
- ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
- Fe – Ferro
- Hg – Mercúrio
- HP – Horse Power
- IAP – Instituto Ambiental do Paraná

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ISWA - International Solid Waste Association

Mn – Manganês

Mo – Molibdênio

NBR – Norma Brasileira

Ni – Níquel

ONU – Organização das Nações Unidas

Pb – Chumbo

PMC – Prefeitura Municipal de Curitiba

PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo

PN – Pressão Nominal

PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico

RALF – Reator Anaeróbio de Lodo Fluidizado

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

RMC – Região Metropolitana de Curitiba

rpm – rotações por minuto

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná

SNAD - Secretária Nacional da Defesa Agropecuária

TFSA – Terra Fina Seca ao Ar

UFC – Unidade de Formação de Colônias

UFPR – Universidade Federal do Paraná

V – Volt

Zn – Zinco

## RESUMO

O aumento da população, associado à industrialização e ao desenvolvimento econômico, que proporcionam maior facilidade de acesso ao consumo e maior diversificação dos produtos, apresenta, como consequência, um aumento na geração de resíduos, sugerindo a procura por novas alternativas de disposição final. Este estudo teve como objetivo estudar uma alternativa técnica e tecnológica de compostagem confinada e acelerada para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, por meio de aeração forçada em ambiente fechado, a tecnologia de compostagem acelerada KNEER<sup>®</sup>. A observação “in loco” e a avaliação das características do sistema visaram a identificação dos pontos relacionados às interferências no processo de compostagem aerada confinada para avaliar a viabilidade técnica do tratamento de lodo de esgoto, associado a uma fonte de carbono, representada por resíduos de poda vegetal. Foram avaliadas as condições de operação do sistema utilizado para a compostagem, tais como: o fornecimento das matérias-primas, a alimentação e o processamento da mistura para a alimentação dos reatores e avaliação da organização e métodos adotados na unidade. Foram, ainda, determinadas as características físico-químicas da mistura dos substratos utilizados, isto é, de lodo de esgoto e podas vegetais, para a produção do composto. Ainda foram avaliadas as suas características de tratabilidade como umidade e relação carbono/nitrogênio. Os parâmetros temperatura, pH, sólidos voláteis e fixos, fósforo, microorganismos patogênicos e metais pesados, também foram avaliados. Os dados coletados permitiram concluir que o sistema apresenta deficiência em relação aos silos dosadores e ao preparo da mistura para a alimentação dos reatores, o que resultou em desequilíbrio na dosagem da massa, principal causa dos problemas identificados. Com o desequilíbrio da dosagem, parâmetros importantes em relação ao desenvolvimento e acompanhamento do processo de compostagem foram prejudicados, entre eles a umidade das matérias-primas e, por conseguinte, da mistura de alimentação do reator, além da relação carbono/nitrogênio. A deficiência relativa à manutenção das condições de alimentação resultou na impossibilidade de uma avaliação completa do composto produzido, dentro dos prazos indicados pelo fabricante, de forma a possibilitar a avaliação da eficiência do sistema em relação à redução das etapas de compostagem em processo acelerado. Em relação à presença de microorganismos e metais pesados, para o período de compostagem de 14 dias, especificado pelo fabricante, a qualidade do composto pode ser considerada boa ou adequada. Não foi observada a presença de coliformes totais e termotolerantes nas amostras retiradas no décimo quarto dia de processo, e de enterococcus fecais nas amostras retiradas no vigésimo primeiro dia. Da mesma forma, em relação aos metais pesados, pode-se afirmar que os valores obtidos para as concentrações foram menores do que os sugeridos pelo Estado do Paraná. A única exceção foi o cobre, que apresentou concentração de 1.165 mg/kg, no quadragésimo segundo dia da primeira batelada, sendo aproximadamente 10% maior do que o limite máximo sugerido.

## ABSTRACT

The increase in population, the industrialization and the economic development have facilitated consumerism and diversification of the range of products, resulting in an increase in the number of residues thus leading to the search for new alternatives to waste disposal. The aim of this work was to analyse a technical and technological alternative of accelerated in-Vessel composting for the treatment of the organic fraction of urban solid waste through forced airing in a closed environment, the KNEER<sup>®</sup> accelerated composting technology. The “in loco” observation and the evaluation of the system features aimed at the identification of the points related to the interference in the aired in-Vessel composting in order to evaluate the technical feasibility of the sewage sludge treatment, associated to a carbon source represented by vegetal pruning residues. The conditions of the operation system were analysed, such as: the raw material supply, the feeding and mixture process for the reactors supply as well as the evaluation of the organization and methodology used in the unit. The physical and chemical characteristics of the substrates, that is, the sewage sludge and the vegetal pruning to produce the composting, were determined. Characteristics such as moisture and carbon/nitrogen relationship were also evaluated. The parameters temperature, pH, solid and fixed volatiles phosphorus, pathogenic microorganisms and heavy metals were also evaluated. The analysis of collected data lead to the conclusion that there were deficiencies in the system concerning the dosage silos and the preparation of the mixture to feed the reactors, resulting in an imbalance of the mixture dosage, the main cause of the identified problems. The imbalance of the dosage affected important parameters of the development and composition process, such as the moisture of the raw materials and, consequently, the mixture to feed the reactor, as well as the carbon/hydrogen relationship. The deficiency in the feeding maintenance resulted in the impossibility of a complete evaluation of the compost produced within the time spam recommended by the manufacturer, in order to evaluate the efficiency of the system concerning the reduced stages for the accelerated process. As for the presence of microorganisms and heavy metals for the 14-day period of composition, specified by the manufacturer, the quality of the composting can be considered good or adequate. Neither *total coliformes* or *thermotolerants* were detected in the samples withdrawn on the 14<sup>th</sup> day of the process, nor *fecal enterococcus* in the samples withdrawn on the 21<sup>st</sup> day. Similarly, it can be pointed out that the values obtained for the concentration of heavy metals were lower than the ones suggested by the State of Paraná. The only exception was for copper, which presented a concentration of 1,165 mg/kg on the 42<sup>nd</sup> day of the first load, 10% above the suggested limit.

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 VISÃO GERAL DO PROBLEMA**

Discussões, estudos e tratados procuram orientar sobre as conseqüências dos impactos, das atividades antropomórficas, ao meio ambiente, que sofre com problemas, como a crescente escassez dos recursos naturais renováveis e não renováveis, que são agravados pela falta de atenção dada às necessidades de manutenção dos frágeis sistemas das grandes cidades.

As atenções voltadas a estes fatores têm determinado a tomada de decisões em relação à preservação ambiental, visando o desenvolvimento sustentável que foi objeto principal da Conferência da ONU sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento do Rio de Janeiro de 1992/ECO-92. O conceito de desenvolvimento sustentável especifica que o direito ao desenvolvimento deve ser exercido de tal forma que responda eqüitativamente às necessidades de desenvolvimento e às necessidades ambientais. Atualmente, este conceito tem sido adotado nos âmbitos industrial, econômico, de planejamento e de desenvolvimento urbano (GIANSANTI, 1998; URBAN, 2002).

Entre as grandes preocupações do mundo moderno, uma das primordialmente tratadas tem sido a geração de resíduos, fator inegável e inevitável da sociedade de consumo, que pode ser majorada em função da globalização, fato refletido no modo de agir e de viver do cidadão. A industrialização e o desenvolvimento econômico proporcionam maior facilidade de acesso ao consumo e maior diversificação dos produtos. Como conseqüência, implicam no aumento da geração de resíduos. Portanto, visando o desenvolvimento sustentável, a administração pública, em todos os âmbitos, deve considerar a produção e a destinação final dos resíduos como questões que envolvam aspectos sociais, de saúde pública, econômicos e ambientais (MOTTA, 1986; FIGUEIREDO, 1995; GRIPPI, 2001).

Segundo ZANETTI (1998), atualmente, os resíduos sólidos municipais são de grande interesse, pois a quantidade produzida tem aumentado, em função do aumento populacional nas cidades, sugerindo então uma procura por novas alternativas de disposição final, o que está de acordo com a opinião de outros autores, não apenas no Brasil (BÜTTENBENDER, 2004; SOARES e GRIMBERG, 2000; VAZ e CABRAL, 2000; CALDAS, 2000).

O aumento da atividade industrial e o crescimento populacional, mais do que diminuir as heranças para as futuras gerações, coloca em risco a qualidade de vida da presente geração. Segundo KASSENKA (1999), há mais de 50 anos, a disposição de resíduos urbanos tem se tornado um difícil problema para o desenvolvimento dos países, pois interfere diretamente no saneamento básico. Muitas cidades e comunidades adotam métodos inadequados de disposição dos resíduos, os quais são responsáveis por problemas ambientais como a contaminação das águas superficiais e sub-superficiais, do solo e do ar. Também, como consequência das condições inadequadas de disposição dos resíduos sólidos urbanos, aparecem a proliferação de vetores, que coloca em risco a saúde da população, a alteração da estética da paisagem e a geração de odores desagradáveis, que contribuem para a diminuição do valor comercial de venda da terra (BRAGA e BONETTO, 1993; IBGE, 2000; SOARES e GRIMBERG, 2000).

Em algumas cidades, no intuito de diminuir as implicações resultantes da má disposição, além dos resíduos sólidos urbanos, o lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto acaba se tornando um componente a ser incluído no gerenciamento de resíduos sólidos (SOARES e GRIMBERG, 2000; VAZ e CABRAL, 2000; CALDERONI, 2003; BÜTTENBENDER, 2004).

De maneira específica, em Curitiba, PR, são gerados, em média, 120 t/d de resíduos provenientes da coleta vegetal, enquanto a Estação de Tratamento de Esgotos Belém, operada pela Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR,

produz aproximadamente 14t/d de lodo de esgoto como matéria seca. Estes valores somados representam em torno de 10% dos resíduos totais produzidos pelo município (GISELE MARTINS, Departamento de Limpeza Pública de Curitiba, contato pessoal, 2004; LAÉRCIO SKIBA, SANEPAR, contato pessoal, 2005).

Na tentativa de se resolver ou minorar o problema da disposição de resíduos sólidos urbanos, algumas medidas têm sido tomadas, em relação às questões de produção de energia, geração de empregos e preservação dos recursos naturais renováveis e não renováveis. Entre alguns procedimentos que podem ser constantemente buscados pelas administrações públicas e pelas comunidades que objetivam o desenvolvimento sustentável estão a adoção de políticas de minimização de resíduos e a implantação de sistemas que possam otimizar a geração de produtos, além de aumentar a oferta de empregos e diminuir significativamente os impactos ao meio ambiente. A implantação de programas de reciclagem pode proporcionar a oportunidade de recuperar resíduos e transformá-los novamente em materiais utilizáveis. Desta forma, recuperar recursos de valor intrínseco, é uma justificativa para a reciclagem. Para isto, é necessário que sejam encontradas soluções, não necessariamente de baixo custo, e estabelecidos critérios que possam facilitar a implantação e a operação desses sistemas e que sejam de grande durabilidade (HASSOL, 1989, SOARES e GRIMBERG, 2000; VAZ e CABRAL, 2000, CALDERONI, 2003; CALDAS, 2000; GRIPPI, 2001).

As soluções convencionais tais como os aterros sanitários e os incineradores, e mesmo a compostagem simplificada, além de todos os esforços levados a efeito até o momento, não foram suficientes para a solução dos problemas referentes à destinação de resíduos sólidos. As dificuldades de implantar soluções adequadas ocorrem tanto pela falta de recursos como pela falta de conhecimento técnico (MILARÉ, 2005).

Novas tecnologias podem ser avaliadas para contribuir com a destinação

adequada dos resíduos e, conseqüentemente, com a minimização dos impactos ambientais por eles provocados (CRISTINA BRAGA, contato pessoal, 2005).

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Em função das condições expostas e com a finalidade de colaborar na busca de soluções para estes problemas, o objetivo geral desta pesquisa foi estudar uma alternativa técnica e tecnológica de compostagem confinada e acelerada para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos, através de aeração forçada em ambiente fechado, a tecnologia de compostagem acelerada KNEER®.

Desta forma, este estudo foi levado a efeito visando a identificação dos pontos relacionados às características interferentes no processo de compostagem aerada confinada para, como subsídio, se avaliar a viabilidade técnica do tratamento de lodo de esgoto, associada a uma fonte de carbono, neste estudo, representada por resíduos de poda vegetal.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo desta pesquisa foram avaliadas as condições de operação do sistema utilizado para a compostagem, tais como: o fornecimento das matérias-primas, a alimentação e o processamento da mistura para a alimentação dos reatores e avaliação da organização e métodos adotados na unidade. Foram, ainda, determinadas as características físico-químicas da mistura dos substratos utilizados, isto é, de lodo de esgoto e podas vegetais, para a produção do composto. Também foram avaliadas as suas características de tratabilidade como umidade e relação carbono/nitrogênio.

O estudo desse sistema de compostagem pode definir condições para atestar uma nova metodologia de operação de unidades de tratamento e disposição final de

resíduos sólidos urbanos, e permitir sua adaptação e adequação ao mercado nacional.

Os resultados a serem obtidos poderão tornar-se um indicativo de alternativa para tratamento e destinação final de resíduos sólidos, diminuir os espaços de compostagem para otimizar a área de terreno a ser ocupada, e ainda, aumentar a produtividade do processamento de matéria orgânica, que pode representar um aumento na vida útil de aterros sanitários.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 ESTADO DA ARTE**

#### **2.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos e Reciclagem**

Os problemas ambientais, sociais e econômicos gerados pela produção de resíduos na sociedade moderna não se caracterizam tão somente pela inadequada disposição no meio ambiente, mas também, pela cada vez menor disponibilidade de áreas para dispor estes resíduos que, nos grandes centros urbanos, atingem volumes extremamente grandes. Enquanto os países desenvolvidos encontram problemas para selecionar áreas que atendam suas necessidades, os países em desenvolvimento defrontam-se com carências tecnológicas e falta de critérios e de controle na disposição final dos resíduos (RAMOS, 2004).

Para o Brasil, a comprovação foi consequência da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2000), que apresentou resultados dos quais pode ser salientado que, aproximadamente, 80% dos municípios brasileiros, isto é, 4.338, investem apenas 5% de seu orçamento anual nos serviços de limpeza pública e/ou coleta de lixo. Dos 8.381 distritos que dispõem de coleta, 5.993 dispõem o lixo em vazadouros a céu aberto, enquanto os que adotam aterros sanitários e aterros controlados são 1.452 e 1.868, respectivamente, como pode ser observado na Tabela 2.1.

Segundo a norma brasileira NBR 10.004/1987, “resíduos sólidos são aqueles resíduos que se encontram nos estados sólido e semi-sólido, e resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de

TABELA 2.1 – QUANTIDADE DE LIXO COLETADO, EM TONELADAS POR DIA NO BRASIL E SUAS REGIÕES – 2000

QUANTIDADE DE DIÁRIA DE LIXO COLETADO (t/d)										
Regiões	Total	Unidade de destino final do lixo coletado								
		Vazadouro		Aterros		Estações		Incineração	Locais não fixos	Outros
		A céu aberto	Em áreas degradadas	Controlado	Sanitário	Compostagem	Triagem			
Brasil	228.413,0	48.321,7	232,6	84.575,5	82.640,3	6.549,7	2.265,0	1.031,8	1.230,2	1,566,2
Norte	11.067,1	6.279,0	56,3	3.133,9	1468,8	5,0	-	8,1	95,6	20,4
Nordeste	41.557,8	20.043,5	45,0	6.071	15.030,1	74,0	92,5	22,4	128,4	50,0
Sudeste	141.616,8	13.755,9	86,6	65.851,4	52.542,3	5.437,9	1.262,9	945,2	781,4	953,2
Sul	19.874,8	5.112,3	36,7	4.833,9	8.046,0	347,2	832,6	30,1	119,9	516,1
Centro-Oeste	14.296,5	3.131,0	8,0	4.684,4	5.553,1	685,6	77,0	26,0	104,9	26,5

FONTE: PESQUISA NACIONAL DO SANAMENTO BÁSICO (IBGE, 2000)

esgotos ou corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

Em função das constatações em relação à geração e considerando a abrangência dada pela definição dos resíduos sólidos, todas as atividades produtivas vitais ao progresso e até mesmo à sobrevivência do ser humano contribuem, de forma significativa, para agravar a situação. Essa preocupação transcende a esfera de técnicos diretamente ligados às áreas de saneamento e é bem traduzida nas palavras de Fritjof Capra:

“Acredito que a visão de mundo sugerida pela física moderna seja incompatível com a nossa sociedade atual, a qual não reflete o harmonioso estado de inter-relacionamento que observamos na natureza. Para alcançar tal estado de equilíbrio dinâmico, será necessária uma estrutura social e econômica radicalmente diferente: uma revolução cultural na verdadeira acepção da palavra. A sobrevivência de toda a nossa civilização pode depender de sermos ou não capazes de realizar tal mudança”.

As últimas duas décadas de nosso século vêm registrando um estado de profunda crise mundial. É uma crise complexa, multidimensional, cujas facetas afetam todos os aspectos de nossa vida social – a saúde e o modo de vida, a qualidade do meio ambiente e das relações sociais, da economia, tecnologia e política. É uma crise de dimensões intelectuais, morais e espirituais; uma crise de escala e premência sem precedentes em toda a história da humanidade. Pela primeira vez, temos que nos defrontar com a real ameaça de extinção da raça humana e de toda a vida no planeta” (CAPRA, 1982).

A análise de tais fatos deveria conduzir à concentração de esforços no sentido da atuação direta na gestão e no gerenciamento dos resíduos sólidos, em termos de parcerias de administrações estaduais e municipais, com foco no planejamento da gestão integrada (SILVA, 2003).

Neste contexto alguns programas foram criados e algumas iniciativas foram tomadas, tais como: “Programas dos R's – Reduzir, Reutilizar, Reciclar, Repensar e Recuperar Recursos” e “Coletas Diferenciadas” para os componentes não biodegradáveis presentes no conjunto dos resíduos urbanos (CALDAS, 2000).

No sentido de melhorar os programas de coleta e destinação final de

resíduos sólidos, a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte implantou, em fevereiro de 1993, um Modelo de Gestão de Resíduos Sólidos, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais decorrentes da geração de resíduos. Os principais pontos do programa foram (ALMEIDA, 2000):

- Compostagem Simplificada;
- Projeto Ponto Verde;
- Reciclagem de Entulhos;
- Projeto Vilas e Favelas;
- Coleta Seletiva;
- Biorremediação do aterro.

Neste sentido, BRAGA e BONETTO (1993) apresentaram os programas implantados no município de Curitiba:

- “Câmbio Verde” iniciado em Janeiro de 1989, com baixo custo para áreas da periferia;
- “Lixo que não é lixo” implantado em Novembro de 1989 e é baseado no princípio de que materiais não biodegradáveis ou parcialmente degradáveis podem ser reciclados e/ou reusados e;
- “Educação Ambiental” que procura achar soluções alternativas práticas, envolver a comunidade e permitam alterar seu comportamento e a atenção em relação ao meio ambiente.

No caso da cidade de Curitiba, apesar das iniciativas, e de acordo com as informações obtidas junto ao Departamento de Limpeza Pública da Secretaria Municipal de Meio Ambiente, e ao Instituto Lixo e Cidadania, os catadores de papel são responsáveis pelo recolhimento diário de 370 t de resíduos recicláveis. Atualmente existem 32 associações de catadores cadastradas junto ao Instituto. Segundo dados da Prefeitura de Curitiba, a quantidade média diária coletada pelos catadores é de 135 kg por catador, para um contingente estimado de 2.740

catadores, o que representa 369 t/d. Enquanto os caminhões do programa oficial de reciclagem recolhem 60 t/d (GISELE MARTINS, Departamento de Limpeza Pública de Curitiba, contato pessoal, 2004; MARIA ROSA DE CARVALHO MELO, Instituto Lixo e Cidadania, contato pessoal, 2005).

Entretanto, a falta de informações e/ou a sua inconsistência, são problemas encontrados pelas administrações públicas relacionados ao gerenciamento informal de resíduos, pois os dados referentes às quantidades coletadas são meramente estimativos, não havendo nenhum trabalho técnico-científico junto aos catadores, associações ou ao Instituto (GISELE MARTINS, Departamento de Limpeza Pública de Curitiba, contato pessoal, 2004; MARIA ROSA DE CARVALHO MELO, Instituto Lixo e Cidadania, contato pessoal, 2005).

Ainda, no âmbito dos Programas de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos devem ser revistos certos paradigmas e condutas, e projetados os novos produtos como apresenta McDONOUGH (2002) em seu livro "Cradle to Cradle". O autor considera que, atualmente, a forma adotada para a transformação de um produto usado em outro, representa apenas o retardamento da destinação deste resíduo para um aterro. Um modo mais adequado seria projetá-lo para ser totalmente transformado e aproveitado ou reaproveitado. Um termo empregado em seu trabalho, e sem tradução para o português, é "downcycling", o que significa reduções da qualidade de um material várias vezes até a sua destinação, após o seu uso, ao aterro sanitário. Um exemplo é o dos plásticos quando reciclados. No reprocessamento ocorre a mistura entre vários tipos de plástico para produzir um híbrido de qualidade inferior que será moldado em um produto mais barato. Este tipo de transformação, o autor, não considera reciclagem.

Neste sentido de transformação e agindo numa parte significativa dos resíduos, a matéria orgânica, a sua destinação aos aterros pode ser diminuída, através de uma operação de recuperação de recursos, a compostagem. PEREIRA

NETO (1996) cita que cerca de 65% dos resíduos urbanos domiciliares produzidos no país sejam constituídos de matéria orgânica.

OBLADEN (2003), entretanto, apresenta resultados de um estudo desenvolvido no município de Araucária e Campina Grande do Sul, PR, referente à composição do resíduo domiciliar, cujas proporções para a composição dos resíduos são as seguintes:

#### Araucária

- matéria orgânica 51,70%;
- recicláveis 36,30%;
- rejeitos 12,00%.

#### Campina Grande do Sul

- matéria orgânica 47,59%;
- recicláveis 45,59%;
- rejeitos 6,82%.

Este resultado pode ser comparado com o de outro trabalho desenvolvido em Rio Grande, RS, por OLIVEIRA (1996), que apresenta a seguinte composição:

- matéria orgânica 46,0%;
- reciclagem 39,0%;
- materiais misturados 15,0%.

Os trabalhos acima permitem afirmar que, em média, 50% dos resíduos produzidos nestas cidades são compostos de matéria orgânica, confirmando, portanto, o cuidado que se deve ter com este resíduo.

Além da matéria orgânica presente nos resíduos domiciliares ou urbanos, existe, ainda, o lodo produzido nas estações de tratamento de esgoto, que é enquadrado como resíduo sólido pela NBR 10.004/2004, que são produzidos em quantidades e qualidades variáveis. Ainda podem ser somados a estes resíduos uma quantidade significativa de material orgânico putrescível oriunda da limpeza

pública, resultante da poda vegetal, além de resíduos provenientes de atividades industriais como a serragem. Todos esses resíduos exigem uma alternativa para a disposição final segura e ambientalmente aceitável (ZANETTI, 1998; FERNANDES, 1999).

No Brasil, somente 1,5% da matéria orgânica é destinada à compostagem, ficando abaixo de índices dos Estados Unidos (12%), Inglaterra (28%) e Índia (68%) (CEMPRE, 2001).

### 2.1.2 Legislação sobre Resíduos Sólidos

No âmbito Federal, em 21 de agosto de 2001, o deputado Emerson Kapaz, relator da Comissão Especial de Resíduos Sólidos da Câmara Federal, apresentou, em Brasília, o relatório preliminar com a minuta de projeto para a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Com previsão para votação até o final de 2001, ainda encontra-se em discussão no Congresso Nacional e no Senado Federal. A Política Nacional de Resíduos Sólidos será destinada a orientar estados e municípios no tratamento e destino de todos os tipos de resíduos e o seu texto deverá nortear as discussões nas audiências públicas. Um dos destaques da proposta é a criação de um Fundo Federal de Resíduos Sólidos formado com a transferência de, no mínimo, 5% dos recursos orçamentários da área de saneamento básico. Este fundo seria gerenciado por um conselho formado por governo e sociedade civil. Além de classificar e definir as regras para a disposição de cada tipo de resíduo, entre eles o urbano, o industrial e o de mineração, dos serviços de saúde, das atividades rurais, e os radioativos, a Política Nacional dá destaque ao setor de embalagens e deverá estipular metas mínimas de reciclagem, nos prazos de um, três, cinco e dez anos, para os segmentos da área de cervejarias, refrigerantes e demais bebidas carbonatadas, água, sucos, leite, alimentos, descartáveis plásticos, descartáveis de papel, descartáveis metálicos e descartáveis de vidro (CAMPANILI, 2001).

Na segunda versão do relatório preliminar da Política Nacional de

Resíduos Sólidos (2002), na Seção V, artigo 175, o Deputado Emerson Kapaz recomenda o processamento dos resíduos sólidos domiciliares em usinas de compostagem, sendo genérico, entretanto, quanto às normas que deverão ser atendidas, nos âmbitos municipal, estadual e federal, no que se refere às instalações físicas do empreendimento, bem como, do composto orgânico produzido.

Em função desta política ainda estar em trâmite no Congresso Nacional, o que prejudica a implantação de um Programa Integrado para o setor no país, um levantamento efetuado por RAMOS (2004), indica que vários estados criaram suas Políticas de Resíduos independentes, sendo que em 15 desses estados as políticas ainda estão em fase de discussão.

Em 2004, a ABNT publicou uma coletânea de normas que teve como objetivo revisar principalmente a Norma Brasileira para a Classificação de Resíduos, NBR 10004/1987, visando aperfeiçoá-la e fornecer subsídios para o gerenciamento de resíduos.

Com relação à compostagem, a NBR 13.591/1996 define os termos empregados exclusivamente em relação a este assunto. São ao todo 72 termos entre os quais aeração forçada, reator biológico, chorume, compostagem, entre outros.

Sobre a qualidade do composto, os parâmetros legais são apresentados em Legislação Federal e Estadual sobre fertilizantes:

- DECRETO nº. 86.955, de 18 de fevereiro de 1982, revogado pelo DECRETO nº. 4.954, de 14 de janeiro de 2004; regulamenta a lei nº. 6.894, de Dezembro de 1980, alterada pela lei nº. 6.894, de 13 de julho de 1981, que dispõe sobre a inspeção e a fiscalização e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes destinados à agricultura.
- Instrução Normativa nº. 10 de 6 de maio de 2004, que aprova as disposições sobre a classificação e os registros de estabelecimentos e produtos, as

exigências e critérios, para embalagem, rotulagem, propaganda e para prestação de serviço, bem como, os procedimentos a serem adotados na inspeção e fiscalização da produção, importação, exportação e comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes destinados à agricultura.

- PORTARIA nº. 01, de 04 de Março de 1983; Resolve: Art. 1º - Aprovar normas, sobre especificações, tolerâncias e procedimentos para coleta de amostras de produtos, e os modelos oficiais a serem utilizados pela inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, destinados à agricultura.

- DECRETO nº. 6.710/90 – Art. 1º - Fica aprovado o Regulamento da Lei Estadual nº. 9.056, de agosto de 1989, que dispõe sobre a produção, distribuição e comercialização de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes, no Estado do Paraná, destinados à agricultura. Para efeitos deste Regulamento considera-se, no Cap. 1. Art. 3º, fertilizante orgânico, o fertilizante de origem vegetal ou animal, contendo um ou mais nutrientes de decomposição ou tratamento especial do material.

- Instrução Normativa nº. 15 de 22 de dezembro de 2004, que aprova as definições e normas sobre as especificações, as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura, ainda, no seu Anexo I, Capítulo II, classifica os fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos e organominerais em:

Classe A – Fertilizante orgânico, que em sua produção, utiliza matéria-prima de origem vegetal, animal ou de processamento das agroindústrias, onde não sejam utilizados no processo o sódio ( $\text{Na}^+$ ), metais pesados, elementos ou compostos sintéticos potencialmente tóxicos;

Classe B – Fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza matéria-

prima oriunda de processamento da atividade industrial ou da agroindústria, onde o sódio ( $\text{Na}^+$ ), metais pesados, elementos ou compostos sintéticos potencialmente tóxicos são utilizados no processo;

Classe C – Fertilizante orgânico que, em sua produção, utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do lixo domiciliar resultando em produto de utilização segura;

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.

## 2.2 DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

### 2.2.1 Aterros Sanitários

Aterros sanitários são processos utilizados para a disposição de resíduos sólidos no solo, particularmente domiciliares, que fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permitem a confinamento segura em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública (CETESB, 1979), ou definido como uma forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, através de confinamento em camadas cobertas com material inerte, geralmente solo, segundo normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais (NBR 10.703/89).

Já a disposição a céu aberto, ou lixão, representa uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos, que se caracteriza pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (NBR 10.703/89).

A técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, que pode causar menor dano ou riscos à saúde pública e com controle operacional

relativamente superior ao lixão, minimizando alguns impactos ambientais, e utilizando apenas alguns princípios de engenharia, é chamado de aterro controlado (NBR 8849/85). Esta norma também indica que a cobertura, como nos aterros sanitários, deve ser diária. Entretanto, como diagnosticado por RAMOS (2004), muitos dos aterros controlados, entre os estudados, no Estado do Paraná, não atendiam a esta especificação da norma.

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico a disposição final de resíduos nos municípios brasileiros está assim dividida (IBGE, 2000):

- lixões 76%;
- aterros controlados 13%;
- aterros sanitários 10%;
- tratamento (compostagem, reciclagem, incineração) 1%.

### 2.2.2 Problemas com Aterros Sanitários

A degradação da matéria orgânica, quando destinada a aterros sanitários, produz um líquido escuro, o chorume (Figura 2.1), altamente poluente e com demanda bioquímica de oxigênio da ordem de 2.000 a 30.000 mg/L (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993). Com a precipitação pluviométrica sobre o aterro, o chorume pode causar problemas operacionais, além de poder, se não for devidamente coletado, contaminar o solo e os recursos hídricos da região. Outro problema relacionado aos aterros sanitários é a necessidade de grandes áreas para disposição dos resíduos, como ilustra a Figura 2.2. Sendo que, estas áreas devem atender uma série de critérios técnicos, tais como (JARDIM et al., 1995; OBLADEN, 2003):

- tamanho da área;
- localização da área;
- adequação ambiental da área;
- inventário físico da área;

- condições de acesso;
- operação;
- controle da área;
- recursos disponíveis – financeiros, humanos e materiais.

HASSOL (1989) comenta que a maioria das estatísticas sobre aterros sanitários trata de massa de resíduos, entretanto, o volume, normalmente, é o responsável pelo consumo da vida útil de um aterro.

FIGURA 2.1 – SAÍDA DE CHORUME – ATERRO DA CAXIMBA CURITIBA: A) CANALETA COM CHORUME, B) MEDIDOR DE VAZÃO DE CHORUME



FONTE: BRAGA (2003)

Para o controle e monitoramento de aterros sanitários de pequeno porte são necessários alguns procedimentos, tais como (ABNT, 1997; CASTILHOS JÚNIOR et al., 2003):

- monitoramento na fase de implantação, das águas do subsolo e superficiais;
- monitoramento, durante a operação do aterro, das águas de subsolo, águas superficiais, volume e concentração do chorume, biogás e recalques das encostas dos taludes.

FIGURA 2.2 – VISTA GERAL – ATERRO DA CAXIMBA - CURITIBA



FONTE: Departamento de Limpeza Pública – PMC (2004)

O encerramento de um aterro sanitário também é um desafio para a engenharia, pois existe uma série de fatores complexos envolvidos. O cuidado com o aterro sanitário após o seu encerramento envolve alguns aspectos a considerar (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993; VIRARAGHAVAN et. al., 1997):

- a definição de um plano de ação de remediação para componentes danificados;
- a definição de uma lista de componentes e frequência de inspeção;
- a definição de um programa de amostragem e dos parâmetros de monitoramento;
- a definição da estratégia de controle da erosão da cobertura final;
- a verificação da presença de plantas mortas na cobertura vegetal;
- a verificação de entupimentos por entulhos da drenagem superficial;
- a verificação dos equipamentos de queima, compressores inoperantes e tubos dos poços de gás quebrados, para evitar a geração gases e odores;

- a verificação de poços e equipamentos de amostragem das águas de sub-solo;
- a verificação de bombas inoperantes e/ou entupimentos dos drenos de chorume.

OBLADEN (2003) cita que a falta de recursos e uma política ambiental não definida têm levado os municípios a dispor os resíduos a céu aberto ou em vazadouros, causando degradação do local e de seu entorno. Maus odores, presença de microorganismos patogênicos e proliferação de vetores são outros problemas encontrados.

A influência das chuvas é comentada por HE et al. (1998), pois devido à precipitação, ocorre infiltração da água através dos sistemas de cobertura dos aterros sanitários que percola para as células dos resíduos sólidos, e pode, como conseqüência, acentuar a decomposição biológica dos resíduos, o que resulta no aumento da quantidade de chorume produzido. Se o chorume migrar para fora dos limites do aterro pode, eventualmente, causar contaminação do subsolo.

## 2.3 TRATAMENTO DE ESGOTOS

### 2.3.1 Esgoto

Águas residuárias ou esgoto constituem o líquido proveniente das diversas modalidades de uso e origem das águas, tais como: doméstica, comercial, industrial, entre outras. Atualmente existe uma grande preocupação em relação ao grau de tratamento e ao destino final dos esgotos e os seus conseqüentes impactos ambientais (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

Esgotos acumulados e não tratados podem conter compostos tóxicos, microorganismos patogênicos e assim, podem atrair vetores e gerar maus odores colocando em risco a saúde pública. Portanto, coletar, remover, tratar, reutilizar ou

dispor estes esgotos é importante tanto para a qualidade de vida da população quanto para o meio ambiente (METCALF & EDDY, 2003).

### 2.3.2 Processos de Tratamento

Os processos de tratamento dos esgotos são formados por uma série de operações unitárias que são empregadas para a remoção de substâncias indesejáveis ou para a transformação destas substâncias em outras de forma mais aceitável, podendo ser classificados em físicos, químicos e biológicos (JORDÃO e PESSÔA, 1995; METCALF & EDDY, 2003).

O tratamento dos esgotos gera alguns sub-produtos, na forma sólida, semi-sólida, ou líquida, que devem receber um tratamento específico e adequado antes de sua destinação final (areia, espuma e lodo). Entre esses produtos o lodo apresenta grande importância devendo receber atenção particular em relação ao seu tratamento e à disposição final. O tratamento e a disposição do lodo podem constituir problemas difíceis ou complexos, face às grandes quantidades que podem ser geradas, à dificuldade em se encontrar locais adequados ou seguros para o destino final do lodo seco, à distância de transporte, aos custos, aos impactos ambientais, e às características de operação e processo (JORDÃO e PESSÔA, 1995).

A quantidade e a qualidade do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto variam em função da tecnologia utilizada para o tratamento. O lodo é um resíduo rico em nitrogênio que pode ser aproveitado para a nutrição vegetal por meio do processo da compostagem (FERNANDES e SILVA, 1999).

## 2.4 COMPOSTAGEM

### 2.4.1 Histórico

Uma das referências mais antigas de uso de composto na agricultura aparece nas placas de argila no Vale da Mesopotâmia, 1000 anos antes de Moisés. Os romanos, os gregos e tribos de Israel já conheciam a compostagem. Textos medievais religiosos e a literatura Renascentista apresentam também comentários a respeito do composto. Os chineses sistematicamente aplicavam os princípios da compostagem. Na Inglaterra, no século 19, Stephen Hoyt e filhos usaram 220.000 peixes para fazer composto (OWEN, 2003).

Segundo ADDISON (2000), agrônomo inglês, Albert Howard, é considerado o fundador do movimento de agricultura orgânica. Sir Albert foi para a Índia em 1905 e, por 25 anos trabalhou como pesquisador, inicialmente como Conselheiro de Agricultura dos Estados da Índia Central, e depois, como Diretor do Instituto de Plantas Industriais “Indore”, onde desenvolveu um processo de compostagem fechado. Ele alterou o modo antigo de fazer a arte de compostagem para processos controlados e definiu bases científicas, incluindo a recirculação do chorume como parte do processo (COOPERBAND, 2004). Seu livro “An Agricultural Testament”, publicado em 1943, causou um novo interesse pelos métodos de agricultura orgânica e de jardinagem; por isso e pela sua pesquisa Howard é conhecido atualmente como o Pai do Método Orgânico (OWEN, 2003).

No Brasil foi Dafert, diretor do Instituto Agrônomo de Campinas, que entre 1888 e 1893, apresentou relatórios explicando como preparar e incentivando o uso de composto orgânico. Trinta anos mais tarde, no mesmo Instituto, D’Utra, desenvolveu trabalhos que fomentava o preparo no meio agrícola. Em 1945, os resultados dos trabalhos de Aloisi Sobrinho indicavam uma técnica para inoculação do composto com água e estrumes animais. Em 1950, Luiz de Queiroz, da Escola Superior de Agricultura, passou a fomentar o uso do composto (KIEHL, 1985).

#### 2.4.2 Definição

O termo “composto orgânico” tem sido utilizado para designar o material orgânico produzido através da decomposição aeróbia de resíduos da preparação de alimentos e de atividades de manutenção de parques, praças e jardins públicos ou particulares, ricos em carbono.

A compostagem como processo de bioxidação aeróbia exotérmica de um substrato orgânico heterogêneo, no estado sólido, caracteriza-se pela produção de CO<sub>2</sub>, água, liberação de substâncias minerais e formação de matéria orgânica estável. Aos resíduos devem ser fornecidas condições ambientais para que a decomposição da matéria orgânica rica em carbono seja degradada. Para isto, é necessário que sejam processados materiais biodegradáveis, e portadores de nutrientes para que a transformação da matéria orgânica ocorra.

O composto, desde que atendidas as técnicas e condições de compostagem, possuirá excelentes qualidades nutricionais, físicas, químicas e biológicas, importantes para a preservação, adubação e manutenção dos solos, bem como para a recuperação de áreas degradadas.

O resultado final do processo de compostagem é a humificação quase total da matéria orgânica, que poderá, desta forma, ser utilizada na agricultura. O composto é, portanto, o resultado de um processo controlado de decomposição microbiológica, de uma massa heterogênea de matéria orgânica no estado sólido e úmido, em presença de oxigênio, passando pelas fases de (1) fitotoxicidade ou composto cru ou imaturo, (2) semicura ou bioestabilização, (3) cura, maturação ou humificação, acompanhada da mineralização de determinados componentes da matéria orgânica (compostagem).

O processo de transformação da matéria orgânica é semelhante ao que ocorre na natureza com a diferença que na compostagem acelerada são oferecidas condições para facilitar e reduzir o tempo de decomposição (JARDIM et. al., 1995;

PEREIRA NETO, 1996; KIEHL, 1998; FERNANDES e SILVA, 1999, HICKMANN, 2004).

HOWARD (1940) descreve os princípios essenciais da agricultura na natureza. O processo pode ser facilmente observado nas florestas, onde existem várias espécies animais, vegetais e microorganismos. O solo está protegido da ação direta do sol, da chuva e do vento. A energia do sol é utilizada, as folhas colaboram para transformar as chuvas em pequenas partículas de água que podem ser absorvidas pelas plantas menores. Não havendo desperdício. A natureza promove sua própria adubação e suprimentos de minerais. Concentrações de vegetais e de resíduos animais, constantemente, assumem um papel no ecossistema terrestre e estes materiais são convertidos em húmus. Destaca-se, claramente, o processo natural de compostagem.

O composto orgânico produzido a partir de resíduos orgânicos possui baixas concentrações de metais pesados e contaminantes podendo, desta maneira, ser utilizado como substituto da terra vegetal ou, também, distribuído a agricultores da região para a recuperação de solos exauridos ou degradados (KIEHL, 1998).

EIGENHEER (1993) comenta que quanto mais próximas as sociedades estão do harmônico ciclo natural, menos dificuldades têm em devolver o que produzem. Isto pode ser interpretado como um problema quando não é possível fazê-lo retornar harmonicamente à natureza, ou a seus elementos iniciais, o que concorda com o conceito de BIDONE (2003) para a compostagem:

A compostagem pode ser considerada uma forma de reciclagem da matéria orgânica, e através da compostagem, pode-se evitar alguns problemas relacionados aos resíduos sólidos.

### 2.4.3 Classificação

De acordo PEREIRA NETO (1996) e KIEHL (1998), a compostagem pode ser classificada, de forma geral, quanto à:

#### 2.4.3.1 Biologia

- processo anaeróbio: a fermentação é realizada por microorganismos que podem viver em ambientes isentos de oxigênio;
- processo aeróbio: o processo ocorre com a presença de microorganismos que necessitam de oxigênio para seu desenvolvimento;
- processo misto: é um processo resultante da associação dos dois anteriores.

#### 2.4.3.2 Temperatura

- criofílico: temperatura menor que 35°C;
- mesofílico: temperatura entre 40°C e 55°C;
- termofílico: temperatura entre 55°C e 70°C.

#### 2.4.3.3 Ambiente

- aberto: o processo ocorre em pátios descobertos, a céu aberto;
- fechado: o processo ocorre em locais fechados, podendo ser em digestores, reatores, torres, tanques, silos, tendo ainda, a possibilidade de revolvimento mecânico da matéria orgânica.

#### 2.4.3.4 Processo

- estático: ou ainda, ser chamado natural, é o processo onde a mistura fica em caixas ou montes em pátios de compostagem;
- dinâmico: ou ainda, ser chamado de acelerado, onde se oferecem condições especiais para a compostagem, tais como: adição de enzimas e fornecimento de aeração forçada.

## 2.4.4 Métodos de Compostagem

Os métodos de compostagem podem, de modo geral, ser divididos em natural e acelerada (KIEHL, 1998; PEREIRA NETO, 1996).

### 2.4.4.1 Compostagem Natural

#### 2.4.4.1.1 Artesanal em Leiras com Revolvimento Manual ou Mecânico

Neste método, a compostagem consiste em formar pilhas com a matéria orgânica a ser degradada com aproximadamente 1 m de altura e 2 m de largura de base, para revolvimento manual, e 2 m de altura e 4 m de base para revolvimento mecânico. A mistura deve conter a proporção de Carbono e Nitrogênio entre 25:1 e 35:1. Em virtude das reações metabólicas dos microorganismos, em alguns dias, a temperatura se eleva para aproximadamente 70 °C. Quanto ao fornecimento de oxigênio à massa em compostagem, o ideal deve ser o revolvimento a cada três dias, após o que a temperatura uma vez mais atingirá novamente a temperatura de 70 °C, e assim sucessivamente até o 70º dia, quando o material estará semicurado e a temperatura estará estabilizada em torno da temperatura ambiente. Como conseqüência, pode-se dizer que o composto estará pronto para uso entre 90 e 120 dias (McKINNEY, 1962, PEREIRA NETO, 1996; KIEHL, 1998; CEMPRE, 2001).

No Estado do Paraná, apenas os municípios de Cornélio Procópio e Apucarana, operam sistemas de compostagem de maneira simplificada, enquanto o município de Itaperuçu, através de uma empresa privada, está solicitando licença ambiental de instalação para a empresa de compostagem, com projetos analisados e aprovados pelo órgão ambiental (ADRIANA FERREIRA, IAP, contato pessoal, 2004).

A compostagem natural apresenta alguns problemas como a necessidade de grandes áreas para a formação da leira e o revolvimento. Outros impactos ambientais inerentes ao processo, tais como a formação de líquidos percolados

(chorume), produção de gases, geração de odores e a proliferação de vetores, são de difícil controle (KNEER, 1978).

A preocupação em reduzir a área destinada à disposição final ou tratamento é demonstrada no estudo de KAYHANIAN (1999) que projetou, operou e avaliou o desempenho de pilhas compactas de compostagem. O projeto, além de remover patogênicos e produzir composto de alta qualidade, traz como principal vantagem a economia de área para tratamento. As pilhas compactas necessitaram apenas da metade do espaço necessário em relação à compostagem em pilha convencional.

O problema de odores foi comentado por SRIVASTAVA (2002), em seu trabalho desenvolvido na Índia onde a compostagem de resíduos sólidos municipais é considerada uma solução técnica aceitável. Entretanto, a emissão de odores das pilhas e seu efeito junto à população, ainda são motivos de atenção.

#### 2.4.4.2 Compostagem Acelerada

##### 2.4.4.2.1 Leiras Estáticas com Aeração Forçada

O processo com aeração forçada foi desenvolvido nos Estados Unidos, pelo Departamento de Pesquisa Agrícola de Beltsville, Maryland, como pilhas estáticas aeradas. Desenvolvido originalmente para compostar lodo de esgoto, pode, contudo, ser usado para uma variedade de resíduos orgânicos, entre eles lixo doméstico e resíduo de poda vegetal (TCHOBANOGLIOUS, 1993).

O processo de aeração de pilhas estáticas consiste em um sistema de tubos perfurados para aeração ou exaustão sobre os quais é depositada a fração orgânica a ser decomposta. Uma pilha pode ter de 2 a 2,5 m de altura e, geralmente, é coberta com uma camada de composto curado e peneirado, para reduzir os odores característicos. Cada pilha tem um soprador ou exaustor individual para melhor controlar a aeração, conforme Figura 2.3. O ar é introduzido para prover de

oxigênio a transformação biológica que ocorre dentro da pilha. O tempo de compostagem é de três a quatro semanas, e depois mais quatro a cinco semanas para a cura do material. Cavacos de madeira podem ser utilizados para melhorar e controlar a granulometria e a temperatura do material a ser compostado (TCHOBANOGLOUS, 1993; KIEHL, 1998).

No processo de compostagem em leira estática existem três modos de aeração: modo positivo ou com injeção de ar, modo negativo ou com sucção de ar, modo híbrido, que é a combinação dos dois modos anteriores (NÓBREGA, 2001). A Figura 2.4 mostra o sistema de aeração (modo negativo) utilizado nas pesquisas da SANEPAR.

FIGURA 2.3 – LEIRA ESTÁTICA AERADA – SANEPAR



FONTE: Pesquisa de campo (2004)

Alguns trabalhos técnicos com leiras estáticas aeradas foram realizados no Brasil, por REZENDE (1991) e por ABREU (1993), os quais procuraram avaliar as condições necessárias de tempo de aeração para a obtenção de um composto maturado e avaliar métodos de aeração para propor um novo modo mais eficiente.

A preocupação com a redução do tempo de compostagem, e também, com a eficiência do processo foi estudada por NÓBREGA (1991), em trabalho que teve por objetivo estudar e avaliar os métodos de aeração positivo e negativo, comparando os resultados com o método híbrido. O processo híbrido mostrou-se mais eficiente, com maior degradação da matéria-prima (fração orgânica do lixo urbano, “in natura”, da cidade de Belo Horizonte), apresentando menor tempo para a fase de aeração e maior eficiência na eliminação de microorganismos patogênicos.

FIGURA 2.4 – DETALHE DE AERAÇÃO – SANEPAR



FONTE: Pesquisa de campo (2004)

O Instituto Ambiental do Paraná não tem registro de usinas de compostagem com o sistema de leiras estáticas no Estado, e a compostagem realizada pela empresa SANEPAR não é contínua, tratando-se de um programa de pesquisa (ADRIANA FERREIRA, IAP, contato pessoal, 2004; EDUARDO PEGORINI, SANEPAR, contato pessoal, 2004).

#### 2.4.4.2.2 Reatores Fechados com Aeração Forçada

Para este caso, além da aeração forçada, tem-se uma construção fechada que abriga a matéria orgânica a ser compostada. Um número grande de formas pode ser usado como reator neste sistema: torres verticais, horizontais (retangulares ou circulares), e tanques rotativos circulares (TCHOBANOGLOUS, 1993; USEPA, 1989).

Em termos de compostagem acelerada, no Estado do Paraná, encontra-se registrada apenas a Unidade de Compostagem Acelerada da empresa Tibagi Sistemas Ambientais, localizada no município de São José dos Pinhais (ADRIANA FERREIRA, IAP, contato pessoal, 2004).

No Brasil, um exemplo de um sistema horizontal é a Usina de Compostagem de Vila Leopoldina, em São Paulo, que adota o sistema DANO, cujo equipamento principal é um biodigestor com um cilindro de 28 m de comprimento por 3,5 m de diâmetro que gira a uma velocidade de 1 rpm, conforme Figura 2.5. Os resíduos sólidos urbanos, que são a matéria-prima do reator, permanecem de 2 a 5 dias no interior do cilindro, onde ocorre trituração parcial, homogeneização e drenagem (JAHNEL, 1999; VALTER LIMA, PM São Paulo, contato pessoal, 2004).

No processo acelerado confinado, a geração de líquidos percolados, a exalação de gases e a exposição dos materiais à biodiversidade do meio são controlados, sendo que o controle de parâmetros importantes, como a umidade e a temperatura, pode ser realizado através de instrumentos precisos e são controlados continuamente através da aeração forçada, assegurando condições seguras para o desenvolvimento da compostagem e ainda reduzindo em pelo menos 50% a área utilizada (KNEER, 1978).

O processo em ambiente fechado com aeração forçada é executado sem nenhum contato com o meio ambiente, enquanto os demais são realizados em pilhas ou leiras a céu aberto e/ou revolvidos periodicamente para permitir a aeração das camadas internas.

Como característica mais importante o método por confinamento em reatores permite um maior controle das condições ambientais, com extrema redução no tempo de compostagem, de 120 dias para 30 dias, enquanto os demais estão sujeitos às variações climáticas (KNEER, 1978).

FIGURA 2.5 – USINA DE COMPOSTAGEM DE VILA LEOPOLDINA, SP - SISTEMA DANO: A) CAIXÕES ALIMENTADORES, B) DETALHE DA ENTRADA DO REATOR, C) VISTA EXTERNA DOS REATORES HORIZONTAIS, D) DETALHE DA SAÍDA DO REATOR



FONTE: Pesquisa de campo (2004)

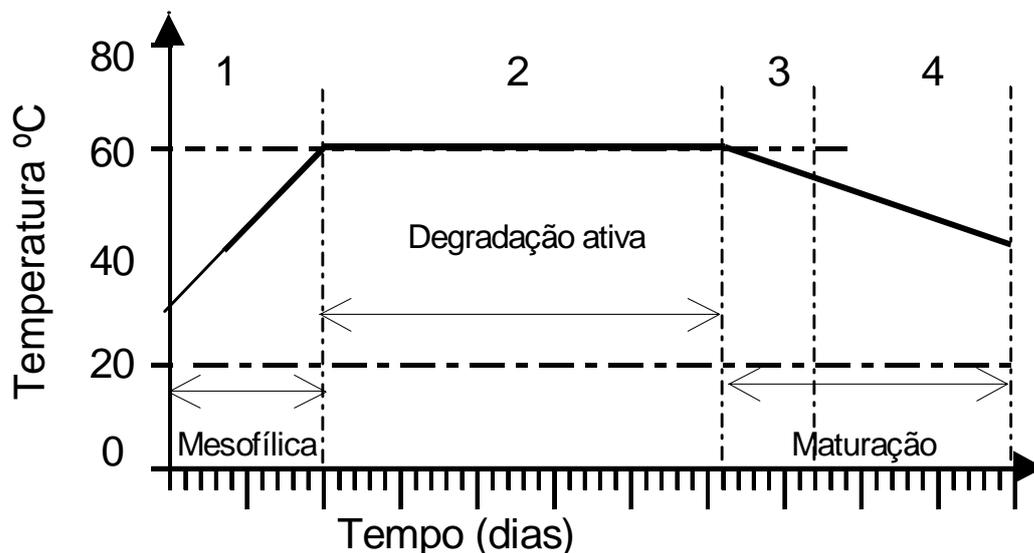
#### 2.4.5 Fases da Compostagem

A primeira fase é denominada fitotóxica devido à formação de ácidos orgânicos e toxinas de curta duração, é reconhecida pelo desprendimento de calor, vapor d'água e CO<sub>2</sub>. Com temperaturas variando de 45°C a 70°C, esta etapa inicia-se 48 horas após a montagem da leira, e tem duração de aproximadamente 15 dias.

A segunda fase, chamada de semicura, inicia-se logo após a primeira fase, e é também chamada de estado de bioestabilização, com tempo de duração entre 60 a 90 dias. Nessa fase, o composto deixa de ser prejudicial às raízes e sementes. A terceira e última fase é a maturação, também conhecida por humificação, que é o estado final da degradação da matéria orgânica, na qual o composto atinge o auge de suas propriedades benéficas ao solo e às plantas. O tempo desta fase não está claramente definido, variando de 1 a 3 meses (KIEHL, 1998).

Segundo BIDONE (2003), a compostagem é definida como um processo em 4 fases, fazendo uma sub-divisão da fase de maturação. Nesta concepção, a terceira fase ocorreria no início do resfriamento. Após atingir a temperatura máxima, durante um período de um a cinco dias; a quarta fase seria a fase de maturação propriamente dita, com a formação de ácidos húmicos, com duração entre 30 e 60 dias. A Figura 2.6 apresenta, de forma esquemática, as fases da compostagem e sua vinculação com a temperatura.

FIGURA 2.6 – ESQUEMA DAS FASES DA COMPOSTAGEM



FONTE: BIDONE (2003)

## 2.4.6 Fatores que Influenciam no Processo de Compostagem

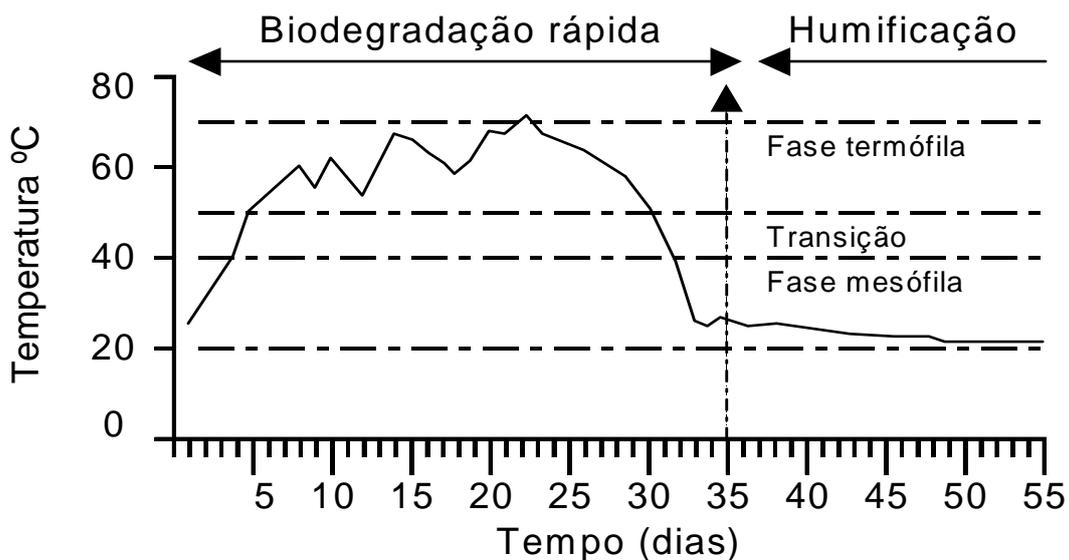
Os principais fatores que afetam o processo de compostagem são: a umidade, a oxigenação, a temperatura, a concentração de nutrientes, o tamanho das partículas e o pH (PEREIRA NETO, 1996).

### 2.4.6.1 Temperatura

A temperatura é um dos principais fatores para controle e eficiência da compostagem. O valor da temperatura varia conforme a fase em que se apresenta o processo de compostagem, alterando de acordo com a curva-padrão da variação da temperatura mostrada na Figura 2.7.

A temperatura passa a exercer influência no processo num intervalo aproximado de 24 horas após a mistura, o que pode ser observado com a elevação da temperatura do meio. Se não houver identificação de aumento de temperatura neste período, existe a possibilidade do processo aeróbio estar comprometido por insucesso de fatores como a concentração de oxigênio, umidade, granulometria e relação carbono/nitrogênio (FONSECA, 2000).

FIGURA 2.7 – CURVA PADRÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DURANTE O PROCESSO DE COMPOSTAGEM.



FONTE: FERNANDES (1999)

#### 2.4.6.2 Aeração

Para o processo aeróbio e, no caso de sistemas com aeração forçada, tanto leira estática quanto reatores fechados, o ar necessário para o processo é parâmetro essencial para o dimensionamento. No caso das leiras artesanais a aeração é obtida através do revolvimento, enquanto para os processos com aeração forçada o oxigênio é fornecido por motores insufladores (PEREIRA NETO, 1996; TCHOBANOGLIOUS, 1993).

Para que ocorram as reações metabólicas a literatura indica que deve ser fornecido de 0,6 a 1,8 m<sup>3</sup> de ar/kg.d de sólidos voláteis (McKINNEY, 1962). Por outro lado, PEREIRA NETO (1996) indica 0,3 a 0,6 m<sup>3</sup> de ar/kg.d de sólidos voláteis.

#### 2.4.6.3 Umidade

Também considerado um importante parâmetro para controle do processo de compostagem, seu valor pode variar em torno de 55%. Misturas com umidade abaixo de 40% poderão ter taxa de compostagem lenta, sendo que a lentidão do processo resulta na redução da atividade biológica (KIEHL, 1985, TCHOBANOGLIOUS, 1993, PEREIRA NETO, 1996). Umidades elevadas podem levar à anaerobiose com produção de gases e o desenvolvimento de maus odores (FONSECA, 2000).

Devido à elevada umidade dos lodos de esgotos, em torno de 90%, para que a sua utilização no processo de compostagem possa ser viabilizado, em geral é necessário uma desidratação prévia e a adição de agentes estruturantes como poda vegetal, por exemplo (BIDONE, 2003).

#### 2.4.6.4 pH

O pH da mistura deve ser cuidadosamente controlado. Apesar da literatura indicar uma faixa entre 6,5 e 8,0 (KIEHL, 1998), algumas experiências realizadas por PEREIRA NETO (1996), apresentaram uma faixa mais ampla, de 4,5 a 9,5.

O pH da massa em compostagem é inicialmente baixo, devido à formação de gás carbônico e de ácidos orgânicos, pois a seiva das plantas, demais partes vegetais, dejetos sólidos e líquidos de animais e humanos são de origem ácida. O pH deve variar entre 5 e 6, e após, em função da decomposição de proteínas e pela eliminação do gás carbônico, o meio torna-se básico, com o pH variando entre 8 e 8,5 (BIDONE, 2003).

Uma relação C/N baixa, próxima de 6:1, apresenta níveis de pH mais elevados, em virtude da liberação de nitrogênio na forma de amônia (FERNANDES e SILVA, 1999).

Ao final do processo, o composto orgânico apresenta, normalmente, pH entre 7,5 e 9. (McKINNEY, 1962; PEREIRA NETO, 1996).

#### 2.4.6.5 Granulometria

Outro fator que interfere de maneira bastante intensa no processo de compostagem é o tamanho das partículas. O tamanho da partícula recomendado pela literatura é entre 1 e 4 cm. Como consequência do controle da granulometria recomendada, o resultado pode ser a obtenção de massa mais homogênea, melhor porosidade e menor compactação (McKINNEY, 1962; PEREIRA NETO, 1996).

#### 2.4.6.6 Relação Carbono / Nitrogênio

A relação Carbono/Nitrogênio é comumente usada para determinar a taxa de decomposição da matéria-prima a ser compostada, além de ser fator limitante do processo. O carbono, entre outras funções, fornece energia para as atividades dos microorganismos, enquanto o nitrogênio é fonte para a reprodução protoplasmática.

Para alta eficiência nos processos de compostagem, a literatura apresenta como valor ótimo para a relação C/N a variação em torno de 25 a 35 para 1, em torno de 18:1 para o composto semicurado ou bioestabilizado, e 8:1 a 12:1 para composto humificado. Uma relação C/N inicial elevada, em torno de 60 a 80:1, fará

com que o tempo de compostagem seja maior, devido à deficiência de nitrogênio para os microorganismos, enquanto o carbono será eliminado na forma de gás carbônico. Por outro lado, para uma relação inicial baixa, em torno de 6:1, os microorganismos eliminarão o nitrogênio na forma de amônia, que pode ser identificada pelo aparecimento de odores característicos. A eliminação do nitrogênio do meio poderá causar alterações, elevando a relação até 30:1, e assim o processo passa a ocorrer de maneira ideal (PEREIRA NETO, 1996).

Apesar da sua importância, a relação C/N não é único parâmetro a ser avaliado no processo de compostagem, pois outras variáveis do processo como a umidade e o pH, também são fatores interferentes que devem ser controlados (PEREIRA NETO, 1996; BRINTON, 1997; KIEHL, 1998; FONSECA, 2000).

#### 2.4.6.7 Matéria Orgânica e Sólidos Voláteis

Segundo KIEHL (1998), durante a compostagem a matéria orgânica tem sua quantidade diminuída, por sofrer um processo de mineralização. Os ensaios de laboratório, quanto à matéria orgânica, apresentam os resultados da seguinte forma:

- matéria orgânica compostável: aquela de fácil decomposição na leira;
- matéria orgânica resistente a compostagem: caracterizada pela lignina, ceras, resinas, óleos e, no caso do lixo, por borracha, plásticos, couro, madeira, entre outras matérias de difícil degradação em curto período de tempo de uma compostagem;
- matéria orgânica total: é a soma dos dois componentes anteriores.

A perda da matéria orgânica por combustão é referida como sólidos voláteis e considerada como sua fração orgânica. Além disso, a expressão sólidos voláteis tem sido usada para indicar a diferença da perda de matéria orgânica por incineração efetuada em amostras tomadas antes e depois da compostagem.

#### 2.4.6.8 Microbiologia do Processo

A decomposição ou estabilização da matéria orgânica é um processo microbiológico conduzidos por bactérias, fungos e actinomicetos. Estes microorganismos apresentam capacidade de degradar vários compostos orgânicos e se revezam durante as fases da compostagem de acordo com fatores específicos que lhes permitem ser ativos na degradação de um ou outro tipo de partícula ou matéria orgânica. A substância química, a umidade, a disponibilidade de oxigênio, a temperatura e a relação carbono/nitrogênio são alguns destes fatores (KIEHL, 1985; PEREIRA NETO, 1996).

Na primeira fase predominam as bactérias e fungos mesófilos, em seguida, com o aumento de temperatura, na fase termófila (Figuras 2.6 e 2.7), os microorganismos predominantes passam a ser os actinomicetos, bactérias e fungos termófilos. Após esta fase, quando a temperatura pode atingir 70 °C, a massa em compostagem retorna à fase mesófila, mais longa que a primeira, porém, com outra composição química, devido ao consumo de açúcares e amido. Na fase final, encontram-se protozoários, nematóides, formigas, vermes e o mais variado número de insetos. O fornecimento de oxigênio para a mistura favorece a multiplicação dos microorganismos, bactérias, fungos e actinomicetos. Os actinomicetos, que estarão presentes na fase final do processo, são visíveis a olho nu, graças aos micélios esbranquiçados em forma de finos fios como teia de aranha ou parecendo pó de giz (KIEHL, 1985).

A Tabela 2.2 apresenta algumas características dos principais grupos de microorganismos predominantes no processo de compostagem.

TABELA 2.2 – CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS GRUPOS DE MICROORGANISMOS ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

Discriminação	Bactérias	Actinomicetos	Fungos
Substrato	Carboidratos, amidos, proteínas e outros compostos orgânicos de fácil decomposição	Substratos de difícil decomposição	Substratos de difícil decomposição
Umidade			Regiões secas
Oxigênio	Menos necessidade	Regiões bem aeradas	Regiões bem aeradas
Condições do meio	Neutro até levemente ácido	Neutro até levemente alcalino	Ácido à alcalino
Faixa de valores de Ph	6,0 a 7,7		2 a 9
Revolvimento	Não interfere	Desfavorável	Desfavorável
Significado durante a decomposição	80 a 90% da capacidade de degradação		
Temperatura	Até 75°C; redução da capacidade de degradação quando essa temperatura for ultrapassada.	Supõe que o limite de temperatura seja de 65°C	Limite de temperatura de 60°C
Função	Decompor a matéria orgânica, animal ou vegetal, aumentar a disponibilidade de nutrientes, agregar partículas no solo e fixar o nitrogênio	Decomposição dos resíduos resistentes de animais e vegetais, formação de húmus, decomposição em alta temperatura de adubação verde, feno, composto, etc.. e fixação do nitrogênio	Decomposição dos resíduos resistentes de animais e vegetais, formação de húmus, decomposição em alta temperatura de adubação verde, feno, composto, etc.. e fixação do nitrogênio

FONTE: Adaptado de Nassu (2003) citado por HEIDEMANN (2005)

## 2.4.7 Composto Orgânico

### 2.4.7.1 Qualidade

A utilização do composto produzido através da fração orgânica de resíduos sólidos e sua qualidade dependem diretamente da matéria-prima empregada no processo. O composto pode, também, ser utilizado “in natura”, fornecendo nutrientes e melhorando as condições físicas do solo (PEREIRA NETO, 1996; KIEHL, 1999; AGUILAR, 2002).

A Instrução Normativa nº. 15, em seu Anexo III, apresenta as especificações, garantias e características dos fertilizantes orgânicos para aplicação no solo conforme Tabela 2.3 (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2004):

TABELA 2.3 – ESPECIFICAÇÕES, GARANTIAS E CARACTERÍSTICAS DOS FERTILIZANTES ORGÂNICOS, MISTO E COMPOSTO

	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	Classes A, B, C, D
Umidade % (máx.)	50	50	50	70	50
N total (mín.)	1				
Carbono orgânico (mín)	15				10
CTC	300			600	300
pH (mín.)	6,00		6,50	6,00	6,00
Relação C/N (máx.)	18			12	
Relação CTC/C (mín.)	20			30	20
N, P, K ou soma NPK	2				

FONTE: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Instrução Normativa Nº. 15 - Anexo III, 2004.

NOTA: Valores obtidos em base seca.  
Umidade determinada a 65°C.

#### 2.4.7.2 Contaminantes Químicos e Biológicos

Os principais contaminantes da matéria orgânica em alguns resíduos sólidos são os microorganismos patogênicos e os metais pesados, estes presentes nos resíduos não orgânicos que, se fossem separados na origem, poderiam ter as suas concentrações, no composto, diminuídas. O lodo de esgoto doméstico contém pequenas quantidades destes contaminantes, entretanto, para sua aplicação, o acompanhamento das concentrações é indispensável para garantir a segurança da atividade (ANDREOLI et al., 1999).

KIEHL (1998) destaca que alguns autores têm concluído de maneira contraditória em relação aos resultados dos seus experimentos sem, entretanto, ter estudado em detalhe o complexo problema dos metais pesados. Um dos equívocos comuns é não respeitar as quantidades e/ou concentrações presentes, pois qualquer nutriente mesmo essencial, benéfico ou útil, pode ser tóxico se assimilado em doses elevadas.

O lodo proveniente das estações de tratamento de esgoto doméstico apresenta baixos teores de Cd, Cu, Mo, Zn, Pb, Mn, Fe, Cr, porém, da mesma forma que alguns resíduos sólidos, pode ser contaminado através de infiltrações, provenientes de efluentes industriais e de águas pluviais, na rede de coleta (FERNANDES et al., 1993; RANGEL et al., 2004). A presença de cobre e zinco nos lodos das estações de tratamento de esgoto podem ser provenientes de lançamentos clandestinos de águas residuárias dos processos de galvanoplastia, da reciclagem de cobre e, também, da tubulação da rede de coleta (EDUARDO PEGORINI, SANEPAR, contato pessoal, 2005). FERNANDES (1993) cita que os lodos domésticos estudados não apresentam grande contaminação e ainda misturados com matéria orgânica diluem mais a sua concentração.

A Tabela 2.4 apresenta a concentração de metais pesados em lodo da ETE Belém, Curitiba, ETE Norte e ETE Sul, Londrina, expressos em mg/kg em relação ao peso seco.

Quanto aos microorganismos patogênicos, segundo FERNANDES e SILVA (1999) o lodo doméstico apresenta, em geral, quatro grupos: fungos, vírus, bactérias e parasitas.

TABELA 2.4 – CONCENTRAÇÕES DE METAIS PESADOS EM LODO DA ETE BELÉM E EM RALF EXPRESSO EM RELAÇÃO AO PESO SECO

Lodo	Cd*	Cr*	Cu*	Ni*	Pb*	Zn*	Hg*
ETE Sul Londrina – RALF	1,6	62,8	725	67,3	208,2	207	
Biodigestor ETE Norte - Londrina	2,11	66,3	196	20,9	72	710	
ETE Norte Londrina – RALF	0,01	70,4	282	29,2	101	1041	
ETE Belém – Curitiba	Nd	178	439	73	123	824	1

FONTE: Adaptado de SILVA e FERNANDES (1998), SANEPAR (1997)

NOTA: (\*) mg/kg

A Tabela 2.5 apresenta os níveis médios de patógenos e de indicadores encontrados no lodo da ETE Belém – Curitiba, Bom Retiro - Londrina e ETE Sul – Londrina. O autor destaca, ainda, que se deve ter a maior preocupação com os parasitas intestinais, como ovos de helmintos, devido à presença freqüente e longo tempo de sobrevivência no meio externo.

Para que o composto, formado de uma mistura com lodo de esgoto, possa apresentar condições de uso na agricultura, sem riscos de infecção e contaminação do meio ambiente, é necessário que haja o acompanhamento da presença de microorganismos no processo (ANDREOLI et al., 1999; FERNANDES, 1999).

TABELA 2.5 – NÍVEL MÉDIO DE PATÓGENOS E DE INDICADORES ENCONTRADOS NO LODO DA ETE BELÉM - CURITIBA

ETE	Coli total (NMP/100g)	Coli fecal (NMP/100g)	Estreptococos fecais (NMP/100g)	Nº. de Ovos de helmintos/gMS	Viabilidade de ovos de helmintos %
Belém Curitiba	7,54.10 <sup>8</sup>	86,4.10 <sup>6</sup>	36,7.10 <sup>6</sup>	4,85	3

FONTE: Adaptado de FERNANDES (1999)

A compostagem tem-se mostrado um tratamento eficiente para remover patógenos, em virtude da intensa atividade biológica já no início do processo, com temperatura elevada durante vários dias, o que destrói os patógenos (ANDREOLI et al., 1999; FERNANDES e SILVA, 1999).

A Tabela 2.6 apresenta dados referentes a temperaturas, e tempo de exposição para a destruição dos microorganismos patogênicos.

A Instrução Normativa nº. 105.003/2004 (IAP, 2004), considera a compostagem como uma técnica de redução de patógenos, sendo recomendado que a temperatura para o processo confinado e em leiras estáticas seja maior do que 55 °C, por pelo menos 3 dias, enquanto para o processo em leiras com revolvimento manual ou mecânico, a temperatura seja maior do que 55°C, por pelo menos 15 dias com, pelo menos, 5 revolvimentos durante a fase termófila.

TABELA 2.6 – TEMPERATURAS E TEMPOS DE EXPOSIÇÃO PARA A DESTRUÇÃO DE MICROORGANISMOS PATOGENICOS

ORGANISMO	TEMPO DE EXPOSIÇÃO (EM MINUTOS) PARA A DESTRUÇÃO DE PATÓGENOS A VÁRIAS TEMPERATURAS				
	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
<i>Entamoeba histolica</i>	5				
Ovos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	60	7			
<i>Brucella abortus</i>		60		3	
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>		45			4
<i>Salmonella typhi</i>			30		4
<i>Escherichia coli</i>			60		5
<i>Micrococcus pyogenes var. aureus</i>					20
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>					20
<i>Shigella sp.</i>	60				
<i>Mycobacterium diphtheria</i>	45				
<i>Necatur americanus</i>	50				
<i>Taenia saginata</i>					5
Vírus					25

FONTE: FERNANDES (1999)

A Tabela 2.7 apresenta os valores limites para concentrações de metais estabelecidos pelo IAP para reciclagem agrícola de biosólidos em solos do Paraná.

TABELA 2.7 – NÍVEIS DE ALERTA E MÁXIMO ADMISSÍVEL DE METAIS PESADOS EM LODOS DE ESGOTOS DESTINADOS A UTILIZAÇÃO AGRÍCOLA

Elemento (mg/kg de matéria seca)	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Cr
Valores de alerta	16	800	240	600	2000	13	800
Valores limite	20	1000	300	750	2500	16	1000

FONTE: Adaptado de IAP (2004)

Em função do acima exposto e visando avaliar a utilização de dois resíduos que apresentam valor intrínseco e, portanto, poderiam ter uma destinação e/ou utilização mais adequada do que a destinação em aterros, esta pesquisa teve a finalidade de avaliar a operacionalidade do processo de compostagem aerada e confinada em uma unidade já instalada no município de São José dos Pinhais.

Os capítulos 3 e 4 apresentam a metodologia definida para o trabalho e os resultados obtidos em condições operacionais verdadeiras. Por fim, são apresentadas as conclusões e recomendações para a melhoria das condições de operação do sistema avaliado.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Este capítulo, além de descrever os materiais a serem utilizados como matérias-primas, descreve a caracterização da mistura a ser compostada, apresenta os métodos adotados, os ensaios realizados e, também, uma descrição sucinta da unidade de compostagem e da tecnologia estudada, visando atingir o objetivo deste trabalho na identificação dos pontos relacionados às características interferentes na operação do sistema e no processo de compostagem da tecnologia KNEER®.

#### **3.1 LOCALIZAÇÃO DA UNIDADE OPERACIONAL**

A Unidade de Valorização de Orgânicos avaliada neste trabalho é de propriedade da empresa Tibagi Sistemas Ambientais e está situada à Rua Silvio Dal Negro, 400, no município de São José dos Pinhais, PR.

#### **3.2 A TECNOLOGIA KNEER®**

##### **3.2.1 Descrição do Funcionamento da Unidade**

O fundamento do sistema KNEER® de compostagem é baseado em processo biológico aeróbio, que ocorre em um sistema confinado alimentado por bateladas. O processamento da matéria orgânica é monitorado e controlado continuamente mediante sensores de temperatura e de oxigenação. Estes dados alimentam um computador que, por sua vez, controla todo o processo e a respectiva aeração. Os dados são registrados de forma contínua e armazenados, podendo ser manipulados logo após a geração da informação ou posteriormente.

A determinação da temperatura foi realizada por termoresistências PT-100 da marca IOP, e a concentração de oxigênio foi avaliada através de um analisador de oxigênio, em linha, da marca ACTRON modelo 4380-13/FBT-246, localizado na saída dos gases de exaustão.

O sistema é alimentado nos silos dosadores diretamente por pá carregadeira e/ou caminhão basculante (Figura 3.1).

Cada silo opera individualmente e libera o material sobre a esteira transportadora, que leva o material até o misturador com pás giratórias, responsável pela homogeneização dos componentes da mistura. Para o transporte do material misturado, até os reatores, são utilizadas correias transportadoras (Figura 3.2).

FIGURA 3.1 – CARREGAMENTO DOS SILOS-DOSADORES COM PÁ-CARREGADEIRA



FONTE: Tibagi Sistemas Ltda. (2002)

A aeração da massa a ser compostada é realizada por um soprador com potência de 5 HP, rotação de 3.600 rpm, tensão 440V, vazão de 320 m<sup>3</sup>/h, e uma linha em tubo de polipropileno, com pressão nominal de 6kgf/cm<sup>2</sup>, com diâmetro externo 160 mm, que veicula o ar à câmara de insuflação, em um ponto na base do reator. A câmara localiza-se no fundo do reator e constitui-se, na sua parte superior, de uma grelha formada por perfis em “Z”, o que possibilita a passagem do ar e o fornecimento de oxigênio à massa a ser compostada. O ar atravessa toda a massa e os gases são retirados por um tubo localizado na parte superior do reator, com PN 6 kgf/cm<sup>2</sup>, com diâmetro externo de 160 mm, ligado a um sistema de exaustão, com potência de 7,5 HP, rotação de 3.600 rpm, tensão 440V, vazão de 340 m<sup>3</sup>/h e filtro. A Figura 3.3 mostra, de forma esquemática, o processo no interior do reator.

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram estudados dois reatores com  $13 \text{ m}^3$  de volume útil cada um.

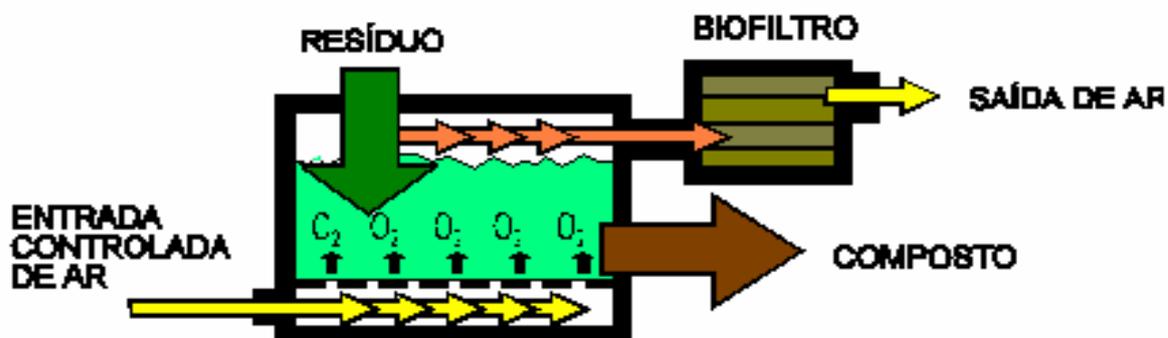
A tecnologia KNEER propõe reduzir de 120 para 14 dias o tempo de compostagem.

FIGURA 3.2 – ESTEIRAS TRANSPORTADORAS, MISTURADOR E REATORES



FONTE: Tibagi Sistemas Ltda. (2002)

FIGURA 3.3 – FLUXO DE AR DENTRO DO REATOR



FONTE: Tibagi Sistemas Ambientais Ltda. (2000)

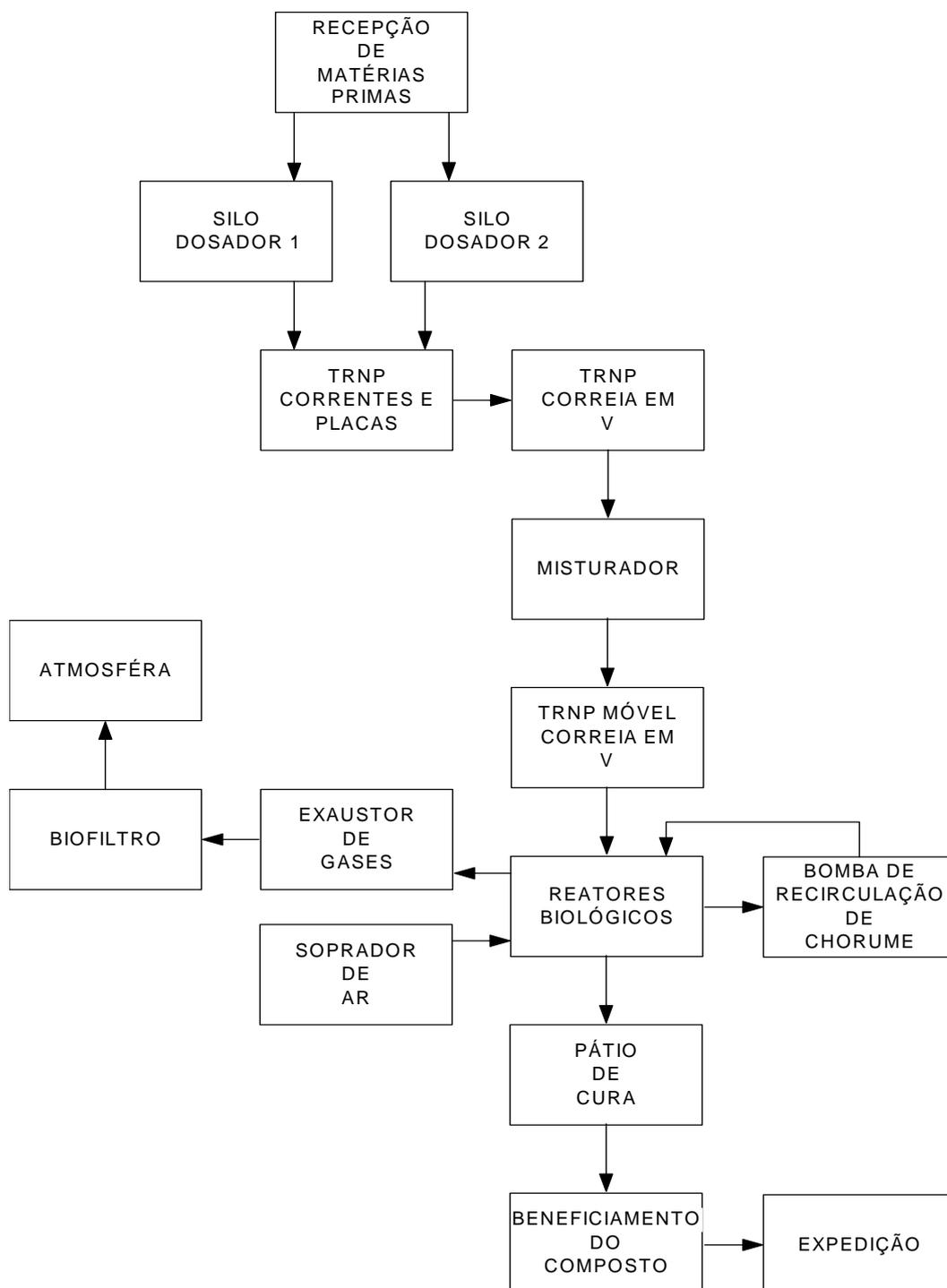
### 3.2.2 Componentes do Sistema

A unidade de processamento de resíduos orgânicos compõe-se dos seguintes setores, conforme “layout” apresentado no Anexo 1:

- pátio de recepção de matéria-prima;
- silos dosadores;
- aparelho misturador;
- esteira de alimentação dos reatores (Staker);
- reatores de processamento;
- biofiltro;
- casa de máquinas;
- pátio de cura.

O fluxograma de toda operação do sistema é mostrado na Figura 3.4.

FIGURA 3.4 - FLUXOGRAMA DA UNIDADE



FONTE: Tibagi Sistemas Ambientais Ltda. (2000)

### 3.3 MATÉRIAS-PRIMAS

#### 3.3.1 Lodo de Esgoto

O lodo utilizado neste estudo foi fornecido pela SANEPAR, e era proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto Belém – ETE Belém, localizada no bairro Boqueirão, tendo sido utilizado, em média, 4 m<sup>3</sup> por batelada, e assumidos os dados de FERNANDES e SILVA (1999), com características médias mostradas na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS MÉDIAS DO LODO DE ESGOTO DESAGUADO GERADOS EM ETEs

	PH	Umidade (%)	Sólidos fixos (% sólidos totais)	C%	N%	C/N
Lodo ativado (convencional)	7,0	89	13	32	6,0	5,3
Lodo ativado (aeração prolongada*)	6,9	88	37	32	4,9	6,5

FONTE: Adaptado de Fernandes e Silva (1999)

NOTA: \* Sistema carrossel

#### 3.3.2 Poda Vegetal

Os resíduos vegetais, ou materiais carbonáceos, têm a função de proporcionar certas características à massa a ser compostada. A poda vegetal, em especial as de árvores, além de estruturar a mistura, quando triturada e utilizada com granulometria adequada, que segundo a literatura, pode ter o tamanho das partículas variando de 1 a 4 cm, contribui para absorver o excesso de umidade e equilibrar a relação carbono/nitrogênio, em torno de 30:1. Estes resíduos são ricos

em carbono e, quando triturados e incorporados ao lodo de esgoto, satisfazem as principais condições, conforme apresentado no Capítulo 2, para a produção de composto orgânico através do processo de compostagem (PEREIRA NETO, 1996; KIEHL, 1998; FERNANDES e SILVA, 1999).

A poda vegetal foi fornecida pelo Horto Municipal da Secretaria Municipal de Meio Ambiente da PMC, PR, era resultante da coleta de resíduos vegetais triturados. Nesta pesquisa foram utilizados 9 m<sup>3</sup> por batelada, e assumiu-se os dados de FERNANDES e SILVA (1999), com características físico-químicas médias apresentadas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 – CARACTERÍSTICAS MÉDIAS DO RESÍDUO VEGETAL USADO COMO ESTRUTURANTE NA PESQUISA

	pH	Umidade (%)	Sólidos fixos (% sólidos totais)	N%	C%	C/N
Poda vegetal	6,9	30	9	1,1	51	46

FONTE: Adaptado de Fernandes e Silva (1999).

### 3.4 MISTURA

#### 3.4.1 Caracterização da Mistura

A caracterização da mistura das matérias-primas, poda vegetal e lodo de esgoto, durante o processo de compostagem, foi definida através de ensaios físico-químicos de amostras representativas, conforme Norma Brasileira NBR 10.007/04 (ABNT, 2004). Os ensaios da mistura, no primeiro dia, são os representados pelas amostras retiradas no dia zero, sendo o dia zero o dia da carga, para ambas as bateladas, e estão apresentados na Tabela 3.3.

Para maior eficiência do processo, é recomendado que a mistura a ser compostada deva estar livre de materiais inertes, ter partículas com diâmetro médio menor que 35 mm, apresentar umidade em torno de 55%, considerada satisfatória, concentração adequada de nutrientes e procurou-se definir uma relação carbono/nitrogênio entre 25:1 e 35:1, o que preconiza PEREIRA NETO (1996) e FERNANDES e SILVA (1999).

TABELA 3.3 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DA MISTURA NO DIA ZERO DAS BATELADAS 1 E 3

	Batelada 1	Batelada 3
Código da amostra	A01B01D00/R04	A01B02D00/R02
Data da coleta	4/4/05	6/5/05
<b>ENSAIOS</b>		
Densidade (kg/L)	0,76	0,7
pH da amostra virgem	7,02	8
pH da CFSA *	6,8	7,57
Umidade (%)	79	74,6
Sólidos Totais (%)	24,2	29,6
Sólidos Fixos (%)	5,2	6,3
Sólidos Voláteis (%)	19	23,3
Carbono Orgânico (g/L)	447	364,52
Carbono Orgânico (%)	34,4	28,1
Matéria Orgânica (g/L)	768	626,9
Nitrogênio Total (mg/kg)	19.275	13.688
Nitrogênio Total base seca	9,18	5,475
Relação Carbono/Nitrogênio	3,75	5,13
Termotolerantes	POS	POS
Coliformes Totais	POS	POS
Enterococcus fecais	0,15 X 10 <sup>7</sup>	1 X 10 <sup>7</sup>
Chumbo - Pb (mg/kg)	n.d.	n.d.
Cobre - Cu (mg/kg)	660	537
Cromo - Cr (mg/kg)	n.d.	n.d.
Níquel - Ni (mg/kg)	n.d.	n.d.
Zinco - Zn (mg/kg)	690	970

NOTA: (\*) CFSA - Composto Fino Seco ao Ar

Legenda do código da amostra:

Aa = Amostra / número

Bb = Batelada / número

Dd = Dias / dias da carga

Rr = Reator / número

### 3.4.2 Dosagem da Mistura

Segundo FERNANDES e SILVA (1999), o cálculo para a dosagem pode ser feita de maneira simples tomando por base que a relação C/N da mistura é a razão entre o total de carbono orgânico presente na mistura e o total de nitrogênio. Assim sendo, adotando os valores de carbono orgânico e nitrogênio apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2, e fixando a relação carbono/nitrogênio em 30:1, chega-se ao resultado de 1 parte em lodo, em peso, para 2,57 partes de poda vegetal.

### 3.4.3 Amostragem

As amostras foram coletadas de acordo com a Norma Brasileira NBR 10007/04 (ABNT, 2004), e de acordo com os seguintes fatores:

#### 3.4.3.1 Tamanho Amostral

Considerando amostras homogêneas e representativas, cada uma apresentou, aproximadamente, a massa de 2 kg. As amostras foram divididas em duas partes, sendo a de maior massa levada para o Laboratório de Química do Centro Tecnológico do Paraná – CEFET, para os ensaios de pH, umidade, sólidos totais, carbono orgânico, coliformes, microorganismos termotolerantes e metais pesados, e a de menor massa para o laboratório da empresa LimnoBras, onde foram feitos os ensaios de nitrogênio e carbono orgânico.

#### 3.4.3.2 - Amostrador e Ponto da Coleta

De acordo com a norma brasileira NBR 10007/04 e, considerando uma mistura sólida, com catorze dias de tempo de processo, foi definido que, para a amostragem, seria utilizado um trado com 25 cm de diâmetro e que seriam usadas pás para a homogeneização e quarteamento.

As amostras foram retiradas de um ponto central do reator, isto é, à metade da altura, metade da largura e metade do comprimento (ABNT, 2004).

### 3.4.3.3 Freqüência da Amostragem

Para a realização deste estudo foram determinadas 8 cargas ou bateladas, com a retirada de amostras nos dias zero, quatro, sete, dez, catorze e vinte e oito, para os dois reatores, para cada carga. O dia zero foi considerado o dia do carregamento do reator. Por orientação do fabricante da tecnologia, a descarga foi feita no décimo quarto dia, e a mistura foi disposta no pátio para cura. Neste dia uma amostra foi retirada do interior do reator, enquanto no vigésimo oitavo dia, uma amostra foi retirada da mistura no pátio de cura. Em função da descarga e do transporte ocorre uma leve homogeneização pelo transporte até o local de cura. Após o transporte, o material ficou exposto a céu aberto em pilha comum, no pátio de cura.

### 3.4.4 Parâmetros Físico-Químicos

Os parâmetros físico-químicos avaliados neste estudo são descritos a seguir:

#### 3.4.4.1 Peso Específico

O peso específico ou densidade é definido como a relação entre o peso e o volume ocupado pelos componentes sólidos e pelos poros. Para a determinação deste parâmetro utilizou-se um recipiente de 20 L, aproximadamente, em aço inox, e adotou-se o procedimento conforme definido por KIEHL (1998).

#### 3.4.4.2 Umidade

A umidade foi determinada segundo a norma brasileira NBR 9.383/86 (ABNT, 1986).

#### 3.4.4.3 Granulometria

A granulometria do composto final será avaliada através de observação visual, com a disposição do composto em área com grama, inicialmente bruto, e posteriormente peneirado, em peneira com malha de 20 mm.

#### 3.4.4.4 Temperatura

A temperatura da massa foi registrada pelo próprio sistema, através do termostato fixado no ponto central do reator, e também, foi anotada manualmente, em impresso próprio, a partir de observação na tela do monitor.

#### 3.4.4.5 pH

Para a determinação do pH adotou-se o procedimento de determinação do pH em água, adaptado de LUCHESE et al. (2002). Entretanto, devido à elevada concentração de matéria orgânica da amostra foi utilizada apenas 1 mL da mesma, diluída em 1 parte para 10.

#### 3.4.4.6 Sólidos Voláteis e Fixos

Para a determinação dos sólidos totais voláteis e fixos, foi utilizada análise gravimétrica, que foi desenvolvida conforme Portaria SNAD nº 31/82 do Ministério da Agricultura (BRASIL, 1982).

#### 3.4.4.7 Carbono Orgânico

Para a determinação do carbono orgânico utilizou-se os procedimentos descritos por LUCHESE et al. (2002), com algumas adaptações.

Tais adaptações consistiram da utilização do conceito de terra fina seca ao ar – TFSA para a mistura ou composto, podendo de forma análoga chamar de composto fino seco ao ar – CFSA, medida em quantidades de massa e não em volume como descreve o método. Para tanto, mediu-se a massa da amostra contida em 1mL em proveta de 10 mL. Isto para que se pudesse obter uma relação entre as grandezas de massa e volume. Após 10 ensaios o valor encontrado foi de 1,372 g/mL de CFSA. O método utilizado foi o da oxidação da matéria orgânica por dicromato.

#### 3.4.4.8 Matéria Orgânica

Para a determinação da concentração de matéria orgânica, adotou-se o procedimento descrito por LUCHESE et al. (2002), no qual, a partir da multiplicação do teor de carbono orgânico por um fator igual a 1,724, obtém-se o teor de matéria orgânica.

#### 3.3.4.9 Nitrogênio Total

A quantificação do Nitrogênio Total Kjeldhal foi realizada através do Método Nessler adaptado por HACH COMPANY (2003). Os resultados obtidos em base seca foram calculados em massa de nitrogênio por massa da amostra (mg/kg), e transformados para porcentagem.

#### 3.3.4.10 Relação Carbono / Nitrogênio

A relação C/N foi determinada conforme KIEHL, (1985), dividindo-se o teor de carbono orgânico pelo teor de nitrogênio total.

#### 3.4.5 Microorganismos

Nos processos de compostagem, os microorganismos cuja presença foi investigada foram os coliformes totais, os termotolerantes e os enterococos fecais.

Para a análise de coliformes totais e das bactérias termotolerantes, foram preparados frascos com solução salina 0,9%, com diluições de  $10^{-1}$  a  $10^{-6}$ , a partir de 30 g da amostra. A identificação da presença ou ausência de coliformes totais e termotolerantes foi realizada através do Método Colorimétrico/Enzimático, adicionando o reagente Fluorocult Caldo LMX, da marca MERCK, para coliformes totais e fecais, a 100 mL da diluição  $10^{-6}$ , segundo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1995). Para a avaliação da presença de coliformes totais foi observada a mudança de cor, enquanto para os termotolerantes foi observada a fluorescência.

Para determinar a presença e quantidade de enterococos fecais inoculou-

se 1 mL da diluição  $10^6$  em Ágar Enterococos, com a técnica do espalhamento em placas de Petri (APHA, 1995).

Todos os experimentos foram realizados em triplicata (HEIDEMANN, 2005).

#### 3.4.6 Metais Pesados

Os metais pesados, Cromo, Chumbo, Cobre, Níquel e Zinco, foram definidos aleatoriamente, para análise, tendo sido especificados apenas estes cinco metais devido a restrições orçamentárias. As concentrações destes metais e dos padrões foram determinadas em triplicata, por espectrofotometria de absorção atômica, em espectrofotômetro marca GBC, modelo Avanta. A metodologia adotada foi a definida pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1995).

As curvas dos padrões foram produzidas utilizando-se padrões da marca Biotec, sendo que cada um apresentava a concentração de 1 ppm, com exceção do padrão para Níquel, cuja concentração era de 0,1 ppm. Os intervalos de concentração das curvas de calibração foram determinados de acordo com a metodologia definida para o equipamento de absorção atômica de chama utilizado, descrito acima, com limite de detecção, determinado com 20 leituras sobre o branco, de 0,1 ppm.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para se atender ao objetivo principal deste trabalho, em relação à identificação dos pontos relacionados às características interferentes na operação do sistema e no processo de compostagem da tecnologia KNEER<sup>®</sup>, a apresentação dos resultados foi dividida nas etapas que compuseram o processo. Assim sendo, considerou-se a seguinte divisão de operação:

- fornecimento de matéria prima;
- alimentação do sistema e;
- processamento da mistura nos reatores.

A divisão para análise, além de atender o objetivo, foi necessária em virtude das diversas dificuldades ocorridas durante o período da pesquisa, dificuldades estas, que só puderam ser constatadas a partir do início dos trabalhos de campo, pois até ali, não tinham sido apontados problemas operacionais.

### 4.1 PROBLEMAS DETECTADOS NO FORNECIMENTO DA MATÉRIA-PRIMA

As matérias primas, poda vegetal e lodo de esgoto, foram fornecidas como descrito no Capítulo 3. Entretanto, o fornecimento dos materiais não atendeu às exigências e programação pré-estabelecidas, pois os equipamentos de produção, tanto da poda quanto do lodo, apresentaram problemas mecânicos durante grande parte do período da pesquisa, resultando em atraso no desenvolvimento do estudo e prejuízo técnico.

Entre os problemas apresentados, podem ser destacados:

- a quebra do triturador de poda vegetal, que resultou em deficiência no fornecimento de matéria-prima representada pela fonte de carbono proveniente das podas vegetais que, por consequência, resultou no fornecimento irregular deste componente;
- a incapacidade do Horto Municipal para suprir, tanto a quantidade de poda triturada necessária para a pesquisa quanto para seu próprio uso;

- a inadequação do pátio de recepção e de cura para estocagem das matérias primas e do material descarregado dos reatores;
- a quebra da prensa desaguadora de lodo.

Os problemas operacionais resultaram em atraso no cronograma da pesquisa. Também deve ser ressaltado que a dificuldade de operação do sistema, sem um setor de recepção coberto ou preparado com baias e/ou caçambas tipo “brooks”, resultou na inadequação das condições de estocagem criteriosa da matéria prima. Isto, por sua vez, resultou em prejuízo da qualidade do material alimentado ao reator.

A conseqüência da irregularidade entre o fornecimento da fonte de carbono, a incompatibilidade na escala de entrega do lodo, e também, a inexistência de um pátio de recepção apropriado, resultou na descaracterização da umidade do lodo de esgoto. Isto porque, o lodo carregado no silo alimentador, em algumas bateladas, ficou exposto a um período de chuva de até 3 dias, até a recepção da poda e carregamento da mistura.

Além da irregularidade no fornecimento, a granulometria do material vegetal não apresentou as dimensões apropriadas para compostagem, que deve ser de 1 a 4 cm, conforme descrito nos Capítulos 2 e 3.

Para ilustrar as condições inadequadas citadas acima, as Figuras 4.1 e 4.2 apresentam algumas condições observadas “in loco”. A Figura 4.1 apresenta a disposição do material produzido, na qual podem ser observados os pedaços de poda vegetal acima da especificação e, na Figura 4.2, é mostrado o composto peneirado. Cabe salientar que, na data do registro destas informações, o material compostado apresentava mais de 90 dias de maturação.

FIGURA 4.1 – DETALHE DO COMPOSTO PRODUZIDO APÓS APLICAÇÃO SUPERFICIAL EM GRAMADO



As setas indicam o material resultante da poda vegetal acima da granulometria especificada.

Após o peneiramento, como pode ser observado na Figura 4.2, houve uma melhor homogeneização da mistura compostada e maior facilidade de aplicação.

#### 4.2 ALIMENTAÇÃO DO SISTEMA

A alimentação dos reatores foi realizada, como descrito no Capítulo 3, através de um sistema composto de máquina pá-carregadeira, silos dosadores, aparelho misturador de pás e esteiras transportadoras.

Este sistema também apresentou, durante o período da pesquisa, problemas operacionais e de manutenção, não proporcionando as condições necessárias e informadas pela empresa autorizada a utilizar a tecnologia KNEER<sup>®</sup>, entre elas, a quebra da pá carregadeira, a quebra da rosca sem fim do silo dosador, a obstrução do material na saída do aparelho misturador.

FIGURA 4.2 – DETALHE DO COMPOSTO PENEIRADO APÓS APLICAÇÃO SUPERFICIAL EM GRAMADO



Apesar da esteira transportadora ser regulada por equipamento eletroeletrônico, não foi possível evitar, em diversas ocasiões, que espaços vazios fossem formados no cone superior do silo dosador, acima da rosca sem fim, denominado efeito gaiola. Foi observado que este fato esteve relacionado, tanto à umidade excessiva quanto à granulometria inadequada da fonte de carbono, somada à falta de vibração do cone, o que causou constante desabastecimento de material na correia que, por conseguinte, causou desequilíbrio na dosagem.

Também foi observado, que o aparelho misturador não apresentou a eficiência prevista, pois as pás presas ao cilindro central não possuíam forma geométrica adequada para a homogeneização necessária. Além disso, o tamanho da boca de saída do aparelho misturador não propiciava facilidade ao fluxo de saída do material, tendo sido necessária uma intervenção emergencial para que o fluxo de passagem da mistura atingisse a correia transportadora sem provocar estrangulamento, conforme a Figura 4.3.

FIGURA 4.3 – INTERVENÇÃO EMERGENCIAL - ABERTURA PARA SAÍDA DO MATERIAL NO APARELHO MISTURADOR



Não se encontrou informações a respeito das dificuldades de preparação de misturas, montagem de leiras, no caso de compostagem convencional ou leira estática, nem sobre dificuldades de operação e alimentação de reatores, pois a maioria dos autores refere-se apenas à avaliação do composto obtido. KAYHANIAN (1999) avaliou o desempenho de leiras compactas, mas também, não apresentou comentários sobre a operação e as dificuldades encontradas na montagem das pilhas.

#### 4.3 PROCESSAMENTO DA MISTURA DENTRO DOS REATORES

Após a intervenção emergencial e solicitar para um funcionário controlar a entrada de matéria-prima para evitar o efeito gaiola citado anteriormente, foram realizadas oito cargas nos reatores, sendo que em apenas duas foi possível coletar todas as amostras programadas e, assim, realizar todos os ensaios previstos. Os fatores que levaram a não completar as oito bateladas previstas foram:

- a queda da energia elétrica da unidade, na segunda e quarta bateladas, o que resultou na paralisação dos motores, comprometendo a aeração da mistura. Esta ocorrência também

paralisou o sistema de informática, o que comprometeu o registro das temperaturas e o da concentração de oxigênio;

- a quebra do motor soprador, na quinta e sexta bateladas, com parada de aproximadamente 5 dias para a retirada, conserto e reinstalação, novamente comprometeu a aeração da mistura;
- o funcionamento irregular do analisador de oxigênio, na sétima batelada, alterou a frequência de aeração;
- para a oitava batelada, como o cronograma das atividades já estava comprometido, não havia justificativa para a continuidade dos procedimentos.

Os fatores apresentados nas seções anteriores contribuíram para o comprometimento do cronograma de atividades, além de ter dificultado a perfeita dosagem das matérias-primas para a mistura.

A apresentação e discussão dos resultados das duas bateladas (primeira e terceira), que tiveram todas as amostras retiradas conforme datas previstas, com descarga no décimo quarto dia, e todos os parâmetros ensaiados, seguem uma ordem de relevância quanto aos problemas citados anteriormente, não seguindo a ordem dos ensaios descritos no Capítulo 3, e ainda, estas duas bateladas serão analisadas em conjunto. Todos os resultados das amostras das bateladas 1 e 3 estão apresentados em tabelas completas no Anexo 2. A Figura 4.4 ilustra a retirada da primeira amostra da batelada 1.

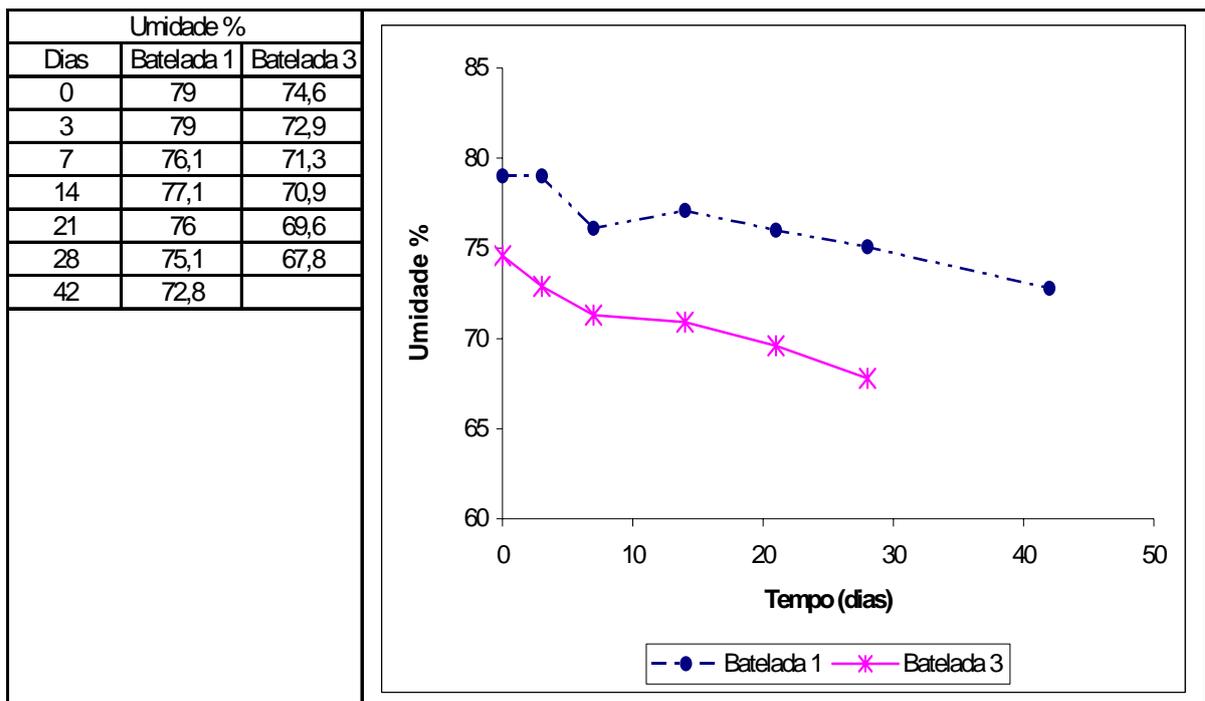
FIGURA 4.4 – RETIRADA DA PRIMEIRA AMOSTRA DA BATELADA 1



## 4.3.1 Umidade

A Figura 4.5 apresenta a variação da umidade das bateladas 1 e 3, considerando o dia zero, o dia da carga da mistura, conforme especificado no Capítulo 3.

FIGURA 4.5 – VARIAÇÃO DA UMIDADE NAS BATELADAS 1 E 3



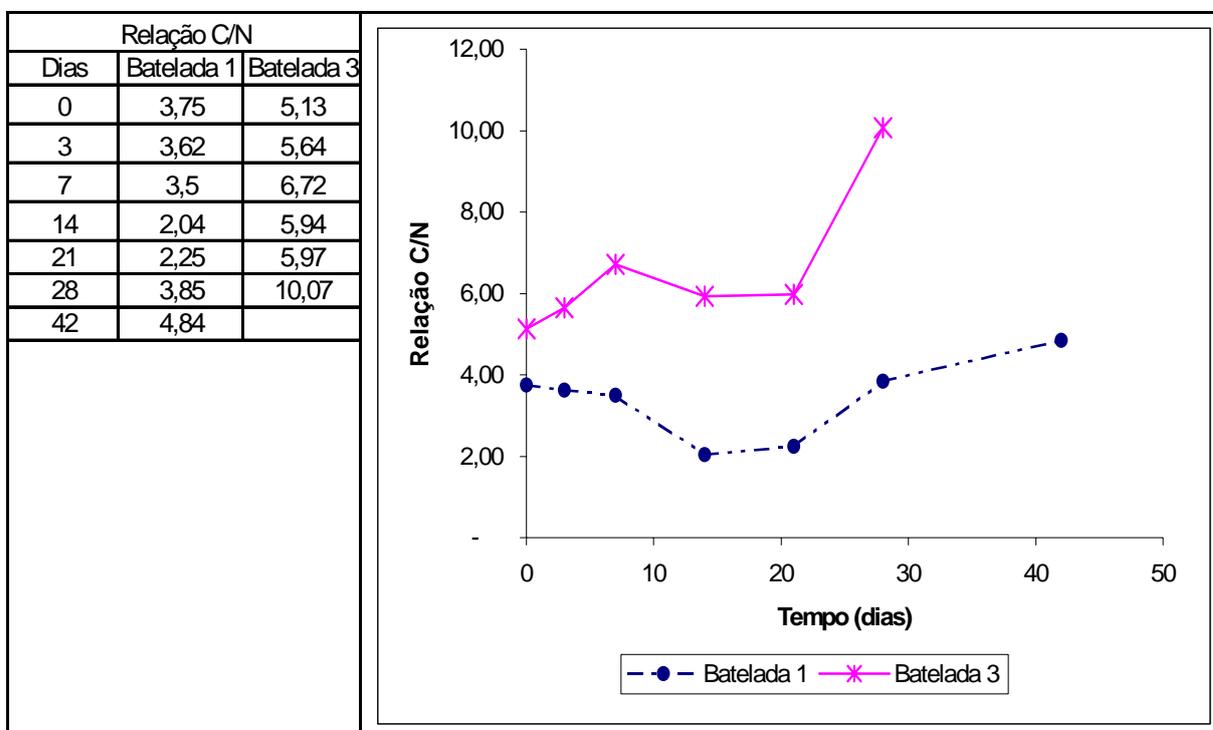
Os percentuais de umidade das duas bateladas ficaram acima de 60%, conforme recomendado por KIEHL (1985), TCHOBANOGLOUS (1993) e PEREIRA NETO (1996).

Apesar da batelada 3 ter apresentado uma redução da umidade em relação à batelada 1, em virtude do material não ter ficado exposto ao tempo, é possível supor uma alteração na dosagem, pois a umidade se apresenta mais alta que a ideal desde a carga, no início do processo, até o vigésimo-oitavo dia. A umidade variou entre os valores de 74,6% e 67,8%, nesse de 28 dias.

#### 4.3.2 Relação Carbono / Nitrogênio

A Figura 4.6 apresenta a variação da relação carbono/nitrogênio das bateladas 1 e 3, considerando o dia zero, o dia da carga da mistura, conforme especificado no Capítulo 3.

FIGURA 4.6 – VARIACÃO DA RELAÇÃO CARBONO / NITROGÊNIO NAS BATELADAS 1 E 3



A relação carbono/nitrogênio baixa, isto é, menor que 10:1, apresentada nas duas bateladas demonstra o excesso de nitrogênio, confirmando o desequilíbrio na dosagem.

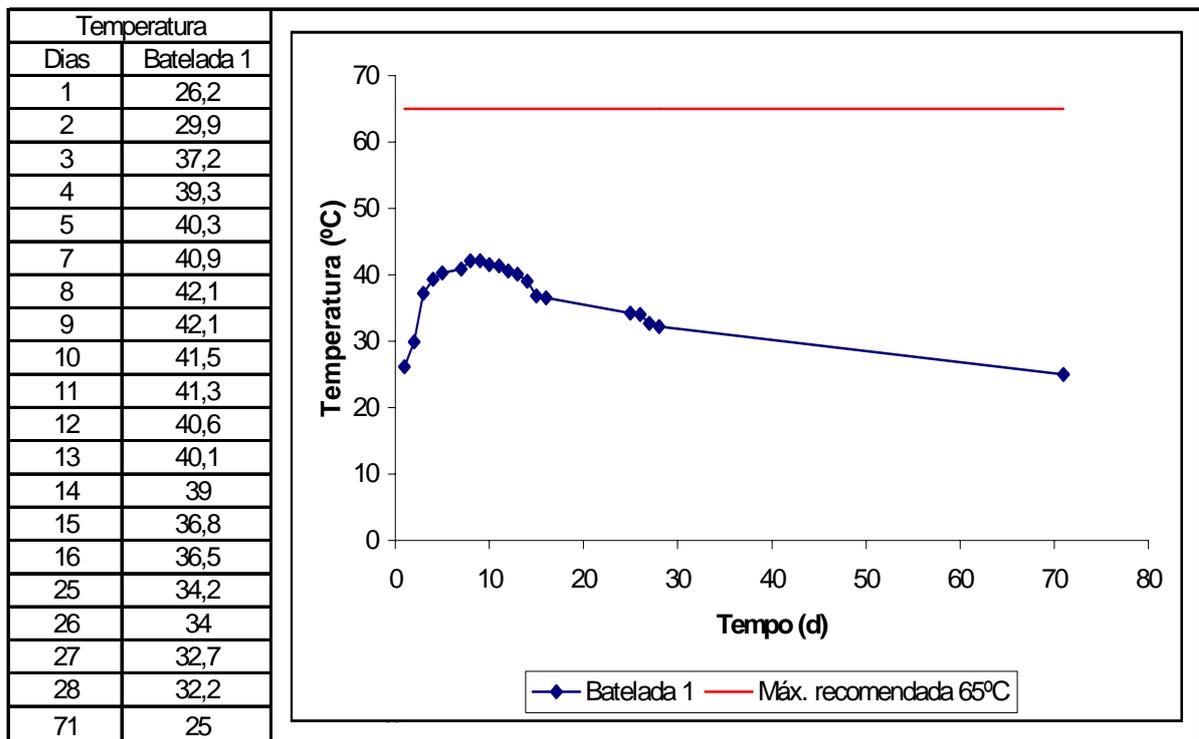
Comparando-se os valores da relação C/N encontrado nas bateladas, em torno de 3:1 na primeira e 6:1 na terceira, com o valor de 5,3:1, apresentado na Tabela 3.1, mais uma vez demonstrou que as misturas das duas bateladas apresentaram maior quantidade de nitrogênio, conseqüentemente, maior quantidade de lodo em relação ao material vegetal (KIEHL, 1985, PEREIRA NETO, 1996).

A batelada 3 demonstrou, pelo aumento da relação C/N, 10:1 no vigésimo oitavo dia, a tendência de volatilização do nitrogênio, que foi observado a partir da percepção de odores de amônia, o que é referenciado por FONSECA (2000).

#### 4.3.3 Temperatura

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam o desenvolvimento da temperatura nas bateladas 1 e 3, respectivamente.

FIGURA 4.7 – VARIACÃO DA TEMPERATURA NA BATELADA 1

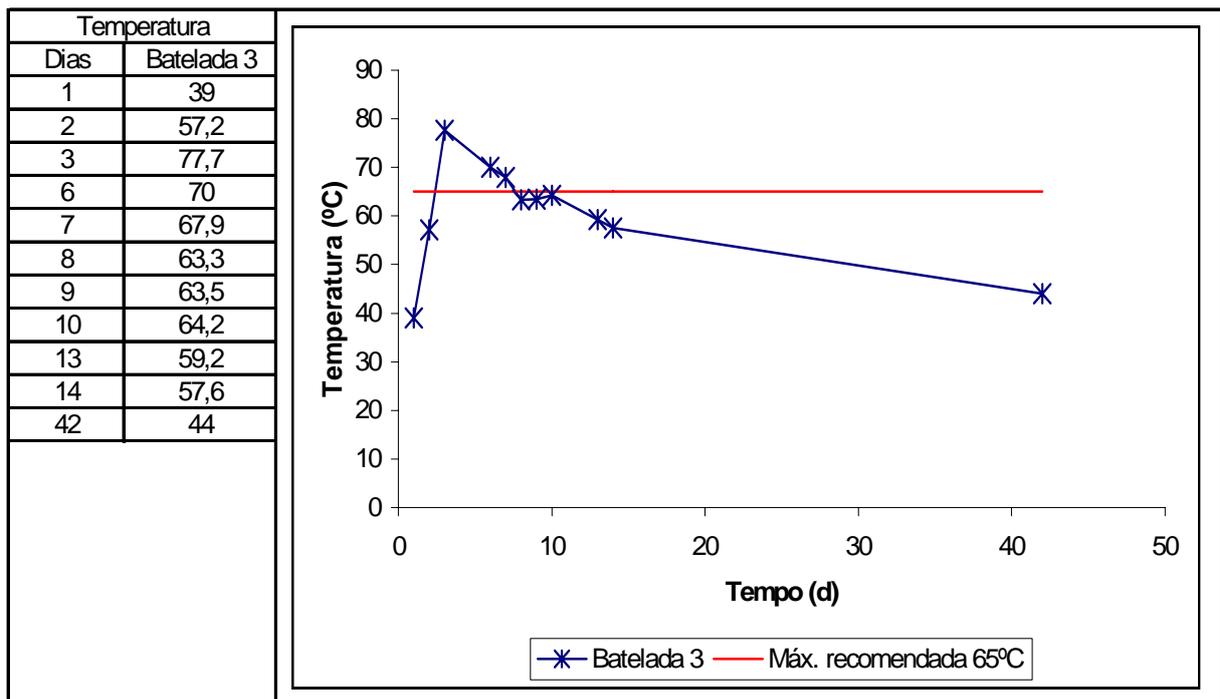


Como pode ser observado, a temperatura não evoluiu conforme o esperado. O ideal para o desenvolvimento da compostagem, de acordo com o apresentado no Capítulo 3 e mostrado na Figura 2.6, considerada evolução padrão,

seria a temperatura atingir 65°C após 2 ou 3 dias, e permanecer nesse valor durante 5 dias.

Pode-se observar que na batelada 1 a elevação da temperatura ocorreu após o quinto dia da carga, e que as temperaturas mais elevadas ocorreram apenas no oitavo e nono dias. Ainda, pode-se observar que 14 dias após a descarga, a massa permanecia em processamento, pois a temperatura medida foi de 32,2 °C, demonstrando que a fase de humificação ainda não estava concluída. Somente no septuagésimo primeiro dia é que a massa atingiu a temperatura ambiente. É importante comparar as temperaturas alcançadas com a umidade e com a relação carbono/nitrogênio analisada anteriormente.

FIGURA 4.8 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA BATELADA 3



Como é possível observar, nas Figuras 4.5 e 4.7, a umidade mais elevada da batelada 1 não permitiu que a temperatura da massa atingisse valores acima de 50°C, considerados ideais para o desenvolvimento dos microorganismos e da compostagem.

A batelada 3 apresentou umidade mais baixa em relação à batelada 1

(Figura 4.5), porém, ainda acima da ideal indicada pela literatura, entretanto a temperatura elevou-se no intervalo de 72 horas, como previsto (Figura 4.8). Pode-se notar que, no dia da descarga (décimo quarto dia), a temperatura ainda era elevada ( $57,6^{\circ}\text{C}$ ) para a compostagem acelerada (KNEER, 1978), indicando que o processo ainda estava na fase termófila.

Após aproximadamente 30 dias da descarga, a mistura apresentou temperatura em torno de  $44^{\circ}\text{C}$ . Isto demonstra que a massa estava em processamento, não tendo atingido ainda o período de cura. Quando esta temperatura foi observada, uma amostra foi retirada para a verificação dos parâmetros de avaliação do processo, conforme Anexo A 2.2.

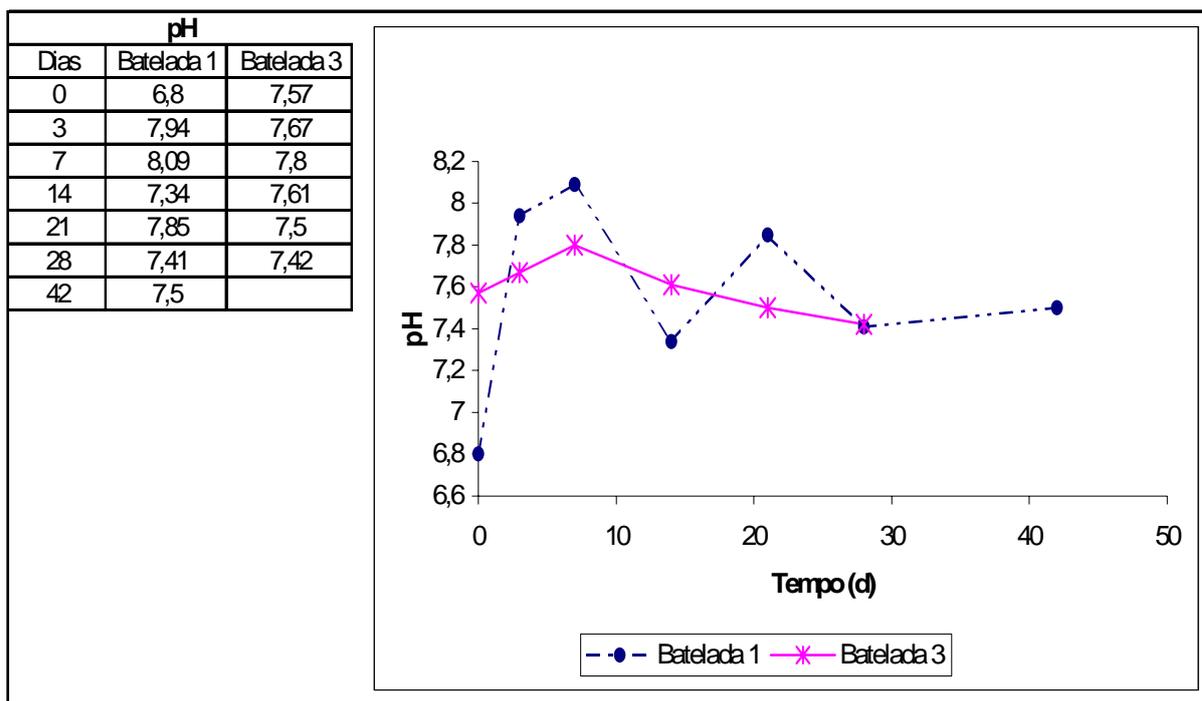
#### 4.3.4 pH

A Figura 4.9 apresenta a variação dos valores de pH para as bateladas 1 e 3, e como pode-se observar, o pH variou de 6,8 a 8,1 para a primeira batelada, e de 7,4 a 7,8 para a terceira batelada .

Como apresentado no Capítulo 2, os valores para a faixa de variação do pH seriam de 6,5 a 8,0 (KIEHL, 1985; PEREIRA NETO, 1996), assim sendo é possível notar que ambas bateladas permaneceram na faixa esperada. Segundo PEREIRA NETO (1996), os microorganismos controlam o pH, e uma variação pode estar relacionada com a maior ou menor atividade desenvolvida pelos microorganismos.

A partir dos resultados obtidos por FERNANDES (1999), pode ser considerado normal uma variação nos valores do pH entre 6 e 9.

FIGURA 4.9 – VARIAÇÃO DO pH NAS BATELADAS 1 E 3.



A diferença de pH apresentada, entre as duas bateladas, pode, ainda, estar relacionada às alterações das características da mistura, isto é, lodo e poda vegetal triturada. Isto pode levar a substratos distintos e, conseqüentemente, maior ou menor atividade dos microorganismos.

#### 4.3.5 Matéria Orgânica e Sólidos Voláteis

As dificuldades encontradas no processamento das matérias primas, especialmente relacionadas ao fornecimento e alimentação do sistema, discutidas neste capítulo, podem ser ratificadas através da análise da variação dos parâmetros matéria orgânica e sólidos voláteis, apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11, respectivamente, que, como pode ser observado, permaneceram estáveis em torno de 620 g/L, no caso da matéria orgânica, e de 20%, no caso dos sólidos voláteis. O que está em desacordo com observações de KIEHL (1998), que sugerem uma redução nos valores dos parâmetros devido ao processo de mineralização da matéria orgânica.

FIGURA 4.10 – VARIAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA NAS BATELADAS 1 E 3

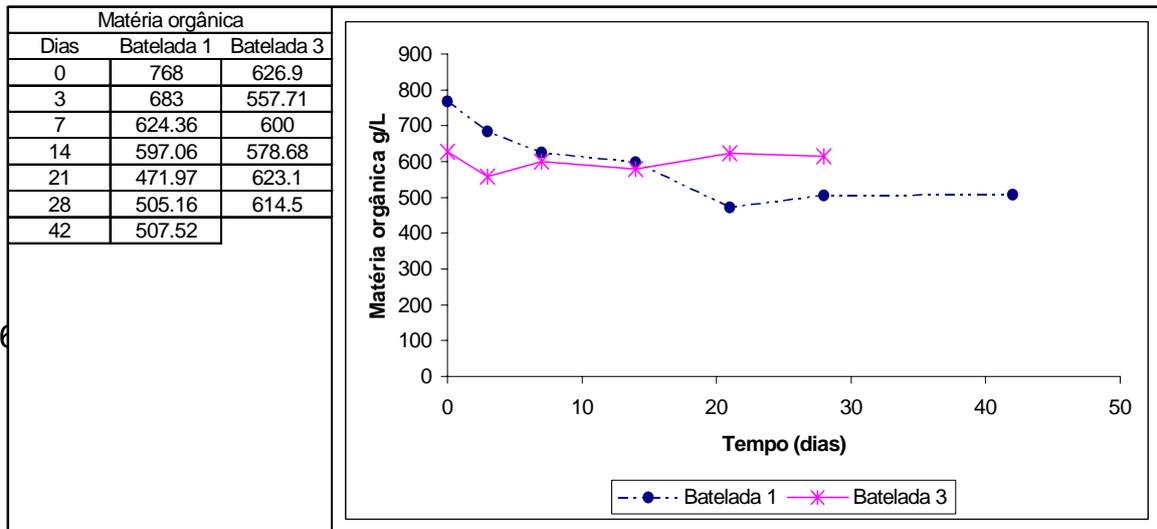
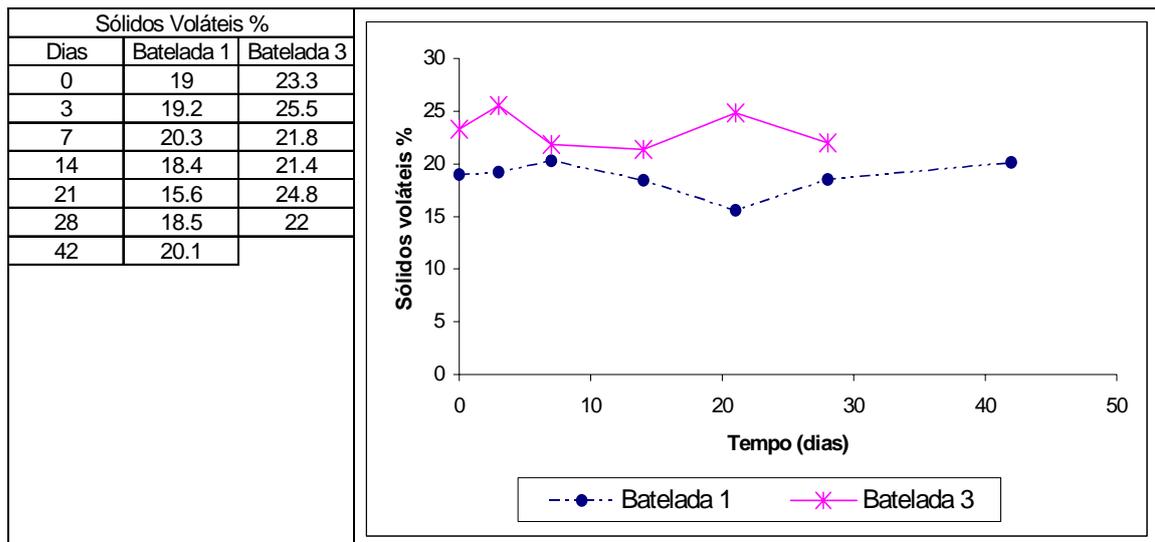


FIGURA 4.11 – VARIAÇÃO DOS SÓLIDOS VOLÁTEIS NAS BATELADAS 1 E 3



#### 4.3.6 Microorganismos

A Tabela 4.1 apresenta os resultados microbiológicos obtidos nas bateladas 1 e 3.

Nos ensaios para avaliar a presença de microorganismos pode ser observado que não foi identificada a presença de coliformes totais nem de termotolerantes, a partir do décimo quarto dia para a batelada 1 e a partir do nono dia para a batelada 3.

A partir do vigésimo primeiro dia do processamento da mistura não foi identificada a presença de microorganismos enterococos fecais.

TABELA 4.1 – RESULTADOS MICROBIOLÓGICOS DAS BATELADAS 1 E 3 REFERENTE À PRESENÇA DE TERMOTOLERANTES, COLIFORMES TOTAIS E ENTEROCOCOS FECALIS

Microorganismos	Dias						
Batelada 1	0	3	7	14	21	28	42
Termotolerantes	+	+	+	-	-	-	-
Coliformes Totais	+	+	+	-	-	-	-
Enterococos fecais (UFC/mL)	$1,5 \times 10^6$	n.d.	$3 \times 10^7$	$4 \times 10^7$	n.d.	n.d.	n.d.
Batelada 3	0	3	7	9	14	28	
Termotolerantes	+	+	+	-	-	-	
Coliformes Totais	+	+	+	-	-	-	
Enterococos fecais (UFC/mL)	$1 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

NOTA: presença (+); ausência (-); n.d. = não detectado

Entretanto, na batelada 1, foi identificada a presença destes microorganismos ainda no décimo quarto dia, o que pode ter sido resultado do excesso de umidade e baixa temperatura (Figuras 4.5 e 4.7).

Os resultados obtidos estão de acordo com as condições mostradas na Tabela 2.6, referentes a tempos de exposição *versus* temperatura. Nestas condições, a exposição dos microorganismos por mais de 60 minutos a temperaturas acima de 60°C permite a destruição de patógenos.

Para a batelada 1, apesar da temperatura máxima não ter atingido 50°C, valor inferior ao recomendado, a presença de amônia pode ter contribuído para a higienização da massa.

Segundo KIEHL (1998), a manutenção da temperatura em torno de 50°C,

por um período de aproximadamente 30 dias, também pode ser eficiente na eliminação dos patógenos.

Neste estudo não foi analisada a eficiência do sistema em relação à eliminação de ovos de helmintos.

#### 4.3.7 Metais Pesados

A Tabela 4.2 apresenta os resultados obtidos nas análises para metais pesados.

Os ensaios de metais pesados ficaram prejudicados, em virtude do laboratório ter utilizado a mesma amostra digerida para a análise do fósforo, representando menor quantidade da amostra para o ensaio.

Assim, comparando com os valores limites para o Estado do Paraná, apresentado na Tabela 2.7, pode-se afirmar que as concentrações obtidas estão abaixo das estabelecidas, com exceção da amostra da batelada 1, para a qual a concentração de Cu, no quadragésimo segundo dia, atingiu 1.165 mg/Kg, sendo aproximadamente 10% maior do que o limite máximo sugerido (IAP, 2004).

TABELA 4.2 – RESULTADO DAS ANÁLISES DE METAIS PESADOS (em mg/kg)

Metais	Batelada 1		Batelada 3	
	Dia 0	Dia 42	Dia 0	Dia 28
Pb	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cu	660	1165	537	738
Cr	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Zn	690	820	970	1070

NOTA: n.d. = não detectado

Segundo ANDREOLI (1999), a concentração de 1.165 mg/Kg pode estar relacionada ao lançamento clandestino de esgoto industrial. Esta informação foi ratificada por EDUARDO PEGORINI (SANEPAR, contato pessoal, 2005) que

salienta que a presença desses metais pode estar relacionada ao lançamento de águas residuárias de empresas de galvanoplastia e de reciclagem de cobre, entre outras (JORDÃO e PESSOA, 1995).

Em virtude do exposto sobre o desequilíbrio da dosagem, as elevadas umidades e a relação C/N baixa, não foi possível considerar o processo de compostagem concluído no prazo definido pelo fabricante, de 14 dias dentro reator e mais 14 dias no pátio de cura, conforme apresentado no Capítulo 3, porém existem indícios de aceleração do processo de compostagem, pois na data da descarga, da batelada 3, foi possível notar a presença de actinomicetos, conforme Figura 4.10, de acordo com KIEHL (1985).

FIGURA 4.12 – DESCARGA DA BATELADA 3 – PRESENÇA DE ACTINOMICETOS



## 5 CONCLUSÃO

Em virtude das condições operacionais apresentadas anteriormente, e com a finalidade de atender o objetivo principal deste trabalho que era estudar uma alternativa técnica e tecnológica de compostagem confinada e acelerada para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos, através de aeração forçada em ambiente fechado, a tecnologia de compostagem acelerada KNEER<sup>®</sup>, a conclusão será apresentada em relação à operação do sistema e à qualidade do composto e, a seguir, serão apresentadas sugestões e recomendações para a que o sistema possa ser operado de maneira mais adequada, o que poderá representar uma melhoria na produção e na qualidade do composto produzido.

### 5.1 OPERAÇÃO DO SISTEMA E QUALIDADE DO COMPOSTO

Em consequência dos ensaios e ações levados a efeito, tanto em laboratório quanto “in loco”, pode-se concluir que o sistema apresenta deficiência em relação à alimentação e ao preparo da mistura para a alimentação dos reatores, o que resultou em desequilíbrio na dosagem da massa, principal causa dos problemas identificados.

Com o desequilíbrio da dosagem, parâmetros importantes em relação ao desenvolvimento e acompanhamento do processo de compostagem foram prejudicados, entre eles a umidade das matérias-primas e, por conseguinte, da mistura de alimentação do reator, além da relação carbono/nitrogênio. A deficiência relativa à manutenção das condições de alimentação resultou na impossibilidade de uma avaliação completa do composto produzido, dentro dos prazos indicados pelo fabricante, de forma a possibilitar a avaliação da eficiência do sistema em relação à redução das etapas de compostagem em processo acelerado.

Em relação à presença de microorganismos e metais pesados, para o período de compostagem de 14 dias, especificado pelo fabricante, a qualidade do composto pode ser considerada boa ou adequada. Esta afirmação é possível devido

à ausência de coliformes totais e termotolerantes observada na amostra retirada no décimo quarto dia de processo.

Da mesma forma ocorre em relação aos metais pesados, que apresentaram de um modo geral concentrações menores do que o sugerido pelo Estado do Paraná, com exceção de uma amostra.

## 5.2 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Em função das observações “in loco” durante o período da pesquisa, para que o sistema apresente maior eficiência, algumas intervenções são necessárias tanto para a unidade avaliada quanto para o projeto e construção de futuras unidades.

A seguir serão apresentadas as recomendações, de acordo com o setor do processo.

### 5.2.1 Fornecimento de Matéria-Prima

- aquisição de triturador próprio para a poda vegetal, que forneça material com granulometria entre 1 e 4 cm;
- readequação do pátio de recepção, sendo que uma área coberta para estocagem da matéria-prima deverá ser reservada;
- programação da operação do sistema para fornecimento contínuo de material para compostagem.

### 5.2.2 Alimentação do Sistema

- aquisição de máquina pá carregadeira reserva ou de um equipamento em melhores condições de operação;
- aquisição de silos dosadores com placas vibratórias, ou reforma dos atuais, para que possa ser garantida a alimentação e a dosagem na mistura das matérias-primas;
- controle contínuo de pesagem, automatizado e preciso;
- aquisição de aparelho misturador mais eficiente.

### 5.2.3 Processamento da Mistura

- aquisição de gerador e bateria “no break”; para que não ocorra descontinuidade no fornecimento de energia ao sistema, principalmente para que os dados coletados pelo programa de controle do sistema operacional não sejam perdidos;
- reformulação do programa computacional específico para o controle e armazenamento de informações, principalmente das concentrações de oxigênio e de temperaturas;
- aquisição de equipamentos, peças e motores de reposição tais como um motor-soprador, termoresistências e um analisador de oxigênio.

### 5.2.4 Organização e Métodos

- permanência de um profissional, em tempo integral, para o gerenciamento do sistema no local de operação;
- implantação de um sistema de rastreabilidade tanto na prática, por meio de baias e placas indicativas dos lotes recebidos e bateladas produzidas, como um controle administrativo, conforme planilha sugerida no Anexo 3. Isto devida à observação, “in loco”, da perda de informações e falta de controle de origem e destinação, tanto da matéria prima quanto da mistura resultante;
- continuidade da operação do sistema de compostagem em todas as etapas, para que seja possível garantir a qualidade do composto produzido;
- adoção de um sistema de controle de qualidade e do processo, que possa avaliar a continuidade da produção, a matéria-prima, a dosagem, a umidade da mistura, e a qualidade do composto produzido, conforme fluxograma apresentado no Anexo 4.

### 5.2.5 Pesquisa

Para que seja possível a obtenção de dados específicos de melhor qualidade em relação ao sistema estudado, sugere-se que, após as intervenções necessárias, o processo, os ensaios e a análise dos resultados sejam repetidos com as mesmas matérias-primas, alterando as dosagens de lodo de esgoto e poda vegetal.

Uma outra medida, que poderia ser adotada, seria a caracterização mais adequada das matérias-primas para cada batelada, por exemplo, a determinação de parâmetros como concentrações de carbono, de nitrogênio, o pH e a umidade, para o lodo de esgoto, para que a dosagem dos componentes possa ser mais precisa.

Para a continuidade deste estudo, recomenda-se também a realização de processamento e ensaios com outras matérias-primas como restos de alimentos, resíduos de feira e serragem.

Para complementar este trabalho e para que sejam produzidas informações sobre melhores condições operacionais, recomenda-se estudo relativo à avaliação dos equipamentos de aeração, sistemas de exaustão de gases e, principalmente, o desenvolvimento ou aprimoramento do programa de informática de operação e controle, usando uma interface mais amigável.

Como consequência das observações dos resultados deste trabalho, também, é sugerida a pesquisa dos efeitos, dos benefícios, da capacidade em fornecer nutrientes, dos compostos produzidos, na aplicação no solo, e ainda, o estudo da capacidade de absorção pelo mercado consumidor das possíveis quantidades produzidas em escala industrial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISON, K. **Albert Howard** Disponível em: <[http:// www.journeytoforever.org/farm\\_library/howardAT/AT1.html](http://www.journeytoforever.org/farm_library/howardAT/AT1.html)> Acesso em: 21 set. 2004.

AGUILAR, F.J., GONZÁLEZ, P. Agricultural use of compost from municipal solid waste – effects on soil physical properties. **The journal of solid waste technology and management**, November 2002, Volume 28, number 4.

ALMEIDA, M., A., de. Modelo de gestão de resíduos sólidos de Belo Horizonte. In: PAULICS, V. **125 Dicas – Idéias para a Ação Municipal**. São Paulo: Pólis, 2000. p. 181-182.

ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C., PEGORINI, E.S.; LARA, A. I. A reciclagem agrícola do lodo de esgoto e a gestão do processo em estações de tratamento de esgoto. **Conferência Internacional sobre Agropolos e Parques Tecnológicos Agroindustriais**. Barretos, SP, 1999.

ANDREOLI, C.; LARA, A. I., ITHENFELD, R. G. K. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

ARCHANJO, C., R.; SILVA, L. H. da. **Acompanhamento de um Processo de Compostagem Acelerada – Tecnologia Kneer®**. Curitiba, Julho/2005, 68f. Monografia (graduação em Tecnologia em Química Ambiental), Curso Superior de Tecnologia em Química Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET - PR.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8.849/1985**: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 9.383/1986**: produtos orgânicos sólidos – determinação da umidade e outros materiais voláteis nas condições do teste. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.703/1989**: Degradação de solos: terminologia. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13.591/1996**. Compostagem: terminologia. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13.895/1997**: Construção de poços de monitoramento e amostragem: procedimento. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.004/2004**: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2ª. Edição, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.007/2004**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2ª. Edição, 2004.

AWWA\APHA\WEF. Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20<sup>th</sup> Edition, 1995. Washington.

AZEVEDO, M. de A. **Estudo e avaliação de quatro modos de aeração para sistemas de compostagem em leiras**, Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 01/04/1993.

BIDONE, F. R. A., REIS, M., SELBACH, P. **Compostagem – Aspectos teóricos e operacionais**, Apostila do curso realizado pela ABES/RS – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre: ABES, Julho 2003.

BRAGA, M.C.B., BONETTO, E. R. Solid Waste Management in Curitiba, Brazil – Alternative solutions. **The journal of resources and technology**, Marh 1993, Volume 21, number 1.

BRASIL. Substitutivo de Projeto de Lei n. 203/91. **Relatório preliminar**: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelece diretrizes e normas para o gerenciamento dos diferentes tipos de resíduos sólidos, acrescenta artigo à Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Brasília, 2002.

BRASIL. Portaria da Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária nº 31, de 8 de junho de 1982. Aprova os métodos analíticos que passam a constituir métodos padrões, oficiais, para análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes sujeitos a inspeção e fiscalização previstas na legislação acima referida. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, p. 10763, 14 jun 82. Seção 1.

BRINTON, W. F. Basis for interpretation of wastes and compost tests. **Journal of the Woods End Research Laboratory**. 1ª Edition, 1989. Mt Vernon: Woods End, 1997.

BRITTO JÚNIOR, A. O. S. **Produção de composto usando lodo de estação de tratamento de esgoto: Caso da CEASA-CE**. Fortaleza - CE, 2003, 200f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará.

BÜTTENBENDER, S. E. **Avaliação da compostagem da fração orgânica dos resíduos urbanos provenientes da coleta seletiva realizada no município de Anegolina – SC**. Florianópolis - SC, março/2004, 140 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental), Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

CALDAS, E., LACZYNSKI, P. Sistema de coleta e tratamento de lixo. In: PAULICS, V. **125 Dicas – Idéias para a Ação Municipal**. São Paulo: Pólis, 2000. p. 193-194.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. 4ª Ed. São Paulo: Humanitas FFLCH/SP, 2003. 346 p.

CAMPANILI, M. **Resíduos sólidos terão política nacional. O Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/ciencia/noticias/2001/ago/09/123.htm>> Acesso em: 29/08/05

CAPRA, F. **O Ponto de Mutação**. São Paulo: Editora Cultrix, 1982. 447 p.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B. de, LANGE, L. C., GOMES, L. P., PESSIN, N. **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para município de pequeno porte**. 1ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

CEMPRE - Compromisso Empresarial Para Reciclagem, **Compostagem: A outra metade da reciclagem**, São Paulo, 2ª Edição, 2001.

CEMPRE - Compromisso Empresarial Para Reciclagem; **Guia de coleta seletiva de lixo**, 1 CD-ROM.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Manual de instruções básicas para a execução de aterro sanitário**. São Paulo, 1979. Anexo 3.

COOPERBAND, L. R. **Composting: The art and science of converting Organic Waste to a valuable soil resource**. Disponível em: <<http://www.wastenotorganics.wisc.edu/composting/compostart/compostart.html>> Acesso em: 21 set. 2004.

EIGENHEER, E. M. **Lixo e desperdício, Raízes do Desperdício**. Rio de Janeiro: ISER – Instituto de Estudos da Religião, 1993

FERNANDES, F., SILVA, S. M. C. P da. **Manual Prático para Compostagem de Biossólidos**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: ABES. 1999.

FERNANDES, F., PIERRO, A. C., YAMAMOTO, R. Y. Produção de fertilizante orgânico por compostagem do lodo gerado por estações de tratamento de esgotos. **PESQUISA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA**, Brasília, 1993, v. 28, n.5, p. 567-574.

FIGUEIREDO, P. J. M. **A sociedade do lixo: Os resíduos, a questão energética e a crise ambiental**. 2ª Edição. Piracicaba: Editora UNIMEP, 1995.

FONSECA, E. **Sistemas de Compostagem**. Curso: Modelo de Gestão Integrada dos resíduos Sólidos Urbanos – Módulo 6. Brasília: ABES, 2000. 183 p.

GIANSANTI, R. **O Desafio do Desenvolvimento Sustentável**. 5ª Edição. São Paulo: Atual editora, 1998, pp 111.

GRIPPI, S. **Lixo, reciclagem e sua história: guia para as prefeituras brasileiras**. RJ: Interciência, 2001.

HACH COMPANY. Method 8075. **Nitrogen, Total Kjeldahl**: Nessler Method (digestion required), Alemanha, 2005. pp 6.

HASSOL, S., RICHMAN, B. **Creating a Healthy World – 101 Practical Tips For Home And Work – Recycling**. First Edition. Colorado: The Windstar Foundation, 1989.

HE, G., SOLO-GABRIELE, H., WONG, K. V. Infiltration rates through landfill cover systems. **The journal of solid waste technology and management**, November 1998, Volume 25, number 3&4.

HEIDEMANN, B. R. **Compostagem acelerada: análise microbiológica do composto**. Departamento de Química e Biologia, CEFET – PR. Curitiba: 2005.

HICKMANN JR, H. L. Composting: Sometimes a good idea does not sell. In: \_\_\_\_\_. **The brief history of solid waste management in the United States during the last 50 years**. Disponível em: <[http://www.forester.net/mw\\_0107\\_history.html](http://www.forester.net/mw_0107_history.html)> Acesso em: 21 set. 2004.

HOWARD, A. **An Agricultural Testament**. Disponível em: <[http://www.journeytoforever.org/farm\\_library/howardAT/ATtoc.html](http://www.journeytoforever.org/farm_library/howardAT/ATtoc.html)> Acesso em: 21 set. 2004.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ – IAP. Diretoria de Controle de Recursos Ambientais. **Manual de Licenciamento Ambiental**. Instrução Normativa 105.003. Edição: Janeiro, 1998; Revisado: Outubro, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Rio de Janeiro: IBGE, 2000.

JAHNEL, M. C., MELLONI, R., CARDOSO, E. J.B.N. **Maturidade de composto de lixo urbano**. Sci. agric. vol.56, n.2 Piracicaba: SP, 1999.

JARDIM N. S. et al. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. 1ª edição. São Paulo: IPT/CEMPRE, 1995. Publicação IPT 2163.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3ª ABES: Rio de Janeiro, 1995.

KASSENGA, G. R. Potencial and constraints of composting as a market solid wastes disposal option for Dar Es Salaam, Tanzania. **The journal of solid waste technology and management**, May 1999, Volume 26, number 2.

KAYHANIAN, M. Design, operation and performance of compressed windrow composting, **The journal of solid waste technology and management**, February 1999, Volume 26, number 1.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica “Ceres” Ltda., 1985. 492 p.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. Piracicaba: Gráfica e Editora Degaspari, 1998. 171 p.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes organominerais**. 3ª Edição. Piracicaba: Gráfica e Editora Degaspari, 1999. 146 p

KNEER, F. X. **Procedimentos gerais para o processo KNEER**. Apostila do autor. Blauberen, Alemanha: Agosto, 1978.

LUCHESE, E. B., FAVERO, L. O. B., LENZI, E. **Fundamentos da Química do Solo: Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002.

McDONOUGH, W. **Cradle to cradle: remaking the way we made things**. First Edition. New York: North Point Press, 2002.

McKENNEY, R. E. Refuse disposal. In: \_\_\_\_\_ . **Microbiology for Sanitary Engineers**, New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1962. p.261-265.

MILARÉ, E. **Direito do Ambiente**. 4ª Edição revista, atualizada e ampliada. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais Ltda., 2005. p 297-300.

MOTTA, F. S. da **Produza sua energia, biodigestores anaeróbios**. Recife: Gráfica Editora, 1986.

NÓBREGA, C. C. **Estudo e avaliação de um método de aeração forçada para compostagem em leiras**, Campina Grande, 01/03/1991, 115f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.

OBLADEN, N. L. **Aterro Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos**. Apostila do curso promovido pela Federação das Associações de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Estado do Paraná, FEAPAR, Programa de Treinamento Paraná, Julho, 2003.

OBLADEN, N. L. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande do Sul**. Trabalho realizado para a Prefeitura Municipal de Campina Grande do Sul, Dezembro, 2003.

OLIVEIRA, A., S., D. **Lixões: O preço da ignorância**. 2ª. Edição, Rio Grande: Fundação Universidade do Rio Grande, 1996.

OWEN, P. A. **The history of composting**. 2003. Disponível em: <<http://www.powen.freeseerve.co.uk/Guides/histcomp.html>> Acesso em: 21 set. 2004.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de Compostagem – Processo de baixo custo**. Belo Horizonte: Fundo das Nações Unidas para a Infância, UNICEF, 1996.

RAMOS, S. I .P. **Sistematização técnico-organizacional de programas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos em municípios do Estado do Paraná**. Curitiba, 13/08/2004, 211 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental), Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná.

RANGEL, O. J. P., SILVA, C. A., BETTIOL, W. GUILHERME, L. R. G., DYNAL, J. F. Acúmulo DE Cu, Mn, Ni, Pb e Zn em latossolo vermelho adubado com fontes de lodo de esgoto e cultivado com milho. **Ciências Agrotécnicas**, Lavras, v. 28, n.1, p.15-23, jan./fev., 2004.

REZENDE, A. A. P. **Estudo e avaliação de um processo de reciclagem e compostagem dos resíduos sólidos urbanos**. Minas Gerais, 01/12/1991. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, MG.

SILVA, F. C. T. **O desperdício no reino da necessidade, Raízes do Desperdício**. Rio de Janeiro: Instituto de Estudos da Religião – ISER, 1993

SILVA, S. M. C. P de; FERNANDES F. Co-compostagem de biosólidos, lodo de tratamento de água e resíduos de podas de árvores. **XXVI Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ambiental**. Lima, Peru, Novembro 1998.

SOARES, A. P. M., GRIMBERG, E. Coleta seletiva e o princípio dos 3 R's. In: PAULICS, V. **125 Dicas – Idéias para a Ação Municipal**. São Paulo: Pólis, 2000. p. 167-168.

SRIVASTAVA, A, KUMAR, R., SINGH, R.N. Odour impact evaluation of municipal waste composting unit, **The journal of solid waste technology and management**. February 2002, Volume 28, number 1.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H; VIGIL, S. **Integrated solid waste management: engineering principles and manages issues**. United States of America, New York: McGraw-Hill, 1993.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater Engineering: treatment and reuse** / Metcalf & Eddy, Inc. 4<sup>th</sup>. Edition. United States of America, New York: McGraw-Hill, 2003.

URBAN, T. **Em outras palavras: meio ambiente para jornalistas**. Curitiba: SENAI-PR/SEMA, 2002. 224 p.

US Environment Protection Agency – EPA. **In-Vessel Composting of Municipal Wastewater Sludge, EPA/625/8-89/016**. Risk Reduction Engineering Laboratory, Summary Report. Cincinnati, Ohio: September 1989.

VAZ, J. C.; CABRAL, C. C. Coleta seletiva e reciclagem do lixo. In: PAULICS, V. **125 Dicas – Idéias para a Ação Municipal**. São Paulo: Pólis, 2000. p. 169-170.

VIRARAGHAVAN, T.; MAHENDRAKER, V.; MIHIAL, D. J. Landfill Closure Plans and Post– Closure Care – Cover designand Maintenance, **The journal of solid waste technology and management**. February 1997, Volume 24, number 1.

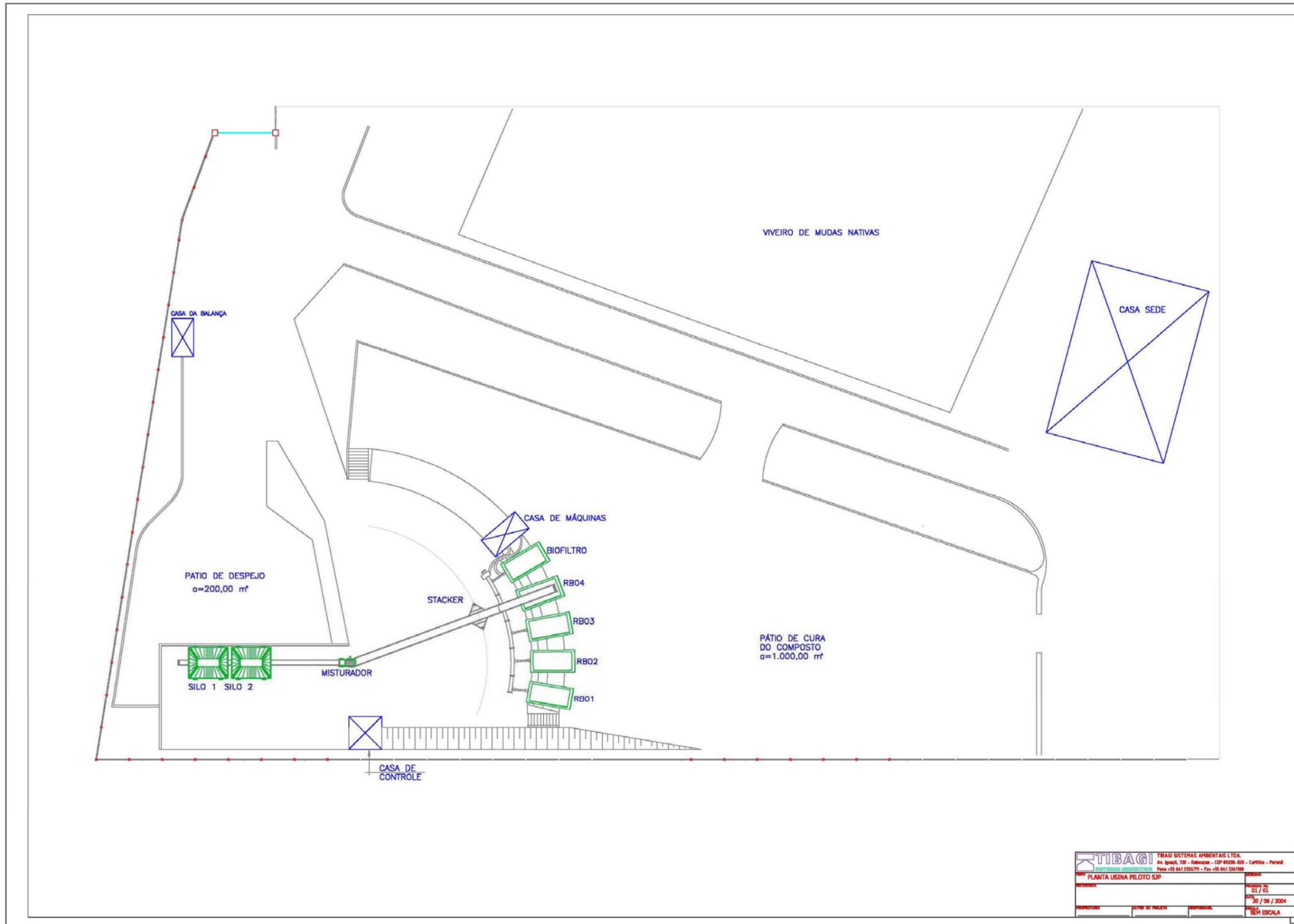
ZANETTI, M.C.; CONTI, R. New proposals for integrated MSW management in landfill, **The journal of solid waste technology and management**. February 1998, Volume 25, number 1.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1 – “LAY OUT” DA UNIDADE

---

“LAY OUT” DA UNIDADE



<b>TIBAGI</b> TIBAGI SISTEMAS AMBIENTAIS LTDA. Av. Iguaçu, 708 - Ribeirão - CEP 08208-820 - Curitiba - Paraná Fone +55 41 33247711 - Fax +55 41 3341188	
<b>PLANTA USINA PILOTO S/P</b>	
PROJEÇÃO:	DATA: 01 / 01
AUTORES:	DATA: 30 / 06 / 2004
REVISÃO:	DATA: 08 / 08 / 2004
ESCALA:	1:100

## ANEXO 2 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE TODAS AS AMOSTRAS

TABELA A.2.1 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE TODAS AS AMOSTRAS DA BATELADA 1

Dias	0	3	7	14	21	28	42
Código da amostra	A01B01D00/R04	A02B01D03/R04	A03B01D07/R04	A04B01D14/R04	A05B01D21/R04	A06B01D28/R04	A07B01D42/R04
Data da Coleta	4/4/2005	7/4/2005	12/4/2005	18/4/2005	25/4/2005	2/5/2005	16/5/2005
	0	3	7	14	21	28	42
Densidade (kg/L)	0,76	0,9	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	0,65
pH da amostra virgem	7,02	8	7,6	8,6	8,47	8,57	8
pH da TFSA	6,8	7,94	8,09	7,34	7,85	7,41	7,5
Umidade (%)	79	79	76,1	77,1	76	75,1	72,8
Sólidos Totais (%)	24,2	23,8	25,2	24,4	21,3	23,8	25,8
Sólidos Fixos (%)	5,2	4,8	5	5,8	5,2	5,5	5,6
Sólidos Voláteis (%)	19	19,2	20,3	18,4	15,6	18,5	20,1
Carbono Orgânico (g/L)	447	397,1	363	347,13	274,4	293,7	295,07
Carbono Orgânico (%)	34,4	30,6	28	26,7	21,1	22,6	22,7
Matéria Orgânica (g/L)	768	683	624,36	597,06	471,97	505,16	507,52
Fósforo (%)	1,06	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	0,94
Nitrogênio Total (mg/kg)	19.275,00	17.772,00	19.125,00	29.944,00	22500	14625	12750
Nitrogênio Total base seca (%)	9,18	8,46	8,00	13,08	9,38	5,87	4,69
Relação Carbono/Nitrogênio	3,75	3,62	3,50	2,04	2,25	3,85	4,84
Termotolerantes	Pos	Pos	Pos	Neg	Neg	Neg	Neg
Coliformes Totais	Pos	Pos	Pos	Neg	Neg	Neg	Neg
Enterococos fecais	0,15 x 10 <sup>7</sup>	0	3 x 10 <sup>7</sup>	4 x 10 <sup>7</sup>	0	0	0
Chumbo - Pb (mg/kg)	n.d.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	n.d.
Cobre - Cu (mg/kg)	660	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	1165
Cromo - Cr (mg/kg)	n.d.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	n.d.
Níquel - Ni (mg/kg)	n.d.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	n.d.
Zinco - Zn (mg/kg)	690	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	820

NOTA: \* TFSA: Terra Fina Seca ao Ar

Legenda do código da amostra:

Aa = Amostra / número

Bb = Batelada / número

Dd = Dias / dias da carga

Rr = Reator / número

Legenda Metais Pesados

n.d. = não detectado

e.n.e. = ensaio não efetuado

TABELA A.2.2 – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE TODAS AS AMOSTRAS DA BATELADA 3

	0	3	7	14	21	28
	<b>A01B02D00/R02</b>	<b>A02B02D03/R02</b>	<b>A03B02D07/R02</b>	<b>A04B02D09/R02</b>	<b>A05B02D14/R02</b>	<b>A06B02D28/R02</b>
<i>Data da Coleta</i>	3/5/2005	6/5/2005	10/5/2005	12/5/2005	17/5/2005	31/5/2005
	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>14</b>	<b>28</b>
Densidade (kg/L)	0,7	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	0,525
pH da amostra virgem	8	8,47	8,52	8,5	8,5	7,42
pH da TFSA	7,57	7,67	7,8	7,61	7,5	7,42
Umidade (%)	74,6	72,9	71,3	70,9	69,6	67,8
Sólidos Totais (%)	29,6	32,5	29,1	27,7	31,6	29,3
Sólidos Fixos (%)	6,3	7	7,3	6,31	6,6	7,5
Sólidos Voláteis (%)	23,3	25,5	21,8	21,4	24,8	22
Carbono Orgânico (g/L)	364,52	324,25	348,8	336,44	362,3	357,1
Carbono Orgânico (%)	28,1	25	26,8	26	28	27,5
Matéria Orgânica (g/L)	626,9	557,71	600	578,68	623,1	614,5
Fósforo (%)	0,83	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	0,73
Nitrogênio Total (mg/kg)	13.688,00	12.000,00	11.438,00	12.750,00	14.250,00	8.804,00
Nitrogênio Total base seca (%)	5,475	4,43	3,99	4,38	4,69	2,73
Relação Carbono/Nitrogênio	5,13	5,64	6,72	5,93	5,97	10,07
Termotolerantes	Pos	Pos	Pos	Neg	Neg	Neg
Coliformes Totais	Pos	Pos	Pos	Neg	Neg	Neg
Enterococcus fecais	1 x 10 <sup>7</sup>	2 x 10 <sup>7</sup>	0	0	0	0
Metal – Pb (mg/kg)	n.d.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	n.d.
Metal – Cu (mg/kg)	537	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	738
Metal – Cr (mg/kg)	n.d.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	n.d.
Metal – Ni (mg/kg)	n.d.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	n.d.
Metal – Zn (mg/kg)	970	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	e.n.e.	1070

NOTA: \* TFSA: Terra Fina Seca ao Ar

Legenda do código da amostra:

Aa = Amostra / número

Bb = Batelada / número

Dd = Dias / dias da carga

Rr = Reator / número

Legenda Metais Pesados

n.d. = não detectado

e.n.e. = ensaio não efetuado

ANEXO 3 – PLANILHAS DE CONTROLE ADMINISTRATIVO - RASTREABILIDADE

TABELA A 3.1 - CONTROLE DE RECEBIMENTO E CARREGAMENTO DE RESÍDUO

UNIDADE DE VALORIZAÇÃO DE ORGÂNICOS									
CONTROLE DE RECEBIMENTO E CARREGAMENTO DE RESÍDUO									
LOTE	RESÍDUO	Qdade (m <sup>3</sup> )	Peso Especifico (t/m <sup>3</sup> )	QDADE (t)	TRANSPORTADORA	CARGA	DESCARGA	RESPONSÁVEL	
001.05	01 D 01 030805	5,00	0,85	4,25	HMS	21/1/2005	4/2/2005	VINICIO	
				0,00			14/1/1900		
				0,00			14/1/1900		
				0,00			14/1/1900		
				0,00			14/1/1900		
				0,00			14/1/1900		
				0,00			14/1/1900		
				0,00			14/1/1900		
<b>TOTAL</b>				<b>4,25</b>					

**Controle de rastreabilidade dos resíduos**

CC CR RE ddmmaa

onde:

CC = Código do Cliente

CR = Código do Resíduo (de acordo com o Ministério da Agricultura)

RE = Reator

ddmmaa = dia mês ano

TABELA A 3.2 - CONTROLE DE RECEBIMENTO E CARREGAMENTO DE MATERIAL ESTRUTURANTE

<b>UNIDADE DE VALORIZAÇÃO DE ORGÂNICOS</b>						
<b>CONTROLE DE RECEBIMENTO E CARREGAMENTO DE MATERIAL ESTRUTURANTE</b>						
<b>ESTRUTURANTE</b>	<b>AQUISIÇÃO(m³)</b>	<b>Estoque (m³)</b>	<b>Utilização</b>	<b>Qdade [m³]</b>	<b>Peso Específico (t/m³)</b>	<b>Qdade [t]</b>
01 ME 001 05	50,00	50,00	01 D 01 030805	7,50	0,30	2,25
		42,50	0,00	0,00	0,30	0,00
		42,50	0,00	0,00	0,30	0,00
		42,50	0,00	0,00	0,30	0,00
	10,00	52,50	0,00	0,00	0,28	0,00
		52,50	0,00	0,00	0,28	0,00
		52,50	0,00	0,00	0,28	0,00
		52,50	0,00	0,00	0,28	0,00
<b>TOTAL</b>				<b>7,50</b>		<b>2,25</b>

**Controle de rastreabilidade dos resíduos****MATERIAL ESTRUTURANTE**

CC ME ccc aa

onde: CC = Código do Cliente  
 ME = Código do Material Estruturante  
 ccc = Código da compra  
 aa = ano

**UTILIZAÇÃO**

CC CR RE ddmmaa

onde: CC = Código do Cliente  
 CR = Código do Resíduo (de acordo c/ o Ministério da Agricultura)  
 RE = Reator  
 ddmmaa = dia mês ano

TABELA A 3.3 - CONTROLE DE PRODUÇÃO DO COMPOSTO

UNIDADE DE VALORIZAÇÃO DE ORGÂNICOS									
CONTROLE DE PRODUÇÃO DO COMPOSTO									
CONTROLE	DESCARGA	Prev. CURA	QTDE CARGA (m <sup>3</sup> )	QTDE DESCARGA (m <sup>3</sup> )	PERDAS (m <sup>3</sup> )	Peso Esp. (t/m <sup>3</sup> )	QTDE DESCARGA (t)	PERDAS (%)	BENEFICIADO (Kg)
01 D 01 030805	4/2/2005	18/2/2005	12,50	9,38	3,13	0,60	5,63	30,00%	3937,50
0	14/1/1900	28/1/1900	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00
0	14/1/1900	28/1/1900	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00
0	14/1/1900	28/1/1900	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00
0	14/1/1900	28/1/1900	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00
0	14/1/1900	28/1/1900	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00
0	14/1/1900	28/1/1900	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00
0	14/1/1900	28/1/1900	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00
0	14/1/1900	28/1/1900	0,00	0,00	0,00		0,00		0,00
<b>TOTAL</b>							<b>5,63</b>		<b>3937,50</b>



ANEXO 4 – FLUXOGRAMA DO CONTROLE DE QUALIDADE E DO PROCESSO

FIGURA A.4.1. – FLUXOGRAMA DO CONTROLE DE QUALIDADE E DO PROCESSO

