

UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE BAURU

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

EDVALDO JOSÉ SCOTON

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO RESPIROMÉTRICO PELO ACOMPANHAMENTO E
CONTROLE DE PROCESSO DE COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO**

BAURU
2012

EDVALDO JOSÉ SCOTON

**AVALIAÇÃO DO MÉTODO RESPIROMÉTRICO PELO ACOMPANHAMENTO E
CONTROLE DE PROCESSO DE COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia da UNESP, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção na área de concentração de Gestão de Operações e Sistemas.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Rosane Aparecida Battistelle.

Co-orientador: Prof. Dr. Jorge Akutsu.

BAURU

2012

Scoton, Edvaldo José.

Avaliação do método respirométrico pelo acompanhamento e controle de processo de compostagem de lodo de esgoto / Edvaldo José Scoton, 2012.

180 f.

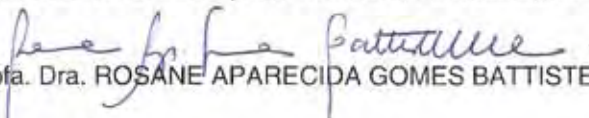
Orientador: Rosane Aparecida Gomes Battistelle

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2012

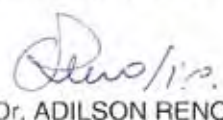
1. Método respirométrico. 2. Resíduos Sólidos. 3. Compostagem. 4. Lodo de esgoto. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE EDVALDO JOSÉ SCOTON, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 17 dias do mês de agosto do ano de 2012, às 13:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Profa. Dra. ROSANE APARECIDA GOMES BATTISTELLE do(a) Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. ERICH KELLNER do(a) / Universidade Federal de Sao Carlos, Prof. Dr. ADILSON RENOFIO do(a) Departamento de Engenharia Civil/Faculdade de Engenharia, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de EDVALDO JOSÉ SCOTON, intitulado "AVALIAÇÃO DO MÉTODO RESPIROMÉTRICO PELO ACOMPANHAMENTO E CONTROLE DE PROCESSO DE COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Profa. Dra. ROSANE APARECIDA GOMES BATTISTELLE


Prof. Dr. ERICH KELLNER


Prof. Dr. ADILSON RENOFIO

À minha família, base e razão de minhas batalhas e conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e poder ser um mero instrumento em suas mãos.

São poucos os mestrandos que podem se dar ao luxo de ter três orientadores, todos dedicados e atenciosos, envolvidos e amigos: obrigado Prof^a Dr^a Rosane Aparecida Gomes Battistelle pela amizade, paciência e ensinamentos; Prof. Dr. Adilson Renóbio por todo o esforço, disponibilidade e sabedoria; e ao idealizador de todo o projeto, Prof. Dr. Jorge Akutsu, por permitir a continuidade ao projeto, transmitindo todo conhecimento. Agradeço também o Prof. Dr. João Eduardo Perea Martins, da Faculdade de Ciências, pela colaboração, atenção e incentivo.

Especialmente ao Técnico do Departamento de Água e Esgotos de Bauru, Sr. Gilberto Sebastião Castilho Filho, pelas análises laboratoriais realizadas, e pelo companheirismo e dedicação.

Muito obrigado a todos os professores, e funcionários do Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção e do Departamento de Engenharia Civil e a todos os companheiros do curso, pelo compartilhamento de experiências e conhecimentos.

Meu agradecimento especial aos colegas do Departamento de Ciências Humanas da FAAC – Faculdade Arquitetura, Artes e Comunicação da Unesp – Campus Bauru, que sempre me apoiaram durante todo o curso Roseli Cristina Nonato Pitondo, Keity de Brito Prado, Simone Patrícia Paganini Spazini e Marcelo Fabiano Machado Gomes.

Aos professores do Departamento de Ciências Humanas da FAAC – Faculdade Arquitetura, Artes e Comunicação da Unesp – Campus Bauru, pela compreensão e apoio nos meus pedidos de afastamento.

A todos os meus amigos, que de uma maneira ou outra sempre me incentivaram, e principalmente, a toda a minha família, pelo amor, carinho e paciência que nos levaram a esta conquista.

“E isso não vem de vós; é dom de Deus! Não vem das obras, para que ninguém se orgulhe. Pois é ele quem nos fez; nós fomos criados em Jesus Cristo para as obras boas, que Deus preparou de antemão para que nós as praticássemos”.

(Carta de São Paulo aos Efésios, 2,4-10).

RESUMO

O desenvolvimento econômico e a necessidade de proporcionar melhor qualidade de vida a toda a população, constituem alguns aspectos responsáveis para que a produção de resíduos sólidos seja cada dia maior, aumentando a necessidade da busca de soluções ambientais corretas, para sua destinação. A compostagem consiste em importante ferramenta para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos, através do uso de tecnologias que processam os resíduos originados da agricultura, agroindústria, silvicultura, dos domicílios e, ainda, do lodo da estação de tratamento de esgoto, adequando-os para serem incorporados ao solo e contribuindo para redução de adubos químicos. No Brasil o emprego do processo tradicional de compostagem, é ainda bastante restrito, pelo alto grau de empirismo utilizado no controle e avaliação do processo e por falta de conhecimento técnico. Este estudo aborda o problema do tratamento de resíduos sólidos orgânicos provenientes das estações de tratamento de esgoto, através de pesquisa experimental de co-compostagem com outros resíduos orgânicos. No processo desenvolvido, denominado de método respirométrico, utilizou-se metodologia na qual os parâmetros de degradação biológica dos resíduos são quantificados na fase gasosa. Os parâmetros avaliados nesse trabalho, na fase gasosa de processos de co-compostagem do lodo de esgoto, possibilitaram a determinação do consumo de O_2 e a geração de CO_2 e da demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Ao obter valores em substância totalmente homogênea, seu emprego apresentou como vantagens maior representatividade, precisão e confiabilidade, representando uma evolução quando comparados aos métodos tradicionais, permitindo o acompanhamento "on line" e contínuo. Os resultados foram muito superiores, quando comparados ao método tradicional, obtendo-se 1.440 linhas de dados/dia, enquanto que no processo convencional, estes dados se resumiriam a uma medição diária de temperatura, o que torna o método respirométrico uma ferramenta extremamente útil e confiável na avaliação do processo de compostagem.

Palavras-chave: Método Respirométrico. Resíduos Sólidos. Compostagem. Lodo de Esgoto.

ABSTRACT

Economic development and the need to provide better quality of life for the entire population, are responsible for some aspects of the production of solid waste each day is greater, increasing the need to search for environmental solutions right to your destination. Composting is an important tool for the treatment of the organic fraction of solid waste through the use of technologies that process the waste generated from agriculture, agribusiness, forestry, households, and also sludge from sewage treatment plant, adapting them to be incorporated into the soil and contributing to reduction of chemical fertilizers. In Brazil the use of traditional composting process is still very limited, the high degree of empiricism used in the control and evaluation of the process and lack of technical knowledge. This study addresses the problem of the treatment of organic solid waste from the sewage treatment plants, through experimental research of co-composting with other organic waste. In the process developed, called respirometric method was used methodology in which the parameters of biological degradation of waste are quantified in the gas phase. The parameters evaluated in this study, in the gas phase of the co-composting of sewage sludge, allowed the determination of O₂ consumption and CO₂ generation and biochemical oxygen demand (BOD). By obtaining values in totally homogeneous substance, its use had advantages as greater representation, accuracy and reliability, representing an evolution when compared to traditional methods, enabling monitoring "on line" and continuous. The results were far superior when compared to the traditional method, obtaining data lines 1440 / day, while in the conventional process, these data are sum up to a daily measurement of temperature, which makes the respirometric method an extremely useful tool and reliable evaluation of the composting process.

Keywords: Respirometric Method. Solid Waste. Composting. Sewage sludge.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema da disposição dos resíduos sólidos em forma de lixão.	38
Figura 2 – Forma inadequada de disposição de resíduos e rejeitos no solo: Lixão.....	39
Figura 3 - Esquema da disposição dos resíduos sólidos em forma de aterro controlado.....	40
Figura 4 – Disposição de resíduos sólidos em aterro controlado.....	40
Figura 5 – Esquema da disposição dos resíduos sólidos em forma de um aterro sanitário.....	41
Figura 6 – Aterro sanitário: Destinação de resíduos sólidos sem impacto ambiental.....	42
Figura 7 – Índice de qualidade de aterro de resíduos no estado de São Paulo em 2010.	43
Figura 8 – Representação esquemática das entradas e saídas do processo de compostagem.....	48
Figura 9 – Evolução da temperatura em uma leira de compostagem.	52
Figura 10 – Perfil típico de temperatura em uma leira de compostagem.	54
Figura 11 – Variação do pH ao longo do processo de compostagem.	61
Figura 12 – Compostagem através do sistema de leiras revolvidas (<i>windrow</i>).	67
Figura 13 - Compostagem através do sistema de leiras estáticas aeradas (<i>static pile</i>).	69
Figura 14 – Compostagem através do sistemas fechados ou reatores biológicos (<i>in-vessel</i>).....	72
Figura 15 – Lodo de esgoto com alta concentração de água.....	76
Figura 16 – Lodo de esgoto em processo de desidratação.....	76
Figura 17 – Respirograma do processo de compostagem.....	81
Figura 18 – Protótipo de um sistema de tratamento de lodo ativado com sistema de aquisição de dados.	87
Figura 19 – Respirômetro AIR NL desenvolvido pelo LISA- <i>Università di Trento</i>	88
Figura 20 – Vista parcial do reator.	89

Figura 21 – Evolução da temperatura consumo de O ₂ na saída do reator para uma mistura de lodo de esgoto e serragem. O eixo da temperatura também indica o consumo de O ₂ em l/h/Kg de matéria seca.	90
Figura 22 – Estrutura do processo de experimentos de compostagem formada basicamente por: tambor rotativo, analisador de gases e aquisição de dados.....	92
Figura 23 – Tambor rotativo no interior da caixa termoreguladora.....	92
Figura 24 – (1) Motor para rotação do reator e (2) bomba de purga.	93
Figura 25 – (1) Entrada de ar e respectivo filtro (2) que abastece o reator.	93
Figura 26 – Interior do tambor rotativo, (1) entrada de ar e (2) saída de ar para o analisador de gás.	93
Figura 27 – Exterior do tambor rotativo.	93
Figura 28 – Analisador de gases, modelo S710, fabricado pela empresa Sick Maihak.....	94
Figura 29 – Detalhe do display do analisador de gases, modelo S710, fabricado pela empresa Sick Maihak.	94
Figura 30 – Aquisição de dados pelo computador.	95
Figura 31 – Detalhamento da tela principal do software desenvolvido, onde existem as opções de controle a uma tela que mostra em tempo real as variações de gases do processo de compostagem.....	95
Figura 32 – Sequência de dados do analisador de gases em caracteres alfanumérico armazenados no computador.	96
Figura 33 – Exemplo do relatório de dados gerado pelo software, onde o arquivo pode ser importado por editores de textos e planilhas.	97
Figura 34 – Bagaço de cana-de-açúcar.	98
Figura 35 – Gérmen de trigo.	98
Figura 36 – Polpa cítrica.....	98
Figura 37 – Ração de potro.....	98
Figura 38 – Materiais utilizados no processo de compostagem: I) Polpa cítrica; II) Bagaço de cana-de-açúcar; III) Ração de potro; IV) Gérmen de trigo.	99
Figura 39 – Estação de Tratamento de Esgotos “Manoel Ferreira Leão Neto” do Departamento Autônomo de Águas e Esgotos (DAAE) Araraquara-SP.	100

Figura 40 – Lodo de esgoto recebido da ETE-Araraquara com alto grau de umidade.....	103
Figura 41 – Lodo de esgoto em processo de desidratação ao ar livre.....	103
Figura 42 – Lodo de esgoto desidratado.....	103
Figura 43 – Lodo de esgoto triturado.....	103
Figura 44 – Granulometria superior a 4,8mm.....	104
Figura 45 – Granulometria menor que 4,8mm e maior que 2,4mm.....	104
Figura 46 – Granulometria menor que 2,4mm e maior que 1,2mm.....	104
Figura 47 – Granulometria menor que 1,2mm, correspondente ao fundo do conjunto de peneiras.....	104
Figura 48 – Resíduos encontrados no lodo de esgoto: sementes, palitos de fósforo, vidros, plásticos, pedras.....	105
Figura 49 – Serviços de poda da Prefeitura Municipal de Bauru.....	106
Figura 50 – Volume de resíduos resultantes dos serviços de poda.....	106
Figura 51 – Poda de grama sem triturar.....	106
Figura 52 – Poda de grama triturada.....	106
Figura 53 – Mistura dos resíduos de lodo de esgoto e de poda de grama, no interior do reator, para o início do processo de compostagem.....	107
Figura 54 – Sistema de co-compostagem de lodo de esgoto e poda de grama, analisados pelo método respirométrico.....	107
Figura 55 – Estação de Tratamento de Esgotos(ETE) do Serviço Autônomo de Água e Esgotos (SAAE), localizada no distrito de Alfredo Guedes, município de Lençóis Paulista.....	108
Figura 56 – Recepção do esgoto, formação do lodo e saída dos efluentes tratados.....	109
Figura 57 – Lodo de esgoto da ETE Alfredo Guedes.....	112
Figura 58 – Bagaço de cana-de-açúcar.....	112
Figura 59 – Borra de pó de café desidratado.....	112
Figura 60 – Mistura dos resíduos de lodo de esgoto, bagaço de cana-de-açúcar e borra de pó de café.....	112
Figura 61 – Embalagem do fertilizante solúvel adicionado no processo, da marca Hydrofert.....	113
Figura 62 – Mistura dos resíduos no interior do reator rotativo no início do processo de co-compostagem.....	113

Figura 63 – Composto no início do processo compostagem da primeira batelada e no final do processo, já estabilizado, após a de decomposição do material orgânico.....	117
Figura 64 – Composto no início do processo compostagem da segunda batelada e ao final do processo de co-compostagem de lodo de esgoto e poda de grama.	120
Figura 65 – Composto obtido ao final do processo de co-compostagem de lodo de esgoto, bagaço de cana-de-açúcar e borra de pó de café.	148
Figura 66 – Composto no início do processo compostagem da terceira batelada e ao final do processo de co-compostagem de lodo de esgoto, bagaço de cana-de-açúcar e borra de pó de café.....	170

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.	34
Gráfico 2 – Estimativa da quantidade de resíduos sólidos gerados no Brasil por habitante/dia em 2000 e 2008.	36
Gráfico 3 – Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2000 e 2008. Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.	37
Gráfico 4 – Rejeitos encaminhados para disposição em solo no Brasil nos anos de 2000 e 2008.	44
Gráfico 5 – Curva de distribuição granulométrica, retida e acumulada.	105
Gráfico 6 – “Respirograma” da evolução temporal de do consumo O_2	115
Gráfico 7 – “Respirograma” da evolução temporal de da presença de CO_2	116
Gráfico 8 – “Respirograma” do processo em 2011, analisado durante um período de 29 dias.	117
Gráfico 9 – Distribuição das medidas de umidade da parte sólida do composto, analisadas em laboratório durante a primeira batelada, em ensaios preliminares.	119
Gráfico 10 – Tempo gasto para consumo de O_2 até que o mesmo atinja 5% do valor total dos gases dentro do reator, em cada frequência de purga.	123
Gráfico 11 – Curva representativa do tempo gasto acumulado para se consumir o O_2 até que o mesmo atinja 5% do valor total dentro do reator.	123
Gráfico 12 – Representação da velocidade do processo do consumo de O_2 obtidos a partir de cada linha de dados coletada.	124
Gráfico 13 – Representação do processo de produção de CO_2 obtidos a partir de cada linha de dados coletada.	125
Gráfico 14 – Representação da relação obtida entre o progresso do consumo de O_2 e o progresso da produção de O_2 , obtidos a partir de cada linha de dados coletada.	126

Gráfico 15 – Consumo de oxigênio expresso em massa (g) distribuído no período do processo.....	129
Gráfico 16 - Consumo de oxigênio expresso em volume (l) distribuído no período do processo.....	130
Gráfico 17 – Produção de gás carbônico expresso em massa (g) distribuído no período do processo.....	131
Gráfico 18 – Produção de gás carbônico expresso em volume (l) distribuído no período do processo.....	132
Gráfico 19 – Massa (g) acumulada de oxigênio, consumido no período de processo de compostagem.	134
Gráfico 20 – Volume (l) acumulado de oxigênio, consumido no período de processo de compostagem.	134
Gráfico 21 – Massa (g) acumulada de gás carbônico, produzido no período de processo de compostagem.	135
Gráfico 22 – Volume (l) acumulado de gás carbônico, produzido no período de processo de compostagem.	135
Gráfico 23 – Gramas/hora de oxigênio consumidas no período de processo de compostagem.....	137
Gráfico 24 – Litros/hora de oxigênio consumidas no período de processo de compostagem.....	138
Gráfico 25 – gramas/hora de gás cabônico produzidas no período de processo de compostagem.....	138
Gráfico 26 – Litros/hora de gás cabônico produzidas no período de processo de compostagem.....	138
Gráfico 27 – Distribuição da DBO - demanda bioquímica de oxigênio durante o processo de compostagem.	142
Gráfico 28 – Emissão de gás carbônico em mg/kg, durante o processo de compostagem.....	143
Gráfico 29 – Relação entre a produção de CO ₂ e o consumo de O ₂ obtidos em cada ciclo de purga	145
Gráfico 30 – Distribuição da medida de umidade apresentada pelo composto durante o período de compostagem.....	146
Gráfico 31 – Distribuição da medida de pH apresentada pelo composto durante o período de compostagem.....	147

Gráfico 32 – Tempo gasto para consumo de O_2 até que o mesmo atinja 3% do valor total dos gases dentro do reator.	150
Gráfico 33 – Curva representativa do tempo gasto acumulado para se consumir o O_2 até que o mesmo atinja 3% do valor total dentro do reator.	151
Gráfico 34 – Representação da velocidade do processo do consumo de O_2 obtidos a partir de cada linha de dados coletada.	151
Gráfico 35 – Representação do processo de produção de CO_2 obtidos a partir de cada linha de dados coletada.	152
Gráfico 36 – Representação da relação obtida entre o progresso do consumo de O_2 e o progresso da produção de O_2 , obtidos a partir de cada linha de dados coletada.	153
Gráfico 37 – Consumo de oxigênio expresso em massa (g) distribuído no período do processo.	155
Gráfico 38 – Consumo de oxigênio expresso em volume(l) distribuído no período do processo.	156
Gráfico 39 – Produção de gás carbônico expresso em massa (g) distribuído no período do processo.	157
Gráfico 40 – Produção de gás carbônico expresso em volume (l) distribuído no período do processo.	158
Gráfico 41 – Massa (g) acumulada de oxigênio, consumido no período de processo de compostagem.	160
Gráfico 42 – Volume (l) acumulado de oxigênio, consumido no período de processo de compostagem.	160
Gráfico 43 – Massa (g) acumulada de gás carbônico, produzido no período de processo de compostagem.	160
Gráfico 44 – Volume (l) acumulado de gás carbônico, produzido no período de processo de compostagem.	161
Gráfico 45 – Gramas/hora de oxigênio consumidas no período de processo de compostagem.	162
Gráfico 46 – Litros/hora de oxigênio consumidas no período de processo de compostagem.	162
Gráfico 47 – gramas/hora de gás carbônico produzidas no período de processo de compostagem.	163

Gráfico 48 – Litros/hora de gás carbônico produzidas no período de processo de compostagem.....	163
Gráfico 49 – Distribuição da DBO - demanda bioquímica de oxigênio durante o processo de compostagem.	165
Gráfico 50 – Emissão de gás carbônico em mg/kg, durante o processo de compostagem.....	166
Gráfico 51 – Relação entre a produção de CO ₂ e o consumo de O ₂ obtidos em cada ciclo de purga.	167
Gráfico 52 – Distribuição da medida de umidade apresentada pelo composto durante o período de compostagem.....	168
Gráfico 53 – Distribuição da medida de pH apresentada pelo composto durante o período de compostagem.....	169
Gráfico 54 – Evolução dos índices percentuais dos sólidos fixos em amostras coletadas durante a evolução do processo de co-compostagem da terceira batelada.	169
Gráfico 55 – Evolução dos índices percentuais dos sólidos voláteis em amostras coletadas durante a evolução do processo de co-compostagem da terceira batelada.	170
Gráfico 56 – Evolução da temperatura ambiente e da temperatura do composto durante o processo de co-compostagem da terceira batelada.....	172
Gráfico 57 – Diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura do composto durante o processo de co-compostagem da terceira batelada	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).....	31
Tabela 2 – Classificação dos resíduos sólidos de acordo com o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).....	32
Tabela 3 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem, de acordo com a PNRS.....	32
Tabela 4 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade, de acordo com a PNRS.....	33
Tabela 5 – Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.	34
Tabela 6 – Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos coletados no Brasil em 2000 e 2008.	35
Tabela 7 – Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2000 e 2008.....	36
Tabela 8 – Quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição em solo, considerando somente lixão, aterro controlado e aterro sanitário (t/dia).....	43
Tabela 9 – Condições de inativação de parasitas e microrganismos patógenos na compostagem.....	53
Tabela 10 – Relações de C/N ótimas para a compostagem, segundo alguns autores.....	57
Tabela 11 – Composição de alguns materiais empregados no preparo do composto (resultados em material seco a 110 °C).....	57
Tabela 12 – Diferenças entre composto estabilizado e composto não estabilizado.....	64
Tabela 13 – Principais vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas de compostagem.....	74

Tabela 14 – Concentrações máximas admissíveis de substâncias inorgânicas em lodos de esgoto destinados à utilização agrícola. - mg/kg (base seca).....	78
Tabela 15 – Níveis máximos admissíveis de agentes patogênicos nos lodos de esgoto destinados a aplicação em área agrícola.....	79
Tabela 16 – Materiais utilizados no processo nos ensaios preliminares.	99
Tabela 17 – Valores de metais encontrados nas amostras do afluente e do lodo da ETE Araraquara em 2008.....	101
Tabela 18 – Valores médios dos atributos analisados no mês de março de 2009 para o afluente e efluente da ETE Araraquara.	101
Tabela 19 – Concentrações máximas admissíveis de substâncias inorgânicas em lodos de esgoto destinados à utilização agrícola através da Resolução CONAMA nº 375/2006 e os valores de metais encontrados nas amostras do lodo da ETE Araraquara.	102
Tabela 20 – Granulometria de uma mostra de 200g, do lodo de esgoto utilizado na 1ª batelada.....	104
Tabela 21 – Materiais utilizados na segunda batelada.....	107
Tabela 22 – Resultados analíticos da amostra do lodo da ETE Alfredo Guedes, município de Lençóis Paulista.	109
Tabela 23 – Controle da qualidade de metais da amostra do lodo da ETE Alfredo Guedes, município de Lençóis Paulista.....	110
Tabela 24 – Concentrações máximas admissíveis de substâncias inorgânicas em lodos de esgoto destinados à utilização agrícola através da Resolução CONAMA nº 375/2006 e os valores de metais encontrados na amostra do lodo da ETE Alfredo Guedes.....	111
Tabela 25 – Análises laboratoriais realizadas pelo Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Unesp, câmpus de Botucatu	111
Tabela 26 – Resíduos utilizados na condução da terceira batelada dos experimentos, analisando-se os parâmetros de relação C/N e de umidade.....	112
Tabela 27 – Adição de fertilizante NPK para aceleração do processo de co-compostagem.	113

Tabela 28 – Análises laboratoriais do composto utilizado na primeira batelada, em ensaios preliminares, realizados no laboratório de análises do DAE Bauru.....	118
Tabela 29 – Análises laboratoriais realizadas pelo Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Unesp, câmpus de Botucatu	119
Tabela 30 – Tempo gasto para consumo do oxigênio existente no interior do reator em cada ciclo de purga.	121
Tabela 31 – Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido em cada ciclo de purga.	127
Tabela 32 - Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido, acumulados durante o período de ciclos de purga.	132
Tabela 33 – Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido, relacionados ao tempo(h) gasto em cada ciclo de purga.	136
Tabela 34 – Valores referentes a produção de CO ₂ e consumo de O ₂ e cálculo da DBO – demanda bioquímica de oxigênio em mg/kg.....	139
Tabela 35 – Relação entre a produção de gás carbônico e o consumo de oxigênio, analisados em função do tempo.....	143
Tabela 36 – Análise bioquímica do lodo de esgoto em fase sólida, realizados no laboratório de análises do DAE Bauru.....	146
Tabela 37 – Análise bioquímica dos resíduos em compostagem na sua fase sólida	146
Tabela 38 – Análises laboratoriais realizadas pelo Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Unesp, câmpus de Botucatu	147
Tabela 39 – Tempo gasto para consumo do oxigênio existente no interior do reator em cada ciclo de purga.	149
Tabela 40 – Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido em cada ciclo de purga.	154
Tabela 41 – Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido, acumulados durante o período de ciclos de purga	159

Tabela 42 – Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido, relacionados ao tempo(h) gasto em cada ciclo de purga	161
Tabela 43 – Valores referentes a produção de CO ₂ e consumo de O ₂ e cálculo da DBO – demanda bioquímica de oxigênio em mg/kg.....	164
Tabela 44 – Relação entre a produção de gás carbônico e o consumo de oxigênio, analisados em função do tempo.....	166
Tabela 45 – Análise bioquímica dos resíduos em compostagem na sua fase sólida	168
Tabela 46 – Temperaturas do composto e temperatura ambiente aferidas durante o processo de co-compostagem da terceira batelada.	171

LISTA DE NOMENCLATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C/N	Relação Carbono e Nitrogênio
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DAAE	Departamento Autônomo de Águas e Esgotos do município de Araraquara
DAE	Laboratório do Departamento de Água e Esgotos de Bauru
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IQC	Qualidade de Usinas de Compostagem
IQR	Índices de Qualidade de Aterro de Resíduos
IRD	Índice de Respiração Dinâmica
IRE	Índice de Respiração Estática
MOT	Matéria Orgânica Total
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
pH)	Potencial hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	Policloreto de Vinila
QR	Quociente Respiratório
TCO ₂	Taxa de Consumo de Oxigênio
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita filho”
USEPA	<i>United States Enviromental Protection Agency</i>

SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	IX
LISTA DE GRÁFICOS	XIII
LISTA DE TABELAS	XVII
LISTA DE NOMENCLATURAS.....	XXI
1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	27
1.2 JUSTIFICATIVAS	28
1.3 OBJETIVO GERAL.....	27
1.4 OBJETIVO ESPECÍFICO	27
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	29
2 REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA	30
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS.....	30
2.1.1 Classificação dos resíduos sólidos.....	31
2.1.2 Panorama da disposição dos resíduos sólidos no Brasil	33
2.2 RECICLAGEM.....	45
2.3 COMPOSTAGEM.....	47
2.3.1 Parâmetros físico-químicos que interferem no processo de compostagem	49
2.3.1.1 Aeração	50
2.3.1.2 Temperatura	51
2.3.1.3 Umidade	54
2.3.1.4 Relação carbono/nitrogênio (C/N)	56
2.3.1.5 Granulometria: estrutura do material	59
2.3.1.6 Potencial Hidrogeniônico (pH)	60
2.3.2 Características do composto orgânico	62
2.3.3 Diferentes processos de compostagem	64
2.3.3.1 Sistema de leiras revolvidas (<i>windrow</i>).....	67
2.3.3.2 Sistema de leiras estáticas aeradas	68
2.3.3.3 Sistema de reatores biológicos.....	71
2.3.3.4 Vantagens e desvantagens dos sistemas.....	74

2.4 LODO DE ESGOTO	75
2.5 APLICAÇÕES DO MÉTODO RESPIROMÉTRICO NA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM ATRAVÉS DE REATORES BIOLÓGICOS.....	79
3 MATERIAIS E MÉTODO	91
3.1 RESÍDUOS UTILIZADOS PARA CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA PRIMEIRA BATELADA, UTILIZADA EM ENSAIOS PRELIMINARES	97
3.2 RESÍDUOS UTILIZADOS PARA CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA SEGUNDA BATELADA, CO-COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO COM PODA DE GRAMA	99
3.3 RESÍDUOS UTILIZADOS PARA CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA TERCEIRA BATELADA, CO-COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO COM BAGAÇO DE CANA E BORRA DE CAFÉ.	108
3.4 LEVANTAMENTO DE DADOS RESPIROMÉTRICOS - MEDIÇÃO DOS ÍNDICES DE O ₂ E CO ₂	114
4 RESULTADOS	115
4.1 RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA BATELADA, UTILIZADA NOS ENSAIOS PRELIMINARES.....	115
4.2 RESULTADOS OBTIDOS NA SEGUNDA BATELADA, CO- COMPOSTAGEM UTILIZANDO-SE OS RESÍDUOS DE LODO DE ESGOTO E PODA DE GRAMA	119
4.2.1 Tempo de processamento da segunda batelada de co-compostagem..	121
4.2.2 Taxa de consumo de oxigênio (TCO) durante o processo da segunda batelada de co-compostagem	124
4.2.3 Taxa de geração de gás carbônico TGCO ₂ , durante o processamento da segunda batelada de co-compostagem.....	125
4.2.4 Relação percentual entre a velocidade de consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico.....	126
4.2.5 Relação entre o consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico, analisados pelas unidades de massa e volume	127
4.2.6 Consumo de oxigênio e produção de gás carbônico acumulados no período	132
4.2.7 Consumo de oxigênio e produção de gás-carbônio em função do tempo de processamento em cada ciclo de purga	135
4.2.8 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	139

4.2.9 Relação entre a produção de gás carbônico e o consumo de oxigênio, analisados em função do tempo (CO_2/O_2)	143
4.2.10 Análises laboratoriais complementares do composto em seu estado sólido	145
4.3 RESULTADOS OBTIDOS NA TERCEIRA BATELADA, CO-COMPOSTAGEM UTILIZANDO-SE OS RESÍDUOS DE LODO DE ESGOTO, BAGAÇO DE CANA DE AÇUCAR E BORRA DE CAFÉ	148
4.3.1 Tempo de processamento da terceira batelada de co-compostagem	149
4.3.2 Taxa de consumo de oxigênio (TCO) durante o processo da segunda batelada de co-compostagem	151
4.3.3 Taxa de geração de gás carbônico $TGCO_2$, durante o processamento da segunda batelada de co-compostagem	152
4.3.4 Relação percentual entre a velocidade de consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico	153
4.3.5 Relação entre o consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico, analisados pelas unidades de massa e volume	154
4.3.6 Consumo de oxigênio e produção de gás carbônico acumulados no período	159
4.3.7 Consumo de oxigênio e produção de gás-carbônio em função do tempo de processamento em cada ciclo de purga	161
4.3.8 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	163
4.3.9 Relação entre a produção de gás carbônico e o consumo de oxigênio, analisados em função do tempo (CO_2/O_2)	166
4.3.10 Análises laboratoriais complementares do composto em seu estado sólido	167
4.3.11 Análises das temperaturas do composto durante o processo de co-compostagem no interior do reator	170
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	174
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos negativos dos resíduos sólidos sobre o meio ambiente surgiram desde quando os homens abandonaram a vida nômade e adotaram o estilo de vida sedentário. Com a industrialização, o mundo vivenciou um intenso processo da urbanização que repercutiu em um aumento significativo das populações urbanas colaborando para o desenvolvimento de vários problemas, dentre eles o aumento da geração de resíduos e a necessidade de destiná-los corretamente (ALBUQUERQUE, 2007).

Segundo Fadini *et al.* (2001) a primeira ação tomada pelos governos, logo após a Revolução Industrial, foi a de tratar o lixo como um problema que devesse ser escondido da sociedade, passando a depositá-lo em locais distantes. Esses locais, no entanto, foram rapidamente alcançados e até mesmo incorporados em decorrência da explosão urbana, um reflexo do próprio desenvolvimento industrial, sendo notório o despreparo das cidades em acompanhá-lo. As consequências dessas ações foram claras e imediatas, além de resultarem em uma aproximação da sociedade e aumentarem os problemas com saneamento básico e riscos de contaminação, os locais de disposição tornaram-se cada vez mais escassos.

Mesmo não sendo consenso, o grande problema de espaço físico para o descarte dos resíduos, fez com que a reciclagem se tornasse uma alternativa para o seu reaproveitamento, uma vez que há os que acreditam ser a reciclagem, originada da desigualdade social aliada a má distribuição de renda. Conceitualmente, reciclagem é um conjunto de técnicas que tem por finalidade aproveitar os resíduos e reutilizá-los em um novo ciclo de produção. Hoje, reciclar deixou de ser apenas um conceito para tornar-se uma prática (TOCHETTO, 2004).

A falta de locais para disposição final adequada dos resíduos humanos e técnicas cada vez mais onerosas para o seu tratamento, tem feito com que muitos municípios brasileiros coloquem em prática uma política para seu gerenciamento integrado, que contempla, entre outras medidas, a redução na

fonte, a reutilização, a reciclagem, a própria compostagem e a disposição em aterros, de forma conjunta (SILVA, 2009).

No Brasil, a promulgação da Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS – Brasil (2010)), após vinte e um anos de discussões no Congresso Nacional, marca o início de uma articulação institucional envolvendo os três entes federados (União, Estados e Municípios) com o setor produtivo e a sociedade civil, na busca de soluções para os graves problemas advindos dos resíduos, que comprometem a qualidade de vida dos brasileiros.

A PNRS estabelece princípios, objetivos, diretrizes, metas e ações, e importantes instrumentos, tais como o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que contemplará os diversos tipos de resíduos gerados, as alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, bem como metas para diferentes cenários, programas, projetos e ações correspondentes.

O Art. 36. da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelece que:

“no âmbito da responsabilidade compartilhada¹ pelo ciclo de vida dos produtos², cabe ao titular dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, observado, se houver, o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos:

I - adotar procedimentos para reaproveitar os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis oriundos dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos;

II - estabelecer sistema de coleta seletiva;

III - articular com os agentes econômicos e sociais medidas para viabilizar o retorno ao ciclo produtivo dos resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis oriundos dos

¹ Cada integrante da cadeia produtiva - fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e até os consumidores - ficarão responsáveis, junto com os titulares dos serviços de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos (JACOBI *et al*, 2011).

² Ciclo dos produtos, que vai desde a obtenção de matérias primas e insumos, passando pelo processo produtivo, pelo consumo até a disposição final (JACOBI *et al*, 2011).

serviços de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos;

IV - realizar as atividades definidas por acordo setorial ou termo de compromisso na forma do § 7º do art. 33, mediante a devida remuneração pelo setor empresarial;

V - implantar sistema de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articular com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido;

VI - dar disposição final ambientalmente adequada aos resíduos e rejeitos oriundos dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos.”

Na busca por soluções para a destinação dos resíduos sólidos orgânicos, merece destaque o processo de compostagem, por ser considerada uma das alternativas mais adequadas sob o ponto de vista ambiental, por resultar em maior e mais apropriada reciclagem, em termos de material e de energia, quando comparadas com outros procedimentos.

A compostagem é um processo biológico em que os microrganismos transformam a matéria orgânica, em um material semelhante ao solo. Após a transformação, a matéria orgânica é denominada de composto, podendo ser utilizado como adubo. A transformação pode ocorrer através de um conjunto de técnicas que controlam a decomposição de materiais orgânicos, com a finalidade de obter, no menor tempo possível, um material estável, rico em húmus e nutrientes minerais (KIEHL, 1998).

No entanto, o emprego do processo de compostagem no Brasil, é ainda bastante restrito, quando comparado ao método do aterro sanitário, principalmente pelo fato de exigir maior investimento inicial, apresentar maior dificuldade operacional e custo unitário de tratamento bem superior ao referido método, Soma-se a isso, o fato de terem ocorridas experiências negativas no passado, devido ao alto grau de empirismo utilizado no controle e avaliação do processo de compostagem, por falta de conhecimento técnico mais aprofundado (AKUTSU *et al.*, 2009).

Existem várias tentativas para reproduzir, em escala laboratorial, o processo de compostagem. No entanto, a reprodução em escala de laboratório pode não ser tarefa muito simples, uma vez que exige considerar todas as variáveis e condições em que o processo será conduzido (PETIOT *et al.*, 2004).

Uma das principais variáveis está associada com a qualidade ou a identificação da composição de resíduos, considerando ser a mesma, extremamente variada, tanto no espaço como no tempo, dificultando na obtenção e fixação de parâmetros para o processo de compostagem. Além das questões do aspecto qualitativo do resíduo, vários outros parâmetros interferem no processo de compostagem, tais como a umidade, oxigênio, temperatura, relação entre carbono/nitrogênio, proporção de tamanho de partícula e pH. Estes aspectos geram índices que são utilizados para a avaliação e monitoramento da atividade biológica no processo de compostagem (HERBETS, 2005).

Segundo Akutsu *et al.* (2009), a utilização de uma técnica que não disponha de critérios, parâmetros e índices consolidados, no que se refere à avaliação de sua performance e controle operacional, apresenta incertezas e falta de confiabilidade, contribuindo para que não exista avanço de sua aplicação, principalmente em larga escala.

Na presente pesquisa, abordou-se o método respirométrico, desenvolvido no projeto experimental realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Campus Bauru desde o ano de 2009, e que utiliza uma nova metodologia para avaliação, consistindo no acompanhamento e controle operacional em tempo real do processo de compostagem, pelo qual os parâmetros de degradação biológica dos resíduos orgânicos não são mensurados na fase sólida, mas sim na fase gasosa e de forma ininterrupta.

Acompanhou-se e analisaram-se ciclos completos de processos de co-compostagem de matéria orgânica, utilizando-se como resíduo principal o lodo de estação de tratamento de esgoto, na busca de verificar se o método é, de fato, uma ferramenta útil e confiável em relação às respostas que o mesmo pode fornecer no acompanhamento operacional e avaliativo do processo de degradação dos resíduos orgânicos.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

É possível, empregando o método respirométrico em observações experimentais de processos de compostagem de resíduos, em especial o lodo de estação de tratamento de esgoto, obter parâmetros precisos de degradação da matéria orgânica?

1.2 OBJETIVO GERAL

Os objetivos da presente pesquisa consistem em avaliar o método de análise gasosa do processo de compostagem, aqui denominado método respirométrico, obtendo parâmetros avaliativos do mesmo, além de estudar e detalhar formas para melhor compreensão dos processos de compostagem.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICO

Analisar através do método respirométrico, processos de co-compostagem de lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) com outros resíduos orgânicos, avaliando sua eficácia; contribuir com a gestão ambiental quanto ao adequado uso do lodo de ETE como matéria prima para compostagem; analisar a possibilidade de implantação do método respirométrico como ferramenta de obtenção de parâmetros precisos de degradação da matéria orgânica, buscando aumentar a eficiência do aproveitamento da matéria orgânica.

1.4 JUSTIFICATIVAS

São diversos os campos de interesse de estudo inseridos na Engenharia de Produção, dentre eles encontra-se a área de Gestão Ambiental, que desenvolve pesquisas e projetos ligados à melhoria da qualidade do meio ambiente, e à minimização dos efeitos danosos que os processos de produção podem causar à natureza.

Mesmo que a concepção de desenvolvimento sustentável revele seu caráter essencialmente interdisciplinar, a abrangência do universo inerente à Engenharia de Produção, constitui-se num campo muito amplo para o contínuo e progressivo aprofundamento do estudo das questões inseridas no desenvolvimento sustentável, suas repercussões e implicações ao processo produtivo industrial e, mais amplamente, a toda a sociedade.

A Engenharia utiliza o capital, a tecnologia, o gerenciamento e os recursos naturais como meios de produção de bens, dos quais a sociedade humana necessita e se beneficia. Tanto no processo de produção quanto no uso desses bens, são gerados resíduos, que se não adequadamente tratados e/ou destinados, podem ocasionar danos à natureza e ao próprio homem (LOPES, 1999).

Neste contexto, é fundamental pesquisa que considere métodos e padrões de produção e consumo, tendo como base a “regra dos três erres”: reduzir, reutilizar e reciclar materiais usados nos sistemas de produção e consumo de forma a garantir que os resíduos possam ser assimilados pelos sistemas ecológicos e que protejam as capacidades regenerativas da Terra (CAMARGO, 2002).

A compostagem é uma alternativa para um tratamento biológico dos resíduos orgânicos, capaz de garantir esta assimilação dos resíduos. Entretanto Petiot (2004), afirma que

“apesar das diversas pesquisas já desenvolvidas, um melhor entendimento do processo de compostagem se faz necessário e as investigações necessitam prosseguir e ser aprofundadas devido a inúmeras dúvidas reinantes sobre o processo.”

O agravo das condições ambientais aponta como caminho a ser seguido, a busca de uma consciência ética coletiva, garantindo o direito a todas as gerações de viver em um ambiente equilibrado, promovido pelo desenvolvimento sustentável. Para se atingir esse objetivo, é necessário pesquisar soluções adequadas, buscando inovações tecnológicas que reparem problemas anteriores e previnam novos problemas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é constituído de 05 (cinco) capítulos, delineado de forma a explicitar sua realização e de contemplar todos os objetivos desta pesquisa. Além deste primeiro capítulo que é introdutório, os demais estão assim discriminados:

No capítulo 2 é apresentado o referencial teórico da dissertação, que aborda além dos resíduos sólidos, os temas de reciclagem, compostagem, lodo de esgoto e análises gasosas do processo de compostagem.

Descriminou-se no Capítulo 3 os materiais e métodos empregados na pesquisa; tanto nas composições principais, denominadas de segunda e terceira bateladas, como na composição inicial, que constituiu os ensaios preliminares, denominada de primeira batelada.

No Capítulo 4 são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos, e o Capítulo 5 finaliza o trabalho com as considerações finais, contribuições que o estudo proporcionou, suas limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

Neste capítulo buscou-se analisar as contribuições teóricas que serão utilizadas para a estruturação deste estudo. Neste sentido, o referencial teórico está dividido em cinco seções, com temas selecionados de acordo com o eixo que rege a pesquisa.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

Segundo Albuquerque *et al.* (2007), na formação e no desenvolvimento das cidades, e mais ainda, com a Revolução Industrial, quando uma importante parcela da população rural dirigiu-se em massa para as cidades, originando um importante crescimento urbano e, conseqüentemente, teve início o uso intensivo dos recursos do planeta, a problemática da gestão dos resíduos agravou-se e o seu mau domínio começou a dar origem aos primeiros problemas ambientais graves.

A preocupação com a destinação dos resíduos sólidos tem alcançado patamares cada vez maiores em todos os setores da sociedade. Esta preocupação aumentou devido à crescente produção de lixo nos grandes centros urbanos e pela evidente negligência resultante do Poder Público, Legisladores, Administradores e, conseqüentemente, pela população (ÂNGULO *et al.*, 2010).

De acordo com Albuquerque *et al.* (2007), na concepção técnica, o lixo deve ser visto e analisado sob o prisma biológico, assim, lixo orgânico é todo lixo que tem origem animal ou vegetal, ou seja, que recentemente fez parte de um ser vivo. Numa linguagem mais técnica e moderna, o autor aborda os resíduos sólidos, sendo seu componente biológico a matéria orgânica, mas da mesma forma oriundos dos seres vivos, animais e vegetais.

Mesmo na atualidade esse tipo de lixo é considerado poluente e, quando acumulado, o lixo orgânico muitas vezes pode tornar-se altamente rejeitado devido ao mau cheiro, oriundo da decomposição destes produtos. Os fenômenos naturais de decomposição ocorrem por ação inicial de

microrganismos, cujo trabalho metabólico tem como resultante a água, gás carbônico e energia térmica (CAMARGO, 2002).

Quanto às características físicas, segundo Albuquerque *et al.* (2007), os resíduos sólidos orgânicos são classificados como molhados. Normalmente tem composição constituída por restos de comida, cascas e bagaços de frutas e verduras, ovos, legumes, alimentos estragados, entre outros.

2.1.1 Classificação dos resíduos sólidos

A definição de resíduos sólidos é bastante ampla. Para Albuquerque *et al.* (2007) os resíduos sólidos são detritos de origens orgânicas, inorgânicas, inertes, radioativas, hospitalares, industriais e que quando bem administrados, muitos deles podem vir a ser diretamente aproveitados e/ou comercializados.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – NBR 10004, 2004), os resíduos sólidos podem ser classificados em 3 classes, como verifica-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos resíduos sólidos de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

CLASSE	CLASSIFICAÇÃO
Classe I	Resíduos Perigosos.
Classe II	Resíduos Não Inertes
Classe III	Resíduos Inertes

Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2004.

O Conselho Nacional de Meio Ambiente – (CONAMA), através da Resolução 005/93, define que os resíduos sólidos podem ser classificados nos grupos apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Classificação dos resíduos sólidos de acordo com o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).

GRUPO	CLASSIFICAÇÃO
Grupo A	Resíduos que apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido à presença de agentes biológicos;
Grupo B	Resíduos que apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido suas características químicas;
Grupo C	Resíduos radioativos;
Grupo D	Resíduos comuns, que são todos os demais que não se enquadram nos grupos descritos anteriormente.

Fonte: Adaptado de Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), 2011.

A Lei nº 12.305/10 que define a PNRS, no seu Art. 13º, classifica os resíduos sólidos quando a origem, como observa-se através da Tabela 3, e quanto a sua periculosidade, na Tabela 4.

Tabela 3 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem, de acordo com a PNRS.

ORIGEM	ATIVIDADES
a) resíduos domiciliares:	atividades domésticas em residências urbanas;
b) resíduos de limpeza urbana:	varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
c) resíduos sólidos urbanos:	os englobados nas alíneas “a” e “b”;
d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços:	os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico:	os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
f) resíduos industriais:	processos produtivos e instalações industriais;
g) resíduos de serviços de saúde:	serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
h) resíduos da construção civil:	construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
i) resíduos agroflorestais:	atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;

ORIGEM	ATIVIDADES
j) resíduos de serviços de transportes:	portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
k) resíduos de mineração:	atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Fonte: Adaptado da PNRS, 2012.

Tabela 4 – Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade, de acordo com a PNRS.

PERICULOSIDADE	ORIGEM
a) resíduos perigosos:	aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
b) resíduos não perigosos:	aqueles não enquadrados na alínea “a”.

Fonte: Adaptado da PNRS, 2012.

O modelo socioeconômico dominante contribui para a produção e consumo excessivo, e incentiva a criação de produtos e bens de consumo cada vez menos duráveis e descartáveis para que se reduza custo de produção e para que o bem ou produto possa ser consumido universalmente. A geração de resíduos sólidos urbanos está intimamente ligada à esse modelo que gera desperdício em todas as suas etapas, desde a concepção dos produtos, desperdício em sua utilização e por fim seu descarte inadequado, gerando danos ambientais (ZANETI, 2003).

2.1.2 Panorama da disposição dos resíduos sólidos no Brasil

Com a aprovação da PNRS, foi elaborado o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, cujo texto passou por um processo de consulta pública, e apresenta um mapa da atual disposição dos resíduos sólidos em todo território brasileiro. A Tabela 5 apresenta a composição dos resíduos mais encontrados no Brasil no ano de 2008 e sua quantidade, expressa em toneladas por dia.

Tabela 5 – Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.

RESÍDUOS	(%)	QUANTIDADE (t/dia)
Material reciclável	31,9	58.527,40
Metais	2,9	5.293,50
Aço	2,3	4.213,70
Alumínio	0,6	1.079,90
Papel, papelão e tetrapak	13,1	23.997,40
Plástico total	13,5	24.847,90
Plástico filme	8,9	16.399,60
Plástico rígido	4,6	8.448,30
Vidro	2,4	4.388,60
Matéria orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
Total	100,0	183.481,50

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Verifica-se um alto percentual de material reciclável, ou seja, 31,9%; mas o percentual de 51,4% de matéria orgânica mostra que, mais da metade do total coletado, consiste em matéria prima para os processos de compostagem.

O Gráfico 1 foi traçado plotando-se os valores dispostos na Tabela 5, e permite fazer uma análise mais clara dos percentuais de cada resíduo apresentado no plano nacional de resíduos sólidos.

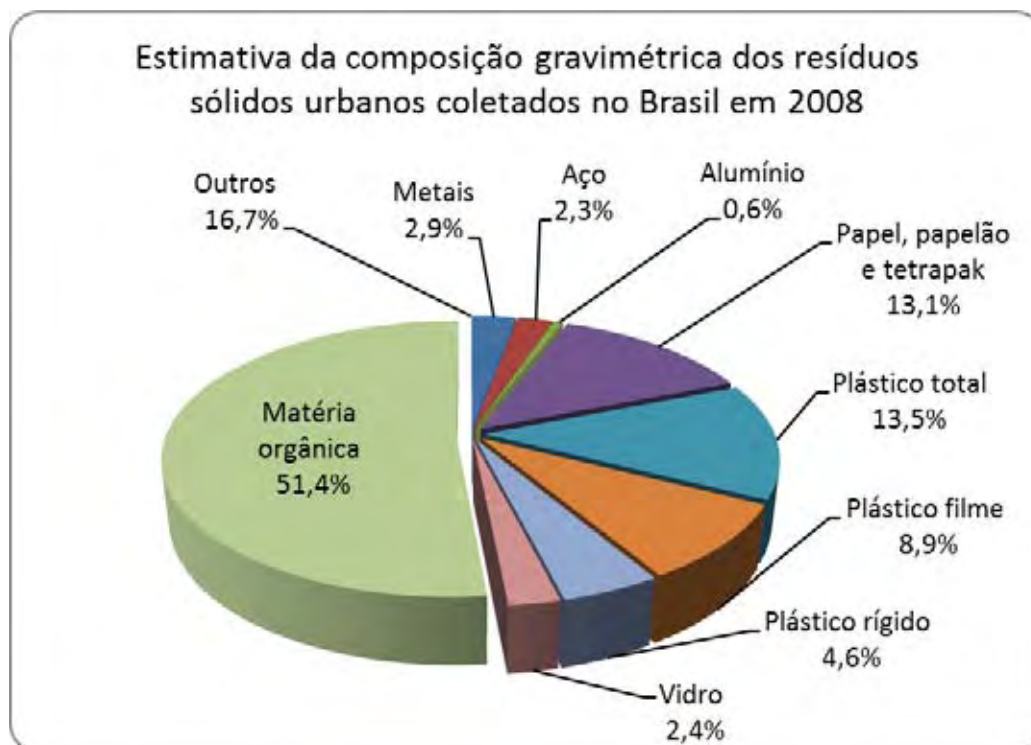


Gráfico 1 – Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.

Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

A Tabela 6 apresenta uma estimativa da distribuição dos resíduos coletados através das regiões políticas brasileiras, bem como uma média da quantidade de resíduos gerados por habitante diariamente.

Tabela 6 – Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos coletados no Brasil em 2000 e 2008.

Unidade de análise	Quantidade de resíduos coletados (t/dia)		Quantidade de resíduos por habitante urbano (kg/hab.dia)	
	2000	2008	2000	2008
Brasil	149.094,30	183.481,50	1,1	1,1
Norte	10.991,40	14.637,30	1,2	1,3
Nordeste	37.507,40	47.203,80	1,1	1,2
Sudeste	74.094,00	68.179,10	1,1	0,9
Sul	18.006,20	37.342,10	0,9	1,6
Centro-Oeste	8.495,30	16.119,20	0,8	1,3

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Conforme Plano Nacional de Resíduos Sólidos, com relação à coleta seletiva de materiais recicláveis, entre 2000 e 2008 houve um aumento de 120% no número de municípios que desenvolvem tais programas, que chegaram a 994, estando a maioria localizada nas regiões Sul e Sudeste. Esse marco, embora importante, ainda não ultrapassa 18% dos municípios brasileiros. Todavia a análise da quantidade de material recuperado por tais programas indica a necessidade de seu aprofundamento.

As estimativas indicam que a participação dos resíduos recuperados pelos programas de coletas seletivas formais é muito pequena, o que sugere que a reciclagem no país ainda ocorra pela reciclagem pré-consumo e pela coleta pós-consumo informal, que devem ser objeto de estudos específicos.

Nota-se que a região sudeste, apesar de ser a maior produtora de resíduos sólidos, quando analisa-se a produção de resíduos por habitante/dia, é a única região que apresenta uma queda de geração de 1,1 kg/hab.dia para 0,9 kg/hab.dia. O Gráfico 2 evidencia estas estimativas de geração de resíduos sólidos:

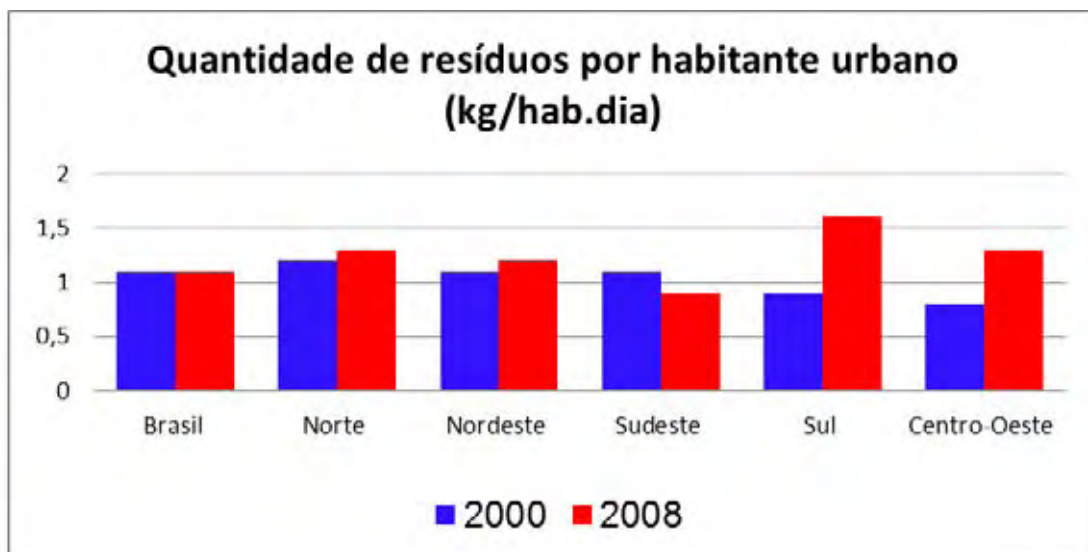


Gráfico 2 – Estimativa da quantidade de resíduos sólidos gerados no Brasil por habitante/dia em 2000 e 2008.

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos indica ainda que, quanto a destinação dos resíduos sólidos urbanos, tanto em 2000 quanto em 2008 observa-se que, mais de 90%, em massa, dos resíduos são destinados para a disposição final em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, sendo somente os 10% restantes distribuídos entre unidades de compostagem, unidades de triagem e reciclagem, unidades de incineração, vazadouros em áreas alagadas e outros destinos, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2000 e 2008.

Destino Final	2000		2008	
	Quantidade (t/d)	%	Quantidade (t/d)	%
Aterro sanitário	49.614,50	35,4	110.044,40	58,3
Aterro Controlado	33.854,30	24,2	36.673,20	19,4
Vazadouros a céu aberto (Lixão)	45.484,70	32,5	37.360,80	19,8
Unidade de compostagem	6.364,50	4,5	1.519,50	0,8
Unidade de triagem para reciclagem	2.158,10	1,5	2.592,00	1,4
Unidade de incineração	483,10	0,3	64,80	<0,1
Vazadouro em áreas alagáveis	228,10	0,2	35,00	<0,1
Locais não fixos	877,30	0,6	SI	
Outra unidade	1.015,10	0,7	525,20	0,3
TOTAL	140.080,70		188.814,90	

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos sólidos, (2012).

No quesito tratamento, apesar da massa de resíduos sólidos urbanos apresentar alto percentual de matéria orgânica, as experiências de compostagem, no Brasil, são ainda incipientes. O resíduo orgânico, por não ser coletado separadamente, acaba sendo encaminhado para disposição final, juntamente com os resíduos domiciliares. Essa forma de destinação gera, para a maioria dos municípios, despesas que poderiam ser evitadas caso a matéria orgânica fosse separada na fonte e encaminhada para um tratamento específico, por exemplo, via compostagem.

Do total estimado de resíduos orgânicos que são coletados (94.335,10 t/d) somente 1,6% (1.509 t/d) é encaminhado para tratamento via compostagem. Em termos absolutos tem-se 211 municípios brasileiros com unidades de compostagem, sendo que os Estados de Minas Gerais e Rio Grande do Sul possuem a maior concentração, 78 e 66 unidades respectivamente.

Observa-se que a destinação para unidade de compostagem, que correspondia em 2000 a 4,5% como destinação final, do total de toneladas/dia, caiu em 2008 para apenas 0,8% desta destinação. Estes dados estão apresentados no Gráfico 3.

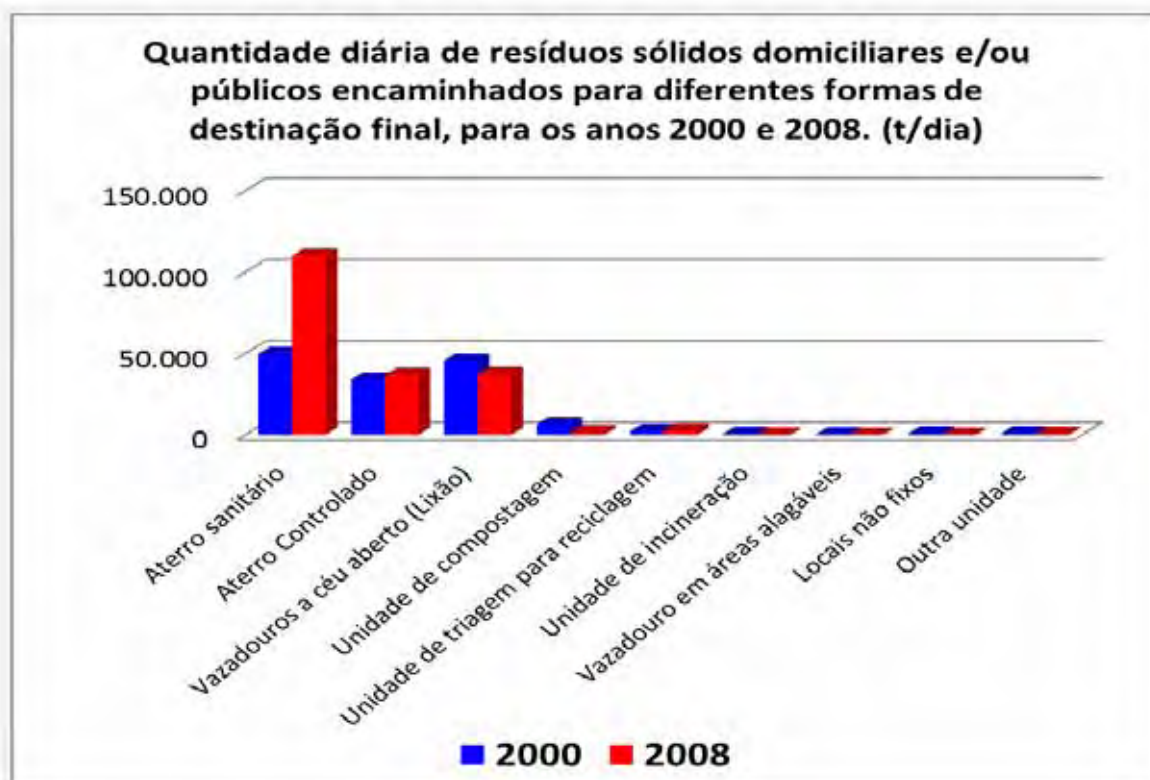


Gráfico 3 – Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos encaminhados para diferentes formas de destinação final, para os anos 2000 e 2008. Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Quanto à disposição final de resíduos e rejeitos no solo, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, foram classificadas a partir de três principais formas – aterro sanitário, aterro controlado e lixão, sendo importante caracterizarmos cada um deles:

I – Lixão - forma inadequada de disposição final de resíduos e rejeitos, que consiste na descarga do material no solo sem qualquer técnica ou medida de controle, conforme esquema observa-se Figura 1.

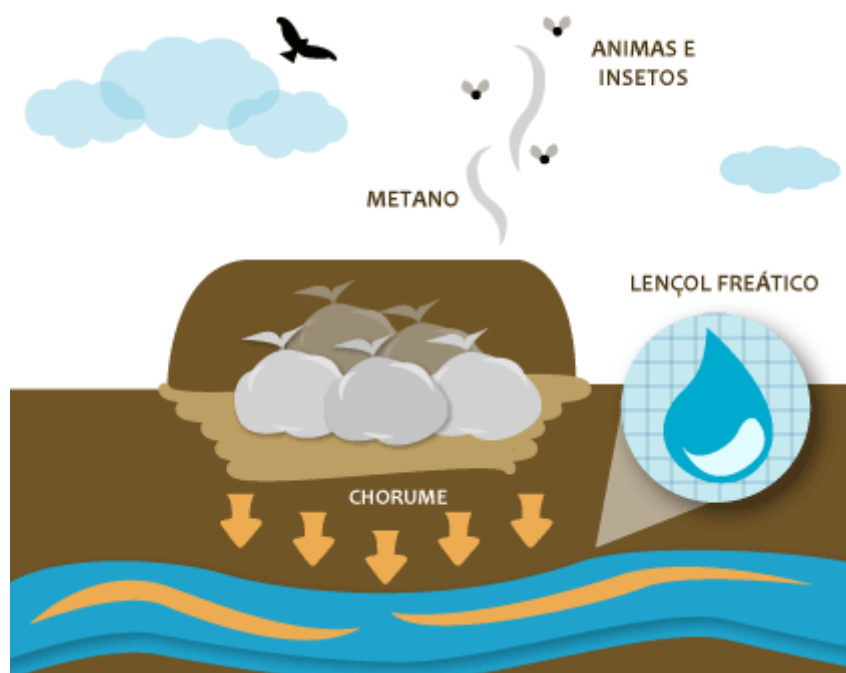


Figura 1 - Esquema da disposição dos resíduos sólidos em forma de lixão.

Fonte: <http://www.rumosustentavel.com.br>.

Para o Portal EcoD os lixões, institucionalizados ou clandestinos, esses locais recebem volumes diários de lixo que são amontoados um por cima do outro. População civil e, em alguns casos, a própria prefeitura, são responsáveis por jogar o lixo coletado no local.

Diversos problemas tornam o lixão a solução menos indicada quando o assunto é o descarte do lixo. Por não ter nenhum tipo de proteção, esses locais se tornam vulneráveis à poluição causada pela decomposição do lixo, tanto no solo, quanto nos lençóis freáticos e no ar.

Isso ocorre porque a maior parte do material despejado entra em processo de decomposição, produzindo o chorume e o gás metano. O chorume

escorre com o auxílio da chuva e penetra na terra, chegando aos lençóis freáticos localizados abaixo do lixão e contaminando a água.

Já o biogás resultante da decomposição do lixo e formado por gases como metano, gás carbônico (CO₂) e vapor d'água, é liberado diretamente para a atmosfera – sem antes passar por nenhum tipo de tratamento.

Além dos impactos ambientais, o acumulo de lixo atrai animais transmissores de doenças, como moscas e ratos. O local ainda é tido como fonte de renda para a população carente, que recolhe o material reciclável e, em alguns casos, chega a se alimentar dos restos encontrados no lixo (Figura 2).



Figura 2 – Forma inadequada de disposição de resíduos e rejeitos no solo: Lixão.
Fonte: [http:// 6omeganacional.blogspot.com.br](http://6omeganacional.blogspot.com.br).

II – Aterro controlado - forma inadequada de disposição final de resíduos e rejeitos, no qual o único cuidado realizado é o recobrimento da massa de resíduos e rejeitos com terra, como observa-se na Figura 3.

Os aterros controlados são locais intermediários entre o lixão e o aterro sanitário. Trata-se geralmente de antigas células que foram remediadas e passaram a reduzir os impactos ambientais e a gerenciar o recebimento de novos resíduos.



Figura 3 - Esquema da disposição dos resíduos sólidos em forma de aterro controlado.

Fonte: <http://www.rumosustentavel.com.br>.

Esses locais recebem cobertura de argila e grama e fazem a captação dos gases e do chorume. O biogás é capturado e queimado e parte do chorume é recolhido. Os aterros controlados são cobertos com terra ou saibro diariamente, fazendo com que o lixo não fique exposto e não atraia animais (Figura 4).



Figura 4 – Disposição de resíduos sólidos em aterro controlado.

Fonte: <http://www.montesclaros.mg.gov.br>.

III – Aterro sanitário - Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança minimizando os impactos ambientais (Figura 5).



Figura 5 - Esquema da disposição dos resíduos sólidos em forma de um aterro sanitário.

Fonte: <http://www.rumosustentavel.com.br>.

A PNRS apresenta este método utilizando os princípios de engenharia (impermeabilização do solo, cercamento, ausência de catadores, sistema de drenagem de gases, águas pluviais e lixiviado) para confinar os resíduos e rejeitos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-o com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

As células são impermeabilizadas com mantas de policloreto de vinila (PVC) e o chorume é drenado e depositado em um poço, para tratamento futuro. O biogás é drenado e pode ser queimado ou aproveitado para eletricidade. Por ser coberto por terra diariamente não há proliferação de pragas urbanas.

Os aterros sanitários são espaços preparados para a deposição final de resíduos sólidos gerados pela atividade humana. Esses locais são planejados para captar e tratar os gases e líquidos resultantes do processo de decomposição, protegendo o solo, os lençóis freáticos e o ar, como obseva-se na Figura 6.



Figura 6 – Aterro sanitário: Destinação de resíduos sólidos sem impacto ambiental.

Fonte: <http://6omeganacional.blogspot.com.br>.

No Estado de São Paulo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), apresentou o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares de 2010, refletindo as condições dos sistemas de disposição e tratamento de resíduos domiciliares, após a consolidação de dados e informações coletados em 2010, em cada um dos 645 municípios do Estado.

Estas condições são expressas pelos Índices de Qualidade de Aterro de Resíduos – IQR, de Qualidade de Aterros em Valas – IQR Valas e de Qualidade de Usinas de Compostagem IQC, que apresentam variação de 0 a 10 e são classificados em três faixas de enquadramento: inadequada, controlada e adequada, conforme a apresenta-se na Figura 7.

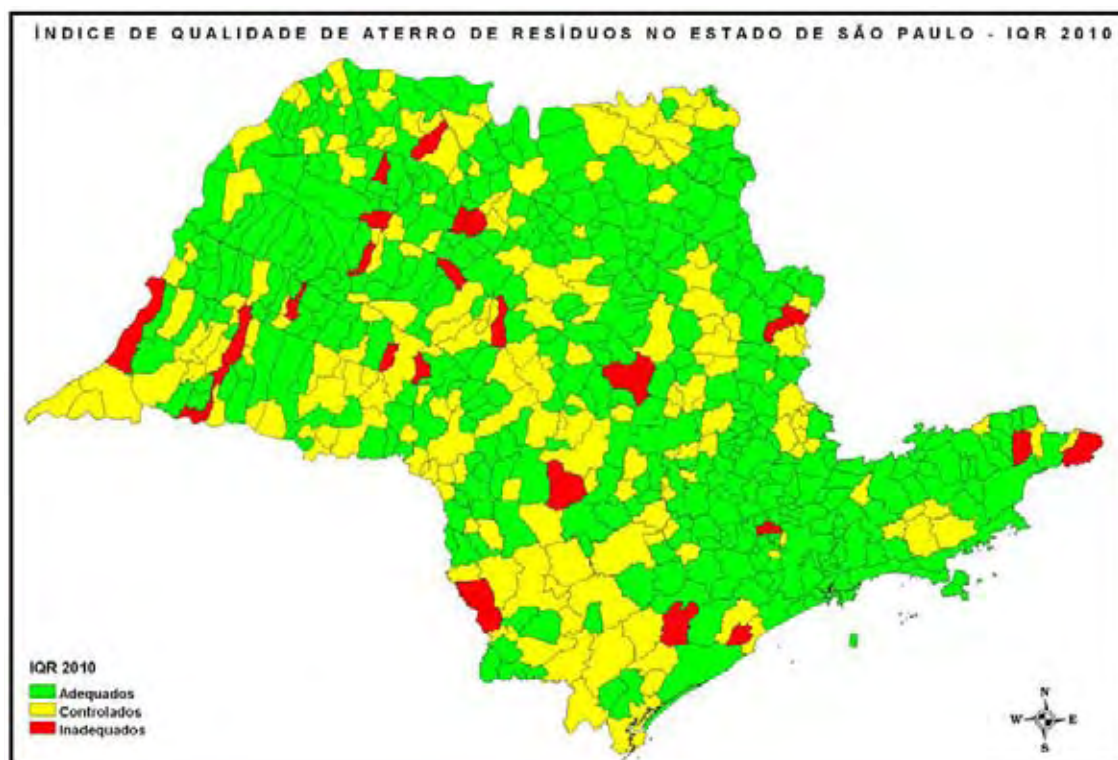


Figura 7 – Índice de qualidade de aterro de resíduos no estado de São Paulo em 2010.
Fonte: Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), 2010.

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, através da Tabela 8 mostra-se, que em termos quantitativos, de 2000 a 2008, houve um aumento de 120% na quantidade de resíduos e rejeitos dispostos em aterros sanitários e uma redução de 18% na quantidade encaminhada para lixões.

Tabela 8 – Quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição em solo, considerando somente lixão, aterro controlado e aterro sanitário (t/dia).

Unidade de análise	Lixão		Aterro controlado		Aterro sanitário	
	2000	2008	2000	2008	2000	2008
Brasil	45.484,70	37.360,80	33.854,3	36.673,20	49.614,5	110.044,40
Estrato Populacional						
Municípios pequenos	34.533,10	32.504,30	10.405,90	14.067,90	6.878,40	32.420,50
Municípios médios	10.119,60	4.844,50	15.525,50	17.278,30	17.105,80	45.203,40
Municípios grandes	832,00	12,00	7.922,90	5.327,00	25.630,30	32.420,50
Macrorregião						
Norte	6.148,50	4.892,50	3.221,8	4.688,20	1.350,2	4.540,60
Nordeste	20.579,60	23.461,50	6.113,1	6.819,00	6.714,9	25.246,60
Sudeste	11.521,00	3.636,20	15.685,6	16.767,00	32.568,4	61.576,80
Sul	4.645,80	1.432,80	4.698,8	3.485,00	5.882,1	15.293,10
Centro-Oeste	2.589,80	3.937,80	4.135,0	4.914,00	3.098,9	3.387,30

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Diferentemente do que ocorria em 2000, quando 60% da quantidade total dos resíduos e rejeitos urbanos eram dispostos de forma inadequada (aterro controlado e lixão), em 2008, vê-se a inversão desses valores, no qual 60% têm disposição final em aterro sanitário.

Porém, não se pode esquecer que ainda há 74 mil toneladas por dia de resíduos e rejeitos sendo dispostos em aterros controlados e lixões.

Com os dados apresentados pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, é possível construir o Gráfico 4, que evidencia a tendência do crescimento da disposição em aterros (sanitário e controlado) e uma queda, ainda que pequena, nas disposições em lixões.

Em termos absolutos, todas as regiões apresentaram aumento na quantidade total de resíduos e rejeitos dispostos em aterros sanitários. Analisando os resultados de disposição em aterros sanitários considerando o total disposto observa-se que a região Sul apresentou melhor desempenho em 2008, dispondo mais de 75% dos seus resíduos sólidos coletados em aterros sanitários.

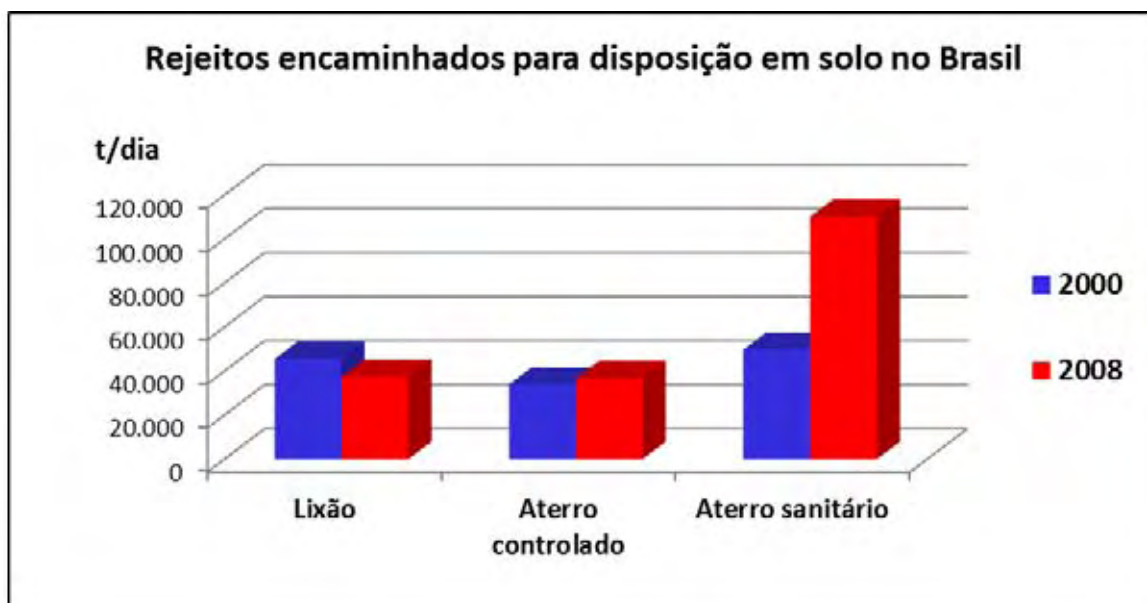


Gráfico 4 - Rejeitos encaminhados para disposição em solo no Brasil nos anos de 2000 e 2008.

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Analisando a situação da disposição final pelo viés do número de unidades de disposição final nos municípios com presença de aterros sanitários, aterros controlados e lixões, observou-se que em 2000, 86% dos municípios encaminhavam seus resíduos e rejeitos para aterros controlados e lixões e, que

somente 14% dos municípios tinham aterros sanitários. Em 2008, apesar do aumento ocorrido no número de municípios (29%) que fazem a disposição final em aterros sanitários vê-se que a maioria deles (71%) ainda dispõe seus resíduos e rejeitos em aterros controlados e lixões.

Diante deste panorama apresentado pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, observa-se a necessidade de se encontrar soluções imediatas para a disposição dos resíduos sólidos urbanos, pois ao voltar-se para a PNRS, verifica-se como três dos principais pontos:

I – Prazo para que até 2014 não mais existam lixões a céu aberto no Brasil. No lugar deles, devem ser criados aterros controlados ou aterros sanitários. Os aterros têm preparo no solo para evitar a contaminação de lençol freático, captam o chorume que resulta da degradação do lixo e contam com a queima do metano para gerar energia;

II – Somente os rejeitos poderão ser encaminhados aos aterros sanitários, compreendendo-se como rejeitos aquela parte do lixo que não tem como ser reciclado. Apenas 10% dos resíduos sólidos são rejeitos. A maioria é orgânica, que em compostagens pode ser reaproveitada e transformada em adubo, e reciclável, que deve ser devidamente separada para a coleta seletiva;

III – Elaboração de planos de resíduos sólidos nos municípios, sendo elaborados para direcionar prefeitos e cidadãos a descartar de forma correta o lixo.

2.2 RECICLAGEM

A reciclagem é um processo que vem ganhando espaço considerável e cuja função prioritária é promover a recuperação de materiais tidos como resíduo sólido, transformando-os em matérias primas a serem utilizados em processos de reprocessamento.

O ciclo descarte, recuperação e processamento secundário ou reprocessamento de material reciclável, também denominado reciclagem. Para Calderoni (*apud* Baptista, 2001), este termo pode ser estendido como um processo através do qual qualquer produto ou material, que tenha servido para os

propósitos originais a qual foi concebido, pode ser considerado como uma matéria prima secundária para a produção de novos produtos e, portanto passível de ser separado do lixo e reintroduzido num novo processo produtivo igual ou semelhante ao anterior.

Em relação ao nível de reciclagem, Fialho (*apud* Baptista, 2001), considera que apenas aspectos meramente econômicos conduzem a soluções que não são ótimas do ponto de vista ambiental. Segundo o autor, o mercado sozinho não conseguirá fazer com que a reciclagem se transforme em um instrumento ambiental de gerenciamento de resíduos sólidos. É necessária uma disciplina de todo o processo e isto passa pelo auxílio do poder legislativo brasileiro.

A reciclagem traz benefícios, tais como: diminuição da quantidade de resíduos a ser aterrada (consequentemente aumenta a vida útil dos aterros sanitários); preservação de recursos naturais; economia de energia na produção de novos produtos; diminuição dos impactos ambientais; novos negócios e geração de empregos diretos e indiretos através da criação de indústrias recicladoras.

Mas a reciclagem não pode ser vista como a principal solução para a questão dos resíduos sólidos urbanos, sendo uma atividade econômica que deve ser encarada como um elemento dentro de um conjunto de soluções. Deve-se considerar que a conduta mais adequada seria tornar a reciclagem efetivamente um ciclo fechado, ou seja, materialmente estanque. No momento, consome-se energia fóssil para o transporte dos produtos separados para serem reciclados e também água, eletricidade e outros insumos no processo da reciclagem propriamente dita. Correto seria que os produtos fossem concebidos para serem integralmente reciclados (GONÇALVES, 2007).

Outro importante avanço da PNRS é a importância dada a chamada "logística reversa". Na prática, a logística reversa diz que uma vez descartadas as embalagens são de responsabilidade dos fabricantes, que devem criar um sistema para reciclar o produto. Por exemplo, uma empresa de refrigerante terá que criar um sistema para recolher as garrafas e latas de alumínio e destiná-las para a reciclagem.

Cardoso *et al.* (2007) afirma que as empresas brasileiras têm se tornado cada vez mais responsáveis por todo o ciclo de vida de seus produtos,

motivadas pela consolidação da legislação ambiental e pelo aumento da consciência ecológica dos consumidores, bem como do mercado.

2.3 COMPOSTAGEM

A compostagem não é uma prática recente. Um dos primeiros registros da aplicação desta técnica na agricultura data do período do Império de Akkad, na Mesopotâmia, há cerca de 4500 anos atrás. Desde então várias civilizações, incluindo chineses, egípcios, gregos e romanos, amontoavam em pilhas a matéria vegetal, estrume, restos de comida e outros tipos de resíduos orgânicos e, deixavam-nos a decompor e a estabilizar até estarem prontos para serem devolvidos ao solo. No entanto, após a II Guerra Mundial, a crescente utilização de fertilizantes químicos aumentou e os métodos tradicionais de fertilização caíram em desuso (ALMEIDA *apud* SANTOS, 2007).

A definição de compostagem, não é universal. Encontra-se definida como a decomposição aeróbia de materiais orgânicos, tais como o estrume, folhas, papel e restos de comida, promovida por microrganismos e que decorre em condições controladas convertendo a matéria orgânica num produto estável semelhante ao húmus (KIEHL, 1998).

Segundo Santos (2007) o processo de compostagem decorre em duas fases: a ativa e a de acabamento (*curing*). A fase ativa da compostagem é caracterizada pela rápida e intensa biotransformação aeróbia e por temperaturas elevadas, já que as reações de degradação são muito intensas, ocorrendo a libertação de energia na forma de calor, CO₂ e vapor de água. A fase de acabamento (*curing*), que se segue à fase ativa, é caracterizada como sendo uma fase de lenta e progressiva diminuição da temperatura.

Queda (*apud* Santos, 2007) define compostagem como um processo controlado de biooxidação de substratos heterogêneos biodegradáveis, resultante da ação dos microrganismos (bactérias, actinomicetes e fungos) naturalmente associados aos substratos, durante o qual ocorre uma fase termófila, onde ocorre a libertação temporária de substâncias com efeito fitotóxico e na qual as

biomassas sofrem profundas transformações (mineralização e humificação parciais), sendo o principal produto final, designado composto.

Sendo uma digestão aeróbia de resíduos orgânicos, na qual ocorre a degradação da matéria orgânica por intermédio de microrganismos, além da matéria orgânica necessita, de oxigênio e água produzindo dióxido de carbono, água e calor, pois trata-se de uma reação biológica exotérmica, obtendo-se assim o produto principal, o composto (Figura 8).

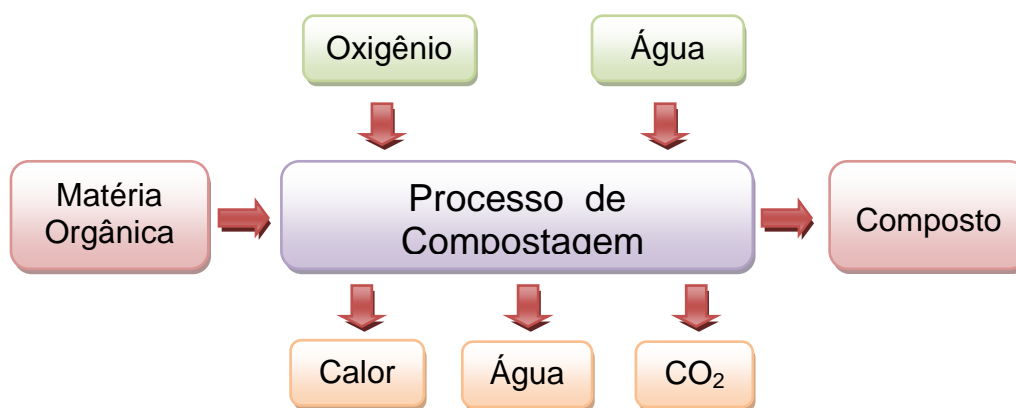


Figura 8 – Representação esquemática das entradas e saídas do processo de compostagem.

Além dos benefícios sanitários, econômicos e ambientais (se corretamente operado), o tratamento de resíduos por compostagem apresenta ainda uma vantagem adicional, o produto final apresenta várias características que permitem a sua utilização como corretivo orgânico, pois seu composto é um fertilizante que se destina, sobretudo, a fornecer matéria orgânica.

Entre os benefícios apontados por diversos autores, relacionados a compostagem e ao composto resultante, podemos citar:

a) O composto atua no solo como uma esponja, ajudando-o a reter umidade e nutrientes;

b) O composto ajuda a melhorar as características dos solos, quer sejam argilosos ou arenosos, concedendo-lhes outra estrutura;

c) Os solos ricos em composto são menos afetados pela erosão;

d) O uso de composto aumenta os nutrientes do solo, reduzindo o recurso ao uso de fertilizantes químicos;

e) Reduz significativamente a quantidade de resíduos a depositar em aterro;

f) Reduz o potencial poluidor da agricultura intensiva, resultante da introdução no solo de nutrientes, como o azoto, num estado químico que reduz a sua solubilidade e conseqüente arrastamento.

2.3.1 Parâmetros físico-químicos que interferem no processo de compostagem

Para que o processo de compostagem se desenvolva de maneira satisfatória, é necessário que alguns parâmetros físico-químicos sejam respeitados permitindo que os microrganismos encontrem condições favoráveis para se desenvolverem e transformarem a matéria orgânica.

Os principais fatores que influenciam o processo de compostagem são os que afetam, direta ou indiretamente o metabolismo dos microrganismos que são responsáveis pela decomposição dos resíduos e sua transformação num produto estável e rico em substâncias húmicas — o composto (SANTOS, 2007).

Os fatores mais importantes são: a temperatura, a qual varia em função da atividade microbiana; potencial hidrogeniônico (pH), com o valor ótimo compreendido entre 5 e 8; o arejamento: um excesso de ventilação pode provocar o arrefecimento da biomassa e retardar o processo de compostagem; o teor de umidade: durante a fase de decomposição, na qual a atividade bacteriana é predominante, as biomassas a compostar deverão ter teores de umidade compreendidos entre 45% a 65 %. Para teores de umidade inferiores a 45%, a atividade microbiana decresce, e para valores superiores a 65% a água expelle o ar da maior parte dos interstícios existentes entre as partículas da biomassa, o que dificulta a difusão do oxigênio e pode originar condições de microaerofilia ou mesmo de anaerobiose (SANTOS, 2007).

2.3.1.1 Aeração

Para Fernandes *et al.* (1999), sendo a compostagem um processo aeróbio, o fornecimento de ar é vital à atividade microbiana, pois os microrganismos aeróbios têm necessidade de O₂ para oxidar a matéria orgânica que lhes serve de alimento.

Durante a compostagem, a demanda por O₂ pode ser bastante elevada e a falta deste elemento pode se tornar em fator limitante para a atividade microbiana e prolongar o ciclo de compostagem.

O ar contido nos interstícios da massa de material em compostagem é importante para o metabolismo e tipo de microrganismos envolvidos no processo. De acordo com Haug (1993) o oxigênio é necessário aos microrganismos no processo de obtenção de energia resultante da oxigenação do carbono orgânico.

Assim, nota-se que ao longo do processo de compostagem ocorre o aumento gradual de dióxido de carbono e consequente diminuição do oxigênio (RUSSO, 2003).

O arejamento da massa em compostagem deve ser constante, para que não se alterem as atividades metabólicas dos microrganismos e o processo de degradação da matéria orgânica seja mais rápido por via da oxigenação de moléculas orgânicas presentes na massa. Para Pereira Neto (1996) o arejamento é o fator mais importante para o controle de diversos parâmetros da compostagem, haja vista que o mesmo proporciona, além do suprimento de oxigênio aos microrganismos, o controle da temperatura e umidade, e consequente remoção de odores.

A circulação de ar na massa do composto é, portanto, de importância primordial para a compostagem rápida e eficiente. Esta circulação depende da estrutura e umidade da massa e também da tecnologia de compostagem utilizada.

Para Andreoli *et al.* (2001), a aeração também influi na velocidade de oxidação do material orgânico e na diminuição da emissão de odores, pois quando há falta de aeração o sistema pode tornar-se anaeróbio.

Seja qual for a tecnologia utilizada, a aeração da mistura é fundamental no período inicial da compostagem, na fase de degradação rápida, onde a atividade microbiana é intensa. Na fase seguinte, a maturação, a atividade microbiana é pouco intensa, logo a necessidade de aeração é bem menor.

O lodo é um resíduo de granulometria fina e quando está parcialmente desidratado, apresenta aspecto pastoso, o que dificulta a difusão do ar. Por esta razão, o lodo normalmente será misturado a outro resíduo, com granulometria mais grosseira, capaz de atuar como agente estruturante na mistura, permitindo assim a criação dos espaços vazios necessários à difusão do ar (FERNANDES *et al.*, 1999)

2.3.1.2 Temperatura

A temperatura é um dos principais fatores que controlam o processo de compostagem. Os microrganismos possuem metabolismo exotérmico, ou seja, realizam a decomposição da matéria orgânica gerando calor e elevando a temperatura da leira, devido às propriedades isolantes da massa em compostagem (KIEHL, 1998).

Sendo assim, a produção de calor de um material é indicativo da atividade biológica na leira de compostagem e, por isso, indiretamente do seu grau de decomposição (HAUG, 1993). A compostagem aeróbia pode ocorrer tanto em regiões de temperatura termofílica (45 °C a 85°C) como mesofílica (25°C a 43°C).

Depois de iniciada a fase termofílica (em torno de 45°C), o ideal é controlar a temperatura entre 55°C e 65 °C. Esta é a faixa que permite a máxima intensidade de atividade microbiológica. Acima de 65°C a atividade microbiológica cai e o ciclo de compostagem fica mais longo (KIEHL, 1998).

Pode-se observar a evolução da temperatura, durante o processo de compostagem, através da Figura 9.

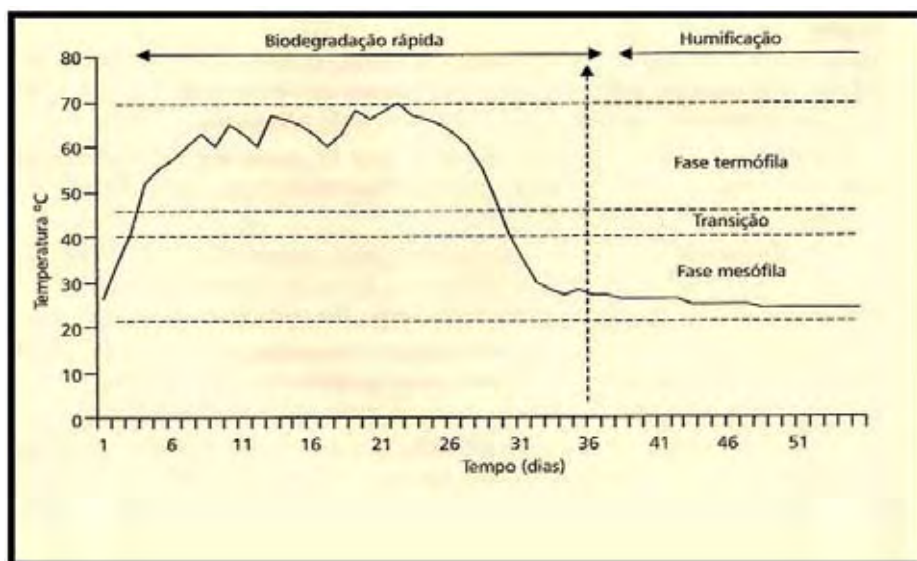


Figura 9 – Evolução da temperatura em uma leira de compostagem.
Fonte: Andreoli *et al.*, (2001).

Embora a elevação da temperatura seja necessária e interessante para a eliminação de microrganismos patogênicos, alguns pesquisadores observaram que a ação dos microrganismos sobre a matéria orgânica aumenta com a elevação da temperatura até 65°C e que acima deste valor o calor limita as populações aptas, havendo um decréscimo da atividade biológica.

De acordo com Epstein (1997) as variações de temperatura são responsáveis pela alternância das diferentes populações bacterianas presentes na massa de resíduos. As faixas de temperatura que definem a predominância de determinados grupos de organismos podem ser classificadas em: criófilas (temperatura ambiente), mesófilas (até 55°C) e termófilas (acima de 55°C). Temperaturas acima de 70°C não são aconselháveis, visto que nesta faixa a atividade dos microrganismos torna-se reduzida, resultando na paralisação do processo e, conseqüentemente, no declínio da temperatura (KIEHL, 1998).

A temperatura é um fator indicativo do equilíbrio biológico, de fácil monitoramento e que reflete a eficiência do processo. Se a leira, em compostagem, registrar temperatura da ordem de 40°C-60°C no segundo ou terceiro dia é sinal que o ecossistema está bem equilibrado e que a compostagem tem todas as chances de ser bem sucedida. Caso contrário, é sinal de que algum ou alguns parâmetros físico-químicos (pH, relação C/N, umidade) não estão sendo respeitados, limitando assim a atividade microbiana (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Atualmente, a aeração também é usada como meio de controlar a temperatura. Em certos casos o insuflamento de ar comprimido na massa do composto pode ser de 5 a 10 vezes maior do que o estritamente necessário à respiração microbiana, tendo assim a função de dissipar o calor liberado no processo. A temperatura é também um fator muito importante quando se tem o intuito de eliminar patógenos. Elevadas temperaturas durante o processo de compostagem levam à destruição de sementes de ervas daninhas, microrganismos patogênicos, larvas de insetos e vermes (GAJALAKSHMI, 2008).

Embora a maioria dos parâmetros de controle da contaminação biológica na compostagem baseie-se em valores, tais como os encontrados na Tabela 9, Lelis e Pereira Neto (2001), ao estudarem a contaminação biológica na compostagem de resíduos sólidos domiciliares, comprovaram ser necessário, em condições reais de trabalho, no mínimo vinte dias sob temperatura termófila para se alcançar uma inativação satisfatória dos patógenos, seguindo-se, obrigatoriamente, a fase de maturação do processo onde ocorre, inclusive, a ação natural de antibióticos na eliminação de eventuais patógenos remanescentes.

A Tabela 9 apresenta a temperatura e o intervalo de tempo, necessários para a destruição dos tipos mais comuns de microrganismos patogênicos e parasitas.

Tabela 9 - Condições de inativação de parasitas e microrganismos patógenos na compostagem.

Microrganismo/Parasita	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
Necator Americanus	45	50
Entamoeba histolística	45	3
Entamoeba histolística (cistos)	55	-
Micrococcus pyogenes	50	10
Ascaris lumbricoides	50 a 70	60m a 43h
Streptococcus pyogenes	54	10
Taenia saginata	55	3
Corynebacterium Diphtherine	55	50
Salmonella SP.	55	60
Salmonella Typhosa	60	30
Shigella Sp.	55	60
Escherichia Coli	55	60
E. Coli (cistos)	60	20
Trichinella spiralis (larvas)	55	3
Trichinella spiralis (cistos)	60	1
Bricella Abortus	55	30
Micobacterium Tuberculosis	67	20

Fonte: Adaptada de Lelis e Pereira Neto, 2001.

Diante da observação desse fenômeno, pode-se concluir que o controle da temperatura é fator de extrema importância para a maximização da decomposição, eliminação de patógenos prejudiciais à saúde humana e para todo o processo de compostagem (RAMEH ,1981 apud BARREIRA, 2005).

É interessante notar que a temperatura nas leiras, durante o processo de compostagem nesta forma de processamento, não é uniforme, como pode ser observado através da Figura 10.

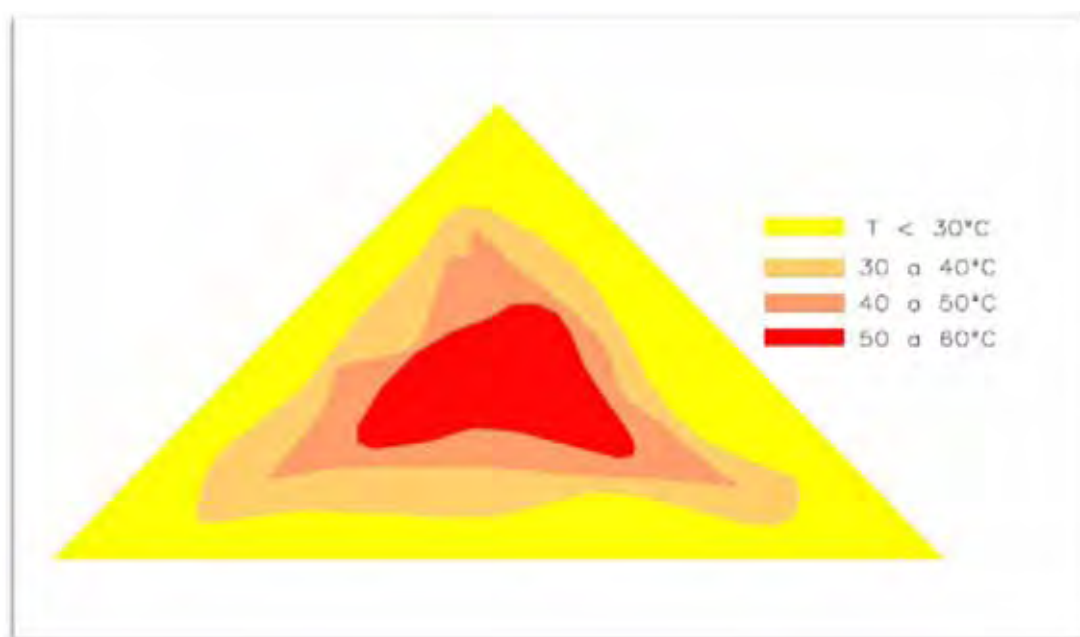


Figura 10 – Perfil típico de temperatura em uma leira de compostagem.
Fonte: Russo, 2003.

A Figura 10 ilustra um perfil típico de temperatura em leiras de compostagem submetidas a processos aeróbicos, onde o mesmo não é uniforme, decrescendo do centro para a periferia da leira.

2.3.1.3 Umidade

Sendo a compostagem um processo biológico de decomposição da matéria orgânica, a presença de água é imprescindível para as necessidades fisiológicas dos organismos, os quais não vivem na ausência de umidade (KIEHL, 1985).

Do ponto de vista teórico, o teor de umidade ideal para propiciar a degradação dos resíduos orgânicos é 100%. Entretanto, devido à necessidade de se obter uma configuração geométrica definida, bem como de manter uma porosidade adequada à passagem livre do ar para oxigenação do material, a umidade fica restringida a um valor máximo, situado em torno de 60% (PEREIRA NETO, 1996).

No composto, o teor ótimo de umidade, de modo geral, situa-se entre 50% e 65%. O ajuste da umidade pode ser feito pela criteriosa mistura de componentes ou pela adição de água.

Na prática se verifica que o teor de umidade depende também da eficácia da aeração, das características físicas dos resíduos (estrutura, porosidade). Elevados teores de umidade (>65%) fazem com que a água ocupe os espaços vazios do meio, impedindo a livre passagem do oxigênio, o que poderá provocar aparecimento de zonas de anaerobiose. Se o teor de umidade de uma mistura é inferior a 40% a atividade biológica é inibida, bem como a velocidade de biodegradação.

Para Fernandes *et al.* (1999) como há perdas de água devido à aeração, em geral, o teor de umidade do composto tende a diminuir ao longo do processo. O teor de umidade é um dos parâmetros que devem ser monitorados durante a compostagem para que o processo se desenvolva satisfatoriamente.

Assim, elevados teores de umidade, ou seja, maiores que 65%, fazem com que a água ocupe os espaços vazios do meio, impedindo a livre passagem do oxigênio, o que poderá provocar aparecimento de zonas de anaerobiose. Se o teor de umidade de uma mistura é inferior a 40%, a atividade biológica é inibida, bem como a velocidade de biodegradação (FERNANDES *et al.*, 1999).

Segundo Silva (2000), a umidade está diretamente relacionada com o tamanho das partículas e com o tamanho e formato das leiras. Quanto menores e mais finas forem as partículas, maior será a capacidade de retenção da umidade. Com relação ao tamanho das leiras pode-se concluir que as pequenas tendem a perder mais umidade. À medida que a matéria orgânica vai se humificando, sua capacidade de reter umidade também aumenta.

O excesso de umidade em uma leira de compostagem pode ser facilmente percebido pela exalação de odores característicos de condições anaeróbias, como, por exemplo, pela formação de gás sulfídrico (KIEHL, 1998).

Os lodos a serem compostados devem passar previamente por processo de desaguamento ou desidratação para eliminar o excesso de água. Entretanto, devido à necessidade de se obter uma configuração geométrica definida, bem como de manter uma porosidade adequada à passagem livre do ar para oxigenação do material, a umidade fica restringida a um valor máximo, situado em torno de 60%. (PEREIRA NETO, 1996).

2.3.1.4 Relação carbono/nitrogênio (C/N)

Os microrganismos necessitam de carbono, como fonte de energia, e de nitrogênio para síntese de proteínas. É por esta razão que a relação C/N é considerada como fator que melhor caracteriza o equilíbrio dos substratos.

A relação C/N inicial teoricamente mais favorável para a compostagem é de 30/1, porém, na prática, valores entre 26/1 e 35/1 são capazes de favorecer uma degradação rápida e eficiente. Assim, quanto mais elevada a relação, maior será o tempo necessário para se atingir a humificação da matéria orgânica, visto que os microrganismos absorvem carbono e nitrogênio sempre na relação 30/1, sendo que das 30 partes de carbono assimilado, 2/3 são eliminados na forma de dióxido de carbono e o restante, ou seja, 1/3 assimilado, é imobilizado e incorporado no protoplasma do microrganismos, vindo posteriormente constituir o húmus. (KIEHL,1998).

Da mesma forma, relações C/N inferiores a 30/1, ou seja, onde há excesso de nitrogênio, também não são favoráveis ao processo de compostagem, visto que nesses casos há o desprendimento de amônia e conseqüente liberação de odores desagradáveis ao meio.

Tanto a falta de nitrogênio quanto a falta de carbono limita a atividade microbiológica. Se a relação C/N for muito baixa pode ocorrer grande perda de nitrogênio pela volatilização da amônia. Se a relação C/N for muito elevada os microrganismos não encontrarão N suficiente para a síntese de proteínas e terão seu desenvolvimento limitado. Como resultado, o processo de compostagem será mais lento (FERNANDES *et al.*, 1999). A adição de um composto de elevada C/N ao solo, conduz à competição pelo azoto disponível, entre microrganismos e

plantas, enquanto que uma relação baixa pode favorecer o desenvolvimento das plantas

A Tabela 10 evidencia que não há consenso entre os autores quanto a relação C/N considerada ótima, uma vez que varia de acordo com as características do material a compostar (RUSSO, 2003).

Tabela 10 - Relações de C/N tidas como ótimas para a compostagem, e respectivos autores.

Relação C/N	Autor	Ano
30-35/1	Gotaas, H.B.	1959
30/1	Haug, R. T.	1980
< 20/1	Cardenas <i>et al.</i>	1980
20-30/1	Golueke, C. G.	1981
5 e 20/1	Chanyasak, <i>et al.</i>	1981
25/1	Bertoldi <i>et al.</i>	1983
30-40/1	Pereira Neto, J. T.	1989
25/1 a 40/1	Richard, T. L..	1992

Fonte: Russo (2003).

De acordo com Kiehl (1985), durante a compostagem, a degradação da matéria orgânica leva a uma redução do carbono orgânico. O nitrogênio total, ou seja, o nitrogênio orgânico, nítrico e amoniacal, aumenta em virtude da mineralização, conseqüentemente, ocorre uma diminuição da relação C/N. Assim, ao final do processo de compostagem esta relação chega a valores entre 8/1 e 12/1 (KIEHL, 1998). A Instrução Normativa nº 23/2005 do Ministério da Agricultura estabelece uma relação C/N final no valor máximo de 18.

A Tabela 11 apresenta a composição de materiais orgânicos que são empregados no processo de compostagem, onde observa-se a relação carbono/nitrogênio de cada um deles.

Tabela 11 - Composição de alguns materiais empregados no preparo do composto (resultados em material seco a 110 °C).

MATERIAL	M.O. (g/kg)	C/N	C (g/kg)	N (g/kg)	P ₂ O ₅ (g/kg)	K ₂ O (g/kg)
Abacaxi (fibras)	714,1	44/1	396,0	9,0	-	4,6
Arroz (cascas)	850,0	63/1	472,5	7,5	1,5	5,3
Arroz (palhas)	543,4	39/1	304,2	7,8	5,8	4,1
Bagaço de cana	585,0	22/1	327,8	14,9	2,8	9,9
Bagaço de laranja	225,1	18/1	127,8	7,1	1,8	4,1

MATERIAL	M.O. (g/kg)	C/N	C (g/kg)	N (g/kg)	P₂O₅ (g/kg)	K₂O (g/kg)
Banana (talos e cachos)	852,8	61/1	469,7	7,7	1,5	5,3
Banana (folhas)	889,9	19/1	490,2	25,8	1,9	-
Borra de café (solúvel)	867,9	25/1	477,5	19,1	1,7	0,2
Cacau (películas)	911,0	16/1	518,4	32,4	14,5	37,4
Cacau (cascas do fruto)	886,8	38/1	486,4	12,8	4,1	25,4
Capim-colonião	910,3	27/1	504,9	18,7	5,3	-
Capim-gordura-catingueiro	923,8	81/1	510,3	6,3	1,7	-
Capim-guiné	887,5	33/1	491,7	14,9	3,4	-
Capim-jaraguá	905,1	64/1	505,6	7,9	2,7	-
Capim-limão (cidreira)	915,2	62/1	508,4	8,2	2,7	-
Capim-milhão roxo	916,0	36/1	504,0	14,0	3,2	-
Capim-mimoso	936,9	79/1	521,4	6,6	2,6	-
Capim-pé-de-galinha	869,9	41/1	479,7	11,7	5,1	-
Capim-de-rhodes gigante	894,8	37/1	503,2	13,6	6,3	-
Cápsulas de mamona	943,3	44/1	519,2	11,8	2,9	8,1
Casca semente de algodão	959,8	78/1	530,4	6,8	0,6	12,0
Crotalaria juncea	914,2	26/1	507,0	19,5	4,0	13,1
Esterco de carneiro	564,9	15/1	319,5	21,3	12,8	26,7
Esterco de cocheira	458,8	18/1	252,0	14,0	5,2	7,4
Esterco de gado	621,1	18/1	345,6	19,2	10,1	16,2
Esterco de galinha	540,0	10/1	304,0	30,4	47,0	18,9
Esterco de porco	462,8	10/1	254,0	25,4	49,3	23,5
Feijão guandu	959,0	29/1	524,9	18,1	5,9	11,4
Feijão de porco	885,4	19/1	484,5	25,5	5,0	24,1
Feijoeiro (palhas)	946,8	32/1	521,6	16,3	2,9	19,4
Fumo (resíduos)	709,2	18/1	390,6	21,7	5,1	27,8
Gramma batatais	908,0	36/1	500,4	13,9	3,6	-
Gramma seca	905,5	31/1	502,2	16,2	6,7	-
Lab Lab	884,6	11/1	501,6	45,6	20,8	-
Mandioca (folhas)	916,4	12/1	522,0	43,5	7,2	-
Mandioca (ramas)	952,6	40/1	524,0	13,1	3,5	-
Mandioca (cascas raiz)	589,4	96/1	326,4	3,4	3,0	4,4
Mamona (cápsulas)	946,0	53/1	625,4	11,8	3,0	18,1
Milho (palhas)	967,5	112/1	537,6	4,8	3,8	16,4
Milho (sabugos)	452,0	101/1	525,2	5,2	1,9	9,0

MATERIAL	M.O. (g/kg)	C/N	C (g/kg)	N (g/kg)	P ₂ O ₅ (g/kg)	K ₂ O (g/kg)
Mucuna preta	906,8	22/1	492,8	22,4	5,8	29,7
Palha de café	999,9	31/1	511,5	16,5	1,8	18,9
Palha de feijão	946,8	32/1	521,6	16,3	2,9	19,4
Polpa de sisal	673,7	27/1	372,6	13,8	4,7	8,8
Serrapilheira	306,8	17/1	163,2	9,6	0,8	1,9
Serragem de madeira	934,5	865/1	519,0	0,6	0,1	0,1
Torta de babaçu	953,5	14/1	518,0	37,0	19,5	10,9
Torta de coco	945,9	12/1	524,4	43,7	18,8	31,4
Torta de usina de açúcar	787,8	20/1	438,0	21,9	23,2	12,3
Turfa	398,9	57/1	222,3	3,9	0,1	3,2

M.O. – matéria orgânica; C/N – relação carbono-nitrogênio.

*o teor de C (g/kg) foi calculado com base na relação C/N e teores de N informados pelo autor.

Fonte: Adaptado de Kiehl, 1981 e 1985.

O lodo de esgoto é um resíduo rico em nitrogênio, apresentando relação C/N entre 5,0 e 11,0. Ele necessita, portanto de um resíduo complementar rico em carbono e pobre em nitrogênio, para que a mistura, criteriosamente determinada, apresente relação C/N em torno de 20 ou 30 (FERNANDES *et al.*, 1999)

2.3.1.5 Granulometria: estrutura do material

A granulometria pode ser definida como a proporção relativa dos diferentes grupos de tamanho de partículas existentes e separáveis por peneiramento, constituindo-se em um importante fator de influência para o processo de compostagem de resíduos sólidos domiciliares (KIEHL, 1998).

Devido à relação do tamanho das partículas com a oxigenação da massa em compostagem, tem-se que partículas finas, menores que 2 mm, dificultam o arejamento, enquanto valores acima de 16 mm propiciam o arejamento natural, dispensando revolvimentos constantes (RUSSO, 2003).

Para Fernandes, *et al.* (1999) quanto mais fina é a granulometria, maior é a área exposta à atividade microbiana, o que promove o aumento das reações bioquímicas, visto que aumenta a área superficial em contato com o oxigênio.

Alguns autores obtiveram condições ótimas de compostagem com substratos apresentando de 30% a 36% de porosidade, mas de modo geral, o tamanho das partículas deverá estar entre 25mm e 75 mm, para ótimos resultados.

Pereira Neto (1989) recomenda uma granulometria de 20mm a 50 mm, em se tratando de compostagem de resíduos sólidos domiciliares, facilitando-se assim, a oxigenação através da formação de massa porosa.

Como o lodo de esgoto normalmente apresenta granulometria muito fina, haveria dificuldade de realizar o processo de compostagem somente com este material, pois fatalmente apresentaria problemas relativos à aeração devido à falta de espaços intersticiais entre as partículas. Esta é uma das principais razões para se combinar o lodo com outro resíduo de granulometria mais grossa, o que confere estrutura porosa à mistura a ser compostada (FERNANDES, 1999).

2.3.1.6 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Segundo Maragno *et al.* (2007), o pH é tido como um parâmetro que afeta os sistemas de compostagem. A reação da matéria orgânica vegetal ou animal é geralmente ácida. Assim, ao se iniciar a decomposição, ocorre uma fase fitotóxica pela formação de ácidos orgânicos que tornam o meio mais ácido do que o da própria matéria-prima original. Entretanto, esses ácidos orgânicos e os traços de ácidos minerais que se formam, reagem com bases liberadas da matéria orgânica, gerando compostos de reação alcalina.

Durante o processo de compostagem nota-se a formação de ácidos húmicos que também reagem com os elementos químicos básicos, formando humatos alcalinos. Como consequência, o pH do composto se eleva à medida que o processo se desenvolve, passando pelo pH 7,0 e alcançando pH superior a 8,0, enquanto contiver nitrogênio amoniacal (MARAGNO *et al.*, 2007).

Fernandes *et al.* (1999) afirma que níveis de pH muito baixos ou muito altos reduzem ou até inibem a atividade microbiana e que quando são utilizadas misturas com pH próximo da neutralidade, o início da compostagem (fase mesófila) é marcado por uma queda sensível de pH, variando de 5,5 a 6,0 , devido à produção de ácidos orgânicos.

Quando a mistura apresentar pH próximo de 5,0 ou ligeiramente inferior há uma diminuição drástica da atividade microbiológica e o composto pode não passar para a fase termófila. A passagem à fase termófila é acompanhada de rápida elevação do pH, que se explica pela hidrólise das proteínas e liberação de amônia. Assim, normalmente o pH se mantém alcalino (7,5-9,0), durante a fase termófila.

De qualquer forma, e principalmente se a relação C/N da mistura for conveniente, o pH geralmente não é um fator crítico da compostagem. Como o pH dos lodos de esgotos sanitários geralmente é próximo de 7,0, o processo de compostagem normalmente se desenvolve muito bem com este material, mesmo quando misturado com bagaço de cana, resíduos de podas de árvores, cascas do processamento de algodão e outros.

Segundo Haug (1993), à medida que os fungos e as bactérias digerem a matéria orgânica, são liberados ácidos que se acumulam e acidificam o meio. Este abaixamento do pH favorece o crescimento de fungos e a decomposição da celulose. Posteriormente estes ácidos são decompostos até serem completamente oxidados. No entanto, se existir escassez de oxigênio, o pH poderá descer a valores inferiores a 4,5 e limitar a atividade microbiana, retardando, assim, o processo de compostagem.

A Figura 11 apresenta, segundo Kiehl (1985) a variação do pH ao longo do processo de compostagem.

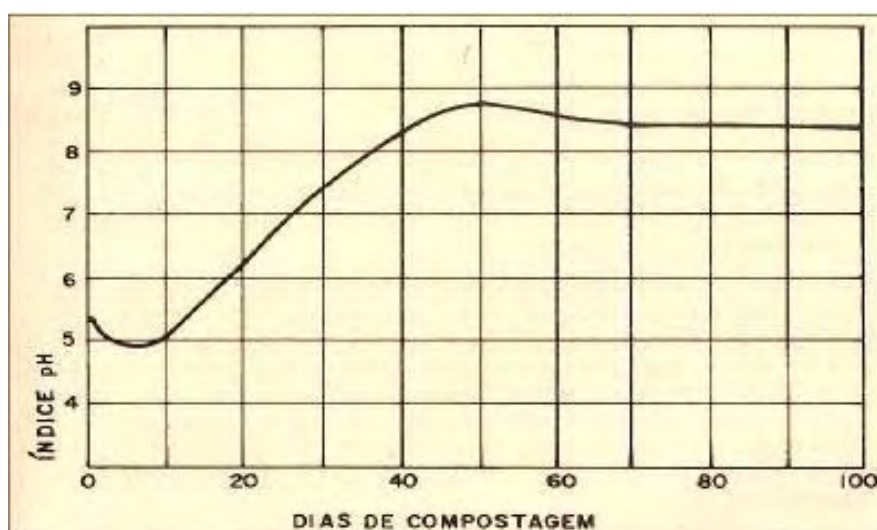


Figura 11 – Variação do pH ao longo do processo de compostagem.

Fonte: Kiehl, 1985.

Observa-se que durante as primeiras horas do processo o pH decresce até valores próximos a 5,0, aumentando, posteriormente, ao longo do processo, de forma gradual, alcançando valores próximos ao intervalo entre 8.0 – 9,0, ao final do período de compostagem.

Em estudo realizado por Campos e Blundi (1999), os autores, ao monitorarem leiras de compostagem de resíduos sólidos domiciliares por um período de 127 dias, observaram que o pH inicial que era de 6,7 decresceu até o valor de 5,9 já no 7º dia, tendo evoluído até o pico de 8.4 no 42º dia e depois permanecido constante no valor de 8,3 até o final do estudo.

2.3.2 Características do composto orgânico

Segundo Barreira (2005), nos primórdios da agricultura, os resíduos orgânicos mais utilizados para a produção de composto eram basicamente dejeções humanas e de animais e restos de cultura. Mais recentemente, com o aumento populacional e a diversificação de indústrias, a geração de resíduos tornou-se mais constante e, conseqüentemente, tem-se empregado como matéria prima para produção de compostos, outros meios, como por exemplo, os provenientes dos resíduos sólidos urbanos, lodos de esgoto, restos de indústrias alimentícias, resíduos da fabricação de papel e de agroindústrias.

Esses resíduos são considerados excelentes matérias-primas para a compostagem devido às suas composições químicas. Todavia, a preocupação quanto à utilização desses resíduos é que muitos desses materiais recebem tratamentos especiais na sua produção industrial nos quais são empregados produtos químicos considerados tóxicos, causando certa ressalva na recomendação de seu uso agrícola para fertilização (KIEHL, 1998).

Em relação à compostagem de resíduos sólidos orgânicos observa-se que ao final do processo são gerados dois importantes componentes: sais minerais, contendo nutrientes para as raízes das plantas e húmus, condicionador e melhorador das propriedades físicas, físico-químicas e biológicas do solo (KIEHL,1998).

Entende-se, portanto, que o benefício da matéria orgânica no solo não é apenas o de fornecedor de nutrientes para as plantas, mas principalmente de modificador, com o intuito de melhorar suas propriedades físicas e biológicas (EMBRAPA, 2004).

De acordo com Kiehl (1998), a qualidade do composto pode ser analisada de acordo com as diferentes referências: a qualidade vista pelo produtor, a exigida pela legislação e a vista pelo agricultor. Porém, em todas essas esferas, há, sem exceção, a preocupação comum no que diz respeito à umidade, à concentração de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) e matéria orgânica e ao conteúdo de inertes (KIEHL, 2004).

Em relação à umidade, percebe-se que o composto não deve apresentar umidade superior a 60%, pois, assim, o comprador estaria comprando mais água que composto. Para Kiehl (1998), as concentrações de NPK e matéria orgânica são extremamente importantes para o valor do composto, à medida que representam também uma forma de se avaliar a sua qualidade e calcular seu valor de mercado comparando-se aos adubos químicos.

O aspecto visual também desempenha papel importante para a comercialização do composto, levando-se em conta que a presença de inertes, tais como cacos de vidro, de louça, de plástico, entre outros, proporciona a sensação de um composto de má qualidade, dificultando a sua venda. Outras características do composto também são examinadas pelo agricultor, como a inexistência de odor, a coloração preta intensa e o tamanho das partículas (KIEHL, 1998, 2004).

Observa-se que o composto cru não possui as características necessárias requeridas a um composto orgânico para uma utilização segura no solo. Dentre as consequências da utilização de compostos imaturos no cultivo de plantas, Kiehl (1998) aponta a interferência na germinação das sementes e a possível toxicidade causada pelo excesso de amônia.

O composto orgânico, quando bem processado, possui odor e coloração característicos, e tem seu manuseio, estocagem e transporte muito facilitados. Todavia, o composto cru não possui tais qualidades, podendo se tornar tóxico para as plantas (BARREIRA, 2005). A Tabela 12 apresenta as principais diferenças entre os compostos estabilizado e não estabilizado.

Tabela 12 - Diferenças entre composto estabilizado e composto não estabilizado.

Composto estabilizado	Composto não estabilizado
Nitrogênio como íon nitrato	Nitrogênio como íon amônio
Enxofre como íon sulfato	Enxofre ainda em parte como íon sulfídrico
Baixa demanda de oxigênio	Alta demanda de oxigênio
Sem perigo de putrefação	Perigo de putrefação
A mineralização é cerca de 50%	Altas concentrações de substâncias orgânicas não mineralizadas
Alta capacidade de retenção de água	Baixa capacidade de retenção de água

Fonte: Adaptado de Barreira, 2005.

Segundo Lasaridi *et al.* (2006), a qualidade do composto orgânico depende de uma série de fatores, tais como tamanho de partículas, umidade, teor de matéria orgânica, teor de carbono, concentração de nitrogênio, fósforo e potássio, metais pesados, salinidade, porosidade, microrganismos patogênicos e grau de estabilidade do composto. capacidade de troca catiônica, capacidade de retenção de água, condutividade elétrica e substâncias húmicas.

2.3.3 Diferentes processos de compostagem

Segundo Fernandes *et al.* (1999), sendo um processo biológico de tratamento de resíduos, a compostagem obedece a alguns princípios. Porém, as tecnologias de implantação do processo admitem alternativas que podem variar de sistemas simples e manuais, até sistemas complexos, altamente tecnificados, onde todos os parâmetros do processo são monitorados e controlados com precisão.

Os processos de compostagem são apresentados de diferentes formas, mas basicamente, têm sido classificados por diversos investigadores segundo três grandes características: disponibilidade de oxigênio (aeróbios e anaeróbios), temperatura (mesofílicos e termofílicos) e tecnologia adotada

(abertos ou sistemas fechados). Mazzer *et al.* (2004), apresenta na Tabela 13 as seguintes classificações:

Tabela 13 - Classificações dos processos de compostagem.

Classificação quanto à Biologia:	
Aeróbio	A compostagem aeróbia corresponde ao processo de compostagem na presença de oxigênio, sendo normalmente considerado que a taxa de arejamento necessária a manter um processo aeróbio é aquele que permite manter o nível de oxigênio disponível para os processos biológicos acima dos 5 %. Neste processo existe o desprendimento de CO ₂ e vapor d'água, onde a temperatura é sempre elevada.
Anaeróbio	A digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos, tem sido designada de compostagem anaeróbia por alguns autores, consistindo no processo de degradação de matéria orgânica na ausência de oxigênio, caracterizada pela ocorrência de bio-transformações anaeróbias. É cada vez mais aceita a designação de fermentação anaeróbia para esta decomposição. Os principais argumentos a favor deste tipo de decomposição são a possibilidade de aproveitamento de parte do carbono sob a forma de metano (CH ₄). Este gás pode ser aproveitado sob a forma de energia, elétrica ou vapor, de fácil utilização em instalações industriais. Neste processo a temperatura permanece baixa.
Misto	Processo onde a matéria passa pela fermentação aeróbia e depois existe uma redução de oxigênio desenvolvendo-se assim o processo anaeróbio.
Classificação quanto a Temperatura	
Criofílico	Processo onde a temperatura atinge uma média inferior, próxima à do ambiente.
Mesofílico	processos biológicos envolvidos na compostagem classifica como mesofílicos os microrganismos que têm a capacidade de se desenvolver a temperaturas de 15 a 45°C . A temperatura nesses processos são diretamente proporcionais a quantidade de microrganismos.
Termofílico	processos biológicos envolvidos na compostagem classifica como termofílicos ao grupo de microrganismos que se desenvolvem a temperaturas entre os 45 e 65°C e que, se mostram incapazes de se desenvolverem a temperaturas inferiores a 40°C. É o mais indicado, pois, as altas temperaturas podem diminuir a sobrevivência de microrganismos patogênicos.

Classificação quanto ao ambiente	
Aberto	Processo onde a compostagem ocorre em pátio a céu aberto.
Fechado	Processo onde a compostagem ocorre em digestores, bioestabilizadores, células de fermentação , etc.
Classificação quanto ao Processamento	
Estático	Processo onde o revolvimento da massa em fermentação é feita com intervalos.
Dinâmico	Processo onde a massa em digestão é revolvida continuamente.

Fonte: Adaptado de Mazzer *et al.*, (2004).

Para Fernandes *et al.* (1999), os processos de compostagem podem ser divididos em três grandes grupos:

a) Sistema de leiras revolvidas (*windrow*) , onde a mistura de resíduos é disposta em leiras , sendo a aeração fornecida pelo revolvimento dos resíduos e pela convecção e difusão do ar na massa do composto. Uma variante deste sistema, além do revolvimento, utiliza a insuflação de ar sob pressão nas leiras

b) Sistema de leiras estáticas aeradas (*static pile*), onde a mistura a ser compostada é colocada sobre uma tubulação perfurada que injeta ou aspira o ar na massa do composto, não havendo revolvimento mecânico das leiras.

c) Sistemas fechados ou reatores biológicos (*in-vessel*) , onde os resíduos são colocados dentro de sistemas fechados, que permitem o controle de todos os parâmetros do processo de compostagem.

Os dois primeiros sistemas geralmente são realizados ao ar livre, sendo em alguns casos realizados em áreas cobertas. A compostagem em reatores biológicos apresenta várias alternativas de reatores e níveis de automação.

O interessante da compostagem é que um bom composto pode ser obtido tanto por tecnologias simples como por tecnologias complexas, desde que os resíduos sejam adequados e o processo biológico ocorra em boas condições. A questão realmente importante a ser colocada é que a alternativa escolhida deve ser adequada à situação do ponto de vista técnico e socioeconômico.

2.3.3.1 Sistema de leiras revolvidas (*windrow*)

Segundo Fernandes *et al.* (1999) dos três sistemas de compostagem apresentados, o de leiras revolvidas é o mais simples. A mistura dos resíduos a serem compostados é disposta em longas leiras que são periodicamente revolvidas. A aeração é feita pela difusão e convecção do ar na massa do composto. No momento em que é feito o revolvimento, o composto entra em contato com a atmosfera rica em O₂, o que permite suprir momentaneamente as necessidades de aeração do processo biológico. O efeito do revolvimento é limitado, pois alguns estudos mostraram que cerca de uma hora depois, o nível de oxigênio da leira se aproxima de zero.

Existem máquinas específicas para misturar e revolver o composto (Figura 12), como por exemplo:

- Implementos tracionados por tratores agrícolas, sendo alguns já fabricados no Brasil;
- Equipamentos auto-propelidos, que se deslocam sobre a leira de composto e realizam o revolvimento, deixando as leiras com dimensões padrão, fixadas pelo modelo do equipamento;
- Pás carregadeiras convencionais, cuja eficiência é menor, porém podem ser usadas com bons resultados.



Figura 12 – Compostagem através do sistema de leiras revolvidas (*windrow*).

Fonte: <http://www.eenee.com/contents/en-us/>.

A altura e seção das leiras dependem do resíduo estruturante e do método de construção da leira, sendo que as de seção triangular, com 1,50m a 1,80m de altura e 4,0m a 4,5m. O espaçamento entre as leiras deve ser determinado em função das características do equipamento que fará o revolvimento. Caso seja uma Pá Carregadeira , um espaçamento de 3,0m geralmente é suficiente.

Durante a compostagem , as leiras devem ser revolvidas no mínimo três vezes por semana (Kuter, 1995), sendo que esta operação tem vários objetivos:

- Aerar a massa de resíduos em compostagem;
- Aumentar a porosidade do meio, que sofre uma compactação natural devido ao peso próprio;
- Homogeneizar a mistura;
- Expor as camadas externas às temperaturas mais elevadas do interior da leira, melhorando a eficiência da desinfecção;
- Em alguns casos, reduzir a granulometria dos resíduos;
- Diminuir o teor de umidade do composto.

O sistema de leiras revolvidas pode gerar alguns problemas de odor no início do processo, quando o lodo, mesmo estabilizado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), ainda apresenta mau cheiro. Porém, quando o processo de compostagem evolui satisfatoriamente, após 5 a 6 dias, o problema de odor praticamente desaparece (FERNANDES *et al.*, 1999).

2.3.3.2 Sistema de leiras estáticas aeradas

Neste sistema a mistura de resíduos é colocada sobre uma tubulação perfurada, conectada a um soprador industrial. A aeração necessária será fornecida por este sistema de injeção de ar sob pressão ou por sucção.

A Figura 13 exemplifica o de sistema de compostagem com leiras estáticas aeradas Nos Estados Unidos , onde este sistema é bastante utilizado, os sopradores mais empregados tem potência entre 1 e 5 HP, de acordo com as

características e volume dos resíduos , sendo ligados e desligados de maneira intermitente, durante a fase de bioestabilização. Estes sopradores trabalham a pressões internas de 600 a 1.000 mm de coluna d'água.



Figura 13 - Compostagem através do sistema de leiras estáticas aeradas (*static pile*).

Fonte: <http://www.waternut.org/moodle>.

A aeração deve ser dimensionada de acordo com os objetivos visados:

- a) Satisfazer às demandas de oxigênio do processo de biodegradação aeróbia;
- b) Remover o excesso de umidade;
- c) Remover o excesso de calor para manter a temperatura em torno de 60°C.

De acordo com os objetivos fixados , as necessidade de aeração podem variar bastante.

De acordo com a *United States Enviromental Protection Agency* – (USEPA), experimentos de compostagem de lodo de esgoto fresco, mostraram que para uma taxa de aeração elevada, próxima de 3,6 m³/min/t de matéria seca de composto, 20 minutos após a parada do soprador, a atmosfera interna da massa de resíduos apresentou condições anaeróbias. Os ciclos de funcionamento dos sopradores devem, portanto, levar em conta esta dinâmica do consumo de oxigênio.

A demanda de oxigênio também é variável de acordo com a fase do processo de compostagem, sendo pequena nos primeiros dias e crescendo muito

após a instalação da fase termófila. Em seguida, quando a temperatura diminui novamente a patamares mesófilos, o consumo de oxigênio cai novamente.

O limite de 2% a 5 % nos gases de aspiração é válido para suprir estritamente as demandas de oxigênio da população microbiana, mas caso o dimensionamento da aeração seja definido pela necessidade de manter a temperatura entre 55% e 65°C, então o parâmetro a ser monitorado será a temperatura e não o teor de oxigênio, que neste caso, será elevado, visto que as necessidades de aeração, para manter a temperatura nestes níveis, é muito superior á estrita demanda de oxigenação do processo de biodegradação.

Quanto ao sentido da aeração, injeção ou aspiração do ar, vários autores defendem o ponto de vista de que a aspiração diminui os caminhos preferenciais de passagem do ar na massa do composto, diminuindo portanto as microzonas de anaerobiose. A sucção do ar também tem a vantagem de permitir melhor controle de odores, pois o ar que percorre a massa do composto é captado pelas tubulações e pode passar posteriormente por um sistema de tratamento de odores (FERNANDES *et al*, 1999).

O sistema de aeração também pode alternar injeção e aspiração de ar. A tubulação de aeração pode ser constituída por tubos de PVC branco de 100 mm de diâmetro, sendo os orifícios de saída de ar espaçados de no máximo 18 cm (EPA, 1978).

É recomendável recobrir a tubulação com uma camada de 20-30 cm de resíduo estruturante seco, para evitar entupimentos. Cavacos de madeira, pela sua porosidade e resistência mecânica, são excelentes para esta finalidade.

Depois de formadas as leiras , também é importante recobri-las com uma camada de aproximadamente 5 cm de resíduo estruturante ou de composto já curado. Esta prática visa:

- a) Proteger o composto do ressecamento superficial , o que impediria a atividade microbiológica nesta região;
- b) Isolar a massa de resíduos de moscas , que são atraídas nos primeiros dias do processo;
- c) Isolar parcialmente os resíduos do meio externo, permitindo a elevação da temperatura na camada externa, o que contribui para melhorar a eficiência de remoção de patógenos.

No sistema de leiras aeradas, os sopradores devem funcionar durante toda a fase termófila (bioestabilização), que é a fase de maior demanda de oxigênio. Para o lodo de esgoto e resíduos estruturantes usuais, o período de aeração varia de 14 a 28 dias, sendo 21 dias a média mais comum.

Após a fase termófila o composto pode ser transportado para outro local, onde será realizada a maturação, que deve durar em torno de 60 dias. Nesta fase as necessidades de oxigenação são baixas e o composto pode ficar em leiras sem aeração, sendo revolvido a cada 20-25 dias.

Segundo Fernandes *et al.* (1999), este sistema de compostagem também permite a formação de leiras em duas configurações:

a) Leiras isoladas, como as descritas para o sistema de leiras revolvidas;

b) Leiras agrupadas, onde a massa de resíduos é colocada em blocos compactos de grandes dimensões.

No primeiro caso é mais fácil gerir a evolução de lotes separados de composto, formando-se, por exemplo, uma leira por dia. No caso das leiras agrupadas, como os volumes de resíduos ficam armazenados em bloco, as produções de cada dia ficam dispostas umas sobre as outras, dificultando a gestão e o controle dos diferentes lotes. Este tipo de leira tem por outro lado, a vantagem de otimizar o uso do terreno, reduzindo as áreas necessárias.

2.3.3.3 Sistema de reatores biológicos

A compostagem realizada em reatores biológicos (*in-vessel*), oferece a possibilidade de maior controle sobre todos os parâmetros importantes para o processo de compostagem, portanto, o ciclo da fase termófila é reduzido, o que em certos casos conferiu, à compostagem em reator, a denominação de “compostagem acelerada”.

Devido à homogeneidade do meio, inclusive com relação à temperatura, a compostagem em reatores também é tida como mais eficiente no controle dos patógenos. Outra característica desta alternativa é a maior facilidade

para controlar odores, pois o sistema é fechado e a aeração controlada (FERNANDES *et al.*, 1999)

De acordo com as características dos resíduos e do tipo de equipamento, o tempo de detenção no reator biológico pode variar de 7 a 20 dias, o que faz com que o sistema demande menor espaço para sua implantação.

A aeração é feita sob pressão e como o sistema é fechado, também se torna mais fácil monitorar a taxa de aeração e adequá-la às necessidades do processo. No caso, pode ser medido o teor de oxigênio dos gases de saída do reator e quando a porcentagem de O₂ estiver próxima de 2%, aumenta-se a vazão de ar para impedir condições de anaerobiose.

Mesmo tendo uma fase termófila mais rápida e intensa, após seu final, o composto ainda deve passar por um período de maturação de mais ou menos 60 dias, tal como descrito para os sistemas anteriores, antes de ser utilizado.

Verifica-se através da Figura 14, um exemplo do processo de compostagem através de reatores biológicos.



Figura 14 – Compostagem através do sistemas fechados ou reatores biológicos (*in-vessel*).

Fonte: <http://www.epd.gov.hk>.

Para Fernandes *et al.* (1999) a compostagem em reator é mais dependente de equipamentos mecânicos do que os sistemas de leiras revolvidas

ou leiras estáticas aeradas, sendo que, seu a sofisticação tecnológica é variável de acordo com o fabricante dos reatores e da escala da usina de compostagem.

De modo geral os vários tipos de reator se enquadram em três grandes categorias:

a) Reatores de fluxo vertical - São constituídos por sistemas parecidos com silos verticais onde os resíduos geralmente entram pela parte superior e percorrem o reator no sentido descendente. O ar pode ser injetado em vários níveis ou apenas na parte inferior do reator.

O dimensionamento é feito de tal forma que quando o composto chega à parte inferior do reator, a fase termófila terminou. O composto então é descarregado e transportado ao pátio de maturação.

b) Reatores de fluxo horizontal - apresentam geralmente forma cilíndrica e são dispostos horizontalmente. Por estas características às vezes são conhecidos como túneis.

Os resíduos entram por uma extremidade do reator e saem pela outra, com tempo de detenção suficiente para a realização da fase termófila. O ar é injetado sob pressão ao longo do trajeto.

c) Reatores de batelada - Difere dos anteriores pelo fato do composto ficar confinado no mesmo local, sem se deslocar. O reator geralmente é dotado de um sistema de agitação da massa de resíduos, que pode ser por rotação lenta do reator em torno de seu próprio eixo, ou por um sistema misturador interno. O revolvimento é necessário para limitar os caminhos preferenciais de passagem do ar, porém alguns modelos de reatores, por batelada, não são dotados deste dispositivo.

Nos dois primeiros casos, os resíduos passam pelos reatores em fluxo contínuo, sendo que o período de detenção é definido pela velocidade com que os resíduos percorrem o trajeto da entrada até a saída do reator. No terceiro caso, o reator, recebe uma determinada quantidade de resíduos, processa-os, e quando a fase termófila chega ao seu final, o reator é aberto, descarregado em batelada, recomeçando-se o processo com novos resíduos frescos.

2.3.3.4 Vantagens e desvantagens dos sistemas

Para se obter um composto de boa qualidade não necessita-se, necessariamente, de tecnologia sofisticada para ser produzido. É necessário um bom controle quanto a qualidade dos resíduos que serão utilizados, a definição criteriosa das proporções de combinação dos resíduos, e bom monitoramento do processo biológico de compostagem, de acordo com os parâmetros. Para Fernandes *et al.* (1999), com relação á tecnologia a ser utilizada, a escolha deve ponderar critérios técnicos e econômicos. As principais vantagens e desvantagens dos três sistemas são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Principais vantagens e desvantagens dos diferentes sistemas de compostagem.

Sistema de compostagem	Vantagens	Desvantagens
Leiras revolvidas	Baixo investimento inicial	Maior necessidade de área, pois as leiras tem que ter pequenas dimensões e há necessidade de espaço livre entre elas
	Flexibilidade de processar volumes variáveis de resíduos	
	Simplicidade de operação	
	Uso de equipamentos simples	Problema de odor mais difícil de ser controlado, principalmente no momento do revolvimento
	Produção de composto homogêneo e de boa qualidade	
	Possibilidade de rápida diminuição do teor de umidade das misturas devido ao revolvimento	Muito dependente do clima. Em períodos de chuva o revolvimento não pode ser feito
		O monitoramento da aeração deve ser mais cuidadoso para garantir a elevação da temperatura
Leiras estáticas aeradas	Baixo investimento inicial	Necessidade de bom dimensionamento do sistema de aeração e controle dos aeradores durante a compostagem
	Melhor controle de odores	
	Fase de bioestabilização mais rápida que o sistema anterior	
	Possibilidade de controle da temperatura e da aeração	Operação também influenciada pelo clima
	Melhor uso da área disponível que no sistema anterior	

Compostagem em reator	Menor demanda de área	Maior investimento inicial
	Melhor controle do processo de compostagem	Dependência de sistemas mecânicos especializados, o que
	Independência de agentes climáticos	torna mais delicada e cara a manutenção
	Facilidade para controlar odores	Menor flexibilidade operacional para tratar volumes variáveis de
	Potencial para recuperação de energia térmica (dependendo do tipo de sistema)	resíduos Difícil de ser reparado se o sistema for mal dimensionado ou a tecnologia proposta for inadequada.

Fonte: Fernandes *et al.*, (1999).

2.4 LODO DE ESGOTO

Segundo Agrawal (2007), o lodo de esgoto, também conhecido como bioossólido, é um subproduto de processos de tratamento de esgoto, cujas características dependem da qualidade do esgoto e dos tipos de processos de tratamento a que é submetido (Figura 15 e Figura 16).

Para Bettioli (2006), a disposição final do bioossólido é uma etapa que gera muitos problemas para as estações de tratamento de esgotos, apresentado um custo de até 50% do orçamento operacional.

Silva (2008), mostra que a produção de lodo no Brasil está estimada entre 150 mil e 220 mil toneladas por ano, devido aos baixos índices de coleta e tratamento de esgoto ainda existentes no país, no entanto, a pressão da sociedade por melhores condições ambientais, indica uma potencial tendência de ocorrer um incremento substancial na quantidade de lodo a ser disposto nos próximos anos, surgindo portanto, a necessidade que sejam apresentadas técnicas que possibilitem tratamento eficiente e adequado de lodos sanitários, obedecendo aos critérios de baixo custo e a facilidade de operação e manutenção, consistindo, assim, em alternativa simplificada viável.



Figura 15 – Lodo de esgoto “*in natura*”.



Figura 16 – Lodo de esgoto em processo de desidratação.

O lodo de esgoto apresenta uma composição muito variável, pois depende da sua origem, bem como do processo de tratamento do esgoto e do seu caráter sazonal. Um lodo de esgoto típico apresenta em torno de 40% de matéria orgânica, 4% de nitrogênio, 2% de fósforo. Sendo rico em nutrientes orgânicos vegetais, o lodo de esgoto pode vir a substituir os fertilizantes, mas a disponibilidade de metais tóxicos, muitas vezes limita o uso para este fim (BETTIOL, 2006).

Para Corrêa (2001), os problemas relacionados à saúde pública e a custos associados ao processamento e transporte de biossólidos são as questões que invariavelmente norteiam o aproveitamento desses resíduos. Ainda, segundo o autor, as questões sanitárias podem ser superadas por meio de manejo adequado do lodo fresco ou por meio de processos que o higienizem e o estabilizem (compostagem, secagem com calor, calefação, insolação natural), convertendo-os, de fato, em biossólidos.

Para Maiorino *et al.* (2002), na Europa a tendência atual de abandonar o uso aterro sanitário como uma estratégia de eliminação de resíduos, que acabam não sendo reutilizados ou reciclados e que exigem muitas implementações de processos, necessidade de impermeabilização de longo prazo, com alto custo financeiro e a disponibilidade de terras adequadas.

Nesta perspectiva, merecem atenção outras possibilidades de destinação, dentre elas a compostagem, onde o destino final do composto deve ser o setor agrícola, podendo ser beneficiado com a presença de lenta degradação de húmus, que contribui para melhoria das características físicas do

solo. Os potenciais benefícios inerentes à administração do composto no solo estão relacionados com a redução, a fim de aumentar a permeabilidade da água do solo e do ar, com a retenção de água e nutrientes em solos arenosos e da concentração de nutrientes essenciais para o solo.

Para Chiba (2008) reciclagem do lodo de esgoto em solos agrícolas é uma das formas mais racionais de utilização desse material, sendo verificado em seus experimentos que sua aplicação do lodo de esgoto não causou efeitos deletérios na qualidade do solo, mesmo com sua reaplicação em anos sucessivos, em termos de contaminação com metais pesados, resultando ainda em aumento nos teores de Zn e Cu disponíveis no solo e que os teores de P, K, Ca, Mg, Cu e Zn nas plantas que receberam lodo de esgoto estavam em níveis adequados, e a utilização desse lodo não resultou em aumento nos teores de Cd, Cr, Ni e Pb no solo e na planta.

Para Corrêa (2007) quanto mais avançado e eficiente for o processo de tratamento de esgoto, maior será a quantidade de lodo produzido, que deve ser gerenciado e disposto adequadamente no meio ambiente, pois o mesmo recebe toda sorte de organismos, tais como vírus, bactérias, protozoários e helmintos. Como resultado, questões relacionadas à saúde pública invariavelmente confrontam o aproveitamento desses resíduos.

A Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 29 de agosto de 2006, que define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências, em sua Seção III - Requisitos Mínimos de Qualidade do Lodo de Esgoto ou Produto Derivado Destinado a Agricultura, define em seu Art. 2º:

“XIV - lodo de esgoto ou produto derivado higienizado: lodo de esgoto ou produto derivado submetido a processo de tratamento de redução de patógenos de acordo com os níveis estabelecidos nesta norma;

XV - lote de lodo de esgoto ou produto derivado: quantidade de lodo de esgoto ou produto derivado destinado para uso agrícola, gerada por uma Estação de Tratamento de Esgoto-ETE ou Unidade de Gerenciamento de Lodo-UGL no período compreendido entre duas

amostragens subseqüentes, caracterizada físico-química e microbiologicamente”

A Resolução coloca ainda que toda aplicação de lodo de esgoto e produtos derivados em solos agrícolas deve ser obrigatoriamente condicionada à elaboração de um projeto agrônômico para as áreas de aplicação, firmado por profissional devidamente habilitado, que atenda aos critérios e procedimentos. A ETE deverá encaminhar ao proprietário e ao arrendatário ou administrador da área, declaração contendo informações sobre as características do lodo de esgoto ou produto derivado, em especial quanto ao tratamento adotado para redução de patógenos e vetores e, orientações quanto à aplicação, baseadas no projeto agrônômico, para aprovação e consentimento dos mesmos.

O seu Art. 11º aponta os limites máximos das substâncias inorgânicas (Tabela 14) e de agentes patogênicos (Tabela 15) devem respeitar:

Tabela 14 – Concentrações máximas admissíveis de substâncias inorgânicas em lodos de esgoto destinados à utilização agrícola. - mg/kg (base seca).

Substâncias Inorgânicas	Concentração Máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)
Arsênio	41
Bário	1300
Cádmio	39
Chumbo	300
Cobre	1500
Cromio	1000
Mercúrio	17
Molibdênio	50
Níquel	420
Selênio	100
Zinco	2800

Fonte: Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 2006.

Tabela 15 – Níveis máximos admissíveis de agentes patogênicos nos lodos de esgoto destinados a aplicação em área agrícola.

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

ST: Sólidos Totais

NMP: Número Mais Provável

UFF: Unidade Formadora de Foco

UFP: Unidade Formadora de Placa

Fonte: Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 2006.

Lodos de esgotos ou produtos derivados enquadrados como classe A, poderão ser utilizados para quaisquer culturas, já a utilização de lodos de esgotos ou produtos derivados enquadrados como classe B, é restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com a aplicação mecanizada, em sulcos ou covas (CONAMA, 2006).

Silva (2008) afirma que a compostagem aeróbia mostrou ser uma alternativa viável para desinfecção e estabilização de resíduos sólidos, fazendo-se necessário o estudo de diferentes configurações de reatores, para se extrair o máximo de eficiência do processo de compostagem aeróbia e, tornando-se de suma importância o desenvolvimento de novas pesquisas que enfoquem a compostagem com percentuais mais elevados de lodos sanitários em geral.

2.5 APLICAÇÕES DO MÉTODO RESPIROMÉTRICO NA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM ATRAVÉS DE REATORES BIOLÓGICOS.

O método respirométrico ou simplesmente “respirometria” é um procedimento em que as medições da velocidade ou taxa de consumo de

oxigênio, ou a taxa de geração de subprodutos gasosos decorrentes da atividade respiratória de uma biomassa ativa quando as mesmas efetuam a degradação biológica de um substrato orgânico, são efetuadas em meios líquidos ou gasosos (AKUTSU *et.al.*, 2009), e podem ser utilizados dentro dos sistemas fechados ou reatores biológicos.

Segundo SCAGLIA *et al.* (2000), a variação temporal do consumo de oxigênio, pode ser avaliada segundo dois métodos: estático e dinâmico. O método de medição estático de consumo de oxigênio é aquele em que, nos experimentos ou sistemas reais de compostagem, em função da inexistência de mistura contínua (daí o termo estático) e controlada dos resíduos, não é assegurado ou torna-se limitado o processo de transferência, restringindo dessa maneira a difusão e o transporte de oxigênio de forma homogênea à massa total de resíduos.

O método de medição dinâmico consiste na utilização de matriz de resíduo sólido compondo um meio trifásico (interação das fases sólida-líquida-gasosa), associada a processo de mistura contínua, tal como ocorre em sistemas “in vessel”, tipo tambores rotativos.

No caso de processos de compostagem, em que há a predominância de atividades de bactérias aeróbias na degradação dos resíduos, as medidas tanto da taxa de consumo de oxigênio (O_2) quanto da taxa de geração temporal de gás carbônico (CO_2), que no caso é o subproduto gasoso principal, podem ser realizadas na atmosfera de um ambiente controlado, como, por exemplo, do interior de um reator (AKUTSU *et al.*, 2009).

De acordo com o mesmo autor, essa medição sistemática das taxas de consumo de oxigênio e produção de gás carbônico ao longo do processo tem sido denominada respirograma do processo na literatura especializada.

“do respirograma pode-se extrair diversas informações e índices, possibilitando inclusive que as fases (lag, exponencial e endógena) do processo sejam identificadas. A fase lag é aquela associada à partida do processo onde em geral existe o início de crescimento e adaptação das bactérias ao meio e resíduo. A fase exponencial caracteriza-se por uma intensa atividade bacteriana na conversão dos resíduos, em geral associada à intensa liberação de calor em que pode haver

predomínio de bactérias termofílicas. A fase endógena caracteriza-se pela extinção gradativa de alimentos para as bactérias, sendo que as mesmas utilizam-se das próprias reservas energéticas para efetuar a respiração. Na prática, ela caracteriza o final do processo inicial aqui denominado de bioestabilização, após o qual se inicia a fase de humificação do composto.”

Apresenta-se na Figura 17 os resultados gráficos obtidos por Akutsu *et al.* (2009) na condução dos experimentos de laboratório utilizando-se do método respirométrico.

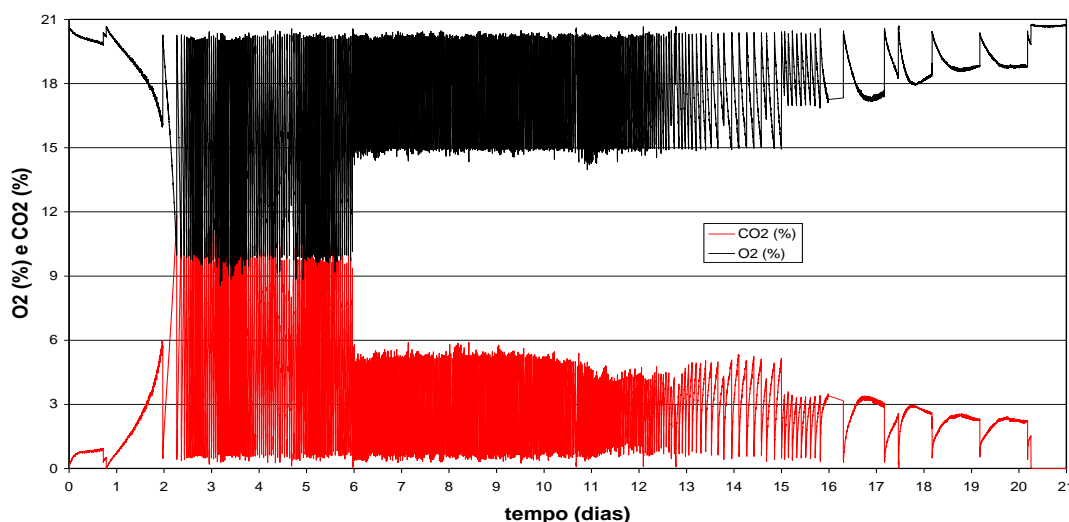


Figura 17 – Respirograma do processo de compostagem.
Fonte: Akutsu *et al.*, 2009.

O respirograma do processo de compostagem apresentado na indica claramente a evolução temporal dos subciclos de consumo de O₂ e respectiva geração de CO₂.

Nota-se no caso que as variações percentuais da taxa de consumo de O₂, se apresentam na faixa de 20% a 15%, e que a respectiva taxa de geração percentual do CO₂, se encontram na faixa de 0% a 5%. O diagrama respirométrico, quando apresentado em escala adequada através de um sistema de interface visual na tela do computador, constitui uma importante ferramenta de acompanhamento operacional do processo. É possível verificar a evolução das taxas de consumo de O₂ e respectiva taxa de geração do CO₂ ao longo do processo de compostagem, evidenciando as suas fases. Pode ser visualizado que o processo de degradação se inicia em torno do dia 2, a partir do qual se acentua

até o dia 3, a partir do qual sofre um decréscimo até o dia 5, quando foi detectada deficiência de umidade no processo.

Efetuada a correção da umidade, o processo sofreu grande aceleração, típico da fase exponencial, atingindo seu pico em torno do dia 7, a partir do qual começou novamente a decair até por volta do dia 10. A partir do dia 10, verificou-se queda acentuada tanto na taxa de consumo de O_2 , quanto na taxa de geração de CO_2 , estendendo-se até por volta do dia 21 em níveis próximos a zero denotando que o resíduo já se encontrava estabilizado (AKUTSU *et al.*, 2009).

Além do aspecto de controle de produção de composto de boa qualidade, o grau de estabilidade desejado num processo de compostagem determinará diversos parâmetros de controle e dimensionamento do sistema, tais como taxa de aeração, e tempo de tratamento requerido para cada tipo de resíduo orgânico, considerando os diversos aspectos qualitativos intrínsecos envolvidos.

GEA *et al.* (2004) apresentam valores e discussão de índices que atualmente vem sendo utilizados para a avaliação e monitoramento da atividade biológica em processo de compostagem, utilizando-se de índices respirométricos. Dentre eles são analisados e citados os seguintes índices:

- Taxa de consumo de oxigênio ($TCO_2 = g O_2/kg MOT \cdot h$),
- Índice de respiração dinâmica ($IRD = g O_2/kg MOT \cdot h$),
- Índice de respiração estática ($IRE = g O_2/kg MOT \cdot h$),
- Quociente respiratório (QR = moles CO_2 gerado/moles de O_2 consumido)

Onde: MOT representa a matéria orgânica total em kg.

A TCO_2 , conforme GEA *et al.* (2004), pode ser referida ou denominada também na literatura como sendo o índice de respiração dinâmica (IRD), quando se trata de avaliar processos de compostagem em sistemas com aeração contínua e dotados de mistura em reatores do tipo tambores rotativos.

Existe em contrapartida outro índice denominado índice de respiração estática (IRE), mais comumente utilizado quando não existe aeração e mistura contínuas (sistema de pilhas estáticas revolvidas, pilhas estáticas aeradas e reatores de fluxo vertical descendente de sólidos, ou reatores tipo “Plug-Flow”).

Teoricamente, IRD e IRE, num ambiente aeróbio, deveriam ser iguais. Porém diferenças significativas têm sido reportadas na literatura especializada

GEA *et al.* (2004). Na prática, tem sido observado que a utilização do índice IRE resulta em subestimação da atividade biológica, atribuída principalmente ao limite de transferência de oxigênio em amostras sólidas estáticas.

O artigo de KOVACS *et al.* (2007), apresenta a análise do adimensional denominado quociente de respiração (QR), que é a relação molar entre o CO₂ produzido e O₂ consumido durante o processo (moles de CO₂ produzido dividido por moles de O₂ consumido).

O coeficiente respiratório QR, conforme apresentado, trata-se de um adimensional, que na verdade reflete uma relação estequiométrica dinâmica resultante do balanço mássico entre a quantidade de CO₂ gerada e do O₂ consumido no processo.

De acordo com GEA *et al.* (2004), ATKINSON e MAVITUNA (1983), relatam que o valor de QR, para processos aeróbios, apresentam valores próximos à unidade, embora se saiba que o índice QR dependa da composição bioquímica do substrato sólido em decomposição. Ainda segundo GEA *et al.* (2004), o índice QR ainda é pouco utilizado na avaliação e controle de processos de compostagem.

Segundo UBAY *et al.* (2007), o valor do índice QR, pode ser considerado um parâmetro relativamente permanente para um dado tipo de resíduo, mesmo que este resíduo seja submetido a diferentes taxas de aeração ou umidade ao longo do processo.

GEA *et al.* (2004), relata valores superiores à unidade para o índice QR, para resíduos contendo altos teores de gorduras, ou na compostagem de resíduos de mesmo tipo submetidos a diferentes faixas de temperatura.

Em experimento conduzido com digestão aeróbia de lodo de esgoto a 55°C, KOVACS *et al.* (2007) observaram a existência de duas faixas de valores de QR, quais sejam: para a fase endogênica, valores de QR entre 0,8 a 1,0 mol CO₂ / mol O₂, e na fase de atividade biológica mais intensa, valores de QR entre 1,2 a 1,25 mol CO₂ / mol O₂.

ADANI *et al.* (2004) apresentam o estudo do índice IRD (índice de respiração dinâmica) como referencial para classificar ou verificar o grau de estabilidade biológica dos resíduos sólidos obtida em sistemas de compostagem. Na verdade, conforme se pode verificar na literatura, e já citado anteriormente, o

índice IRD a princípio pode ser considerado como sinônimo do índice TCO₂ (taxa de consumo de oxigênio).

ADANI *et al.*, (2004) e LASARID (2006), consideram que o grau de estabilidade biológica determina o nível ou estágio em que uma matéria orgânica facilmente biodegradável foi decomposta biologicamente. Tal nível identifica o ponto alcançado no processo de biodegradação, que por sua vez pode ser usado para classificar e graduar o resíduo (composto orgânico resultante como subproduto do processo) segundo uma escala de valores.

Dessa maneira, o valor de um composto pode ser associado diretamente ao grau de estabilidade alcançado, uma vez que evitará, quando disposto no solo, malefícios tais como potencial de geração residual de odores, gases, geração de calor e alteração do pH além de efeito de fitotoxicidade às plantas.

Além do aspecto de controle de produção de composto de qualidade, o grau de estabilidade desejado num processo de compostagem determinará e definirá diversos parâmetros de controle e dimensionamento do sistema, tais como taxa de aeração, e tempo de tratamento requerido para cada tipo de resíduo orgânico, considerando os diversos aspectos qualitativos intrínsecos envolvidos.

ADANI *et al.* (2004) utilizaram 16 tipos de resíduos sólidos orgânicos, de diferentes origens, composições e graus de estabilização biológica para a condução dos experimentos e proposição de valores limites para o índice IRD como indicador de estabilidade biológica do resíduo.

Após inúmeras análises, avaliações matemáticas e estatísticas e testes de validação e consistência do modelo proposto, concluíram que o IRD pode ser utilizado como parâmetro para indicar o grau de bioestabilização de um resíduo. Assim, um índice IRD de 1.000 mg O₂ / kg SV.hora, segundo os autores é indicativo de um composto medianamente bioestabilizado, enquanto um valor da ordem de 500 mg O₂ / kg SV.hora, pode representar um composto com elevado grau de bioestabilização.

Ainda segundo ADANI *et al.* (2004), muitos métodos analíticos têm sido propostos ao longo dos últimos anos para determinação do grau de estabilização de um composto. São citados, por exemplo, diversos pesquisadores e órgãos tais

como, CHANYASAK e KUBOTA, 1981; IANOTI *et al.*, 1992; ADANI *et al.*, 1995.; AVNIMELECH *et al.*, 1996, UNITED STATES COMPOSTING COUNCIL, 1997.

Dentre estes, os mesmos autores relatam que os métodos voltados à determinação da atividade respirométrica dos microrganismos são merecedores de maior atenção, citando, por exemplo, NAKAGAWA *et al.*, 1995; e WILLSON e DALMAT, 1986; que avaliam a taxa de biodegradação associada ao acompanhamento da taxa de geração de CO₂ (TGCO₂) e, IANNOTTI *et al.*, 1992; PALETSKI e YOUNG, 1995, e LASARIDI, 1988, que por sua vez avaliam a taxa de biodegradação através da taxa de consumo de O₂ (TCO₂).

Citam ainda que, para objetivo de acompanhamento respirométrico de processos de compostagem, o método que se utiliza da análise da taxa de consumo de O₂ (TCO₂), tem sido preferida pelos pesquisadores da área.

Cabe lembrar que a TGCO₂ (taxa de geração de gás carbônico) tem sido utilizada muitas vezes pelos pesquisadores pelo fato da medição do CO₂ em geral apresentar custos menores e possibilitar análises químicas indiretas mais simplificadas. Um método de análise indireta e simplificada consiste na utilização de solução de KOH (0,25M), para adsorção do CO₂, presente no efluente gasoso, utilizando-se de pequena amostra de resíduo sólido imerso em meio líquido agitado, com todas as condições controladas por período de incubação de 24 horas, temperatura de 25°C em meio com nutrientes, oxigênio e solução tamponada.

O artigo de KALAMDHAD *et al.* (2007) apresenta este método e outro que se utiliza da correlação da concentração de CO₂ captada e adsorvida em meio líquido com a condutividade dada em mS/cm, após ajuste de curva de calibração e correlação entre estes parâmetros.

ADANI *et al.* (2004) relatam que segundo SCAGLIA *et al.* (2000) a variação temporal do consumo de oxigênio, pode ser avaliada segundo dois métodos: estático e dinâmico.

O método de medição estático de consumo de oxigênio é aquele em que, nos experimentos ou sistemas reais de compostagem, em função da inexistência de mistura contínua (daí o termo estático) e controlada dos resíduos, não é assegurado ou torna-se limitado o processos de transferência, limitando dessa maneira a difusão e transporte de oxigênio de forma homogênea à massa total de resíduos.

KALAMDHAD *et al.* (2007) apresentam valores referenciais para TCO_2 e TGCO_2 de início e final de processo de compostagem. Para obtenção desses valores conduziram experimentos com 4 tipos de resíduos, apresentando cada qual uma relação inicial carbono: nitrogênio (C:N) distinta. Utilizaram como reator um tipo de tambor rotativo manual, onde faziam cerca de 4 revoluções diárias para efetuar a mistura dos resíduos pré-triturados e preparados. O oxigênio era suprido por meio de duas aberturas situadas nas laterais do tambor, e segundo os autores a oxigenação era garantida nas ocasiões das revoluções do tambor.

Cabe salientar que as medidas das concentrações de O_2 e CO_2 eram efetuadas pelo método indireto em meio líquido. Pequenas parcelas de resíduos eram amostradas e retiradas do reator (a cada 2 dias), prosseguindo-se ao longo do processo, e submetidas ao teste de evolução temporal do consumo de O_2 e respectiva geração de CO_2 .

KALAMDHAD *et al.* (2007), citam que institutos como a California Compost Quality Council (CCQC-US standard-2001) e a National Standard of Canada (BNQ 0413-200), consideram que valores de índices TCO_2 final = 0,16 $\text{mg O}_2/\text{g SV.hora}$ = 3,6 $\text{mg O}_2/\text{g SV.dia}$, indicam estágio de bioestabilização do composto. Os pesquisadores concluem que todos os tipos de resíduos por eles estudados podem ser considerados bioestabilizados segundo esses índices de referências.

Outro índice de interesse prático para fins de dimensionamento de sistemas de compostagem se refere à taxa de aeração média representada em termos de consumo volumétrico de oxigênio ou ar por unidade de massa de resíduos ao longo do tempo.

Logicamente que tais valores devem ser encarados apenas como índices referenciais pois mesmo considerando que todos os resíduos são de origem domiciliar, as características qualitativas podem variar de uma localidade para outra, além também das condições ambientais e de contorno em que se deram o processo de compostagem.

De acordo com KIEHL, 1998, um composto cru (resíduo sólido doméstico), apresenta valor inicial de DQO, igual ou maior a 900.000 mg/kg , enquanto este valor decresce para 700.000 mg/kg para um composto já bioestabilizado, assumindo valores menores que 300.000 mg/kg quando o mesmo é considerado um composto curado.

Para Catunda *et al.* (1998), a medição da taxa de respiração ou taxa de consumo de oxigênio (TCO_2) é de grande importância para o controle e monitoração de sistemas de lodo ativado. A TCO_2 provê informações sobre a qualidade do afluente e do lodo ativado e pode indicar também a presença de elementos tóxicos no afluente que possa comprometer o desempenho do sistema.

Resultados experimentais qualitativos, obtidos com um sistema de lodo ativado em escala reduzida através de um sistema de aquisição de dados a microcontrolador conectado a um PC, e resultados de simulações, são apresentados e comparados através de um protótipo de um sistema de lodo ativado foi construído no laboratório para realização de testes experimentais conforme esquema apresentado na Figura 18.

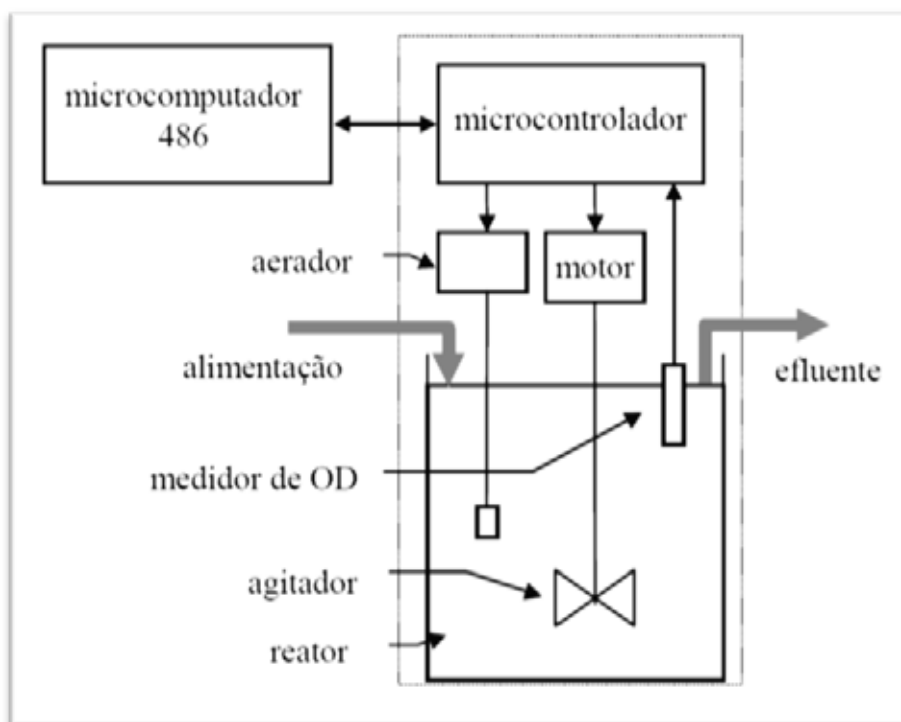


Figura 18 – Protótipo de um sistema de tratamento de lodo ativado com sistema de aquisição de dados.

Fonte: Catunda *et al.*, 1998.

O protótipo é constituído de um reator de 6 litros, um agitador, um aerador e um tanque de alimentação. Usou-se um microcontrolador para aquisição de dados, análise e controle dos dispositivos externos. Um executivo em tempo real foi implementado para esse microcontrolador com a finalidade de controlar e sincronizar as diversas tarefas do sistema, tais como aquisição

periódica de dados e comunicação com um microcomputador, no qual os dados são apresentados em forma gráfica e armazenados (CATUNDA *et al.*, 1998).

Em pesquisa abordando os métodos respirométricos voltados ao controle biológico em geral, com técnicas desenvolvidas para a aplicação em tratamentos de águas residuárias, principalmente no controle de processos por lodos ativados e recentes desenvolvimentos do método para a aplicação em sistemas de tratamento por fitodepuração (*Wetlands*), Andreottola *et al.* (2005), descreve novos métodos que foram desenvolvidos no Laboratório di Ingegneria Sanitaria-Ambientale (LISA) da *Università di Trento*, Itália, como observa-se na Figura 19.



Figura 19 – Respirômetro AIR NL desenvolvido pelo LISA-
Università di Trento.

Fonte: Andreottola *et al.*, (2005).

Estes métodos baseiam-se em duas metodologias de laboratório para a aplicação da respirometria em fitoderuração: o primeiro caracteriza a atividade bacteriológica do solo com a finalidade de medir a concentração de O_2 na fase gasosa, o outro avalia a concentração de O_2 na fase aquosa.

Para Andreotolla *et al.* (2005), a TCO_2 representa um dos principais componentes a ser quantificado no procedimento de projeto e/ou gestão do

tratamento de águas residuárias, uma vez que este depende da quantidade de oxigênio que se tornará disponível para o processo biológico no solo. É importante conhecer se o processo de biodegradabilidade no solo se realiza em condições aeróbias, apresentando assim suficiente O_2 em fase aquosa, ou em condições anaeróbias, após o oxigênio ser completamente exaurido.

Fernandes *et al.* (2000), também apresenta pesquisa utilizando-se de tecnologia básica desenvolvida para um reator piloto, de forma cilíndrica, de 80cm de comprimento e 70cm de diâmetro, hermeticamente fechado e dotado de equipamentos periféricos que permitem o total controle do processo de aeração durante a biodegradação aeróbia de substratos orgânicos no estado sólido.

O reator piloto composto por um cilindro que é montado sobre duas hastes de metal, com plataformas, que fixam o reator e permitem que ele bascule, podendo ficar na posição inclinada para cima (carregamento), na horizontal (posição de serviço) e inclinada para baixo (descarga), como observa-se na Figura 20.

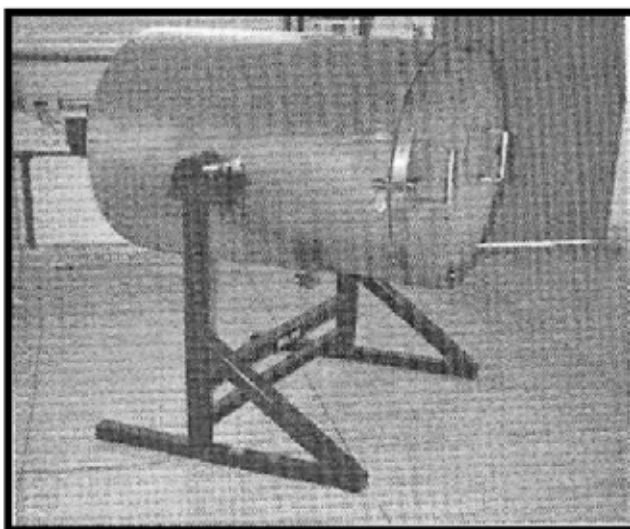


Figura 20 – Vista parcial do reator.
Fonte: Fernandes *et.al.*, 2000.

Na parte inferior interna estão fixados os difusores de ar e a sonda para medida da temperatura. Na parte frontal, uma tampa circular, dotada de borracha, fecha o reator hermeticamente. O controle da aeração é feito de forma automatizada através de um Controlador Lógico Programável (PLC), ligado a um micro computador, que armazena on line os dados de evolução da temperatura,

vazão de ar, teor de O_2 nos gases de saída do sistema e incrementos de vazão de ar. Destaca-se ainda no projeto piloto os equipamentos:

a) O medidor de temperatura utilizado é uma sonda com sensor Pt 100 Din, acompanhada de um processador modelo HT 290, da Hitec®;

b) O medidor de teor de Oxigênio (Oxímetro) proporciona a medida do teor de O_2 no ar através de uma célula bioquímica. Seu modelo é 100F da Califórnia Analytical (Simatic);

c) O medidor de vazão de ar, tipo Vortex integral, modelo YF101, da Yokogawa.

A Figura 21 apresenta um dos resultados obtidos através deste projeto, nela são representados o consumo de O_2 por quilograma de massa seca e da temperatura.

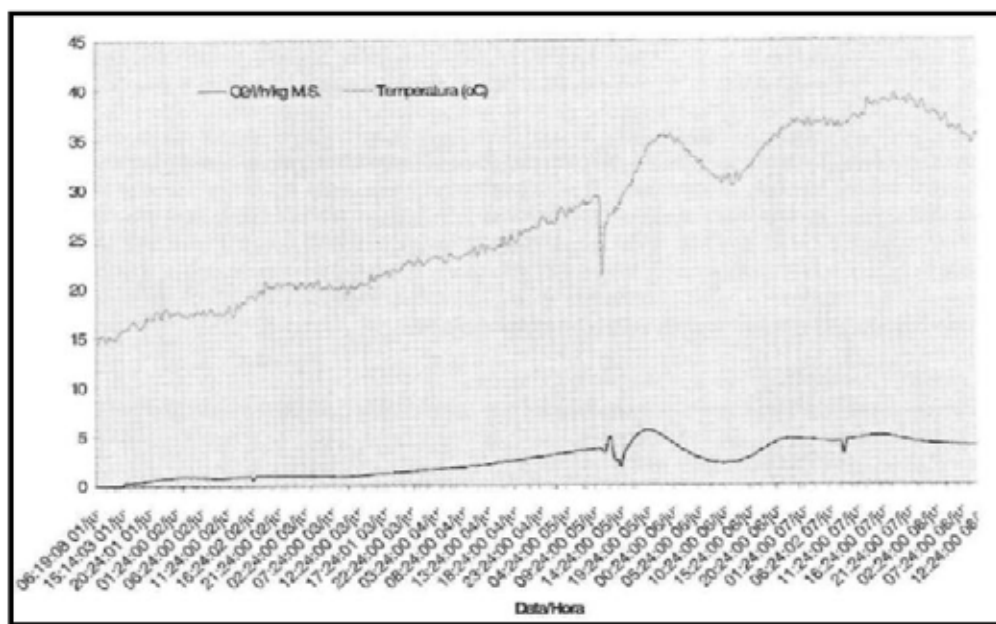


Figura 21 – Evolução da temperatura consumo de O_2 na saída do reator para uma mistura de lodo de esgoto e serragem. O eixo da temperatura também indica o consumo de O_2 em l/h/Kg de matéria seca.

Fonte: Fernandes *et al.*, 2000.

O trabalho de pesquisa é apresentado, como exemplo, os dados de monitoramento de um experimento de compostagem de lodo de esgoto e serragem de madeira. O objetivo do piloto é permitir o estudo da biodegradabilidade de substratos orgânicos e gerar parâmetros de projeto para usinas em escala real.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado e fundamentado, inicialmente, através de pesquisa bibliográfica interdisciplinar, identificando-se teorias de autores que tratam dos diversos assuntos relacionados à temática escolhida, utilizando-se da análise de artigos de revistas, capítulos de livros, teses e dissertações, publicações em meios eletrônicos, entre outros.

Quanto a sua natureza, a metodologia utilizada foi a pesquisa aplicada experimental, sendo seus desenvolvimentos conduzidos em uma instalação piloto de compostagem montada nas dependências do laboratório de resíduos sólidos da Faculdade de Engenharia da UNESP – Câmpus de Bauru.

Quanto a abordagem do problema, a pesquisa é quantitativa, pela realização de um processo de investigação de forma a quantificar os dados coletados, em ciclos completos de processos de compostagem de matéria orgânica e também qualitativa, verificando a confiabilidade e precisão dos dados obtidos e sua utilização como parâmetros de análise e intervenção no processo de compostagem e aplicações em projetos para processamento em larga escala.

Os experimentos para avaliação do método respirométrico foram conduzidos nas instalações do projeto piloto de compostagem nas dependências do laboratório de resíduos sólidos da Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, o qual passou por reformulações, como a troca do tambor rotativo, além de manutenções que foram necessárias nos demais equipamentos, devido ao período em que ficou inativo.

Os equipamentos utilizados foram: por um reator rotativo, acoplado no interior de uma caixa fechada com vidros, para minimizar a variação de temperatura durante o processo e seu odor característico, e ainda, permitir a visualização do mesmo; um analisador de gases e um microcomputador para aquisição dos dados e o controle do reator rotativo, sendo que cada uma destas etapas são interligadas e dependentes.

Na Figura 22 observa-se a estrutura geral dos equipamentos do processo de análise experimental de compostagem de resíduos sólidos, pelo método respirométrico, e que foram utilizados na presente pesquisa.



Figura 22 - Estrutura do processo de experimentos de compostagem formada basicamente por: tambor rotativo, analisador de gases e aquisição de dados.

A Figura 23 apresenta vista parcial do reator rotativo, fabricado em aço inox, o qual possui um volume útil de 90,135 litros, tem um eixo tubular que serve como suporte para transmissão da rotação e ao mesmo tempo possui entrada e saída dos gases.



Figura 23 – Tambor rotativo no interior da caixa termoreguladora.

Conta ainda com dois conjuntos de sopradores (bombas de ar), um destinado à alimentação do reator e outro destinado à recirculação, apresenta também, em uma de suas paredes, uma janela removível para manuseio das amostras.

As Figuras de 24 a 27 detalham os equipamentos acoplados a esta instalação, um motor responsável para rotação do reator, entrada de ar, além de detalhes do interior do reator, onde observa-se as entradas e saídas de ar.

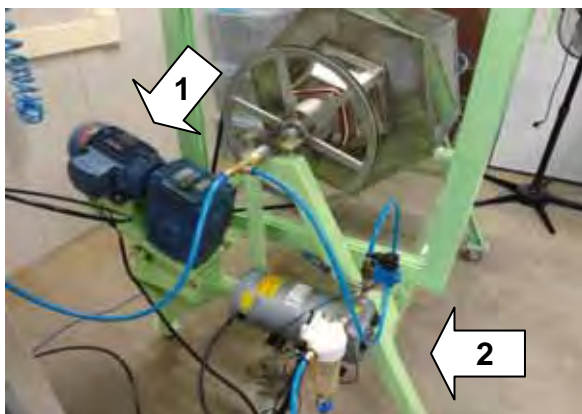


Figura 24 – (1) Motor para rotação do reator e (2) bomba de purga.



Figura 25 – (1) Entrada de ar e respectivo filtro (2) que abastece o reator.

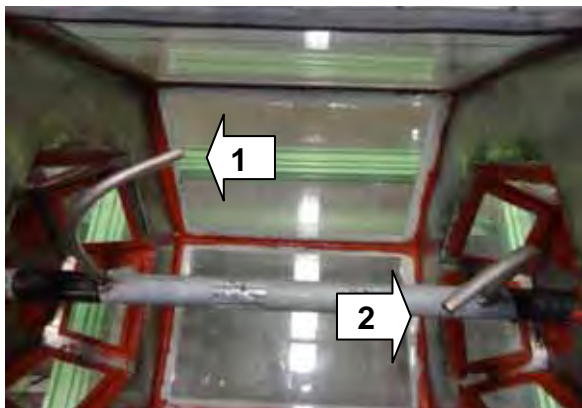


Figura 26 – Interior do tambor rotativo, (1) entrada de ar e (2) saída de ar para o analisador de gás.

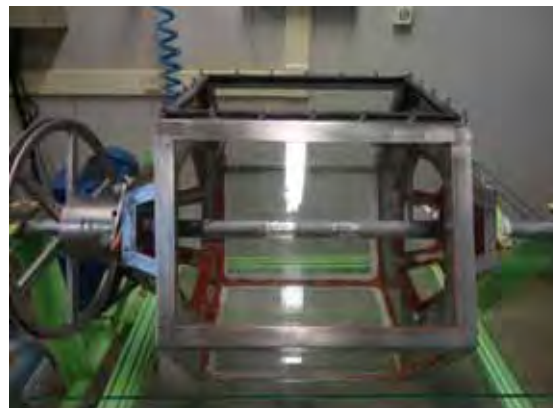


Figura 27 – Exterior do tambor rotativo.

Conectados à linha de recirculação, a montagem piloto conta com um sistema completo de coleta e análises automatizada dos gases O_2 e CO_2 . O aparelho medidor apresenta-se na Figura 28, um dispositivo modelo S710, fabricado pela empresa Sick Maihak, apresenta em seu *display* (Figura 30) e registra os valores de concentração desses gases em termos percentuais ($\%O_2$ e $\%CO_2$).

A apresentação de opções de coleta e registro de dados pode ocorrer em intervalos de 1s a 600s. Nos experimentos desenvolvidos, o intervalo de coleta de dados do aparelho foi ajustado para 60s. Nessa configuração, o aparelho registra, por dia, um total de 1.440 dados.



Figura 28 – Analisador de gases, modelo S710, fabricado pela empresa Sick Maihak.



Figura 29 – Detalhe do display do analisador de gases, modelo S710, fabricado pela empresa Sick Maihak.

Este analisador de gases possui uma interface de comunicação serial, que envia os dados medidos consecutivamente, em períodos específicos de tempo, a um computador que recebe de forma “*on line*” (Figura 30).



Figura 30 – Aquisição de dados pelo computador.

Após o conhecimento detalhado do padrão de dados gerados pelo analisador de gases, foi desenvolvido um software pelo Prof. Dr. João E. M. Perea Martins, do Departamento de Computação da Faculdade de Ciências da Unesp Bauru, que recebe continuamente dados do analisador de gases, analisa estes dados e separa as informações relativas aos níveis de O₂ e CO₂ (Figura 31).

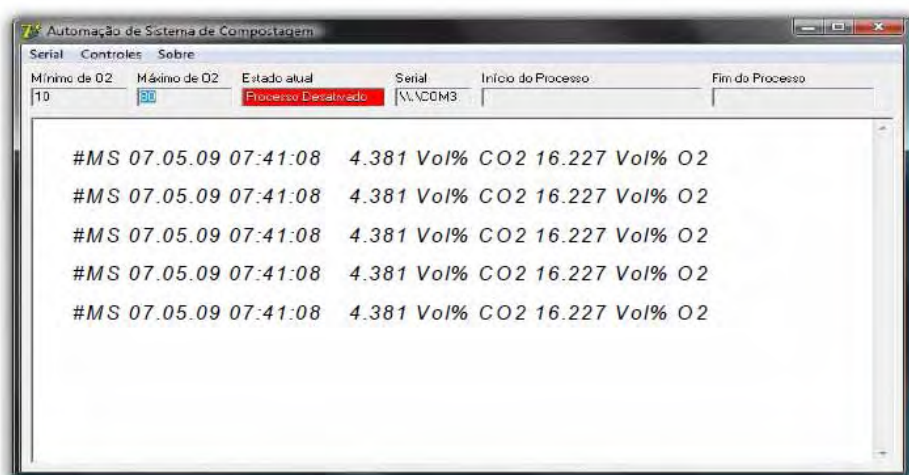


Figura 31 – Detalhamento da tela principal do software desenvolvido, onde existem as opções de controle a uma tela que mostra em tempo real as variações de gases do processo de compostagem.

Fonte: Martins *et al.*, 2009.

Para a automação de experimentos de processos de compostagem, o software permite que o usuário escolha três modos distintos de operação, que são: 1) Ativar Controle Direto (contínuo); 2) Ativar Controle por Tempo e 3) Ativar Controle por Data (MARTINS *et al.*, 2009).

De acordo com os níveis percentuais de concentrações dos gases, o software controla um mecanismo de hardware que permite injetar uma concentração desejada e pré-estabelecida de ar no interior do reator, para o consumo das bactérias envolvidas na degradação dos resíduos. Nesta pesquisa trabalhou-se com níveis de O₂ entre 5% e 20%.

A Figura 32 mostra a string de dados que é fornecida ao computador, em cada envio de dados, ou seja, nos experimentos estes dados foram programados para serem enviados de minuto em minuto.



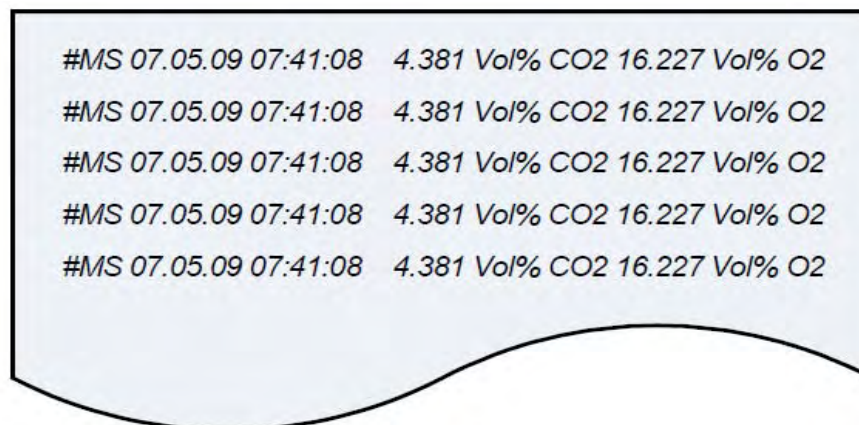
```
#MS 07.02.12 15:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
```

Figura 32 – Sequência de dados do analisador de gases em caracteres alfanumérico armazenados no computador.

Onde:

- a) #MS: indicador (header) de resultados da análise do S710 em operação;
- b) 07.02.12: data do envio dos dados;
- c) 15:41:08: hora do envio dos dados;
- d) 4.381 Vol% CO₂: medida de CO₂ em Vol%;
- e) 16.227 Vol% O₂: medida do O₂.

Observa-se através da Figura 33 que a estrutura dos dados recebidos tem um formato de texto (TXT), que pode ser importado diretamente por outros softwares, como editores de textos, planilhas eletrônicas ou softwares de processamento matemático e, conseqüentemente, construção e análise por meio de gráficos (MARTINS *et al.*, 2009).



```
#MS 07.05.09 07:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
#MS 07.05.09 07:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
#MS 07.05.09 07:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
#MS 07.05.09 07:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
#MS 07.05.09 07:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
```

Figura 33 – Exemplo do relatório de dados gerado pelo software, onde o arquivo pode ser importado por editores de textos e planilhas.

Fonte: Martins et al., 2009.

Utilizou-se o software livre TeamViewer 7, o qual permite a conexão de rede, de maneira que os computadores possam compartilhar os dados pela Internet, para acompanhamento a distância do processo, podendo inclusive ativar ou desativar o mesmo.

Através deste aplicativo, ou de outros disponíveis, pode-se observar se o processo não sofreu interrupções, como por exemplo, em caso de queda de fornecimento de energia elétrica, em períodos em não há presença física no acompanhamento do processo, tais como, os períodos noturnos e finais de semana.

3.1 RESÍDUOS UTILIZADOS PARA CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA PRIMEIRA BATELADA, UTILIZADA EM ENSAIOS PRELIMINARES

Os equipamentos utilizados no projeto estiveram inoperantes por um cerca de dois anos, portanto, fez-se necessário uma aferição do equipamento através de ensaios preliminares de processos de compostagem. Nesta batelada, buscou-se também trabalhar com resíduos orgânicos que estão dispostos em grande quantidade na realidade do Brasil, e que ao mesmo tempo, tivessem participado dos experimentos iniciais do método, proporcionando uma análise comparativa de dados.

Desta forma optou-se por trabalhar, como resíduo principal, com bagaço da cana-de-açúcar, encontrado em abundancia no País em função da produção, em larga escala, de etanol e açúcar, sendo destinados, em sua maior parte, na produção de energia elétrica, através da incineração, além de outros materiais com as mesmas características físicas/químicas e quantidade de massa(kg) que os materiais utilizados em experimentos realizados no ano de 2009, para que fosse avaliada a aferição do equipamento, considerando que houve a substituição do reator empregado no processo de compostagem. A Tabela 16 descreve os materiais que foram utilizados no processo experimental de compostagem e que podem ser observados nas Figuras 34 a 37.



Figura 34 – Bagaço de cana-de-açúcar.



Figura 35 – Germes de trigo.



Figura 36 – Polpa cítrica.



Figura 37 – Ração de potro.

Através da Figura 38 observa-se os materiais utilizados no processo, bagaço de cana-de-açúcar; polpa cítrica, ração de potro e germes de trigo, além de água. Os materiais foram pesados através de balança eletrônica e os valores encontrados estão demonstrados na Tabela 16.

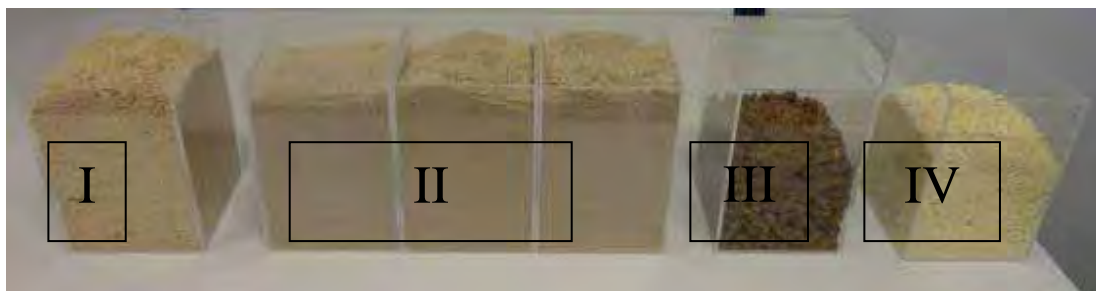


Figura 38 – Materiais utilizados no processo de compostagem: I) Polpa cítrica; II) Bagaço de cana-de-açúcar; III) Ração de potro; IV) Germes de trigo.

Tabela 16 – Materiais utilizados no processo nos ensaios preliminares.

Material	Massa (kg)
Bagaço de cana-de-açúcar	1
Polpa cítrica	1
Ração de potro	1
Germes de trigo	1
Água	1,2
Total	5,2

3.2 RESÍDUOS UTILIZADOS PARA CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA SEGUNDA BATELADA, CO-COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO COM PODA DE GRAMA

O lodo de esgoto utilizado nesta segunda batelada de experimentos, tem origem na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) “Manoel Ferreira Leão Neto” do Departamento Autônomo de Águas e Esgotos (DAAE) do município de Araraquara, estado de São Paulo (Figura 39).

Atualmente, o volume de esgoto tratado pela ETE-Araraquara é da ordem de 1.210.000 m³/mês, caracterizando um consumo de energia elétrica da ordem de 570.000 kwh/mês (referente ao mês de abril de 2002), gerando um gasto de aproximadamente R\$ 70.000,00, representando um custo de R\$ 0,06 por m³ de esgoto tratado.



Figura 39 – Estação de Tratamento de Esgotos “Manoel Ferreira Leão Neto” do Departamento Autônomo de Águas e Esgotos (DAAE) Araraquara-SP.

Fonte: <http://www.daaeararaquara.com.br>

A construção da ETE-Araraquara teve início em dezembro de 1998 e em outubro de 1999 foram iniciadas as operações para o tratamento dos esgotos domésticos da cidade. Ela foi projetada para tratar 100% do esgoto coletado na cidade. A ETE opera por meio do sistema aeróbico e é constituída de lagoas aeradas seguidas de lagoas de sedimentação. Para a condução dos esgotos até a estação foram construídos 14,9 quilômetros de interceptores. A ETE encontra-se afastada da área urbana do município, na rodovia SP 255, às margens do Ribeirão das Cruzes. A estação faz o tratamento médio de 45.000m³/dia de esgoto.

Foram previstos três módulos de tratamento, cada um formado por uma lagoa aerada, uma lagoa de sedimentação e uma lagoa de lodo, passando o tratamento dos esgotos por diversas fases. Ao seu final o efluente (esgoto tratado) das lagoas de sedimentação é enviado para o Ribeirão das Cruzes e o lodo sedimentado no fundo das lagoas deverá ser estabilizado por processos anaeróbios e removido periodicamente. As Tabela 17 e 18 apresentam análise físico-química do lodo de esgoto gerado na ETE-Araraquara, segundo normas técnicas específicas:

Tabela 17 – Valores de metais encontrados nas amostras do afluente e do lodo da ETE Araraquara em 2008.

Atributos	Afluente	Lodo
Zinco (mg/L Zn)	9,00	150,00
Chumbo (mg/L Pb)	< 0,01	< 0,02
Cádmio (mg/L Cd)	< 0,0006	< 0,0006
Níquel (mg/L Ni)	< 0,008	< 0,008
Ferro (mg/L Fe)	77,99	2800,00
Manganês (mg/L Mn)	1,98	21,02
Cobre (mg/L Cu)	-	31,00
Cromo (mg/L Cr)	2,88	42,00
Cálcio (mg/L Ca)	-	99.000,00
Magnésio (mg/L Mg)	-	2.200,00
Cobalto (mg/L Co)	1,44	< 0,001
Lítio (mg/L Li)	-	-
Sódio (mg/L Na)	-	14.000,00
Potássio (mg/L K)	-	3.000,00
Alumínio (mg/L Al)	-	< 0,01

Fonte: <http://www.daaearaquara.com.br>

Tabela 18 – Valores médios dos atributos analisados no mês de março de 2009 para o afluente e efluente da ETE Araraquara.

Atributos	Afluente	Efluente
DQO (mg/LO ₂)	544	269
DBO (mg/LO ₂)	218	65
pH	7	8
Condutividade (us/cm)	707	691
Sólidos Totais (mg/L)	651	458
Sólidos Fixos (mg/L)	306	278
Sólidos Voláteis (mg/L)	354	180
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	162	100
Sólidos Suspensos Fixos (mg/L)	25	16
Sólidos Suspensos Voláteis (mg/L)	138	84
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	489	358
Sólidos Dissolvidos Fixos (mg/L)	281	262
Sólidos Dissolvidos Voláteis (mg/L)	207	96
Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	4	0
Turbidez (NTU)	-	239

Cor (mg/L Pt-Co)	-	622
Cloreto (mg/L Cl)	56	53
Nitrogênio Amoniacal (mg/L N)	21,90	25,60
Nitrato (mg/L N)	1,10	1,40
Nitrito (mg/L N)	0,05	0,10
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L N)	40,30	39,50
Fósforo Total (mg/L P)	6,70	6,22
Substâncias Solúveis em Hexano (mg/L)	54	16
Coliformes Totais (UFC/100mL)	$9,4 \times 10^7$	$1,9 \times 10^6$
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100mL)	$5,4 \times 10^6$	$7,8 \times 10^4$
Temperatura da Amostra (oC)	20	20
Temperatura Ambiente (°C)	31	31

Fonte: <http://www.daaearaquara.com.br>.

Verifica-se pela Tabela 19 que em relação aos metais pesados, considerando a Resolução 375/2006 que regulamenta a utilização do lodo de esgoto em solos agrícolas, o lodo da ETE de Araraquara encontra-se dentro das concentrações admissíveis.

Tabela 19 – Concentrações máximas admissíveis de substâncias inorgânicas em lodos de esgoto destinados à utilização agrícola através da Resolução CONAMA nº 375/2006 e os valores de metais encontrados nas amostras do lodo da ETE Araraquara.

Substâncias Inorgânicas	Concentração Máxima permitida (mg/kg, base seca)	Valores encontrados no Lodo de Esgoto da ETE - Araraquara
Arsênio	41	-
Bário	1300	-
Cádmio	39	< 0,0006
Chumbo	300	< 0,02
Cobre	1500	31,00
Cromio	1000	42,00
Mercúrio	17	-
Molibdênio	50	-
Níquel	420	< 0,008
Selênio	100	-
Zinco	2800	150,00

Fonte: Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 2006; <http://www.daaearaquara.com.br>.

A ETE-Araraquara, permite uma remoção de DBO e DQO acima de 80%, atendendo aos limites de lançamento estabelecidos no Decreto Estadual 8468, de 8 de setembro de 1976 do Estado de São Paulo, impondo como limite para DBO 5 dias, 20°C no máximo 60 mg/L ou que o sistema de tratamento de águas residuárias reduza a carga poluidora em termos de DBO 5 dias, 20°C do despejo em no mínimo 80%.

Os demais parâmetros pesquisados, atendem os padrões de lançamento segundo as condições estabelecidas pela Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 29 de agosto de 2006.

Após o recebimento do lodo de esgoto, ele passou por um processo de desidratação ao ar livre, pois apresentava excesso de umidade, como pode-se observar pela Figura 40. Na Figura 41 observa-se o lodo de esgoto já desidratado, na Figura 42 no estado sólido, e a na Figura 43, após passar por um processo de trituração.



Figura 40 – Lodo de esgoto recebido da ETE-Araraquara com alto grau de umidade.



Figura 41 – Lodo de esgoto em processo de desidratação ao ar livre.



Figura 42 – Lodo de esgoto desidratado.



Figura 43 – Lodo de esgoto triturado.

Após ser triturado manualmente com o auxílio de uma barra de ferro, efetuou-se a análise da composição granulometria apresentada pelo lodo de esgoto, realizada de acordo com os procedimentos da normatização ABNT/NBR NM 248:2003, Agregados: Determinação da composição granulométrica, através passagem por um conjunto de peneiras e obteve-se como resultados a granulometria apresentada nas Figuras 44 a 47.



Figura 44 – Fração retida na peneira de 4,8mm.



Figura 45 – Fração que passa na peneira de 4,8mm e retida na peneira de 2,4mm.



Figura 46 – Fração que passa na peneira de 2,4mm e retida na peneira de 1,2mm.



Figura 47 – Fração que passa na peneira de 1,2mm, e retida no fundo do conjunto.

Os valores obtidos (em gramas) em cada fase de peneiramento, utilizando-se uma mostra de 200g, são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Granulometria de uma mostra de 200g, do lodo de esgoto utilizado na 1ª batelada.

Peneira utilizada		Material retido	Porcentagens	
nº	(mm)	(g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)
Fundo	Fundo	105,36	53	100
16	1,2	63,03	31	47
8	2,4	27,91	14	16
4	4,8	3,7	2	2

Estes valores após serem plotados apresentaram-se no Gráfico 5 com a curva de distribuição granulométrica, sendo analisados com os valores retidos e acumulados.

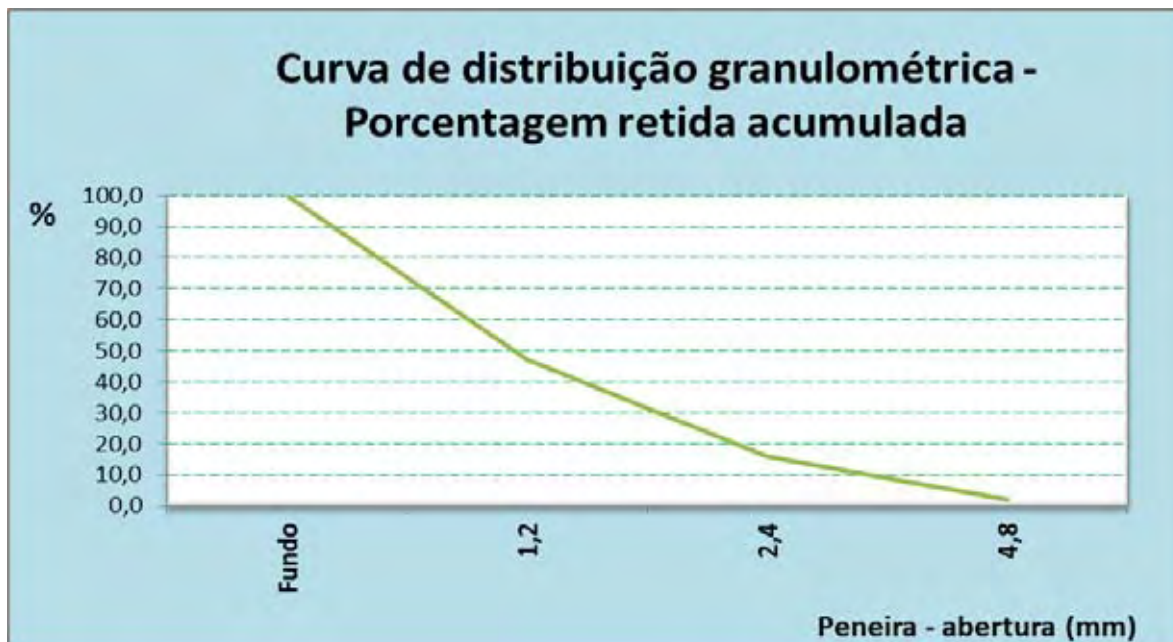


Gráfico 5 – Curva de distribuição granulométrica, retida acumulada.

Observa-se através da Figura 48 algumas substâncias encontradas no lodo de esgoto, através do processo de peneiramento, que não foram homogêneas ao restante do volume, como por exemplo: sementes, pedras, plásticos, vidros, palitos de fósforo, e que por sua vez, seriam de difícil ou impossível processo de compostagem.



Figura 48 – Resíduos encontrados no lodo de esgoto: sementes, palitos de fósforo, vidros, plásticos, pedras.

Optou-se por fazer um processo de compostagem denominado co-compostagem, combinando o lodo com resíduo de podas de grama que foram trituradas, conferindo uma estrutura porosa à mistura a ser compostada, para evitar problemas relativos à aeração devido à falta de espaços intersticiais entre as partículas, além de adequada relação carbono/nitrogênio.

Verifica-se nas Figuras 49 e 50, assim como inúmeros outros resíduos de poda, uma grande quantidade de poda de grama, originada principalmente de limpeza pública, que poderia ter uma destinação mais adequada, como por exemplo, através dos processos de compostagem.



Figura 49 – Serviços de poda da Prefeitura Municipal de Bauru.



Figura 50 – Volume de resíduos resultantes dos serviços de poda.

A poda de grama foi triturada, conforme observa-se nas Figuras 51 e 52, para obter-se uma granulometria mais adequada para a mistura.



Figura 51 – Poda de grama *in natura*.



Figura 52 – Poda de grama triturada.

A mistura depositada no interior do reator, pode ser observada através da Figura 53, e sua massa foram distribuídas conforme descrito na Tabela 21.



Figura 53 – Mistura dos resíduos de lodo de esgoto e de poda de grama, no interior do reator, para o início do processo de compostagem.

Tabela 21 - Materiais utilizados na segunda batelada.

Material	Massa (kg)
Lodo de esgoto	2,318
Poda de grama	4,636
Total	6,954

Através da Figura 54 pode-se verificar uma visão total do projeto, no início do processo da segunda batelada de compostagem.



Figura 54 – Sistema de co-compostagem de lodo de esgoto e poda de grama, analisados pelo método respirométrico.

3.3 RESÍDUOS UTILIZADOS PARA CONDUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA TERCEIRA BATELADA, CO-COMPOSTAGEM DE LODO DE ESGOTO COM BAGAÇO DE CANA E BORRA DE CAFÉ.

Na terceira batelada experimental, utilizou-se no processo de compostagem o lodo de estação de tratamento de esgotos, coletados na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) do Serviço Autônomo de Água e Esgotos (SAAE), localizada no distrito de Alfredo Guedes, município de Lençóis Paulista (Figura 55). Inaugurada em abril de 2011, a obra instalada em uma área de 100 metros quadrados, possui a capacidade para o tratamento de efluentes domiciliares entre 10 mil a 400 mil litros x dia.



Figura 55 – Estação de Tratamento de Esgotos(ETE) do Serviço Autônomo de Água e Esgotos (SAAE), localizada no distrito de Alfredo Guedes, município de Lençóis Paulista.

O sistema é formado por um reator anaeróbio de manta de lodo, um reator aeróbio com filtro submerso, decantador, soprador, difusores e painel de comando elétrico. A Figura 56 mostra a recepção do esgoto, formação do lodo e saída dos efluentes após o tratamento.



Figura 56 – Recepção do esgoto, formação do lodo e saída dos efluentes tratados.

Destaca-se a importância de redes de esgotos (emissários) específicos para esgoto doméstico e para esgoto industrial. No esgoto coletado no distrito de Alfredo Guedes verifica-se as características domésticas, não havendo produção industrial no bairro.

Após a coleta, enviou-se amostra do lodo coletado na estação de tratamento, para a empresa Bioagri Ambiental, na cidade de Piracicaba, para ser realizada análise de seus parâmetros, segundo as referências metodológicas:

- pH: SMEWW 4500 - H+ - B - Electrometric Method
- CHN: ASTM D5291, D5373 e D4239
- Mercúrio: POP PA 037 / USEPA 1631, 245.7
- Metais (ICP-OES): POP PA 035 / SMWW 3120 B, USEPA 6010
- Sólidos Totais: POP PA 009 - Rev.04 / SMWW 2540B

Os resultados podem ser verificados através das tabelas 22 e 23.

Tabela 22 – Resultados analíticos da amostra do lodo da ETE Alfredo Guedes, município de Lençóis Paulista.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	4,44
Carbono	% p/p	0,05	9,19
Nitrogênio	% p/p	0,05	< 0,05
Relação C/N	partes de C / 1 N	0,05	< 0,05
pH (Suspensão 1:1)	-	0 - 14	7,1
Umidade	% p/p	0,05	95,6
Alumínio	mg/kg	1	8790
Antimônio	mg/kg	1	< 1
Arsênio	mg/kg	1	< 1
Bário	mg/kg	1	42

Boro	mg/kg	1	67
Cádmio	mg/kg	0,1	< 0,1
Chumbo	mg/kg	1	14
Cobalto	mg/kg	1	7,9
Cobre	mg/kg	1	56
Cromo	mg/kg	1	39
Ferro	mg/kg	1	19410
Manganês	mg/kg	1	156
Mercúrio	mg/kg	0,05	0,89
Molibdênio	mg/kg	1	< 1
Níquel	mg/kg	1	13
Prata	mg/kg	1	< 1
Selênio	mg/kg	1	< 1
Vanádio	mg/kg	1	129
Zinco	mg/kg	1	222
Sólidos Voláteis	% p/p	0,05	3,90

Tabela 23 – Controle da qualidade de metais da amostra do lodo da ETE Alfredo Guedes, município de Lençóis Paulista.

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Prata	mg/kg	1	< 1
Alumínio	mg/kg	1	< 1
Arsênio	mg/kg	1	< 1
Bário	mg/kg	1	< 1
Cádmio	mg/kg	0,1	< 0,1
Cobalto	mg/kg	1	< 1
Cromo	mg/kg	1	< 1
Cobre	mg/kg	1	< 1
Ferro	mg/kg	1	< 1
Manganês	mg/kg	1	< 1
Molibdênio	mg/kg	1	< 1
Níquel	mg/kg	1	< 1
Chumbo	mg/kg	1	< 1
Antimônio	mg/kg	1	< 1
Selênio	mg/kg	1	< 1
Vanádio	mg/kg	1	< 1
Zinco	mg/kg	1	< 1

Verifica-se pela tabela 24 que em relação aos metais pesados, considerando a Resolução 375/2006 que regulamenta a utilização do lodo de

esgoto em solos agrícolas, o lodo da ETE de Alfredo Guedes encontra-se dentro das concentrações admissíveis.

Tabela 24 – Concentrações máximas admissíveis de substâncias inorgânicas em lodos de esgoto destinados à utilização agrícola através da Resolução CONAMA nº 375/2006 e os valores de metais encontrados na amostra do lodo da ETE Alfredo Guedes.

Substâncias Inorgânicas	Concentração Máxima permitida (mg/kg, base seca)	Valores encontrados no Lodo de Esgoto da ETE – Alfredo Guedes
Arsênio	41	< 1
Bário	1300	42
Cádmio	39	< 0,1
Chumbo	300	14
Cobre	1500	56
Cromio	1000	39
Mercúrio	17	0,89
Molibdênio	50	< 1
Níquel	420	13
Selênio	100	< 1
Zinco	2800	222

Fonte: Resolução nº 375 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), 2006.

Diferentemente da segunda batelada, quando utilizou-se o lodo de esgoto desidratado, em estado sólido, nesta batelada utilizou-se o lodo de estação de tratamento de esgoto *in natura*, com alto percentual de umidade, em co-compostagem com os resíduos de bagaço de cana-de-açúcar e borra de pó de café, além de água. A Tabela 25 apresenta análise dos resíduos de cana-de-açúcar e borra de café realizados pelo Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Unesp, câmpus de Botucatu. O nitrogênio foi determinado pelo método de oxidação com ácido perclórico; o carbono, por queima em mufla.

Tabela 25 – Análises laboratoriais realizadas pelo Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Unesp, câmpus de Botucatu.

AMOSTRAS	C%	N%	U-65°C%	C/N	pH
Borra de pó de café	16,18	0,77	68,14	21/1	5,95
Bagaço de cana	41,69	0,46	4,82	91/1	4,84

Buscando-se também, na quantificação de cada um dos resíduos utilizados, garantir os parâmetros ótimos de umidade e relação carbono/nitrogênio apontados pela literatura, utilizou-se os resíduos conforme a Tabela 26 e as Figuras 57, 58, 59 e 60.

Tabela 26 – Resíduos utilizados na condução da terceira batelada dos experimentos, analisando-se os parâmetros de relação C/N e de umidade.

Material	Massa (kg)	Relação C/N	Umidade (%)
Lodo de Esgoto	3	0,05	57,19
Bagaço de cana-de-açúcar	1	91	5,07
Borra de pó café	2,5	21	3,91
Água	1		100
Total	7,5		

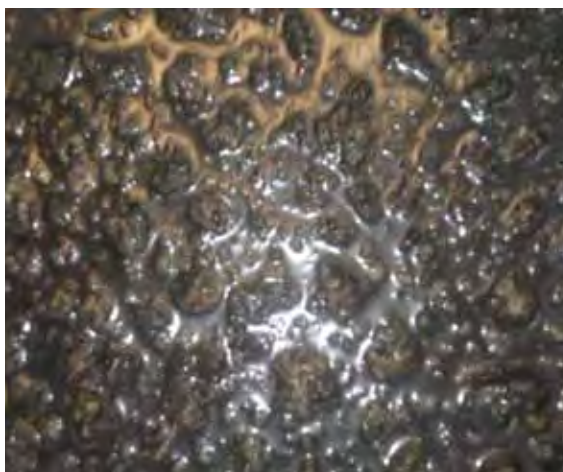


Figura 57 – Lodo de esgoto da ETE Alfredo Guedes.

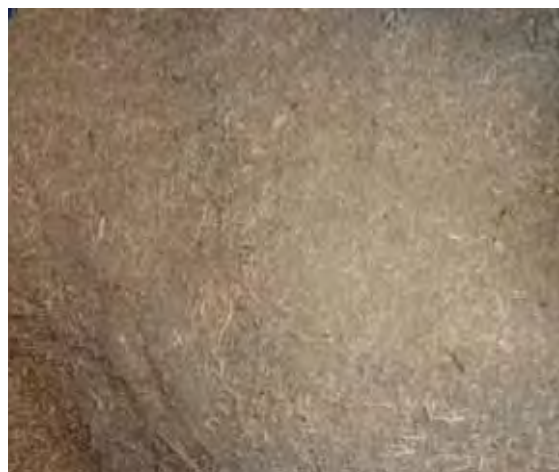


Figura 58 – Bagaço de cana-de-açúcar.



Figura 59 – Borra de pó de café desidratado.

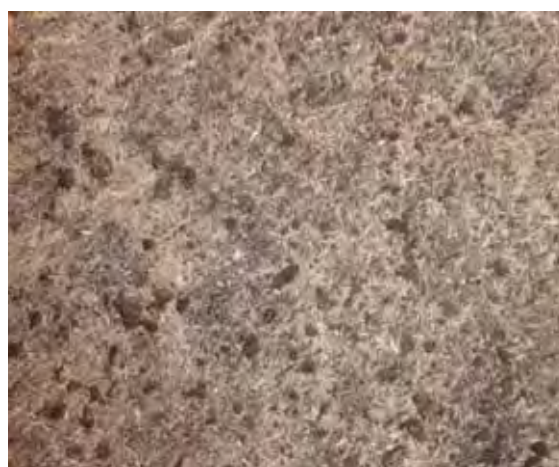


Figura 60 – Mistura dos resíduos de lodo de esgoto, bagaço de cana-de-açúcar e borra de pó de café.

Durante o processo e com o objetivo de acelerar a decomposição por parte das bactérias, adicionou-se, conforme Tabela 27, fertilizante solúvel contendo nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) na proporção 20x20x20 (Figura 61).

Tabela 27 – Adição de fertilizante NPK para aceleração do processo de co-compostagem.

Data	Fertilizante (g)
27/06	50
10/07	50
19/07	50
Total	150



Figura 61 – Embalagem do fertilizante NPK solúvel adicionado no processo, da marca Hydrofert.

A Figura 62 apresenta os resíduos no interior do reator rotativo, no início do processo de compostagem.



Figura 62 – Mistura dos resíduos no interior do reator rotativo no início do processo de co-compostagem.

3.4 LEVANTAMENTO DE DADOS RESPIROMÉTRICOS - MEDIÇÃO DOS ÍNDICES DE O₂ E CO₂

Os parâmetros medidos na fase gasosa, consistiram basicamente na determinação da evolução temporal do consumo de O₂ e respectiva geração de CO₂ sendo estes gases analisados e registrados continuamente pelo analisador de gases, excetuando períodos de coleta de matérias para análise de umidade, ao longo do processo aqui representado e referido como sendo um ciclo.

Nos ensaios preliminares, através da primeira batelada, ao se construir um gráfico através do software Matlab, plotando-se os valores da evolução do consumo de O₂ e respectiva geração de CO₂ ao longo do ciclo total do processo, que neste experimento atingiu um total de 39.870 linhas de dados, obteve-se um diagrama aqui denominado de “respirograma”, do processo de compostagem.

Já na segunda e terceira batelada, optou-se pela plotagem dos dados através do gerador de gráficos do Excel, e além da evolução do consumo de O₂ e respectiva geração de CO₂, foram gerados respirogramas para análise dos ciclos de purga, isto é, o descarte dos gases presentes no reator rotativo e a introdução de novo volume de ar ambiente, no momento em que o percentual de O₂ atinge níveis abaixo do programado, em ciclos simultâneos, até que o composto esteja estabilizado. Analisou-se ainda a relação entre O₂ e CO₂ e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

4 RESULTADOS

Os resultados foram analisados de forma isoladas, isto é, após obtenção de dados da primeira batelada, a utilizada nos ensaios preliminares, estes já foram analisados e, após a segunda batelada os dados obtidos foram analisados, independentes dos resultados obtidos no preliminares.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS NA PRIMEIRA BATELADA, UTILIZADA NOS ENSAIOS PRELIMINARES

O “respirograma” do processo de compostagem apresentado nesta batelada, indica a evolução temporal dos subciclos de consumo de O_2 e respectiva geração de CO_2 . Apresentam-se no Gráfico 6, a evolução temporal do consumo de O_2 e a Gráfico 7 a evolução temporal da presença de CO_2 através de gráficos plotados pelo software Matlab, com os resultados obtidos na condução dos experimentos de laboratório utilizando-se o método respirométrico entre os dias 01 a 29 de dezembro de 2011, compreendendo um período de 29 dias.

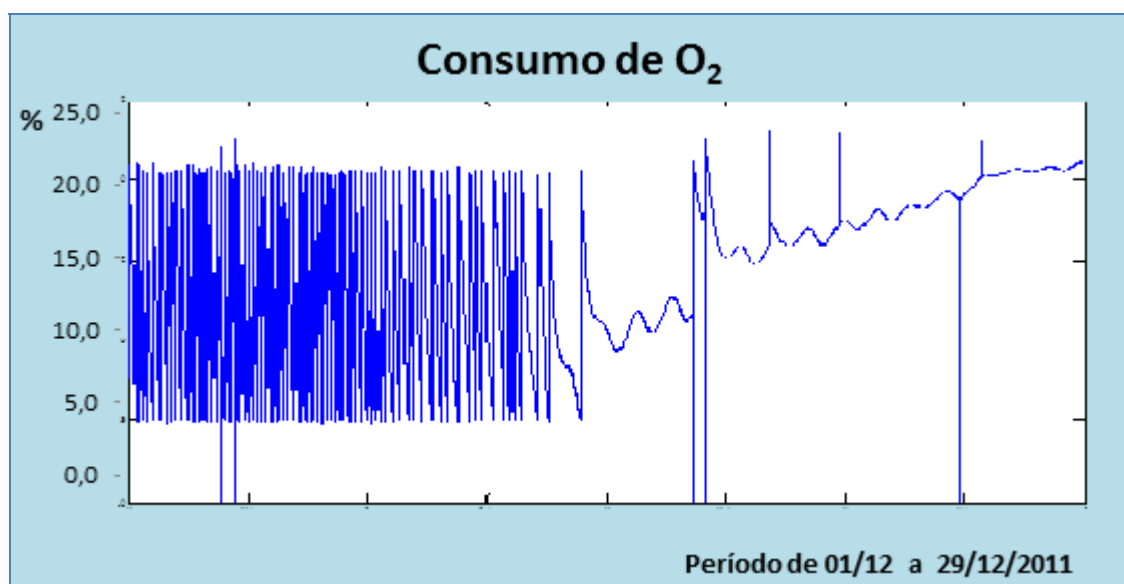


Gráfico 6 - “Respirograma” da evolução temporal de do consumo O_2 .

Deve-se destacar que o eixo das abcissas do gráfico representa o período de 29 dias em que ocorreu o processo de compostagem e o eixo das

ordenadas o percentual dos gases dentro do tambor rotativo. Verificou-se ainda, que o valor mínimo atingido de range é 5%, valor este programado para ocorrer a purga dos gases. Quedas abaixo deste índice foram ocasionados por paralisações do sistema.

No início do processo a velocidade dos ciclos de purga é intenso, diminuindo progressivamente, até que a concentração de O_2 na câmara de compostagem, o que foi considerado como estabilização do composto.

No Gráfico 7 observa-se a progressão da taxa de produção de CO_2 , e verifica-se que o a mesma intensidade até o meio do processo, na medida em que ocorre a estabilização do composto, os percentuais vão diminuindo progressivamente.

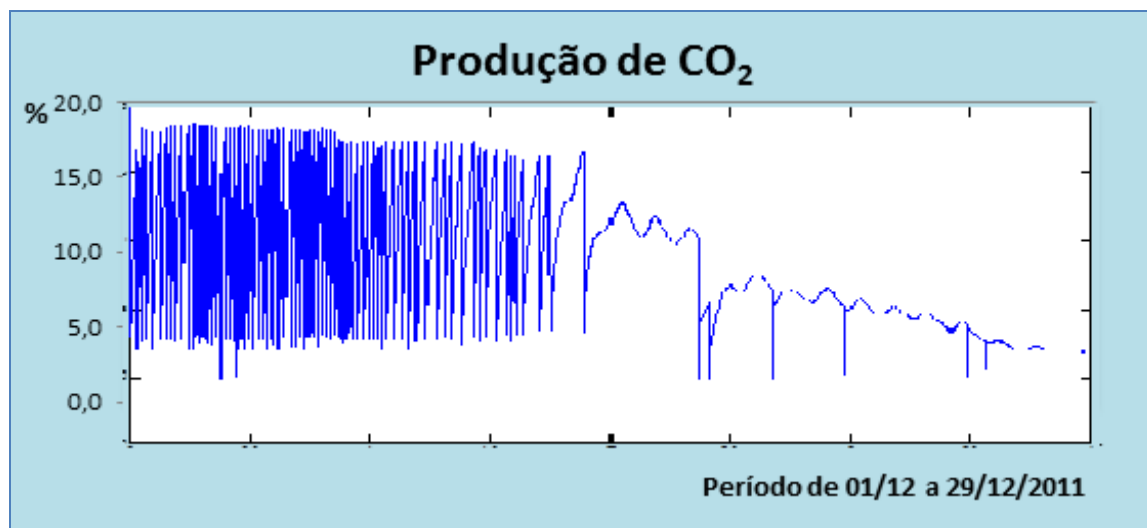


Gráfico 7 - "Respirograma" da evolução temporal de da presença de CO_2 .

Utilizando-se dos valores percentuais da presença de CO_2 e O_2 simultaneamente, obtem-se o Gráfico 8, que indica que a produção de CO_2 é inversamente proporcional a produção de O_2 .

O momento em que a produção de CO_2 atinge um baixo percentual é o mesmo em que a concentração de O_2 está estabilizado em 20%, no momento em que a produção de CO_2 atinge um alto percentual(20%) é o mesmo momento no qual o consumo de O_2 apresenta um baixo percentual(5%). Ao final do período, verifica-se que as variações de ambos não estão mais com a mesma frequência do início do processo, indicando a estabilização do mesmo.

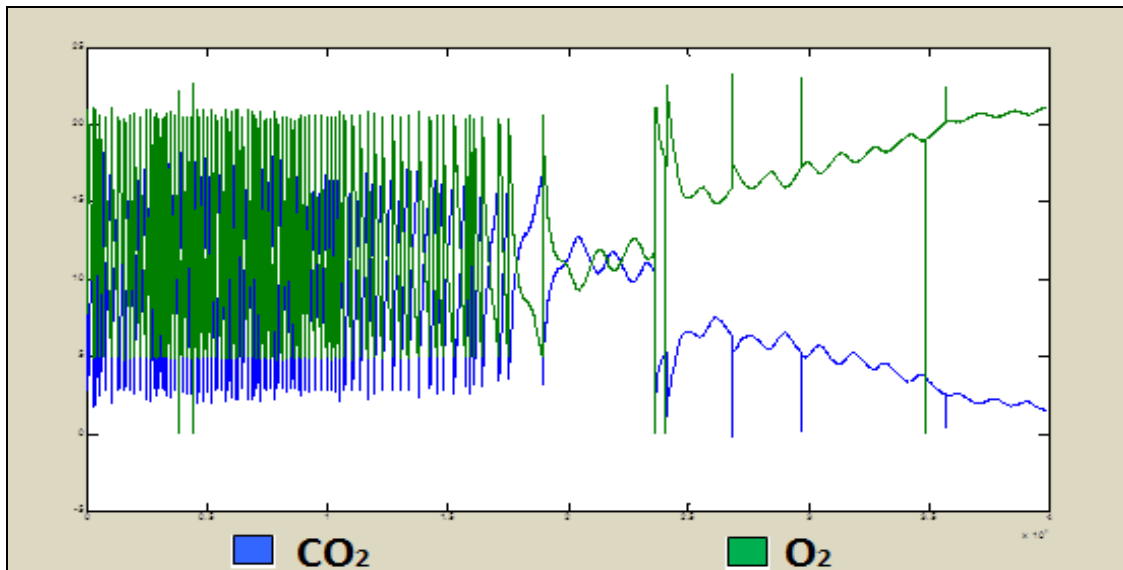


Gráfico 8 - "Respirograma" do processo em 2011, analisado durante um período de 29 dias.

Pode-se visualizar, através da Figura 63, o resultado físico obtido pelo processo, observando que a massa do composto foi reduzida para 2,230 kg, apresentando uma maior compactação



Figura 63 – Composto no início do processo compostagem da primeira batelada e no final do processo, já estabilizado, após a decomposição do material orgânico.

Apesar do processo de compostagem ter se estabilizado, encontra-se resíduos da cana-de-açúcar que não se decomuseram, provavelmente em função da presença de lignina, polímero fenólico, que propicia uma proteção, rigidez e impermeabilidade à parede celular, sendo de difícil decomposição bacteriana.

Paralelamente às análises gasosas, realizou-se análises do composto em seu estado sólido, através do Laboratório do Departamento de Água e

Esgotos de Bauru (DAE), presente na Faculdade de Engenharia da Unesp, câmpus de Bauru, verificando-se parâmetros que ainda não se encontram automatizados no projeto, como os índices de umidade e pH, sendo que os dados são apresentados na Tabela 28.

No dia 20 de dezembro foram analisados os índices da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e da Demanda Química de Oxigênio (DQO). DBO e DQO são os índices usuais constantes em legislação que especificam o do lançamento de efluentes líquidos em corpos d'água.

A DBO corresponde à concentração do oxigênio dissolvido num corpo d'água que é consumido pela atividade bacteriana. A DBO é proporcional ao tempo, ou seja, quanto maior o tempo mais matéria orgânica biodegradável é decomposta pela atividade aeróbica das bactérias.

Este índice é um bom indicador de quão poluída está uma água, pois quanto maior a quantidade de matéria orgânica, maior será seu DBO. No caso de efluentes, o valor da DBO explicita quanto de oxigênio será consumido quando do seu lançamento num corpo d'água, mensurando o dano ambiental que vai representar.

Se a DBO for muito alta, o oxigênio da água é rapidamente consumido, ficando redutor e tendo início a decomposição anaeróbica da matéria orgânica. Este tipo de decomposição é responsável pela produção de subprodutos poluidores e que degradam a qualidade da água.

A DQO demonstra a quantidade necessária de oxigênio, fornecido por um agente oxidante, para oxidar totalmente a matéria orgânica presente em um meio (água ou efluente). A DQO mensura, indiretamente, a carga de matéria orgânica contido no efluente, isto é de seu efeito poluidor.

Tabela 28 – Análises laboratoriais do composto utilizado na primeira batelada, em ensaios preliminares, realizados no laboratório de análises do DAE Bauru.

Data	DBO (mg/l de O ₂)	DQO (mg/l de O ₂)	pH	Umidade (%)
05/12/2011	-	-	-	64,48
12/12/2011	-	-	6,77	62,87
20/12/2011	460	4110	8,20	70,53

Determinou-se ainda, a umidade da mistura, e através dos dados obtidos, traçou-se o Gráfico 9, onde verificou-se que este índice esteve um pouco acima dos padrões considerados ótimos para o processo, que seria entre 50% e 60%, conforme Kiehl (1998).

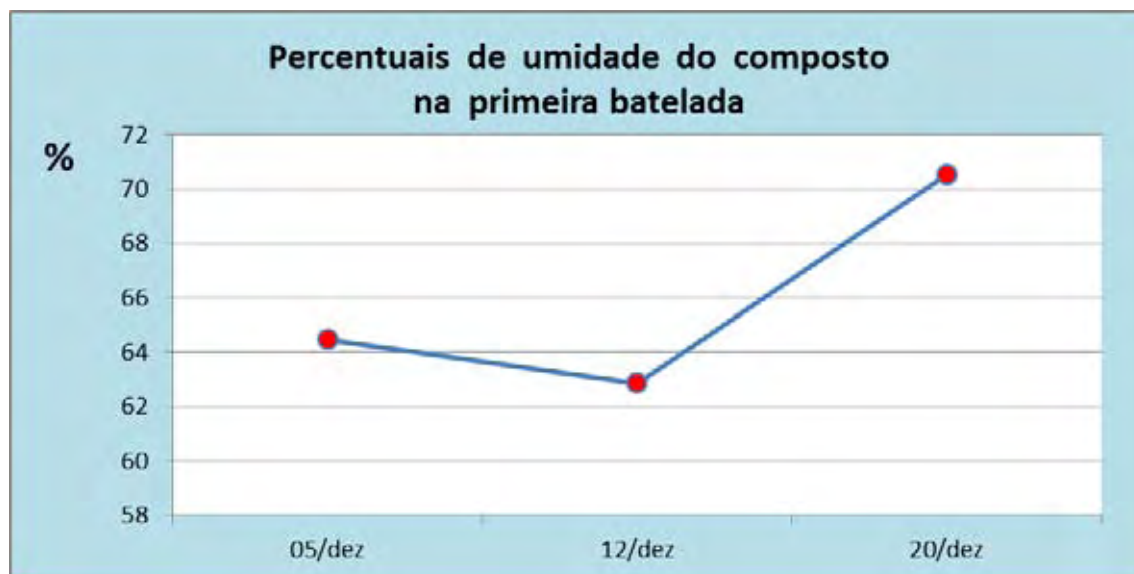


Gráfico 9 – Medidas de umidade da parte sólida do composto, analisadas em laboratório durante a primeira batelada, em ensaios preliminares.

Foram realizadas também, análises complementares do composto final, pelo Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Unesp, câmpus de Botucatu, conforme Tabela 29. Verifica-se que o pH corresponde ao encontrado nas análises realizadas no Laboratório do DAE, e que estão dentro dos valores ótimos de estabilização do composto, apontados por Kiehl (1998).

Tabela 29 – Análises laboratoriais realizadas pelo Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Unesp, câmpus de Botucatu.

AMOSTRA(S)	C%	N%	U-65°C%	C/N	pH
Composto 1	29,98	0,65	23,87	46/1	8,31

4.2 RESULTADOS OBTIDOS NA SEGUNDA BATELADA, CO-COMPOSTAGEM UTILIZANDO-SE OS RESÍDUOS DE LODO DE ESGOTO E PODA DE GRAMA

Os dados desta segunda batelada foram analisados segundo os dados obtidos pelo analisador de gases. Ressalta-se nesta batelada que o seu início no

dia 19 de janeiro, foi interrompido devido a entupimento nas tubulações que conduziam as amostras gasosas ao analisador de gases, causados por resíduos muito finos, encontrados na mistura e que foram carregados para o interior da tubulação de saída dos gases gerados pelo processo. Após a liberação da passagem gasosa, acoplou-se filtros na saída da amostra no interior do reator, para evitar que a ocorrência do problema.

Efetivamente o processo iniciou-se em 24 de janeiro de 2012, as 16h07min, obtendo-se a primeira purga em 26 de janeiro. Embora a estabilização do composto, observando-se os dados obtidos, tenham ocorrido anteriormente, o encerramento da coleta de dados do processo ocorreu em 29 de fevereiro, obtendo 39.870 linhas de dados.

Pode-se visualizar, através da Figura 64, o aspecto físico obtido no material resultante do processo na segunda batelada.



Figura 64 – Composto no início do processo compostagem da segunda batelada e ao final do processo de co-compostagem de lodo de esgoto e poda de grama.

Observou-se ainda que a massa do composto foi reduzida para 5,068 kg, conforme pesagem em balança digital, apresentando uma maior compactação que no início do processo.

Nesta batelada, os dados obtidos foram tratados, organizados em tabelas, e plotados para geração de gráficos, utilizando-se o software Excel.

4.2.1 Tempo de processamento da segunda batelada de co-compostagem

Na Tabela 30 são apresentados os dados obtidos nesta batelada, indicando o tempo gasto para que o consumo de O₂, a partir do início do processo, com percentual de aproximadamente 21% do total da mistura gasosa no interior do reator, sendo reduzido para o valor de até 5% dessa mistura, parâmetro definido pelo range programado pelo sistema, a partir do qual ocorre a purga, isto é, a eliminação da mistura gasosa (com alto índice de CO₂) e a introdução de ar ambiente, e assim, sucessivamente, até que haja estabilização do composto.

Tabela 30 – Tempo gasto para consumo do oxigênio existente no interior do reator em cada ciclo de purga.

CICLOS DE PURGA	DATA DE ENCERRAMENTO	TEMPO (min)	TEMPO (h)	MINUTOS ACUMULADOS	HORAS ACUMULADAS
1	26.01.12	505	8,42	505	8,42
2	27.01.12	484	8,07	1010	16,84
3	27.01.12	406	6,77	1494	24,90
4	27.01.12	477	7,95	1900	31,67
5	28.01.12	521	8,68	2377	39,62
6	28.01.12	503	8,38	2898	48,30
7	28.01.12	391	6,52	3401	56,69
8	29.01.12	366	6,10	3792	63,20
9	29.01.12	475	7,92	4158	69,30
10	29.01.12	416	6,93	4633	77,22
11	29.01.12	287	4,78	5049	84,15
12	30.01.12	406	6,77	5336	88,94
13	30.01.12	503	8,38	5742	95,70
14	30.01.12	307	5,12	6245	104,09
15	30.01.12	280	4,67	6552	109,20
16	31.01.12	437	7,28	6832	113,87
17	31.01.12	420	7,00	7269	121,15
18	31.01.12	292	4,87	7689	128,15
19	31.01.12	339	5,65	7981	133,02
20	01.02.12	589	9,82	8320	138,67
21	01.02.12	377	6,28	8909	148,49
22	01.02.12	299	4,98	9286	154,77
23	02.02.12	470	7,83	9585	159,75
24	02.02.12	509	8,48	10055	167,59
25	02.02.12	299	4,98	10564	176,07
26	03.02.12	433	7,22	10863	181,05

CICLOS DE PURGA	DATA DE ENCERRAMENTO	TEMPO (min)	TEMPO (h)	MINUTOS ACUMULADOS	HORAS ACUMULADAS
27	03.02.12	505	8,42	11296	188,27
28	03.02.12	398	6,63	11801	196,69
29	04.02.12	480	8,00	12199	203,32
30	04.02.12	605	10,08	12679	211,32
31	04.02.12	405	6,75	13284	221,40
32	05.02.12	517	8,62	13689	228,15
33	05.02.12	605	10,08	14206	236,77
34	05.02.12	475	7,92	14811	246,85
35	06.02.12	803	13,38	15286	254,77
36	06.02.12	533	8,88	16089	268,15
37	07.02.12	721	12,02	16622	277,04
38	07.02.12	254	4,23	17343	289,05
39	07.02.12	195	3,25	17597	293,29
40	07.02.12	253	4,22	17792	296,54
41	08.02.12	395	6,58	18045	300,75
42	08.02.12	415	6,92	18440	307,34
43	08.02.12	394	6,57	18855	314,25
44	09.02.12	379	6,32	19249	320,82
45	09.02.12	428	7,13	19800	330,00
46	10.02.12	723	12,05	20228	337,14
47	10.02.12	528	8,80	20951	349,19
48	11.02.12	877	14,62	21479	357,99
49	12.02.12	960	16,00	22356	372,60
50	13.02.12	1311	21,85	23316	388,60
51	15.02.12	2410	40,17	24627	410,45
52	16.02.12	1266	21,10	27037	450,62
53	18.02.12	1927	32,12	28303	471,72
54	24.02.12	4414	73,57	30230	503,84
55	29.02.12	2929	48,82	34644	577,40
TEMPO MÉDIO		661,93	11,03	-	-

Verificou-se que, no total, foram completados 56 ciclos de purga, no tempo total de 577,40 horas, ou seja aproximadamente 24 dias, com tempo médio de ciclo de purga de aproximadamente 11h03min.

O Gráfico 10 apresenta o tempo gasto no consumo de O₂ com relação ao volume total de gases no interior do reator, para os intervalos entre cada uma das purgas. Verifica-se que para o período de 26 de janeiro a 05 de fevereiro o tempo máximo foi em torno de 10 horas, com aumento de consumo no dia 06 de fevereiro, quando se constatou baixa umidade (36%). Entre os dias 07 e 09 de

fevereiro este tempo sofre uma queda, aumentando a rapidez do consumo de O_2 . A partir do dia 10 de fevereiro o tempo gasto no consumo aumenta continuamente, período no qual, conclui-se, que ocorreu a estabilização na decomposição do composto. Verifica-se ainda que a partir do 51º ciclo de purga, até o final do processo, o tempo de consumo do O_2 é cada vez maior.

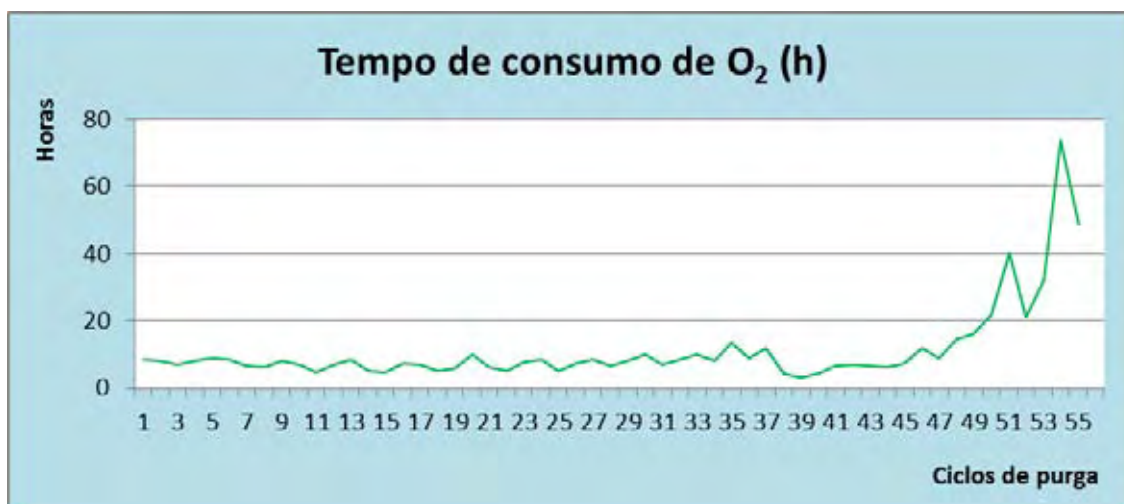


Gráfico 10 - Tempo gasto para consumo de O_2 até que o mesmo atinja 5% do valor total dos gases dentro do reator, em cada frequência de purga.

O Gráfico 11 apresenta o consumo acumulado de O_2 ao longo do período, considerando o volume da fase gasosa do reator. Tocante com o Gráfico 10, ratifica-se que os maiores consumos de O_2 também ocorre a partir de 09 de fevereiro, indicando maior intensidade das atividades bacterianas.

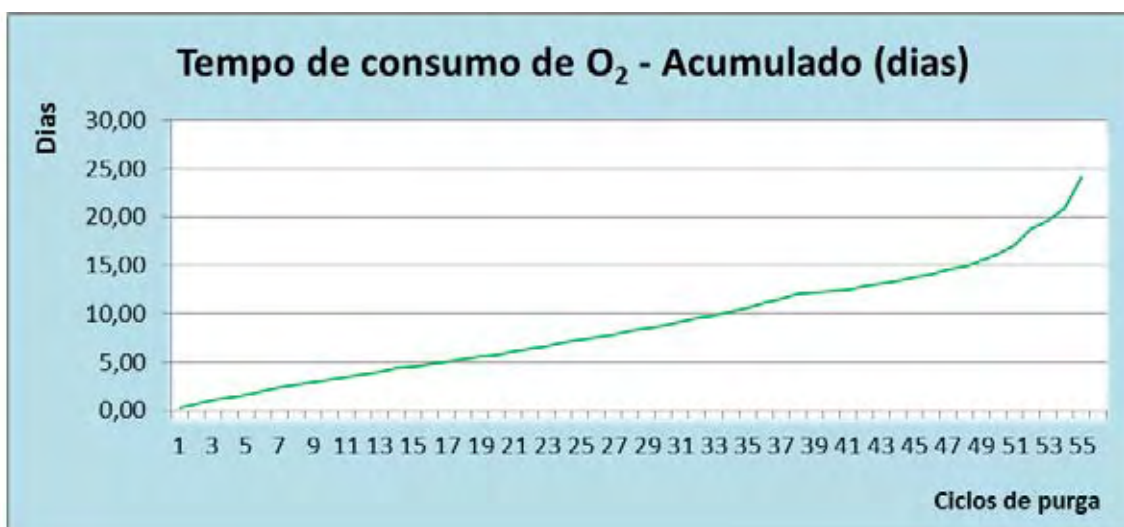


Gráfico 11 - Curva representativa do tempo gasto acumulado para se consumir o O_2 até que o mesmo atinja 5% do valor total dentro do reator.

4.2.2 Taxa de consumo de oxigênio (TCO) durante o processo da segunda batelada de co-compostagem

Considerando a quantidade de nutrientes do material a ser compostado, a fase inicial do processo é quando ocorre atividades bacterianas em maior intensidade e, conseqüentemente, o consumo de O_2 no interior do reator, ocorre em tempos menores. O Gráfico 12 apresenta esta condição, uma vez que os intervalos de purgas iniciais são pequenos e se espaçam ao longo do período do processo de compostagem.

Neste gráfico, vale ressaltar que a faixa de range analisada no O_2 , isto é, a faixa que refere-se à amplitude delimitada por um valor mínimo e um valor máximo de dados, foi estabelecida entre 5% e 20%, para esta batelada. Nota-se que o percentual não fica abaixo de 5%, valor mínimo programado de range e, no momento em que atinge este valor, é o mesmo em que ocorrerá a purga dos gases. Ao término de cada purga o valor do percentual atinge seu máximo, entre 20% e 21%, onde o ar no interior do reator é eliminado e introduzido um novo volume de gás do ambiente externo.

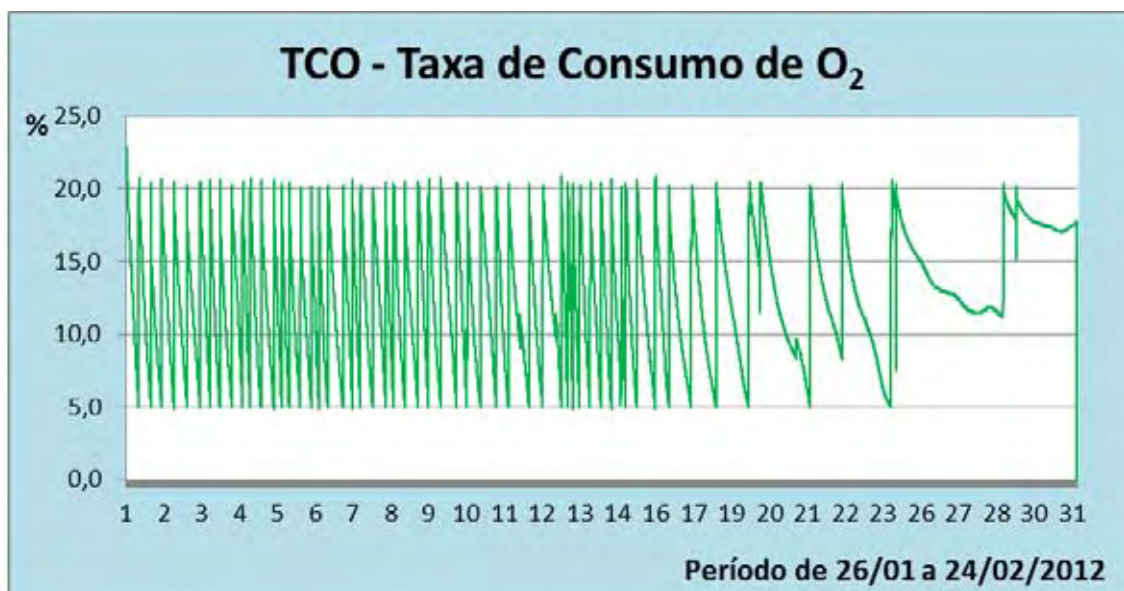


Gráfico 12 - Representação da velocidade do processo do consumo de O_2 obtidos a partir de cada linha de dados coletada.

Verifica-se uma variação intensa nos dias iniciais do processo até por volta do ciclo 12, onde a intensidade diminui. Entre os ciclos 12 e 14, período em

que o índice de umidade foi corrigido, a partir desta correção houve condições mais favoráveis para desenvolvimento da colônia de bactérias, e como consequência o consumo de O₂ torna-se intenso. A partir do ciclo 15 o consumo vai diminuindo e observa-se um intervalo cada vez maior entre as purgas, onde se conclui que nesta fase ocorre a estabilização do processo.

4.2.3 Taxa de geração de gás carbônico TGCO₂, durante o processamento da segunda batelada de co-compostagem

A produção de CO₂, durante o período do processo de compostagem, é observado no Gráfico 13.

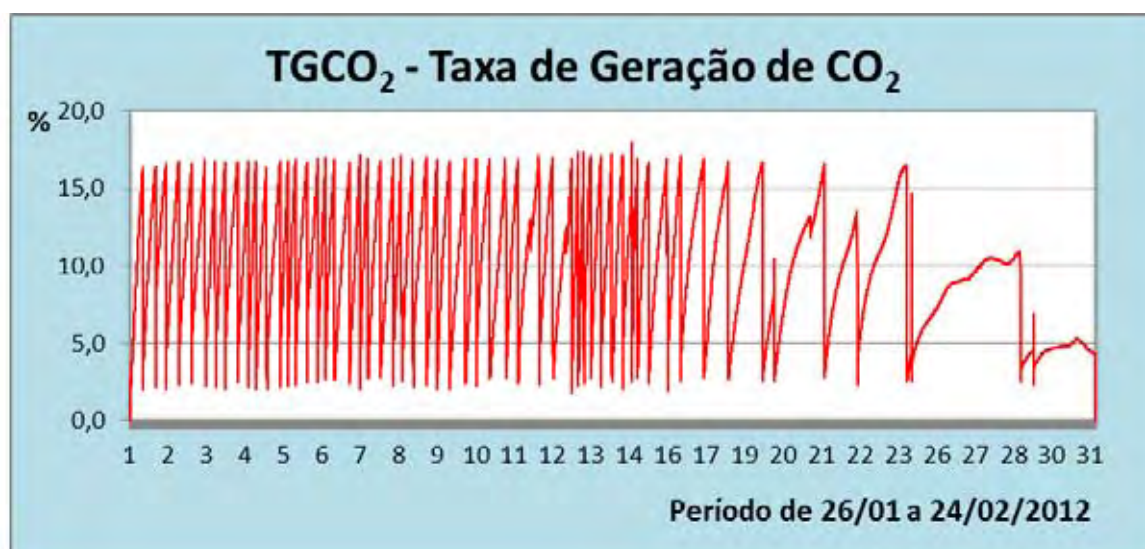


Gráfico 13 – Representação do processo de produção de CO₂ obtidos a partir de cada linha de dados coletada.

O gráfico apresenta alta produção de CO₂ nos momentos iniciais, onde o evento se repete de forma intensa. Assim como no consumo de O₂ nota-se que o percentual diminui a intensidade de variação entre os ciclos 11 e 12, período em que a umidade estava baixa.

Após a correção da umidade, verifica-se novamente um aumento na produção de CO₂, mas após ciclo 15 o processo foi diminuindo progressivamente, o que interpreta-se como o a fase de estabilização do processo de compostagem.

A produção de CO₂ no processo é inversa ao consumo de O₂. Assim quando no interior do reator, se tem elevada porcentagem de O₂, ter-se-á baixa

porcentagem de CO_2 . Com o desenvolvimento de atividades bacterianas, o consumo de O_2 aumenta (o que reduz sua porcentagem no interior do reator) e proporcionalmente a esta redução, obtêm-se o aumento de CO_2 .

4.2.4 Relação percentual entre a velocidade de consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico

Plotando-se os valores percentuais da presença de CO_2 e O_2 obtidos nas linhas de dados, e observando-as simultaneamente, obtém-se o Gráfico 14, que indica que a produção de CO_2 é inversamente proporcional a produção de O_2 , isto é, no momento em que a produção de CO_2 atinge um baixo percentual é o consumo de O_2 está apresentando um alto percentual e, no momento em que a produção de CO_2 atinge um alto percentual é o mesmo momento no qual o consumo de O_2 apresenta um baixo percentual.

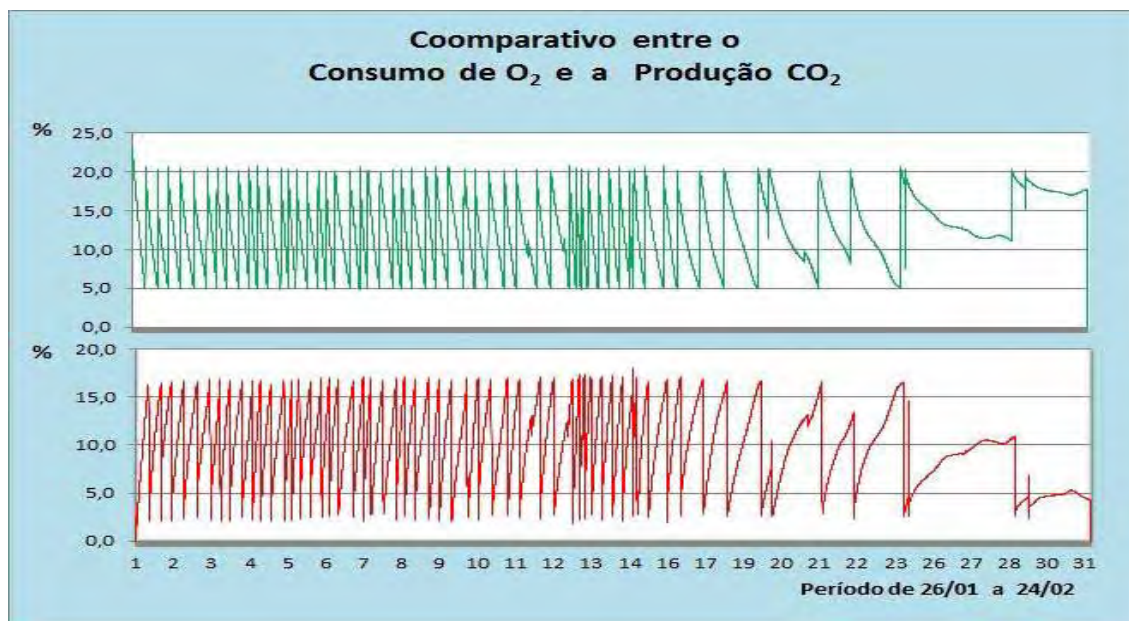


Gráfico 14 – Representação da relação obtida entre o progresso do consumo de O_2 e o progresso da produção de CO_2 , obtidos a partir de cada linha de dados coletada.

Ao final do período, verifica-se que as variações de ambos não estão mais com a mesma frequência do início do processo, indicando a estabilização do mesmo.

4.2.5 Relação entre o consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico, analisados pelas unidades de massa e volume

Através da Tabela 31, verifica-se as relações entre o consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico, analisados sob as unidades de medida de massa (gramas) e de volume (litros) em cada um dos 55 ciclos de purga que ocorreram durante o período de decomposição dos resíduos orgânicos, que podem ser utilizados em projetos de dimensionamento de reatores em altas escalas.

Tabela 31 – Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido em cada ciclo de purga.

CICLOS DE PURGA	DATA	% O ₂	% CO ₂	CONSUMO DE O ₂ (gramas)	CONSUMO DE O ₂ (litros)	PRODUÇÃO DE CO ₂ (gramas)	PRODUÇÃO DE CO ₂ (litros)
1	26.01	17,956	16,372	7,70	10,77	13,16	9,82
2	27.01	15,773	14,406	6,76	9,46	11,58	8,64
3	27.01	15,483	14,436	6,64	9,29	11,60	8,66
4	27.01	15,780	14,702	6,76	9,47	11,81	8,82
5	28.01	15,494	14,313	6,64	9,30	11,50	8,59
6	28.01	15,240	14,376	6,53	9,14	11,55	8,63
7	28.01	15,545	14,571	6,66	9,33	11,71	8,74
8	29.01	15,611	14,564	6,69	9,37	11,70	8,74
9	29.01	15,645	14,621	6,71	9,39	11,75	8,77
10	29.01	15,251	14,303	6,54	9,15	11,49	8,58
11	29.01	15,529	14,596	6,66	9,32	11,73	8,76
12	30.01	15,787	14,263	6,77	9,47	11,46	8,56
13	30.01	15,720	14,615	6,74	9,43	11,74	8,77
14	30.01	15,574	14,591	6,67	9,34	11,72	8,75
15	30.01	15,452	14,588	6,62	9,27	11,72	8,75
16	31.01	15,422	14,301	6,61	9,25	11,49	8,58
17	31.01	15,116	14,429	6,48	9,07	11,59	8,66
18	31.01	15,328	14,523	6,57	9,20	11,67	8,71
19	31.01	15,106	14,24	6,47	9,06	11,44	8,54
20	01.02	15,294	14,021	6,55	9,18	11,27	8,41
21	01.02	15,425	14,76	6,61	9,26	11,86	8,86
22	01.02	15,635	14,841	6,70	9,38	11,93	8,90
23	02.02	15,290	14,046	6,55	9,17	11,29	8,43
24	02.02	15,117	14,04	6,48	9,07	11,28	8,42
25	02.02	15,472	14,907	6,63	9,28	11,98	8,94
26	03.02	15,353	14,218	6,58	9,21	11,43	8,53
27	03.02	15,521	14,89	6,65	9,31	11,97	8,93

CICLOS DE PURGA	DATA	% O ₂	% CO ₂	CONSUMO DE O ₂ (gramas)	CONSUMO DE O ₂ (litros)	PRODUÇÃO DE CO ₂ (gramas)	PRODUÇÃO DE CO ₂ (litros)
28	03.02	15,553	14,476	6,67	9,33	11,63	8,69
29	04.02	15,703	14,646	6,73	9,42	11,77	8,79
30	04.02	15,800	14,858	6,77	9,48	11,94	8,91
31	04.02	15,475	14,476	6,63	9,29	11,63	8,69
32	05.02	15,447	14,667	6,62	9,27	11,79	8,80
33	05.02	15,164	14,184	6,50	9,10	11,40	8,51
34	05.02	15,188	14,173	6,51	9,11	11,39	8,50
35	06.02	15,375	14,631	6,59	9,23	11,76	8,78
36	06.02	15,354	14,642	6,58	9,21	11,77	8,79
37	07.02	15,267	14,164	6,54	9,16	11,38	8,50
38	07.02	15,911	15,475	6,82	9,55	12,44	9,29
39	07.02	15,593	15,169	6,68	9,36	12,19	9,10
40	07.02	15,380	14,728	6,59	9,23	11,84	8,84
41	08.02	15,269	14,295	6,54	9,16	11,49	8,58
42	08.02	15,596	15,137	6,68	9,36	12,16	9,08
43	08.02	15,438	14,473	6,62	9,26	11,63	8,68
44	09.02	15,603	15,948	6,69	9,36	12,82	9,57
45	09.02	15,206	14,341	6,52	9,12	11,52	8,60
46	09.02	15,308	13,934	6,56	9,18	11,20	8,36
47	10.02	15,706	14,472	6,73	9,42	11,63	8,68
48	10.02	15,849	15,207	6,79	9,51	12,22	9,12
49	11.02	15,252	14,329	6,54	9,15	11,51	8,60
50	12.02	15,299	13,897	6,56	9,18	11,17	8,34
51	15.02	15,551	13,983	6,66	9,33	11,24	8,39
52	16.02	11,803	9,746	5,06	7,08	7,83	5,85
53	18.02	15,347	14,234	6,58	9,21	11,44	8,54
54	24.02	9,353	8,11	4,01	5,61	6,52	4,87
55	29.02	2,558	1,702	1,10	1,53	1,37	1,02
TOTAL				355,83	498,16	624,08	465,978

A Tabela 31 apresenta os seguintes dados calculados em cada um dos ciclos de purga e que estão representados no Gráfico 15.

- Percentual de O₂ – apresenta o range entre o percentual inicial (início da purga) menos o percentual final (purga).
- Percentual de CO₂ – apresenta o range entre o percentual inicial (início da purga) menos o percentual final (purga).
- Consumo de O₂ – Massa - valores em gramas calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, conforme a Equação 1:

$$O_2(g) = \frac{60 \times 16 \times \% O_2}{22,4} \quad (1)$$

Onde:

60 l = volume aproximado da mistura gasosa presentes no reator;

16 = massa de 1 mol de O_2 ;

% O_2 = range percentual de oxigênio presente na mistura gasosa;

22,4 l = volume que ocupa 1 mol de O_2 nas condições normais de temperatura e pressão.

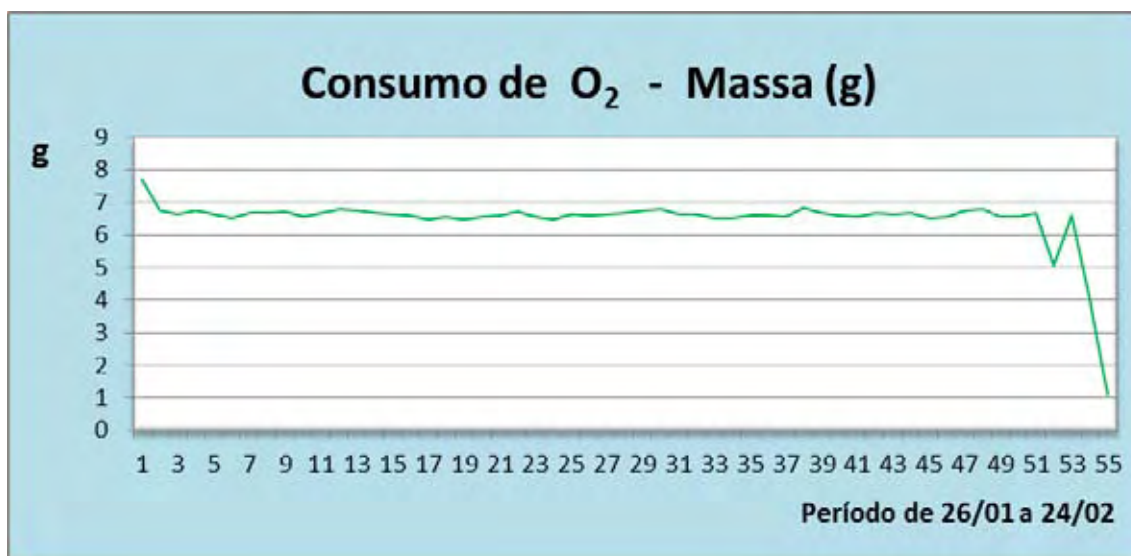


Gráfico 15 – Consumo de oxigênio expresso em massa (g) distribuído no período do processo.

Observa-se através do Gráfico 15, um consumo inicial alto, próximo de 8 g/ciclo, estabilizando-se depois em aproximadamente, 6,5 g/ciclo. Ao final este consumo cai progressivamente até próximo de 1 g/ciclo, mais um dado que confirma o final do processo de decomposição dos resíduos. Verifica-se também que, ao final dos 55 ciclos de purgas, foram consumidos aproximadamente 355,83 gramas de oxigênio.

d) Consumo de O_2 – Volume - valores em litros calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, conforme a Equação 2:

$$O_2(l) = \frac{\% O_2 \times 22,4}{16} \quad (2)$$

Onde:

% O₂ = range percentual de oxigênio presente na mistura gasosa;
 22,4 l = volume que ocupa 1 mol de O₂ nas condições normais de temperatura e pressão;

16 = massa de 1 mol de O₂.

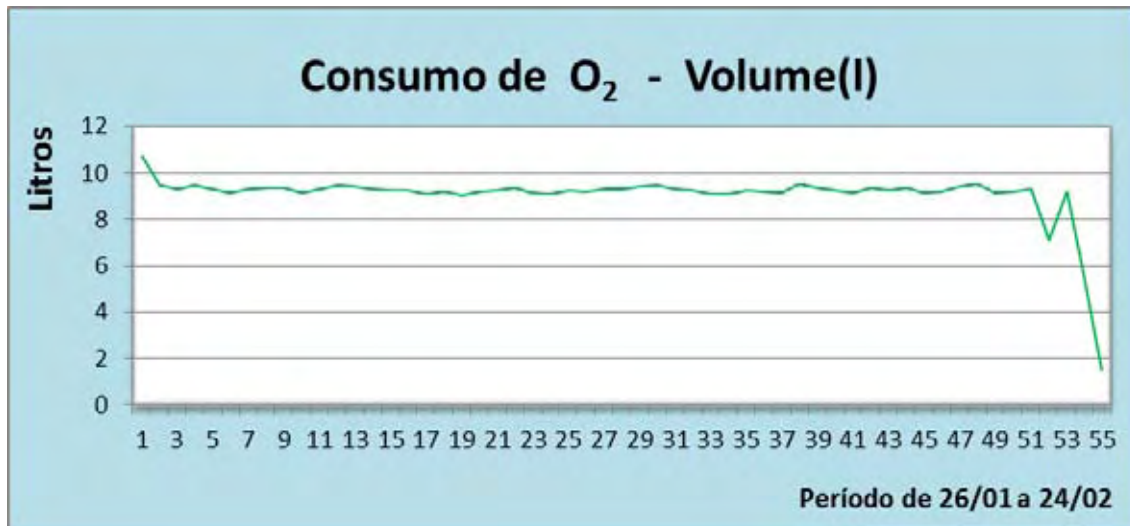


Gráfico 16 - Consumo de oxigênio expresso em volume(l) distribuído no período do processo.

No Gráfico 16, também pode-se verificar o consumo de oxigênio através do período de 55 ciclos de purga, porém este consumo é determinado em volume (litros) por ciclo. Este gráfico é semelhante ao Gráfico 15, e a análise dos dados apresentados é a mesma. Obtem-se também uma totalização do volume de litros de oxigênio consumido, de aproximadamente 498,16 litros.

e) Produção de CO₂ – Massa - valores em gramas calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, através da Equação 3:

$$CO_2(g) = \frac{60 \times 30 \times \% CO_2}{22,4} \quad (3)$$

Onde:

60 l = volume aproximado da mistura gasosa presentes no reator;

30 = massa de 1 mol de CO₂;

% CO₂ = range percentual de gás carbônico presente na mistura gasosa;

22,4 l = volume que ocupa 1 mol de O₂ nas condições normais de temperatura e pressão.

Analisa-se no Gráfico 17 a produção de gás carbônico durante os ciclos de purga, neste caso utiliza-se como unidade de medida a massa (gramas), verifica-se também neste Gráfico uma alta produção inicial, próxima de 14 g/ciclo, durante a maior parte do processo permanece próxima de 12 g/ciclo, caindo até aproximadamente 2 g/ciclo, no momento que deduz-se, o processo estabilizou-se. A produção total de gás carbônico, valor dado em massa, foi de aproximadamente 624,08g.

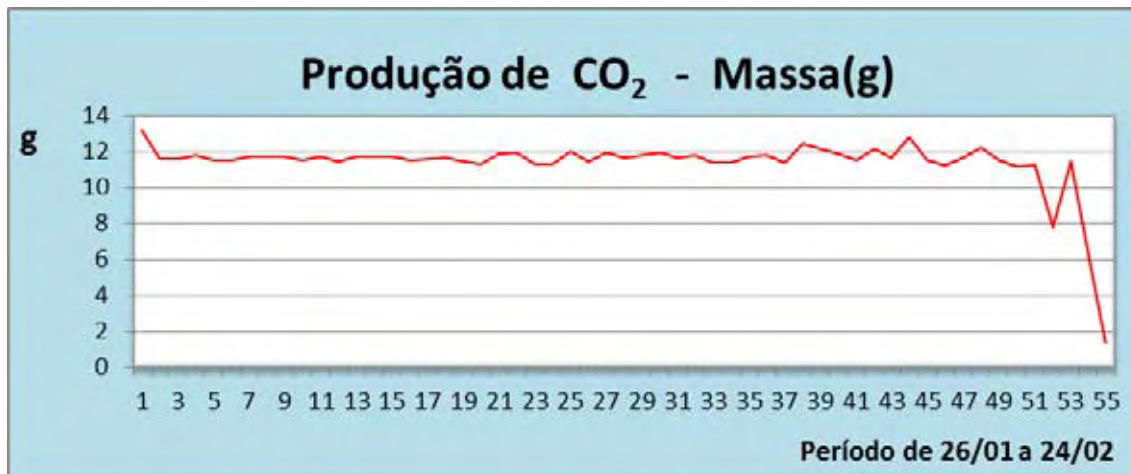


Gráfico 17 – Produção de gás carbônico expresso em massa (g) distribuído no período do processo.

- f) Consumo de CO₂ – Volume – valores em litros calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, através da Equação 4:

$$CO_2(l) = \frac{\%CO_2 \times 22,4}{30} \quad (4)$$

Onde:

% CO₂ = range percentual de gás carbônico na mistura gasosa;

22,4 l = volume que ocupa 1 mol de CO₂ nas condições normais de temperatura e pressão;

30 = massa de 1 mol de CO₂.

Verifica-se no Gráfico 18 o volume (em litros), referentes a produção total de gás carbônico, no processo. O total apresentado nesta unidade de medida foi de aproximadamente 465,98 litros. A linha de análise de dados é semelhante a apresentada no Gráfico 17.

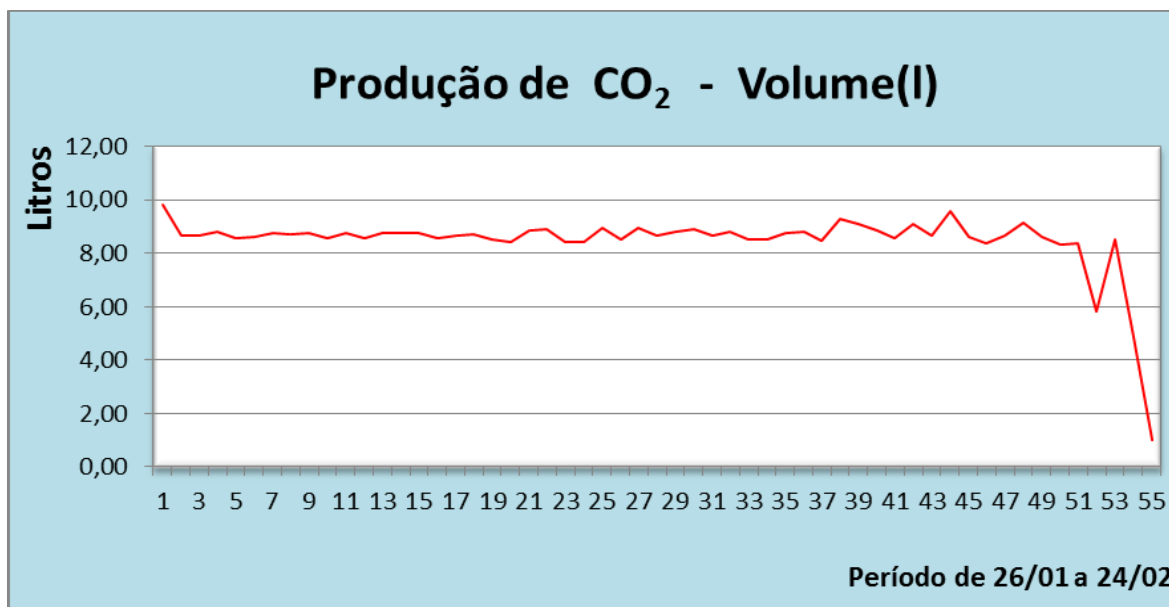


Gráfico 18 – Produção de gás carbônico expresso em volume (l) distribuído no período do processo.

4.2.6 Consumo de oxigênio e produção de gás carbônico acumulados no período

Na Tabela 32, tem-se os valores apresentados na Tabela 20, onde pode-se verificar a massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido em cada ciclo de purga, mas com seus valores acumulados durante o período.

Tabela 32 - Massa e volume de oxigênio consumido no interior do reator e massa e volume de gás carbônico produzido, acumulados durante o período de ciclos de purga.

CICLOS DE PURGA	DATA	ACUMULADO O ₂ - (gramas)	ACUMULADO O ₂ - (Litros)	ACUMULADO CO ₂ - (gramas)	ACUMULADO CO ₂ - (Litros)
1	26.01	7,70	10,77	13,16	9,82
2	27.01	14,46	20,24	24,73	18,47
3	27.01	21,09	29,53	36,33	27,13
4	27.01	27,85	39,00	48,15	35,95
5	28.01	34,49	48,29	59,65	44,54
6	28.01	41,03	57,44	71,20	53,16

CICLOS DE PURGA	DATA	ACUMULADO O ₂ - (gramas)	ACUMULADO O ₂ - (Litros)	ACUMULADO CO ₂ - (gramas)	ACUMULADO CO ₂ - (Litros)
7	28.01	47,69	66,76	82,91	61,91
8	29.01	54,38	76,13	94,61	70,64
9	29.01	61,08	85,52	106,36	79,42
10	29.01	67,62	94,67	117,86	88,00
11	29.01	74,27	103,98	129,58	96,76
12	30.01	81,04	113,46	141,05	105,31
13	30.01	87,78	122,89	152,79	114,08
14	30.01	94,45	132,23	164,51	122,84
15	30.01	101,07	141,50	176,24	131,59
16	31.01	107,68	150,76	187,73	140,17
17	31.01	114,16	159,83	199,32	148,83
18	31.01	120,73	169,02	210,99	157,54
19	31.01	127,21	178,09	222,44	166,09
20	01.02	133,76	187,26	233,70	174,50
21	01.02	140,37	196,52	245,56	183,35
22	01.02	147,07	205,90	257,49	192,26
23	02.02	153,62	215,07	268,78	200,69
24	02.02	160,10	224,14	280,06	209,11
25	02.02	166,73	233,43	292,04	218,06
26	03.02	173,31	242,64	303,46	226,59
27	03.02	179,97	251,95	315,43	235,52
28	03.02	186,63	261,28	327,06	244,21
29	04.02	193,36	270,71	338,83	252,99
30	04.02	200,13	280,19	350,77	261,91
31	04.02	206,76	289,47	362,40	270,59
32	05.02	213,38	298,74	374,19	279,39
33	05.02	219,88	307,84	385,59	287,90
34	05.02	226,39	316,95	396,97	296,41
35	06.02	232,98	326,17	408,73	305,19
36	06.02	239,56	335,39	420,50	313,97
37	07.02	246,11	344,55	431,88	322,47
38	07.02	252,92	354,09	444,31	331,76
39	07.02	259,61	363,45	456,50	340,86
40	07.02	266,20	372,68	468,34	349,69
41	08.02	272,74	381,84	479,83	358,27
42	08.02	279,43	391,20	491,99	367,35
43	08.02	286,04	400,46	503,62	376,04
44	09.02	292,73	409,82	516,44	385,61
45	09.02	299,25	418,94	527,96	394,21
46	09.02	305,81	428,13	539,16	402,57
47	10.02	312,54	437,55	550,79	411,25
48	10.02	319,33	447,06	563,01	420,38

CICLOS DE PURGA	DATA	ACUMULADO O ₂ - (gramas)	ACUMULADO O ₂ - (Litros)	ACUMULADO CO ₂ - (gramas)	ACUMULADO CO ₂ - (Litros)
49	11.02	325,87	456,21	574,52	428,97
50	12.02	332,42	465,39	585,69	437,31
51	15.02	339,09	474,72	596,92	445,70
52	16.02	344,15	481,81	604,76	451,55
53	18.02	350,72	491,01	616,19	460,09
54	24.02	354,73	496,63	622,71	464,96
55	29.02	355,83	498,16	624,08	465,98

Os Gráficos 19, 20, 21 e 22, que apresentam curvas similares, porém de diferentes unidades de medida. Estas informações compreendem parâmetros importantes no dimensionamento de projetos, com extrapolação dos parâmetros a serem utilizados no processo em escala real.

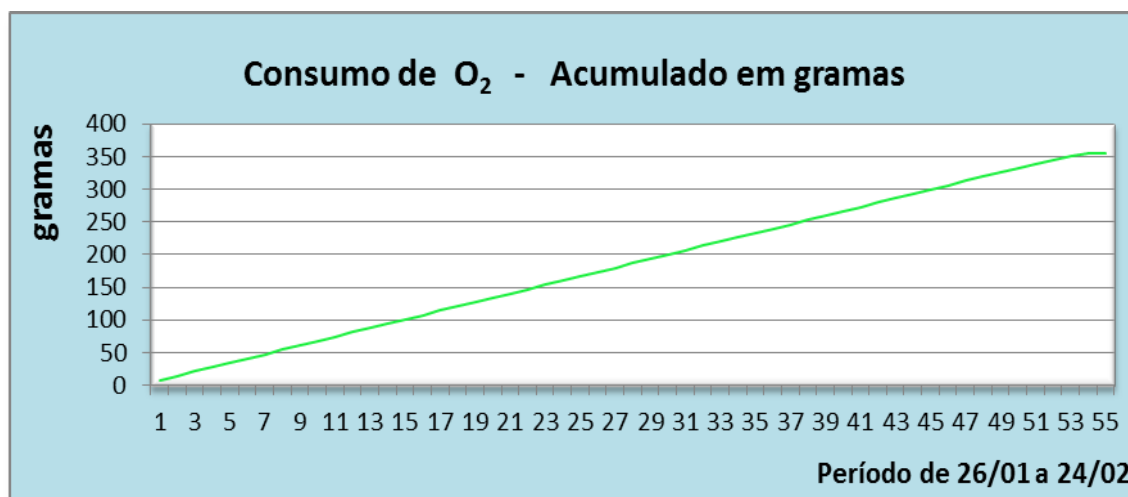


Gráfico 19 – Massa (g) acumulada de oxigênio, consumido no período de processo de compostagem.

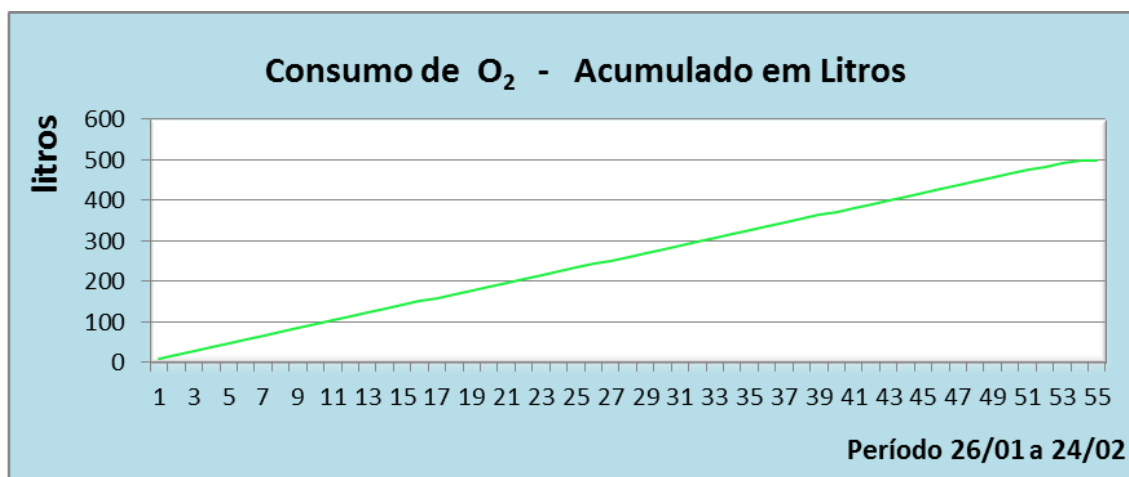


Gráfico 20 – Volume (l) acumulada de oxigênio, consumido no período de processo de compostagem.

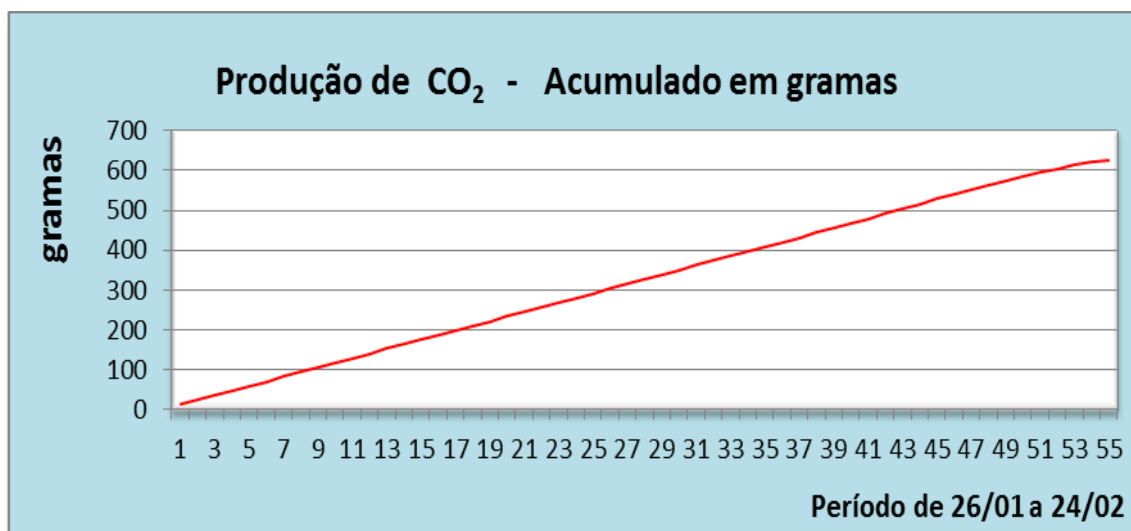


Gráfico 21 – Massa (g) acumulada de gás carbônico, produzido no período de processo de compostagem.

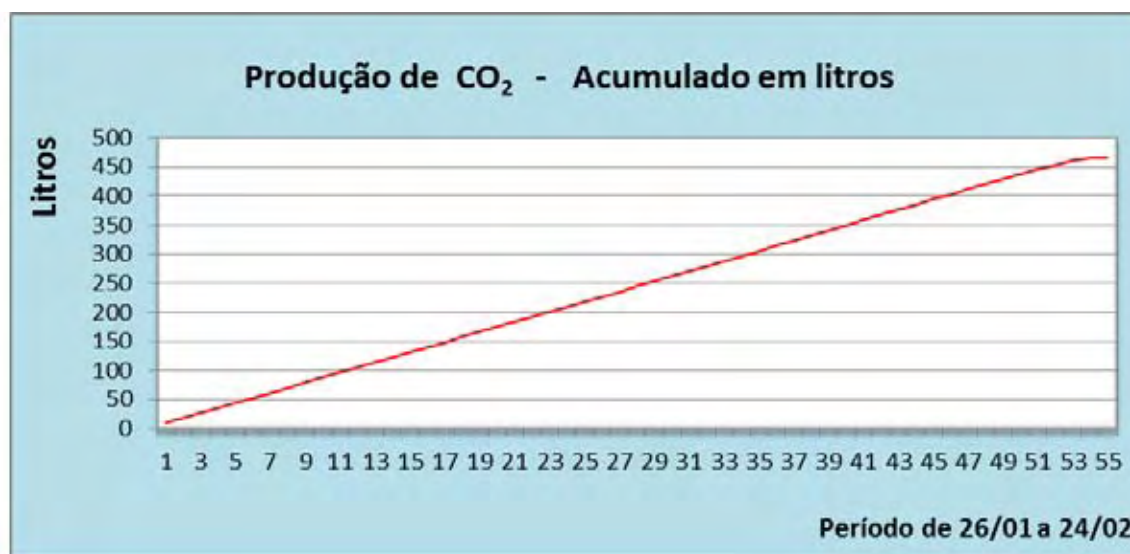


Gráfico 22 – Volume (l) acumulado de gás carbônico, produzido no período de processo de compostagem.

4.2.7 Consumo de oxigênio e produção de gás carbônico em função do tempo de processamento em cada ciclo de purga

Na Tabela 33 apresenta-se o tempo gasto para o consumo de oxigênio e para produção de gás carbônico nas unidades de g/h (massa) e de l/h (volume).

Tabela 33 – Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido, relacionados ao tempo(h) gasto em cada ciclo de purga.

CICLOS DE PURGA	DATA	Consumo de O ₂ (g/h)	Consumo de O ₂ (l/h)	Produção de CO ₂ (g/h)	Produção de CO ₂ (l/h)
1	26.01	0,91	1,28	1,56	1,17
2	27.01	0,84	1,17	1,44	1,07
3	27.01	0,98	1,37	1,71	1,28
4	27.01	0,85	1,19	1,49	1,11
5	28.01	0,76	1,07	1,32	0,99
6	28.01	0,78	1,09	1,38	1,03
7	28.01	1,02	1,43	1,80	1,34
8	29.01	1,10	1,54	1,92	1,43
9	29.01	0,85	1,19	1,48	1,11
10	29.01	0,94	1,32	1,66	1,24
11	29.01	1,39	1,95	2,45	1,83
12	30.01	1,00	1,40	1,69	1,26
13	30.01	0,80	1,12	1,40	1,05
14	30.01	1,30	1,83	2,29	1,71
15	30.01	1,42	1,99	2,51	1,88
16	31.01	0,91	1,27	1,58	1,18
17	31.01	0,93	1,30	1,66	1,24
18	31.01	1,35	1,89	2,40	1,79
19	31.01	1,15	1,60	2,02	1,51
20	01.02	0,67	0,94	1,15	0,86
21	01.02	1,05	1,47	1,89	1,41
22	01.02	1,34	1,88	2,39	1,79
23	02.02	0,84	1,17	1,44	1,08
24	02.02	0,76	1,07	1,33	0,99
25	02.02	1,33	1,86	2,40	1,79
26	03.02	0,91	1,28	1,58	1,18
27	03.02	0,79	1,11	1,42	1,06
28	03.02	1,01	1,41	1,75	1,31
29	04.02	0,84	1,18	1,47	1,10
30	04.02	0,67	0,94	1,18	0,88
31	04.02	0,98	1,38	1,72	1,29
32	05.02	0,77	1,08	1,37	1,02
33	05.02	0,64	0,90	1,13	0,84
34	05.02	0,82	1,15	1,44	1,07
35	06.02	0,49	0,69	0,88	0,66
36	06.02	0,74	1,04	1,32	0,99
37	07.02	0,54	0,76	0,95	0,71
38	07.02	1,61	2,26	2,94	2,19
39	07.02	2,06	2,88	3,75	2,80
40	07.02	1,56	2,19	2,81	2,10
41	08.02	0,99	1,39	1,75	1,30

CICLOS DE PURGA	DATA	Consumo de O ₂ (g/h)	Consumo de O ₂ (l/h)	Produção de CO ₂ (g/h)	Produção de CO ₂ (l/h)
42	08.02	0,97	1,35	1,76	1,31
43	08.02	1,01	1,41	1,77	1,32
44	09.02	1,06	1,48	2,03	1,52
45	09.02	2,27	3,18	4,02	3,00
46	09.02	0,92	1,29	1,57	1,17
47	10.02	0,56	0,78	0,97	0,72
48	10.02	0,77	1,08	1,39	1,04
49	11.02	0,45	0,63	0,79	0,59
50	12.02	0,41	0,57	0,70	0,52
51	15.02	0,30	0,43	0,51	0,38
52	16.02	0,13	0,18	0,19	0,15
53	18.02	0,31	0,44	0,54	0,40
54	24.02	0,12	0,17	0,20	0,15
55	29.02	0,01	0,02	0,02	0,01
MÉDIA		0,91	1,27	1,61	1,20

Através dos valores obtidos e plotados nos Gráficos 23, 24, 25 e 26, é possível obter outros parâmetros importantes, a massa e volume dos gases presentes no reator.

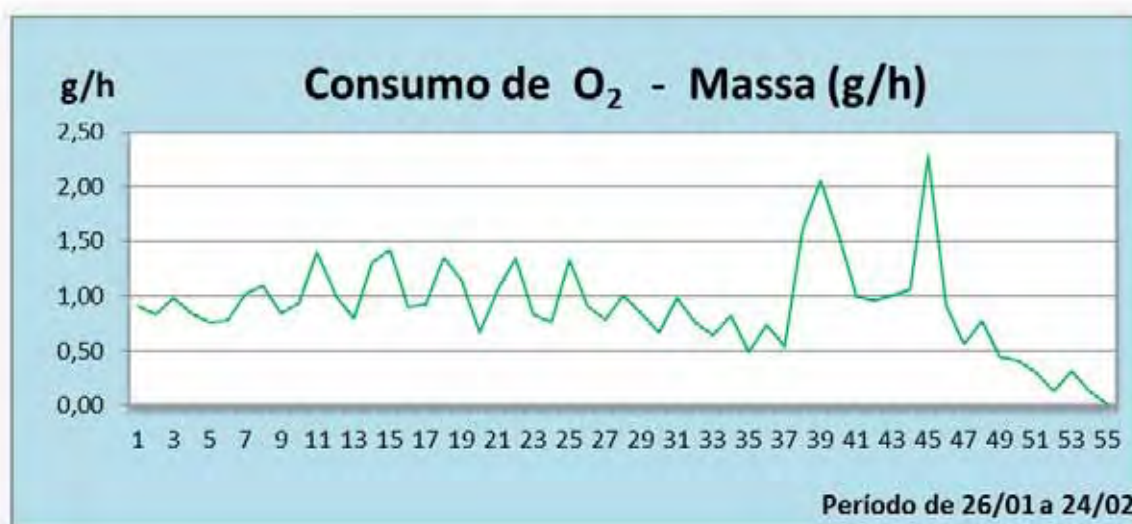


Gráfico 23 – Gramas/hora de oxigênio consumidas no período de processo de compostagem.

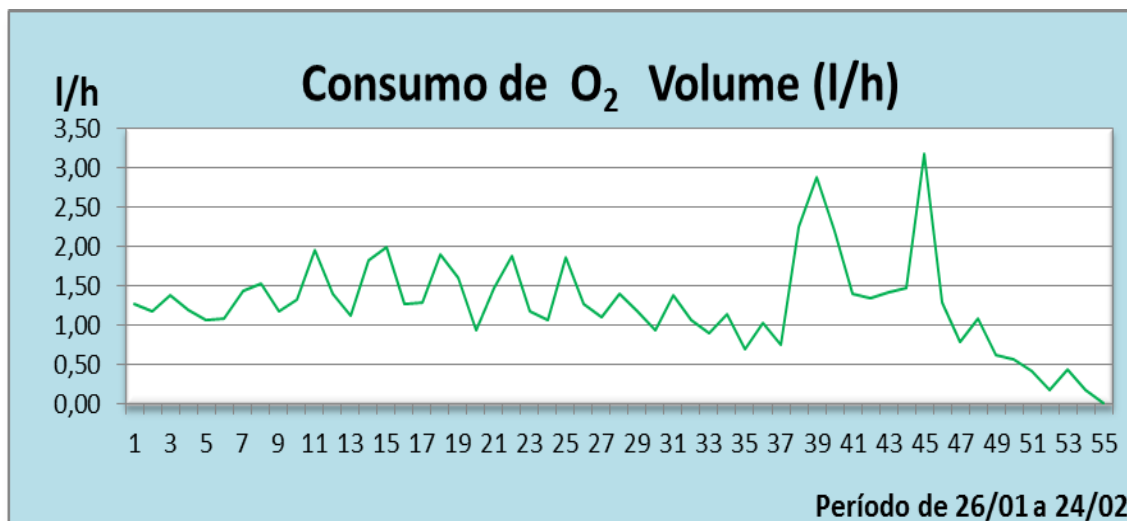


Gráfico 24 – Litros/hora de oxigênio consumidas no período de processo de compostagem.

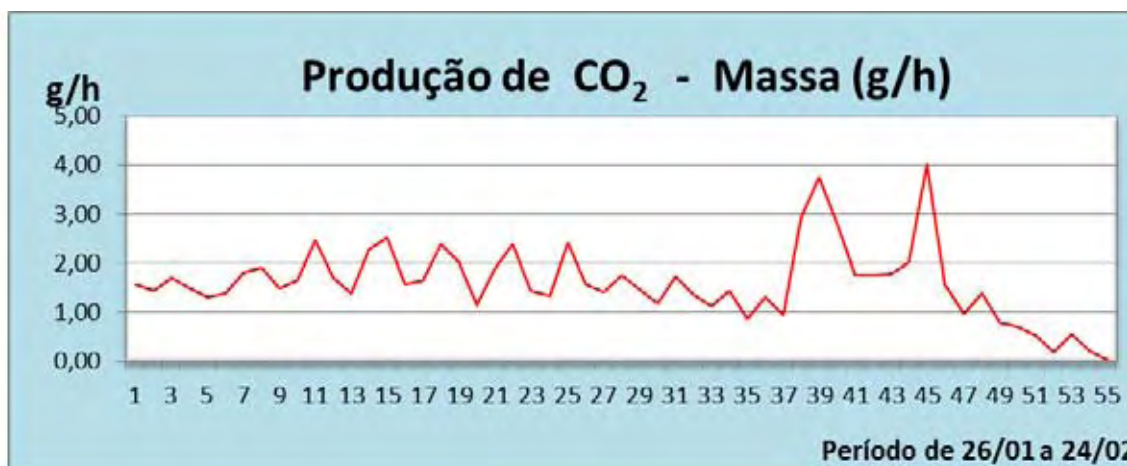


Gráfico 25 – Gramas/hora de gás carbônico produzidas no período de processo de compostagem.

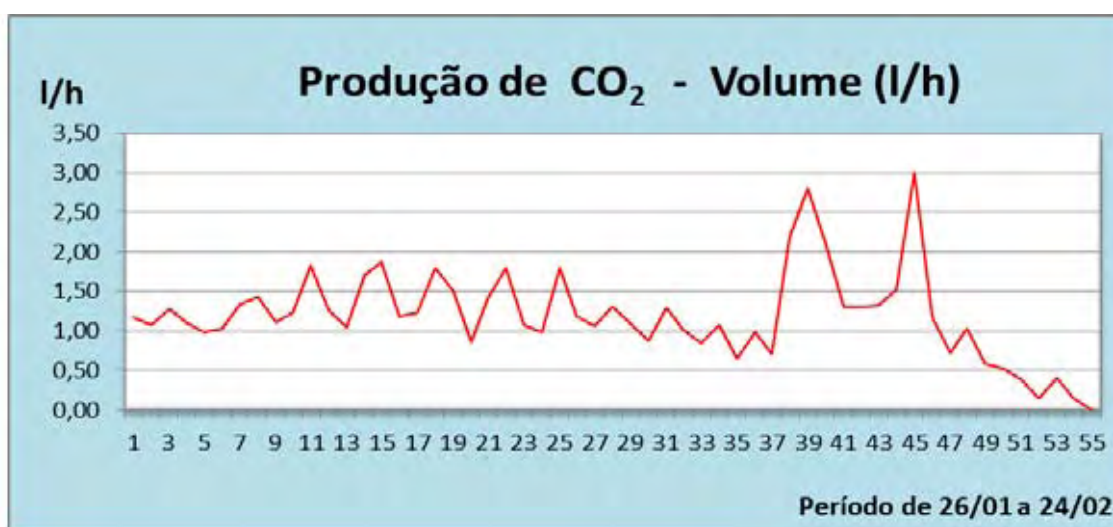


Gráfico 26 – Litros/hora de gás carbônico produzidas no período de processo de compostagem.

Os gráficos, semelhantes, mostram a relação massa/tempo e volume/tempo no processo de compostagem. Demonstram também um período em que o processo teve seu tempo acelerado, entre os ciclos 37 e 46, coincidindo com o momento em que houve um acréscimo de 300 ml de água nos resíduos presentes no reator, corrigindo a umidade baixa (em torno de 33%) que havia sido encontrada através de análise laboratorial da parte sólida.

4.2.8 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), fornece a quantia de oxigênio necessária para decompor certa quantidade de matéria orgânica. Desta forma, com o valor da DBO tem-se a vazão de gás oxigênio necessária para se decompor uma matéria orgânica, assim pode-se calcular o tempo, e quantidade de gás para que ocorra a compostagem, ou seja, é possível fazer o dimensionamento de todo o processo e do reator a ser utilizado.

A DBO é unidade de medida que calcula a quantidade do oxigênio consumido pela atividade bacteriana sendo proporcional ao tempo, ou seja, quanto maior o tempo mais matéria orgânica biodegradável é decomposta pela atividade aeróbica das bactérias. Os valores de DBO que na literatura encontramos representados em sua maioria na unidade de mg/l, por serem medidos em meios líquidos, são aqui demonstrados na Tabela 34 em mg/kg, já que os resíduos encontram-se na fase sólida, no total de 6,954 kg:

Tabela 34 – Valores referentes a produção de CO₂ e consumo de O₂ e cálculo da DBO – demanda bioquímica de oxigênio em mg/kg.

CICLO DE PURGA	DATA	PRODUÇÃO DE CO ₂ (gramas)	CONSUMO DE O ₂ (gramas)	C02 (mg/kg)	DBO - O2 (mg/kg)
1	26.01	13,16	7,70	438,54	1107
2	27.01	11,58	6,76	385,88	972
3	27.01	11,60	6,64	386,68	954
4	27.01	11,81	6,76	393,80	973
5	28.01	11,50	6,64	383,38	955

CICLO DE PURGA	DATA	PRODUÇÃO DE CO₂ (gramas)	CONSUMO DE O₂ (gramas)	C02 (mg/kg)	DBO - O2 (mg/kg)
6	28.01	11,55	6,53	385,07	939
7	28.01	11,71	6,66	390,29	958
8	29.01	11,70	6,69	390,11	962
9	29.01	11,75	6,71	391,63	964
10	29.01	11,49	6,54	383,12	940
11	29.01	11,73	6,66	390,96	957
12	30.01	11,46	6,77	382,04	973
13	30.01	11,74	6,74	391,47	969
14	30.01	11,72	6,67	390,83	960
15	30.01	11,72	6,62	390,75	952
16	31.01	11,49	6,61	383,06	950
17	31.01	11,59	6,48	386,49	932
18	31.01	11,67	6,57	389,01	945
19	31.01	11,44	6,47	381,43	931
20	01.02	11,27	6,55	375,56	943
21	01.02	11,86	6,61	395,36	951
22	01.02	11,93	6,70	397,53	964
23	02.02	11,29	6,55	376,23	942
24	02.02	11,28	6,48	376,07	932
25	02.02	11,98	6,63	399,29	954
26	03.02	11,43	6,58	380,84	946
27	03.02	11,97	6,65	398,84	957
28	03.02	11,63	6,67	387,75	959
29	04.02	11,77	6,73	392,30	968
30	04.02	11,94	6,77	397,98	974
31	04.02	11,63	6,63	387,75	954
32	05.02	11,79	6,62	392,87	952
33	05.02	11,40	6,50	379,93	935
34	05.02	11,39	6,51	379,63	936
35	06.02	11,76	6,59	391,90	948
36	06.02	11,77	6,58	392,20	946
37	07.02	11,38	6,54	379,39	941
38	07.02	12,44	6,82	414,51	981
39	07.02	12,19	6,68	406,31	961
40	07.02	11,84	6,59	394,50	948
41	08.02	11,49	6,54	382,90	941

CICLO DE PURGA	DATA	PRODUÇÃO DE CO ₂ (gramas)	CONSUMO DE O ₂ (gramas)	C02 (mg/kg)	DBO - O2 (mg/kg)
42	08.02	12,16	6,68	405,46	961
43	08.02	11,63	6,62	387,67	951
44	09.02	12,82	6,69	427,18	962
45	09.02	11,52	6,52	384,13	937
46	09.02	11,20	6,56	373,23	943
47	10.02	11,63	6,73	387,64	968
48	10.02	12,22	6,79	407,33	977
49	11.02	11,51	6,54	383,81	940
50	12.02	11,17	6,56	372,24	943
51	15.02	11,24	6,66	374,54	958
52	16.02	7,83	5,06	261,05	727
53	18.02	11,44	6,58	381,27	946
54	24.02	6,52	4,01	217,23	576
55	29.02	1,37	1,10	45,59	158

O Gráfico 27 mostra a evolução da DBO no período de compostagem. Os valores de DBO, apresentados na Tabela 34 obtêm-se a partir da Equação 5:

$$DBO = \frac{O_2(g)}{6,954(kg)} \cdot 1000 \quad (5)$$

Onde:

DBO = Demanda bioquímica de oxigênio;

O₂(g) = total de oxigênio em massa (g), consumido no ciclo de purga;

6,954kg = massa de resíduos presentes no reator;

1000 = para representação dos valores em miligramas.

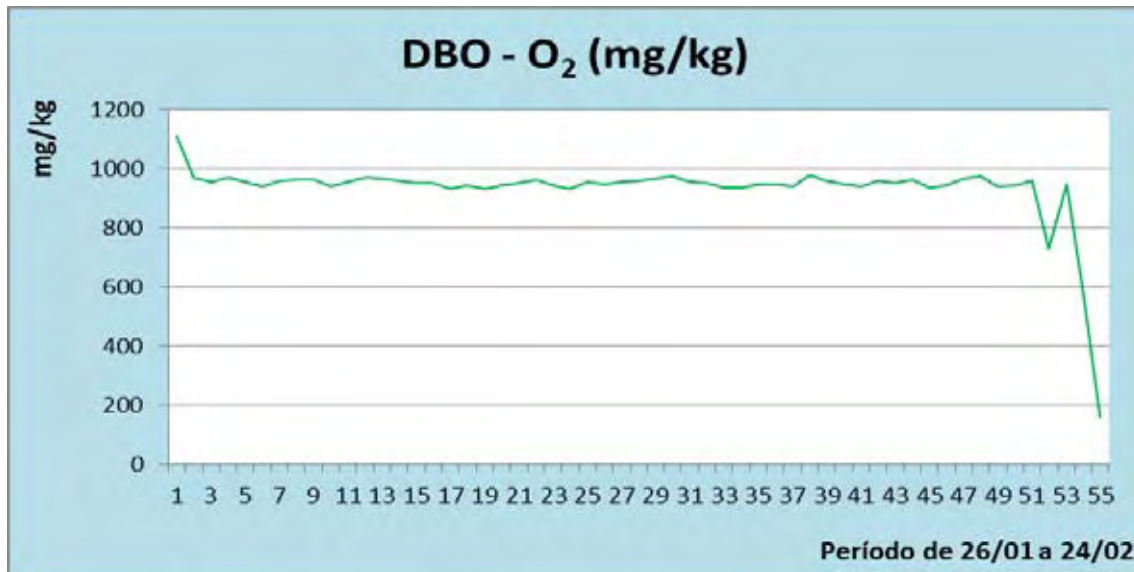


Gráfico 27 – Distribuição da DBO - demanda bioquímica de oxigênio durante o processo de compostagem.

Através do valor da DBO tem-se a vazão de gás oxigênio necessária para se decompor uma matéria orgânica, assim pode-se calcular o tempo, e quantidade de gás para que ocorra a compostagem, ou seja, é possível fazer o dimensionamento de todo o processo e do reator a ser utilizado, e assim também, utilizar seus parâmetros para serem utilizados no processo em escala real.

Observa-se também um índice, correspondente a produção de gás carbônico em massa (g) encontrados pelo seu volume (l), em cada ciclo de purga, através de uma equação, ou seja pode-se calcular a emissão de dióxido de carbono na atmosfera, em litros ou gramas por quilogramas de resíduos, através da Equação 6 e os resultados obtidos visualiza-se no Gráfico 28:

$$CO_2 \left(\frac{mg}{kg} \right) = \frac{CO_2(g)}{6,954(kg)} \cdot 1000 \quad (6)$$

Onde:

$CO_2(mg/l)$ = produção de gás carbônico em miligramas por quilogramas.

$CO_2(g)$ = total de gás carbônico em massa (g), consumido no ciclo de purga.

6,954kg = Valor estimado de resíduos presentes no reator

1000 = para representação dos valores em miligramas

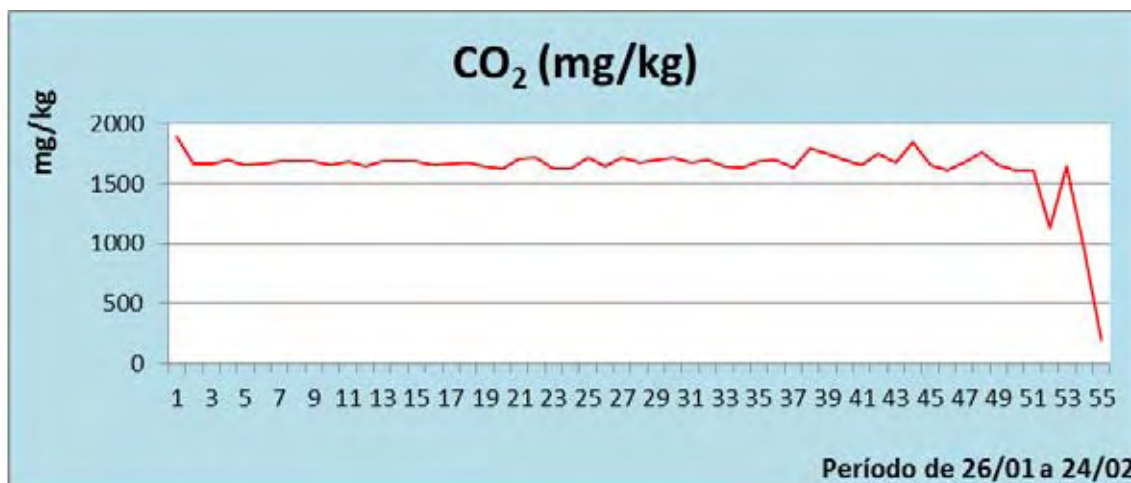


Gráfico 28 – Emissão de gás carbônico em mg/kg, durante o processo de compostagem.

4.2.9 Relação entre a produção de gás carbônico e o consumo de oxigênio, analisados em função do tempo (CO₂/ O₂)

Verifica-se através da Tabela 35 a relação entre a produção de gás carbônico e o consumo de oxigênio, analisados em função do tempo do processo de co-compostagem.

Tabela 35 – Relação entre a produção de gás carbônico e o consumo de oxigênio, analisados em função do tempo.

CICLOS DE PURGA	DATA	RANGE CO ₂	RANGE O ₂	TEMPO (min)	CO ₂ /min	O ₂ /min	CO ₂ / O ₂
1	26.01	16,37	17,96	505	0,03	0,04	0,912
2	27.01	14,41	15,77	484	0,03	0,03	0,913
3	27.01	14,44	15,48	406	0,04	0,04	0,932
4	27.01	14,70	15,78	477	0,03	0,03	0,932
5	28.01	14,31	15,49	521	0,03	0,03	0,924
6	28.01	14,38	15,24	503	0,03	0,03	0,943
7	28.01	14,57	15,55	391	0,04	0,04	0,937
8	29.01	14,56	15,61	366	0,04	0,04	0,933
9	29.01	14,62	15,65	475	0,03	0,03	0,935
10	29.01	14,30	15,25	416	0,03	0,04	0,938
11	29.01	14,60	15,53	287	0,05	0,05	0,940
12	30.01	14,26	15,79	406	0,04	0,04	0,903

CICLOS DE PURGA	DATA	RANGE CO ₂	RANGE O ₂	TEMPO (min)	CO ₂ /min	O ₂ /min	CO ₂ / O ₂
13	30.01	14,62	15,72	503	0,03	0,03	0,930
14	30.01	14,59	15,57	307	0,05	0,05	0,937
15	30.01	14,59	15,45	280	0,05	0,06	0,944
16	31.01	14,30	15,42	437	0,03	0,04	0,927
17	31.01	14,43	15,12	420	0,03	0,04	0,955
18	31.01	14,52	15,33	292	0,05	0,05	0,947
19	31.01	14,24	15,11	339	0,04	0,04	0,943
20	01.02	14,02	15,29	589	0,02	0,03	0,917
21	01.02	14,76	15,43	377	0,04	0,04	0,957
22	01.02	14,84	15,64	299	0,05	0,05	0,949
23	02.02	14,05	15,29	470	0,03	0,03	0,919
24	02.02	14,04	15,12	509	0,03	0,03	0,929
25	02.02	14,91	15,47	299	0,05	0,05	0,963
26	03.02	14,22	15,35	433	0,03	0,04	0,926
27	03.02	14,89	15,52	505	0,03	0,03	0,959
28	03.02	14,48	15,55	398	0,04	0,04	0,931
29	04.02	14,65	15,70	480	0,03	0,03	0,933
30	04.02	14,86	15,80	605	0,02	0,03	0,940
31	04.02	14,48	15,48	405	0,04	0,04	0,935
32	05.02	14,67	15,45	517	0,03	0,03	0,950
33	05.02	14,18	15,16	605	0,02	0,03	0,935
34	05.02	14,17	15,19	475	0,03	0,03	0,933
35	06.02	14,63	15,38	803	0,02	0,02	0,952
36	06.02	14,64	15,35	533	0,03	0,03	0,954
37	07.02	14,16	15,27	721	0,02	0,02	0,928
38	07.02	15,48	15,91	254	0,06	0,06	0,973
39	07.02	15,17	15,59	195	0,08	0,08	0,973
40	07.02	14,73	15,38	253	0,06	0,06	0,958
41	08.02	14,30	15,27	395	0,04	0,04	0,936
42	08.02	15,14	15,60	415	0,04	0,04	0,971
43	08.02	14,47	15,44	394	0,04	0,04	0,937
44	09.02	15,95	15,60	379	0,04	0,04	1,022
45	09.02	14,34	15,21	172	0,08	0,09	0,943
46	09.02	13,93	15,31	428	0,03	0,04	0,910
47	10.02	14,47	15,71	723	0,02	0,02	0,921
48	10.02	15,21	15,85	528	0,03	0,03	0,959

CICLOS DE PURGA	DATA	RANGE CO ₂	RANGE O ₂	TEMPO (min)	CO ₂ /min	O ₂ /min	CO ₂ / O ₂
49	11.02	14,33	15,25	877	0,02	0,02	0,939
50	12.02	13,90	15,30	960	0,01	0,02	0,908
51	15.02	13,98	15,55	2410	0,01	0,01	0,899
52	16.02	9,75	11,80	1266	0,01	0,01	0,826
53	18.02	14,23	15,35	1927	0,01	0,01	0,927
54	24.02	8,11	9,35	4414	0,00	0,00	0,867
55	29.02	1,70	2,56	2929	0,00	0,00	0,665
MÉDIA		14,12	15,10	650,13	0,03	0,04	0,93

Verifica-se a relação encontrada, em cada linha de dados recebida, entre o percentual CO₂ e o percentual de O₂ (CO₂/O₂) observando-se também no Gráfico 29. Este índice varia de 0,8% a 1% aproximadamente, no período que em que o processo está na fase mais ativa, a medida que o processo se aproxima do final, este índice atingi entre 0,6% e 0,8%.

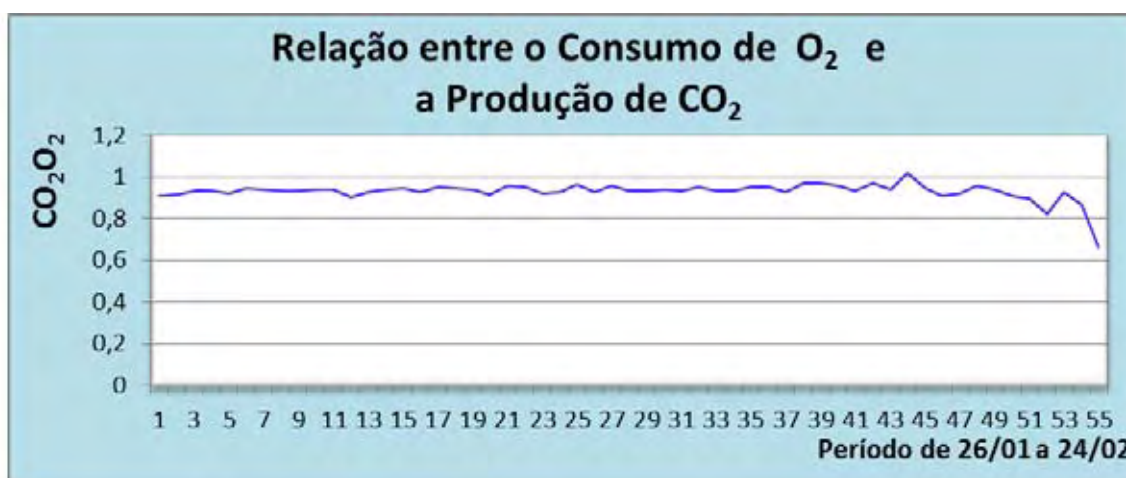


Gráfico 29 – Relação entre a produção de CO₂ e o consumo de O₂ obtidos em cada ciclo de purga.

4.2.10 Análises laboratoriais complementares do composto em seu estado sólido

Antes do início do processo, o lodo de esgoto passou por um processo de análise laboratorial em sua fase sólida, pelo técnico Gilberto Sebastião

Castilho Filho, no laboratório de hidrologia do DAE-Departamento de Água e Esgotos de Bauru, localizada Faculdade de Engenharia da Unesp, Câmpus de Bauru, e obteve-se os resultados da Tabela 36:

Tabela 36 – Análise bioquímica do lodo de esgoto em fase sólida, realizados no laboratório de análises do DAE Bauru.

Data	DQO – O ₂ (mg/L)	DBO – O ₂ (mg/L)	pH	Umidade (%)
19/1	348	43	7,12	-

Durante o processo de compostagem, a mistura de resíduos (lodo de esgoto e poda de grama) também passou por análises laboratoriais o pH e a umidade e seus valores encontrados, observa-se na Tabela 37:

Tabela 37 – Análise bioquímica dos resíduos em compostagem na sua fase sólida.

Data	pH	Umidade (%)
19/1	-	27,13
26/1	7,23	38,69
6/2	7,59	33,58
15/2	8,17	33,72
2/3	8,59	25,74

Verifica-se no Gráfico 30 que a umidade, apresentou índices entre 25% e 40%, abaixo portanto, dos índices considerados ótimos para o processo, que seriam entre 50 e 65%.

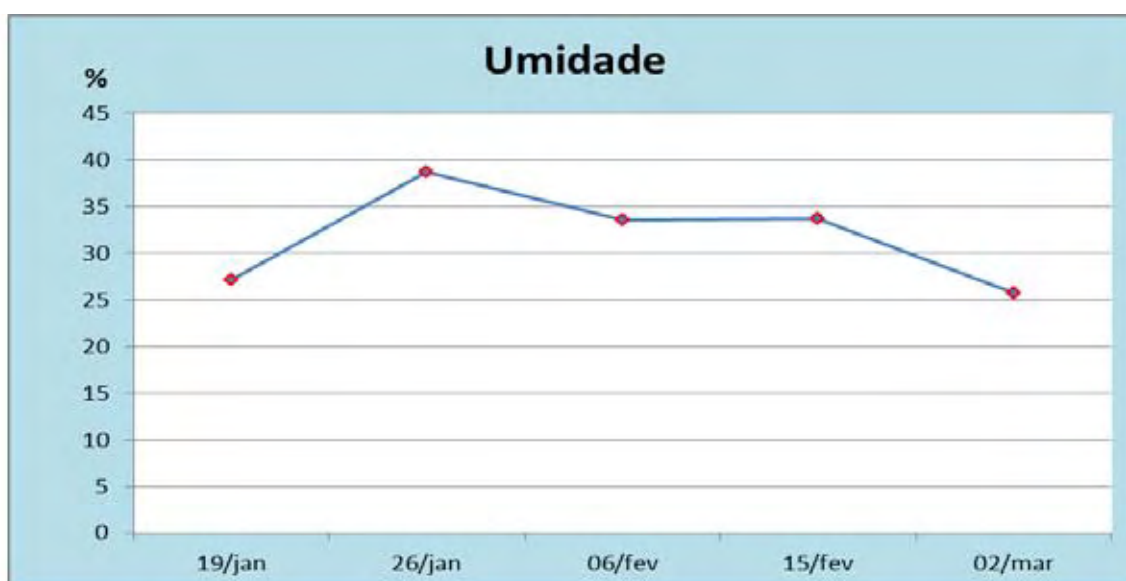


Gráfico 30 – Distribuição da medida de umidade apresentada pelo composto durante o período de compostagem.

Através do Gráfico 31 o fator de análise é o pH, encontrado no início próximo da neutralidade (7) e transformando-se durante o processo num meio de pH alcalino, entre 7,5 e 8,5.

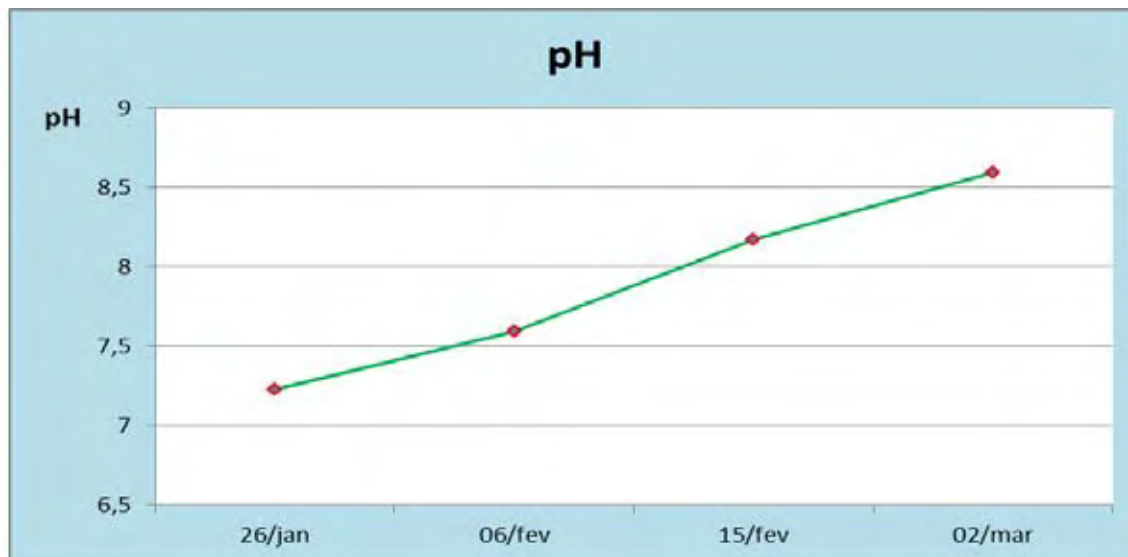


Gráfico 31 – Distribuição da medida de pH apresentada pelo composto durante o período de compostagem.

Foram realizadas também, análises complementares do composto final, pelo Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Unesp, câmpus de Botucatu, conforme Tabela 38. Verificou-se que o pH corresponde ao encontrado nas análises realizadas no Laboratório do DAE, e que estão dentro dos valores ótimos de estabilização do composto.

Tabela 38 – Análises laboratoriais realizadas pelo Laboratório de Fertilizantes e Corretivos da Unesp, câmpus de Botucatu.

AMOSTRA(S)	C%	N%	U-65°C%	C/N	pH
Composto-2	22,67	1,44	14,62	16/1	8,02

Verifica-se nestes resultados que os parâmetros, pH (8,02) e a relação C/N (16/1), estão nos parâmetros citados na bibliografia, como indicadores de estabilidade do composto.

4.3 RESULTADOS OBTIDOS NA TERCEIRA BATELADA, CO-COMPOSTAGEM UTILIZANDO-SE OS RESÍDUOS DE LODO DE ESGOTO, BAGAÇO DE CANA DE AÇUCAR E BORRA DE CAFÉ

Os dados desta segunda batelada foram analisados com seu início no dia 21 de junho de 2012, sendo que o consumo de oxigênio teve início somente em 27 de junho, quando foi acrescentado 50g de fertilizante solúvel, contendo nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) na proporção 20x20x20, o que acelerou a atividade bacteriana. A estabilização do composto, verificado a partir da estabilidade na taxa de consumo de oxigênio e, conseqüentemente o encerramento dos ciclos de purga e da coleta de dados do processo, ocorreu em 29 de julho, obtendo-se 31.375 linhas de dados.

Pode-se visualizar, através da Figura 65, o resultado físico obtido pelo processo na terceira batelada, observando que a massa do composto foi reduzida para 5,570 kg.

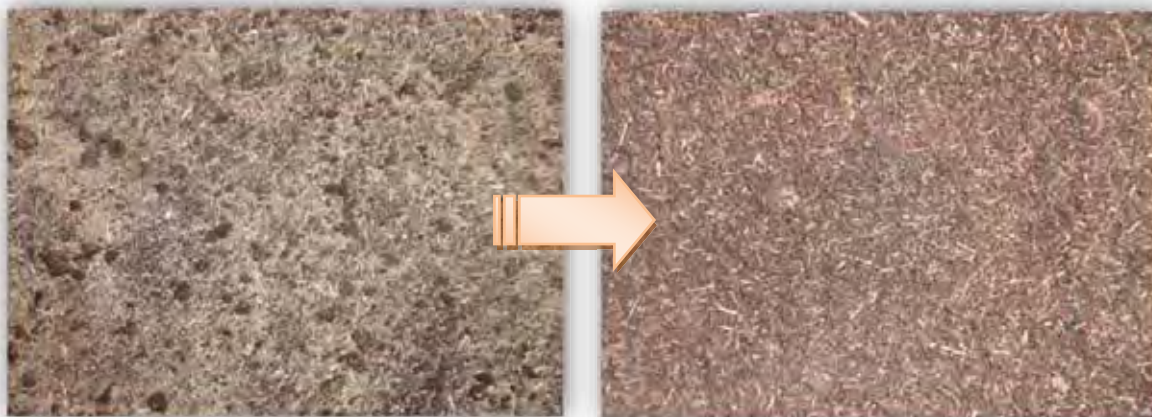


Figura 65 – Composto no início do processo compostagem da terceira batelada e ao final do processo de co-compostagem de lodo de esgoto, bagaço de cana-de-açúcar e borra de pó de café.

A automação dos ciclos de purga não foi realizada nesta batelada, em função da desconfiguração que ocorreu no analisador de gases após o mesmo ser calibrado. Optou-se por fazer a purga manualmente, utilizando-se como valor mínimo de range 3% de oxigênio.

Nesta terceira batelada, os dados obtidos também foram tratados, organizados em tabelas, e plotados para geração de gráficos, utilizando-se o software Excel, sendo analisadas conforme os seguintes critérios de análise.

4.3.1 Tempo de processamento da terceira batelada de co-compostagem

Na Tabela 39 são apresentados os dados obtidos nesta batelada, indicam o tempo gasto para que o consumo de O₂, a partir do início do processo, com percentual encontra-se apresentando o valor de aproximadamente 21% do total da mistura gasosa no interior do reator, sendo reduzido para o valor de até 3% dessa mistura, a partir do qual ativou-se manualmente a purga, isto é, a eliminação da mistura gasosa e a introdução de ar ambiente.

Tabela 39 – Tempo gasto para consumo do oxigênio existente no interior do reator em cada ciclo de purga.

CICLOS DE PURGA	DATA DE ENCERRAMENTO	TEMPO (min)	TEMPO (h)	MINUTOS ACUMULADOS	HORAS ACUMULADAS
1	29.06	7508	125,13	7508	125,13
2	02.07	770	12,83	15016	250,27
3	03.07	1313	21,88	15786	263,10
4	05.07	1440	24,00	17099	284,98
5	06.07	1424	23,73	18539	308,98
6	10.07	1488	24,80	19963	332,72
7	11.07	1470	24,50	21451	357,52
8	12.07	1121	18,68	22921	382,02
9	13.07	1307	21,78	24042	400,70
10	17.07	1323	22,05	25349	422,48
11	19.07	2121	35,35	26672	444,53
12	20.07	1509	25,15	28793	479,88
13	21.07	1380	23,00	30302	505,03
14	22.07	480	8,00	31682	528,03
15	23.07	503	8,38	32162	536,03
16	25.07	1434	23,90	32665	544,42
17	26.07	1635	27,25	34099	568,32
18	29.07	3118	51,97	35734	595,57
TEMPO MÉDIO		1741,33	29,02	-	-

Verificou-se que, no total, foram completados 18 ciclos de purga, no tempo total de 595,57 horas, em 39 dias de processo, com tempo médio de purga de aproximadamente 29h02min cada.

O Gráfico 32 apresenta o tempo de consumo de O_2 com relação ao volume total de gases no interior do reator, para os intervalos entre cada uma das purgas. Verificou-se que para o período de 21 de junho a 29 de julho, isto é, no primeiro ciclo do processo, o tempo de consumo foi muito alto.

Seguindo determinações de Akutsu *et al.* (2009), adicionou-se 50g de fertilizante NPK solúvel, na proporção 20x20x20, para que o processo de decomposição fosse agilizado. No último ciclo do processo o tempo gasto no consumo aumenta continuamente, período no qual, conclui-se, que ocorreu a estabilização na decomposição do composto.

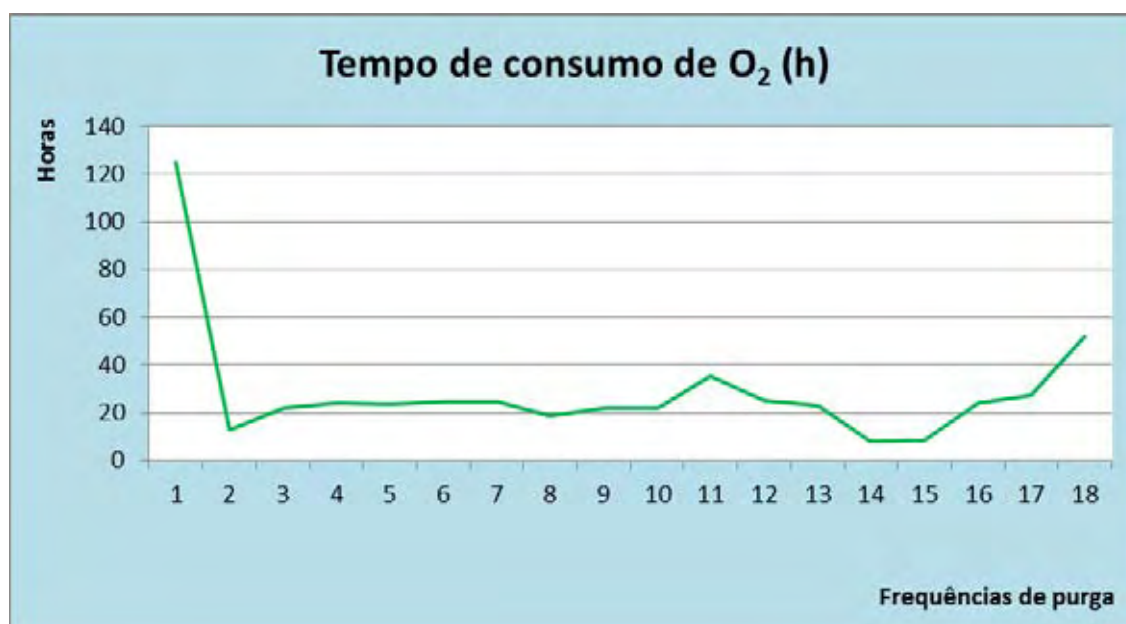


Gráfico 32 – Tempo gasto para consumo de O_2 até que o mesmo atinja 3% do valor total dos gases dentro do reator.

O Gráfico 33 apresenta o consumo acumulado de O_2 ao longo do período, considerando o volume da fase gasosa do reator. Tocante com o Gráfico 32, ratifica-se que os maiores consumos de O_2 também ocorre a partir de 09 de fevereiro, indicando maior intensidade das atividades bacterianas.

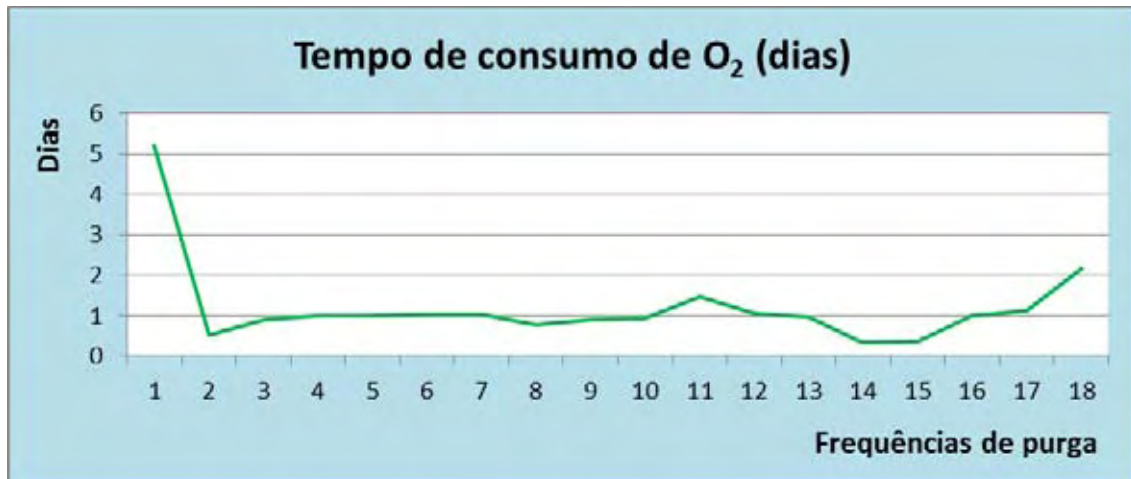


Gráfico 33 – Curva representativa do tempo gasto acumulado para se consumir o O₂ até que o mesmo atinja 3% do valor total dentro do reator.

4.3.2 Taxa de consumo de oxigênio (TCO) durante o processo da segunda batelada de co-compostagem

Analisando-se o Gráfico 34, ressalta-se que a faixa de range analisada no O₂, isto é, a faixa que refere-se à amplitude delimitada por um valor mínimo e um valor máximo de dados, foi estabelecida entre 3% e 22%, para esta batelada. Nota-se que o percentual não fica abaixo de 5%, valor mínimo programado de range e, no momento em que atinge este valor, é o mesmo em que ocorrerá a purga dos gases. Ao término de cada purga o valor do percentual atinge seu máximo, entre 20% e 21%, onde o ar no interior do reator é eliminado e introduzido um novo volume de gás do ambiente externo.

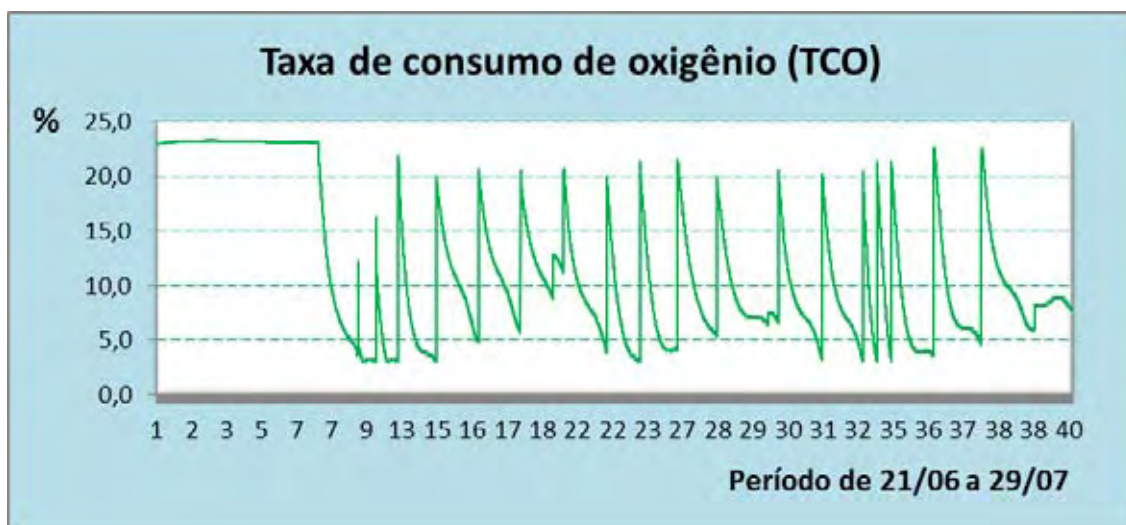


Gráfico 34 – Representação da velocidade do processo do consumo de O₂ obtidos a partir de cada linha de dados coletada.

Verifica-se que no início do processo o consumo de oxigênio não ocorre até o dia 27 de junho, momento em que foi adicionado 50g de fertilizante solúvel NPK, a partir deste ponto (sétimo dia do período), o processo se inicia, sofrendo uma variação intensa do processo até por volta do dia 09 de julho (vigésimo dia do processo), onde a intensidade diminui. No dia 10 de julho adicionou-se mais 50g de fertilizante solúvel NPK. O consumo de oxigênio voltou a acelerar até o dia 18 de julho (29º dia do período), quando estabilizou-se novamente.

No dia 19 de julho, adicionou-se pela terceira vez 50g de fertilizante solúvel NPK, o que fez com que o consumo de oxigênio fosse retomado até o 40º dia, quando estabilizou-se por completo. Não adicionou-se novamente o fertilizante por constatarmos através de análises laboratoriais que o pH e DBO apresentavam índices que indicariam a estabilidade do processo. Taxa de geração de gás carbônico TGCO₂, durante o processamento da segunda batelada de co-compostagem.

4.3.3 Taxa de geração de gás carbônico TGCO₂, durante o processamento da segunda batelada de co-compostagem

Paralelamente ao consumo de oxigênio, a produção de CO₂, durante o período do processo de compostagem, pode ser observado no Gráfico 35.

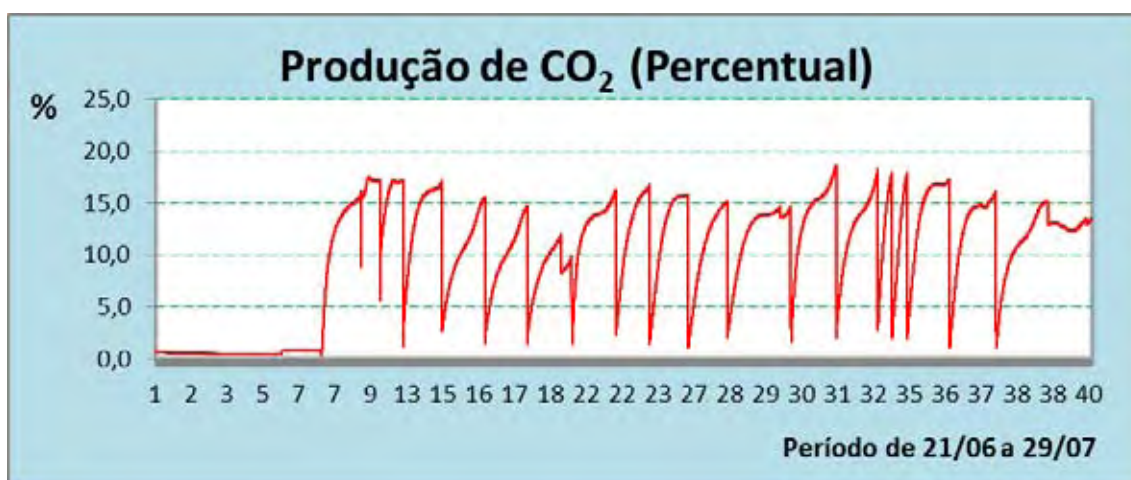


Gráfico 35 – Representação do processo de produção de CO₂ obtidos a partir de cada linha de dados coletada.

A produção de CO_2 no processo é inversamente proporcional ao consumo de O_2 , sendo que as intervenções que alteraram o consumo de oxigênio (adição de fertilizantes) atuaram também na produção de CO_2 . Assim quando no interior do reator, se tem elevada porcentagem de O_2 , ter-se-á baixa porcentagem de CO_2 . Com o desenvolvimento de atividades bacterianas, o consumo de O_2 aumenta (o que reduz sua porcentagem no interior do reator) e proporcionalmente a esta redução, obtem-se o aumento de CO_2 .

4.3.4 Relação percentual entre a velocidade de consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico

Plotando-se os valores percentuais da presença de CO_2 e O_2 obtidos nas linhas de dados, e observando-as simultaneamente, obtem-se o Gráfico 36, que indica que a produção de CO_2 é inversamente proporcional a produção de O_2 , isto é, no momento em que a produção de CO_2 atinge um baixo percentual é o consumo de O_2 está apresentando um alto percentual e, no momento em que a produção de CO_2 atinge um alto percentual é o mesmo momento no qual o consumo de O_2 apresenta um baixo percentual.

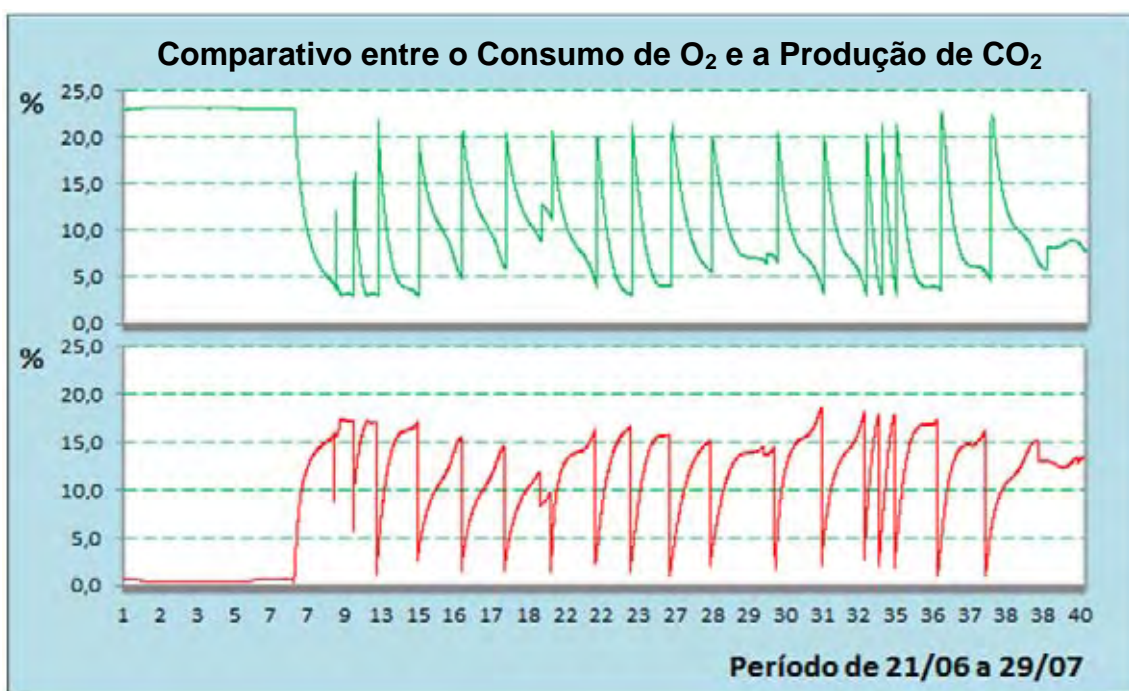


Gráfico 36 – Representação da relação obtida entre o progresso do consumo de O_2 e o progresso da produção de CO_2 , obtidos a partir de cada linha de dados coletada.

Ao final do período, verifica-se que as variações de ambos não estão mais com a mesma frequência do início do processo, indicando a estabilização do mesmo.

4.3.5 Relação entre o consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico, analisados pelas unidades de massa e volume

Através da Tabela 40, verifica-se as relações entre o consumo de oxigênio e a produção de gás carbônico, analisados sob as unidades de medida de massa (gramas) e de volume (litros) em cada um dos 18 ciclos de purga que ocorreram durante o período de decomposição dos resíduos orgânicos, que podem ser utilizados em projetos de dimensionamento de reatores em altas escalas.

Tabela 40 – Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido em cada ciclo de purga.

CICLOS DE PURGA	DATA	% O ₂	% CO ₂	CONSUMO DE O ₂ (gramas)	CONSUMO DE O ₂ (litros)	PRODUÇÃO DE CO ₂ (gramas)	PRODUÇÃO DE CO ₂ (litros)
1	29.06	19,879	16,537	8,52	11,93	13,29	9,92
2	02.07	6,508	5,778	2,79	3,90	4,64	3,47
3	03.07	17,144	15,360	7,35	10,29	12,34	9,22
4	05.07	15,231	12,990	6,53	9,14	10,44	7,79
5	06.07	14,368	12,713	6,16	8,62	10,22	7,63
6	10.07	9,367	7,411	4,01	5,62	5,96	4,45
7	11.07	16,439	14,516	7,05	9,86	11,66	8,71
8	12.07	16,989	14,481	7,28	10,19	11,64	8,69
9	13.07	15,989	14,395	6,85	9,59	11,57	8,64
10	17.07	14,841	13,885	6,36	8,90	11,16	8,33
11	19.07	13,419	12,022	5,75	8,05	9,66	7,21
12	20.07	16,807	15,331	7,20	10,08	12,32	9,20
13	21.07	17,263	15,383	7,40	10,36	12,36	9,23
14	22.07	16,946	15,217	7,26	10,17	12,23	9,13
15	23.07	17,327	15,931	7,43	10,40	12,80	9,56
16	25.07	16,665	15,415	7,14	10,00	12,39	9,25
17	26.07	15,111	14,501	6,48	9,07	11,65	8,70
18	29.07	12,301	9,692	5,27	7,38	7,79	5,82
TOTAL				116,83	163,56	194,11	144,93

A Tabela 40 apresenta os seguintes dados calculados em cada um dos ciclos de purga:

- a) Percentual de O_2 – apresenta o range entre o percentual inicial (início da purga) menos o percentual final (purga).
- b) Percentual de CO_2 – apresenta o range entre o percentual inicial (início da purga) menos o percentual final (purga).
- c) Consumo de O_2 – Massa - valores em gramas calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, conforme a Equação 7:

$$O_2(g) = \frac{60 \times 16 \times \%O_2}{22,4} \quad (7)$$

Onde:

60 l = volume aproximado da mistura gasosa presentes no reator;

16 = massa de 1 mol de O_2 ;

% O_2 = range percentual de oxigênio presente na mistura gasosa;

22,4 l = volume que ocupa 1 mol de O_2 nas condições normais de temperatura e pressão.

Observa-se através do Gráfico 37, um consumo inicial muito baixo, e a necessidade de intervenção no processo nos dias 27 de junho, 10 e 17 de julho, adicionando-se o fertilizante solúvel NPK, e reativando o processo.

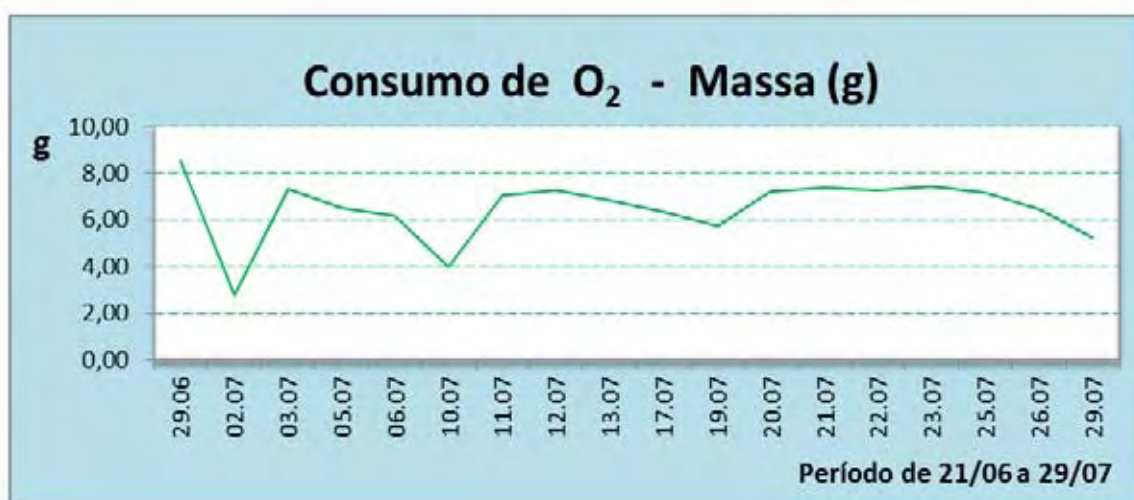


Gráfico 37 – Consumo de oxigênio expresso em massa (g) distribuído no período do processo.

Ao final este consumo cai progressivamente, mais um dado que confirma o final do processo de decomposição dos resíduos. Verifica-se também

através do Gráfico 37 que, ao final do período de 40 dias, foram consumidos aproximadamente 116,83 gramas de oxigênio.

- d) Consumo de O_2 – Volume - valores em litros calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, conforme a Equação 8:

$$O_2(l) = \frac{\%O_2 \times 22,4}{16} \quad (8)$$

Onde:

- $\% O_2$ = range percentual de oxigênio presente na mistura gasosa;
- 22,4 l = volume que ocupa 1 mol de O_2 nas condições normais de temperatura e pressão;
- 16 = massa de 1 mol de O_2 .

No Gráfico 38, também pode-se verificar o consumo de oxigênio através do período de 40 dias do processo, porém este consumo é determinado em volume (litros) por ciclo.

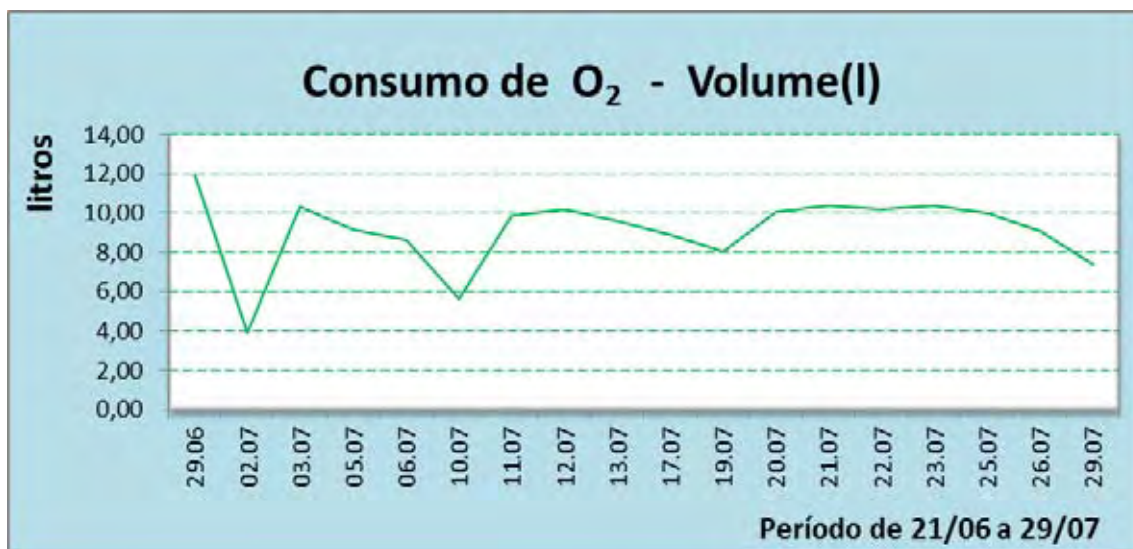


Gráfico 38 – Consumo de oxigênio expresso em volume(l) distribuído no período do processo.

Este gráfico é semelhante ao Gráfico 37, e a análise dos dados apresentados é a mesma. Obtem-se também uma totalização do volume de litros de oxigênio consumido, de aproximadamente 163,56 litros.

e) Produção de CO_2 – Massa - valores em gramas calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, através da Equação 9:

$$CO_2(g) = \frac{60 \times 30 \times \% CO_2}{22,4} \quad (9)$$

Onde:

60 l = volume aproximado da mistura gasosa presentes no reator;

30 = massa de 1 mol de CO_2 ;

% CO_2 = range percentual de gás carbônico presente na mistura gasosa;

22,4 l = volume que ocupa 1 mol de O_2 nas condições normais de temperatura e pressão.

Analisa-se no Gráfico 39 a produção de gás carbônico durante os ciclos de purga, neste caso utilizou-se como unidade de medida a massa (gramas). Verifica-se também neste Gráfico uma baixa produção inicial de gás carbônico, e a necessidade de intervenção no processo nos dias 27 de junho, 10 e 17 de julho, adicionando-se o fertilizante solúvel NPK, e reativando o processo. A produção total de gás carbônico, valor dado em massa, foi de aproximadamente 194,11g.

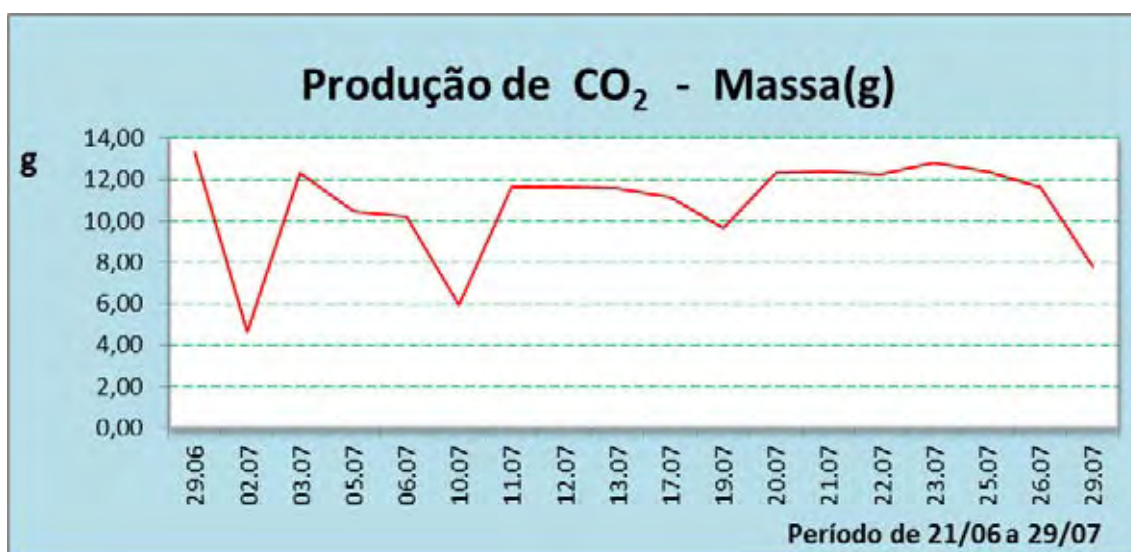


Gráfico 39 – Produção de gás carbônico expresso em massa (g) distribuído no período do processo.

- f) Consumo de CO₂ – Volume – valores em litros calculados utilizando-se como volume aproximado de resíduos o valor de 30 litros, através da Equação 10:

$$CO_2(l) = \frac{\%CO_2 \times 22,4}{30} \quad (10)$$

Onde:

- % CO₂ = range percentual de gás carbônico na mistura gasosa;
- 22,4 l = volume que ocupa 1 mol de CO₂ nas condições normais de temperatura e pressão;
- 30 = massa de 1 mol de CO₂.

Verifica-se no Gráfico 40 o volume (em litros), referentes a produção total de gás carbônico, no processo. O total apresentado nesta unidade de medida foi de aproximadamente 144,93 litros. A linha de análise de dados é semelhante a apresentada no Gráfico 17.

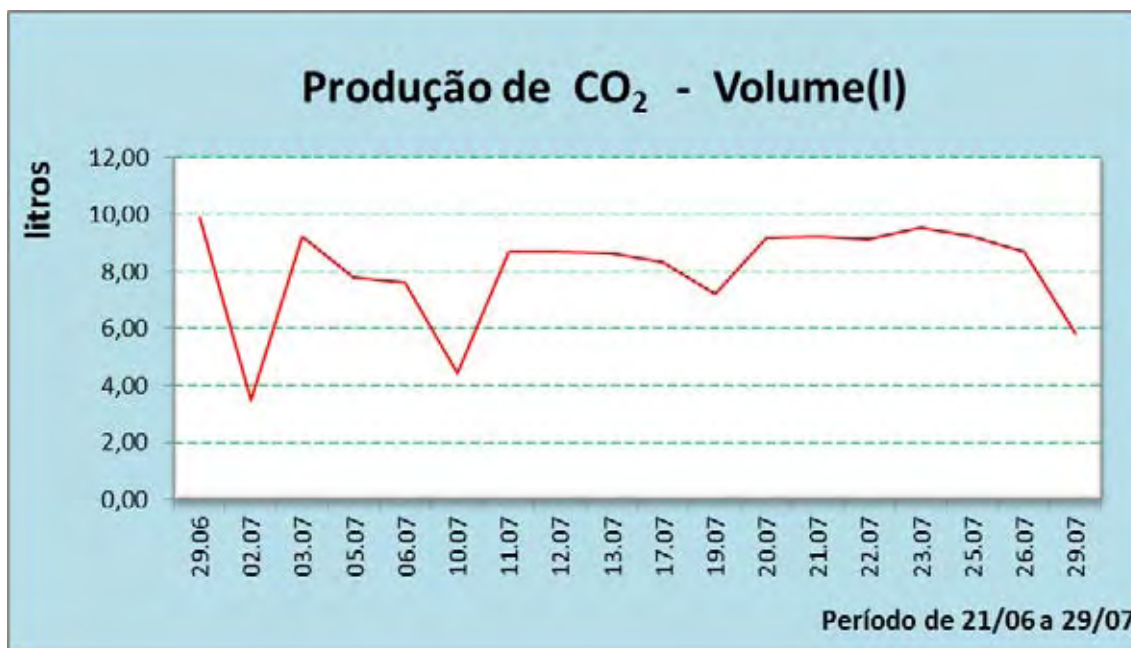


Gráfico 40 – Produção de gás carbônico expresso em volume (l) distribuído no período do processo.

4.3.6 Consumo de oxigênio e produção de gás carbônico acumulados no período

Na Tabela 41, tem-se os valores apresentados na Tabela 20, onde pode-se verificar a massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido em cada ciclo de purga, mas com seus valores acumulados durante o período.

Tabela 41 – Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido, acumulados durante o período de ciclos de purga.

CICLOS DE PURGA	DATA	ACUMULADO O ₂ - (gramas)	ACUMULADO O ₂ - (Litros)	ACUMULADO CO ₂ - (gramas)	ACUMULADO CO ₂ - (Litros)
1	29.06	8,52	11,93	13,29	9,92
2	02.07	11,31	15,83	17,93	13,39
3	03.07	18,66	26,12	30,27	22,61
4	05.07	25,18	35,26	40,71	30,40
5	06.07	31,34	43,88	50,93	38,03
6	10.07	35,36	49,50	56,88	42,47
7	11.07	42,40	59,36	68,55	51,18
8	12.07	49,68	69,56	80,19	59,87
9	13.07	56,53	79,15	91,75	68,51
10	17.07	62,90	88,05	102,91	76,84
11	19.07	68,65	96,10	112,57	84,05
12	20.07	75,85	106,19	124,89	93,25
13	21.07	83,25	116,55	137,25	102,48
14	22.07	90,51	126,71	149,48	111,61
15	23.07	97,94	137,11	162,28	121,17
16	25.07	105,08	147,11	174,67	130,42
17	26.07	111,55	156,18	186,32	139,12
18	29.07	116,83	163,56	194,11	144,93

Verifica-se nos Gráficos 41, 42, 43 e 44, o consumo de O₂ acumulado que apresentam curvas similares, porém de diferentes unidades de medida. Estas informações compreendem parâmetros importantes no dimensionamento de projetos, com extrapolação dos parâmetros a serem utilizados no processo em escala real.



Gráfico 41 – Massa (g) acumulada de oxigênio, consumido no período de processo de compostagem.

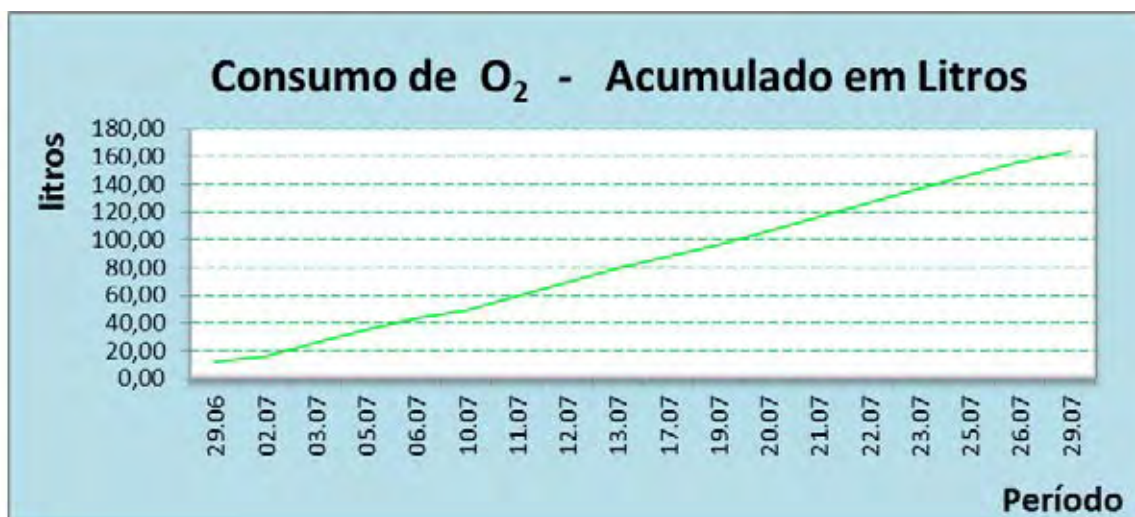


Gráfico 42 – Volume (l) acumulado de oxigênio, consumido no período de processo de compostagem.

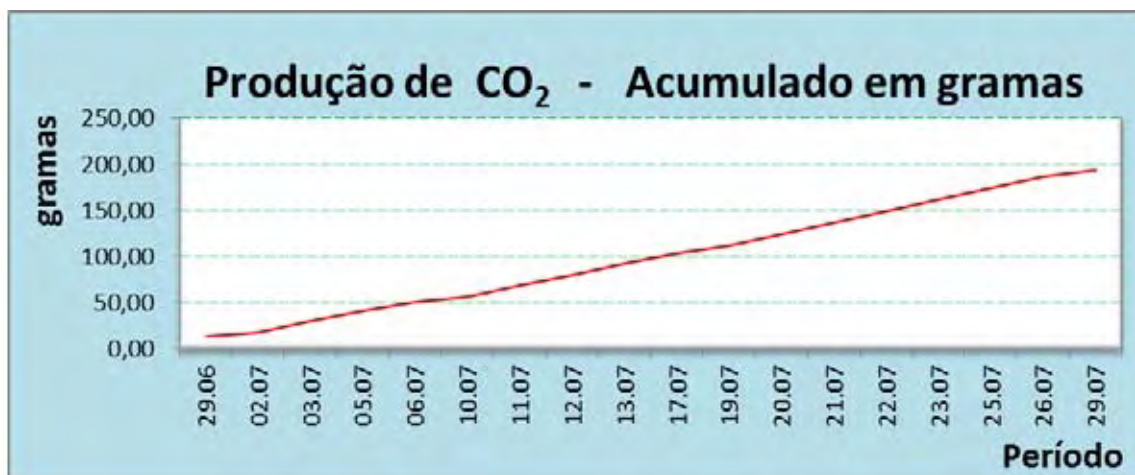


Gráfico 43 – Massa (g) acumulada de gás carbônico, produzido no período de processo de compostagem.

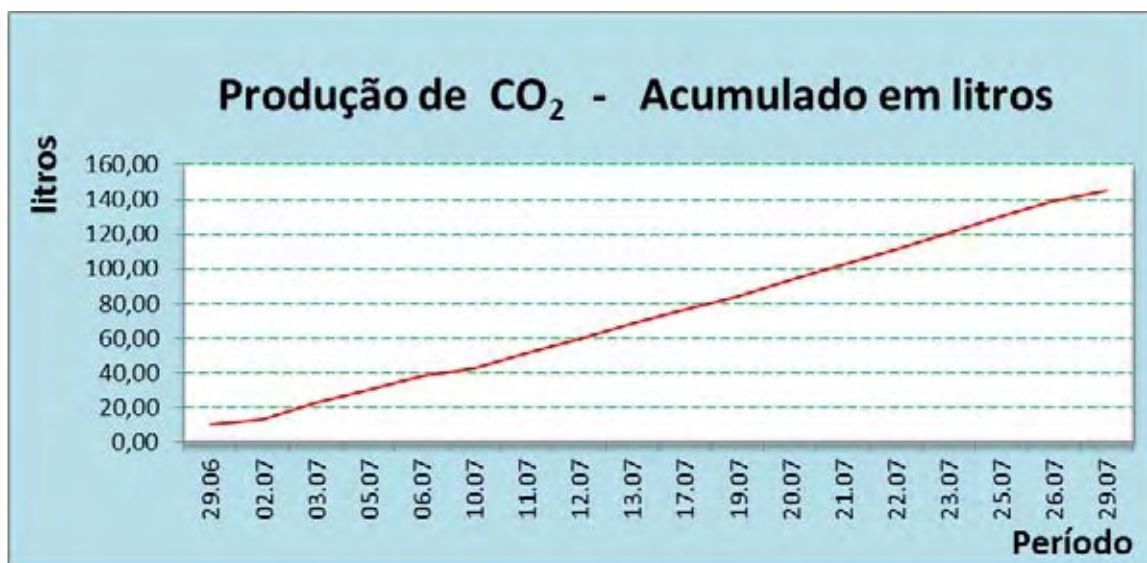


Gráfico 44 – Volume (l) acumulado de gás carbônico, produzido no período de processo de compostagem.

4.3.7 Consumo de oxigênio e produção de gás carbônico em função do tempo de processamento em cada ciclo de purga

Na Tabela 42 apresenta-se o tempo gasto para o consumo de oxigênio e para produção de gás carbônico nas unidades de g/h (massa/hora) e de l/h (volume/hora).

Tabela 42 – Massa e volume de oxigênio consumido e massa e volume de gás carbônico produzido, relacionados ao tempo(h) gasto em cada ciclo de purga.

CICLOS DE PURGA	DATA	Consumo de O ₂ (g/h)	Consumo de O ₂ (L/h)	Produção de CO ₂ (g/h)	Produção de CO ₂ (L/h)
1	29.06	0,068	0,095	0,106	0,079
2	02.07	0,217	0,304	0,361	0,270
3	03.07	0,336	0,470	0,564	0,421
4	05.07	0,272	0,381	0,435	0,325
5	06.07	0,259	0,363	0,430	0,321
6	10.07	0,162	0,227	0,240	0,179
7	11.07	0,288	0,403	0,476	0,355
8	12.07	0,390	0,546	0,623	0,465
9	13.07	0,315	0,440	0,531	0,396
10	17.07	0,288	0,404	0,506	0,378
11	19.07	0,163	0,228	0,273	0,204
12	20.07	0,286	0,401	0,490	0,366
13	21.07	0,322	0,450	0,537	0,401

CICLOS DE PURGA	DATA	Consumo de O ₂ (g/h)	Consumo de O ₂ (L/h)	Produção de CO ₂ (g/h)	Produção de CO ₂ (L/h)
14	22.07	0,908	1,271	1,528	1,141
15	23.07	0,886	1,240	1,527	1,140
16	25.07	0,299	0,418	0,518	0,387
17	26.07	0,238	0,333	0,428	0,319
18	29.07	0,101	0,142	0,150	0,112
MÉDIA		0,322	0,451	0,540	0,403

Através dos valores obtidos e plotados nos Gráficos 45, 46, 47 e 48 obtêm-se também através destes dados, outros parâmetros importantes no dimensionamento de projetos, a massa e volume dos gases presentes no reator, informações que extrapolam os parâmetros a serem utilizados no processo em escala real.

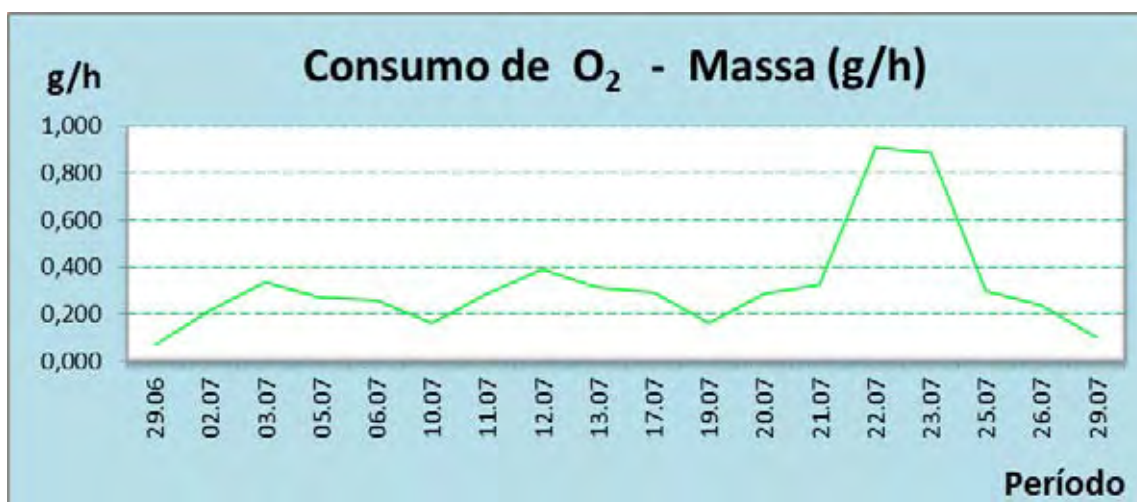


Gráfico 45 – Gramas/hora de oxigênio consumidas no período de processo de compostagem.



Gráfico 46 – Litros/hora de oxigênio consumidas no período de processo de compostagem.

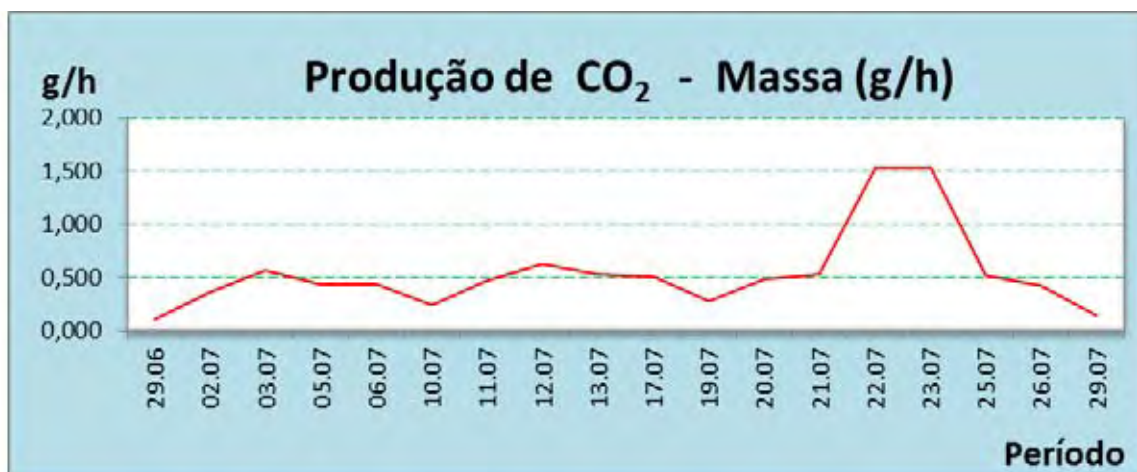


Gráfico 47 – gramas/hora de gás carbônico produzidas no período de processo de compostagem.

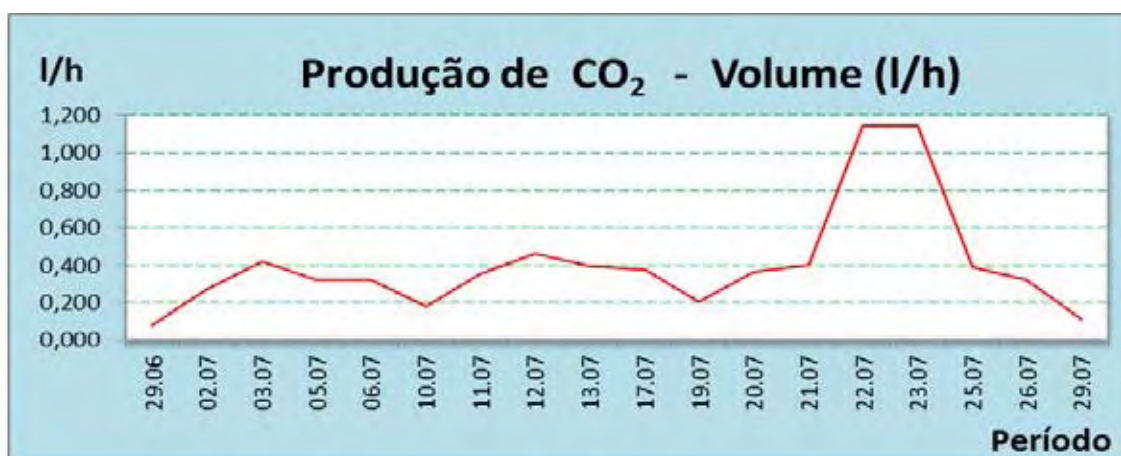


Gráfico 48 – Litros/hora de gás carbônico produzidas no período de processo de compostagem.

Os gráficos, semelhantes, mostram a relação massa/tempo e volume/tempo no processo de compostagem. Demonstram também um período em que o processo teve seu tempo acelerado, entre os dias 21 e 25 de julho, após o último acréscimo de fertilizante solúvel NPK.

4.3.8 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Assim como na segunda batelada, os valores de DBO demonstrados na Tabela 43 em mg/kg, já que os resíduos encontram-se na fase sólida, no total de 6,5 kg:

Tabela 43 – Valores referentes a produção de CO₂ e consumo de O₂ e cálculo da DBO – demanda bioquímica de oxigênio em mg/kg.

CICLO DE PURGA	DATA	PRODUÇÃO DE CO ₂ (gramas)	CONSUMO DE O ₂ (gramas)	C02 (mg/kg)	DBO - O2 (mg/kg)
1	29.06	13,29	8,52	2044	1311
2	02.07	4,64	2,79	668	401
3	03.07	12,34	7,35	1775	1057
4	05.07	10,44	6,53	1501	939
5	06.07	10,22	6,16	1469	885
6	10.07	5,96	4,01	856	577
7	11.07	11,66	7,05	1677	1013
8	12.07	11,64	7,28	1673	1047
9	13.07	11,57	6,85	1663	985
10	17.07	11,16	6,36	1604	915
11	19.07	9,66	5,75	1389	827
12	20.07	12,32	7,20	1772	1036
13	21.07	12,36	7,40	1778	1064
14	22.07	12,23	7,26	1758	1044
15	23.07	12,80	7,43	1841	1068
16	25.07	12,39	7,14	1781	1027
17	26.07	11,65	6,48	1676	931
18	29.07	7,79	5,27	1120	758

O Gráfico 49 mostra a evolução da DBO no período de compostagem. Os valores de DBO, apresentados na Tabela 43 obtêm-se a partir da Equação 11:

$$DBO = \frac{O_2(g)}{6,5(kg)} \cdot 1000 \quad (11)$$

Onde:

DBO = Demanda bioquímica de oxigênio;

O₂(g) = total de oxigênio em massa (g), consumido no ciclo de purga;

6,5kg = massa de resíduos presentes no reator;

1000 = para representação dos valores em miligramas.

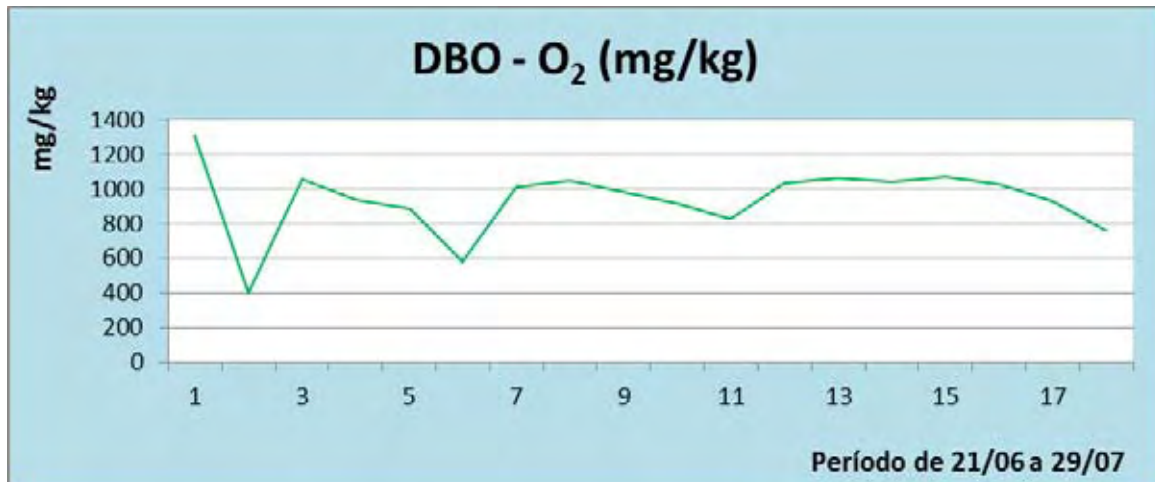


Gráfico 49 – Distribuição da DBO - demanda bioquímica de oxigênio durante o processo de compostagem.

Através do valor da DBO tem-se a vazão de gás oxigênio necessária para se decompor a matéria orgânica, assim pode-se calcular o tempo, e quantidade de gás para que ocorra a compostagem, ou seja, é possível fazer o dimensionamento de todo o processo e do reator a ser utilizado, e assim também, utilizar seus parâmetros para serem utilizados no processo em escala real.

Observou-se também um índice, correspondente a produção de gás carbônico em massa (g) encontrados pelo seu volume (l), em cada ciclo de purga, ou seja, pode-se calcular a emissão de dióxido de carbono na atmosfera, em litros ou gramas por quilogramas de resíduos, através da Equação 12 e os resultados obtidos visualiza-se no Gráfico 50:

$$CO_2 \left(\frac{mg}{kg} \right) = \frac{CO_2(g)}{6,5(kg)} \cdot 1000 \quad (12)$$

Onde:

$CO_2(mg/l)$ = produção de gás carbônico em miligramas por quilogramas.

$CO_2(g)$ = total de gás carbônico em massa (g), consumido no ciclo de purga.

6,5kg = Valor estimado de resíduos presentes no reator

1000 = para representação dos valores em miligramas

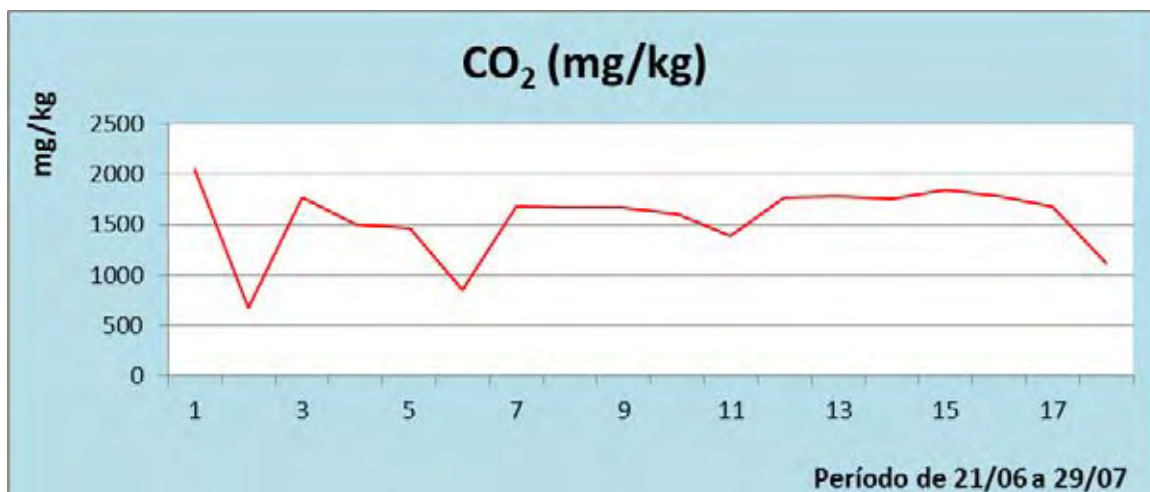


Gráfico 50 – Emissão de gás carbônico em mg/kg, durante o processo de compostagem.

4.3.9 Relação entre a produção de gás carbônico e o consumo de oxigênio, analisados em função do tempo (CO₂/ O₂)

Verifica-se através da Tabela 44 a relação entre a produção de gás carbônico e o consumo de oxigênio, analisados em função do tempo do processo de co-compostagem.

Tabela 44 – Relação entre a produção de gás carbônico e o consumo de oxigênio, analisados em função do tempo.

CICLOS DE PURGA	DATA	RANGE CO ₂	RANGE O ₂	TEMPO (min)	CO ₂ /min	O ₂ /min	CO ₂ / O ₂
1	29.06.12	16,537	19,879	7508,000	0,002	0,003	0,832
2	02.07.12	5,778	6,508	771,000	0,007	0,008	0,888
3	03.07.12	15,360	17,144	1313,000	0,012	0,013	0,896
4	05.07.12	12,990	15,231	1440,000	0,009	0,011	0,853
5	06.07.12	12,713	14,368	1424,000	0,009	0,010	0,885
6	10.07.12	7,411	9,367	1488,000	0,005	0,006	0,791
7	11.07.12	14,516	16,439	1470,000	0,010	0,011	0,883
8	12.07.12	14,481	16,989	1121,000	0,013	0,015	0,852
9	13.07.12	14,395	15,989	1307,000	0,011	0,012	0,900
10	17.07.12	13,885	14,841	1323,000	0,010	0,011	0,936

CICLOS DE PURGA	DATA	RANGE CO ₂	RANGE O ₂	TEMPO (min)	CO ₂ /min	O ₂ /min	CO ₂ / O ₂
11	19.07.12	12,022	13,419	2121,000	0,006	0,006	0,896
12	20.07.12	15,331	16,807	1509,000	0,010	0,011	0,912
13	21.07.12	15,383	17,263	1380,000	0,011	0,013	0,891
14	22.07.12	15,217	16,946	480,000	0,032	0,035	0,898
15	23.07.12	15,931	17,327	503,000	0,032	0,034	0,919
16	25.07.12	15,415	16,665	1434,000	0,011	0,012	0,925
17	26.07.12	14,501	15,111	1635,000	0,009	0,009	0,960
18	29.07.12	9,692	12,301	3118,000	0,003	0,004	0,788
MÉDIA		13,420	15,144	1741,389	0,011	0,013	0,884

Verifica-se a relação encontrada, em cada linha de dados recebida, entre o percentual CO₂ e o percentual de O₂ (CO₂/O₂) observando-se também no Gráfico 51. Este índice varia de 0,8% a 0,9% aproximadamente, no período que em que o processo está na fase mais ativa, a medida que o processo se aproximou do final, este índice estabilizou-se em 0,8%.

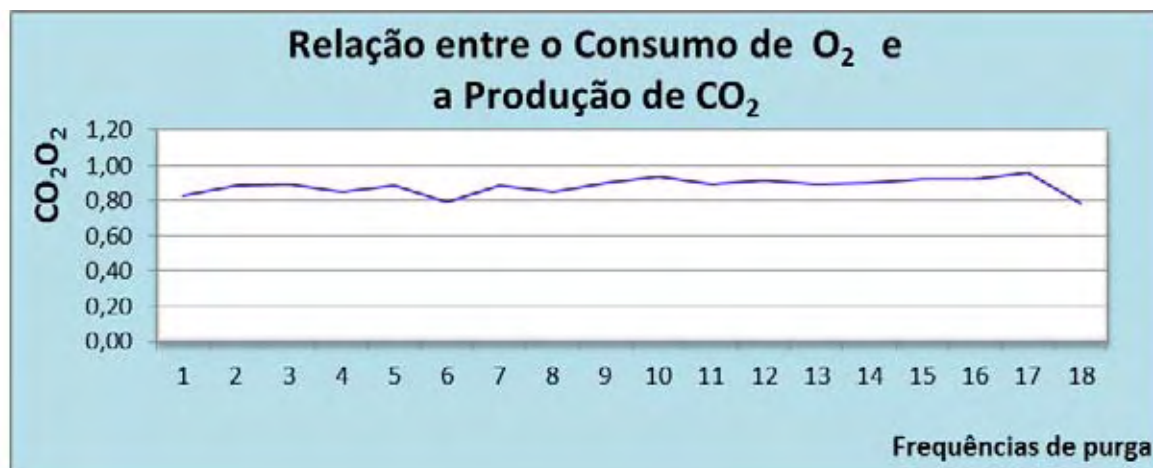


Gráfico 51 – Relação entre a produção de CO₂ e o consumo de O₂ obtidos em cada ciclo de purga.

4.3.10 Análises laboratoriais complementares do composto em seu estado sólido

Antes do início do processo, o lodo de esgoto passou por um processo de análise laboratorial em sua fase sólida, no laboratório de hidrologia do DAE-

Departamento de Água e Esgotos de Bauru, localizada Faculdade de Engenharia da Unesp, Câmpus de Bauru, sendo que os resultados estão apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 – Análise bioquímica dos resíduos em compostagem na sua fase sólida.

Data	Umidade	pH	Sólidos Fixos (%)	Sólidos Voláteis (%)
22/jun	39,7	-	-	-
25/jun	63,81	-	-	-
03/jul	61,7	-	23,57	76,43
09/jul	63,87	5,97	19,17	80,83
16/jul	69,47	5,64	18,15	81,75
22/jul	68,95	5,85	26,56	73,44
30/jul	73,76	5,63	18,17	81,83
02/ago	68,37	6,59	25,37	74,63

Destaca-se na Tabela 45 os valores de pH e umidade, valores estes que puderam ser avaliados através da análise gasosa do processo e que também ainda não estão automatizadas.

Verifica-se no Gráfico 52 que a umidade, apresentou índices entre 39,7% no início do processo, sendo corrigido no segundo dia e 73,76% quando do seu final, mas durante o processo este índice teve em média 63,70%, portanto índice considerado ótimos para o processo, que seriam entre 50% e 65%.

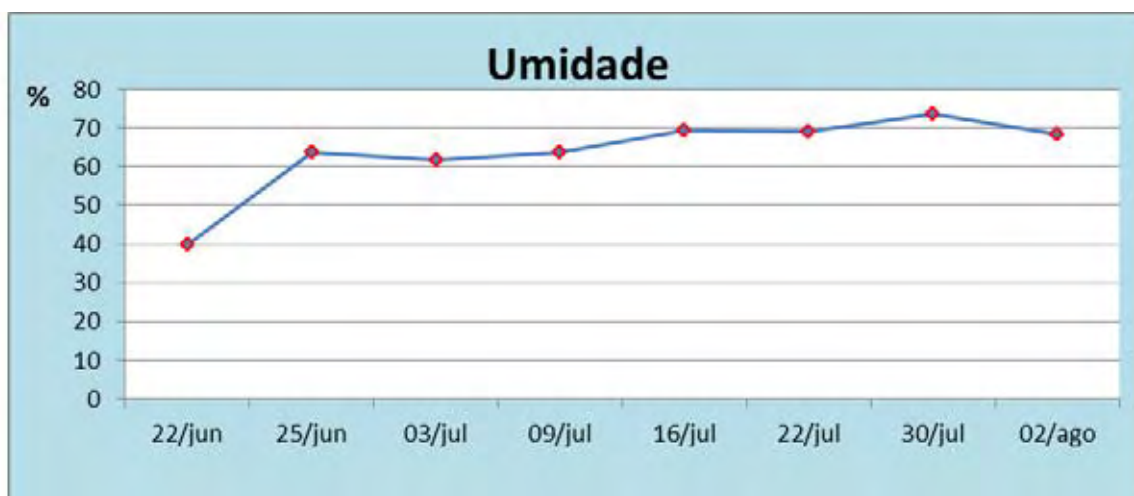


Gráfico 52 – Distribuição da medida de umidade apresentada pelo composto durante o período de compostagem.

Através do Gráfico 53 o fator de análise é o pH, encontrando em seu encerramento ou estabilização do processo pH 6,59, muito próximo da neutralidade (7), parâmetro que também atesta a estabilização do composto.

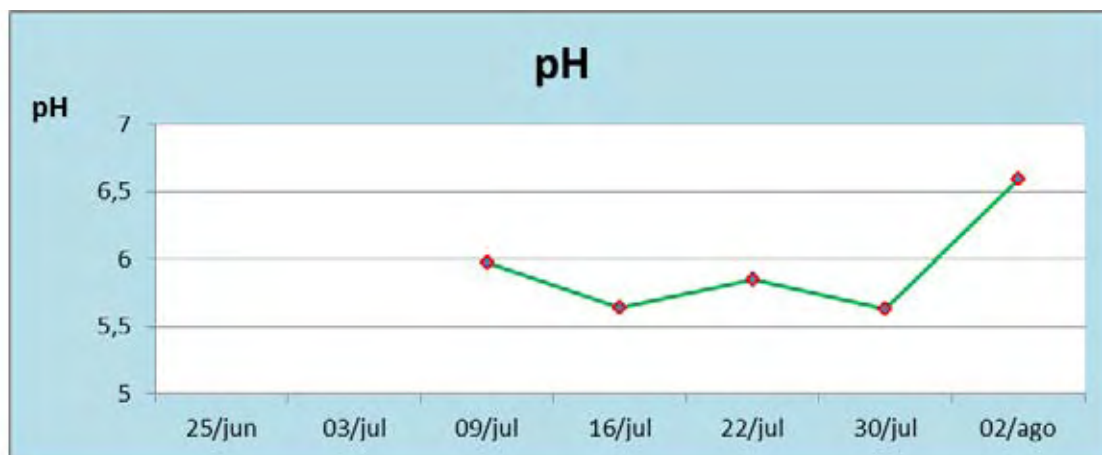


Gráfico 53 – Distribuição da medida de pH apresentada pelo composto durante o período de compostagem.

No seu encerramento também foram analisados e encontrados os valores de DBO = 462 e DQO = 2300, índices que também estão dentro dos parâmetros esperados na estabilização do composto.

Analisou-se ainda os valores de sólidos fixos e sólidos voláteis, índices que podem ser visualizados através dos Gráficos 54 e 55.

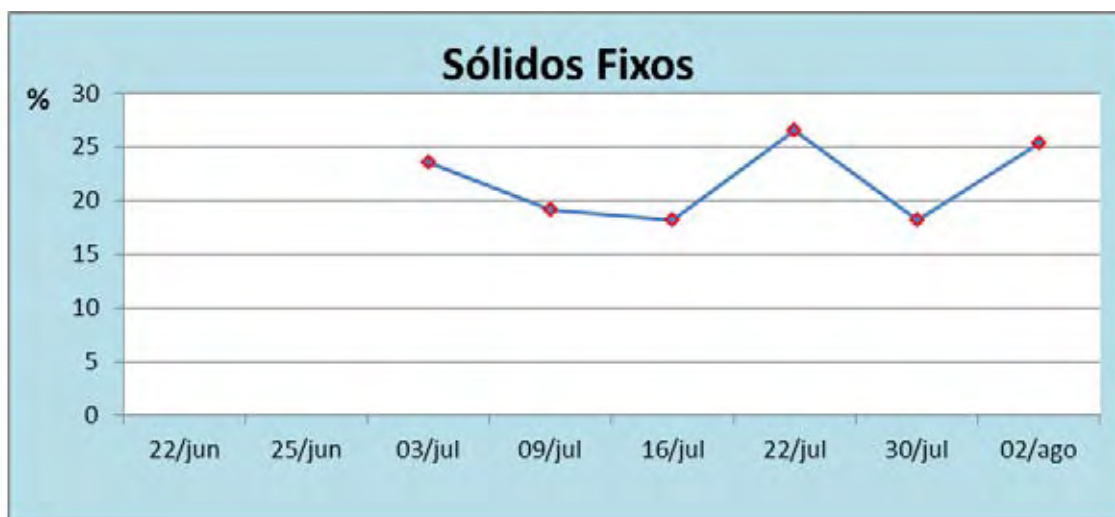


Gráfico 54 – Evolução dos índices percentuais dos sólidos fixos em amostras coletadas durante a evolução do processo de co-compostagem da terceira batelada.

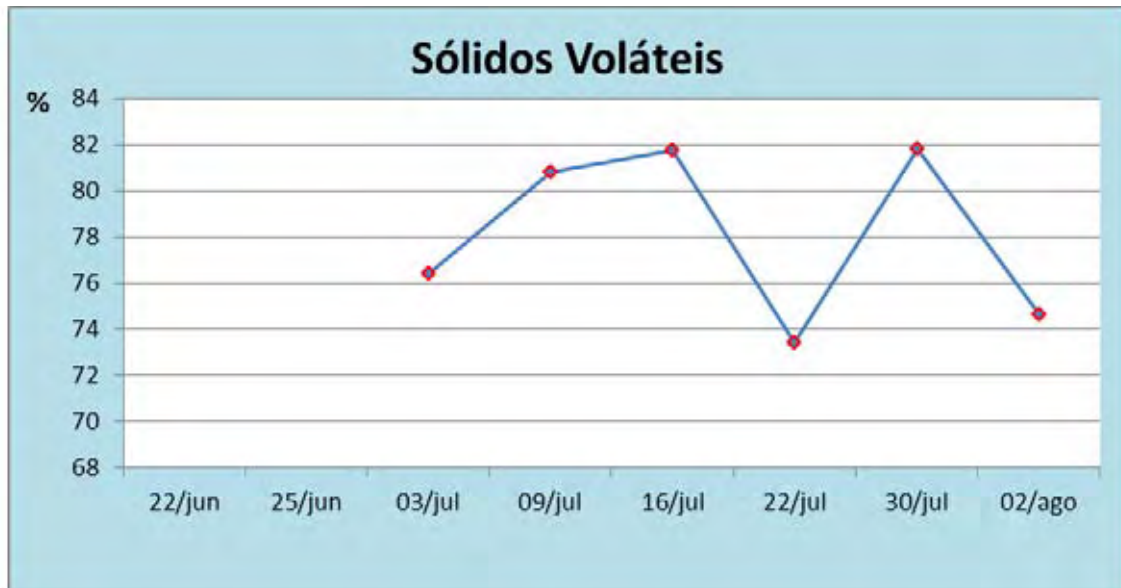


Gráfico 55 – Evolução dos índices percentuais dos sólidos voláteis em amostras coletadas durante a evolução do processo de co-compostagem da terceira batelada.

4.3.11 Análises das temperaturas do composto durante o processo de co-compostagem no interior do reator.

Realizou-se medições de temperatura, através de termômetro digital, do composto no interior do reator rotativo, nos momento em que realizou-se também as purgas gasosas, durante o desenvolvimento do processo de compostagem, conforme Figura 66.



Figura 66 – Verificação da temperatura do composto, através de termômetro digital.

Os valores encontrados nestas medições, assim como as temperaturas ambientes, no momento destas verificações, mostra-se através da Tabela 46.

Tabela 46 – Temperaturas do composto e temperatura ambiente aferidas durante o processo de co-compostagem da terceira batelada.

DATA	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	TEMPERATURA COMPOSTO (°C)	DIFERENÇA ENTRE TEMPERATURA AMBIENTE E A TEMPERATURA DO COMPOSTO (°C)
21/jun	-	-	-
22/jun	-	25	-
23/jun	-	28	-
24/jun	-	29	-
25/jun	-	27	--
26/jun	-	24	-
27/jun	-	25	-
28/jun	-	26	-
29/jun	-	30	-
30/jun	-	-	-
01/jul	-	31	-
02/jul	-	32	-
03/jul	29	31	2
04/jul	26	28	2
05/jul	27	30	3
06/jul	27	30	3
07/jul	27	29	2
08/jul	-	-	-
09/jul	26	28	2
10/jul	27	29	2
11/jul	29	31	2
12/jul	26	28	2
13/jul	22	24	2
14/jul	-	-	-
15/jul	24	24	0
16/jul	23	25	2
17/jul	22	24	2
18/jul	-	-	-
19/jul	25	26	1
20/jul	26	28	2

21/jul	-	-	-
22/jul	29	29	0
23/jul	28	29	1
24/jul	28	29	1
25/jul	28	29	1
26/jul	30	32	2
27/jul	26	29	3
28/jul	-	-	-
29/jul	-	-	-
30/jul	26	27	1
31/jul	-	-	-
01/ago	-	-	-
02/ago	22	21	-1
MÉDIA	26,2	27,8	1,6

Observa-se através do Gráfico 56 e do Gráfico 57 que, diferentemente do apontado por Kiehl (1998), onde ideal é controlar a temperatura entre 55°C e 65 °C permitindo a máxima intensidade de atividade microbiológica, a temperatura do composto oscilou entre 1°C e 3°C acima da temperatura ambiente, que em média foi de 26,2°C. Verificou-se ainda que no momento em que o processo não estava ativo, a temperatura do composto apresentou o mesmo valor da temperatura ambiente.

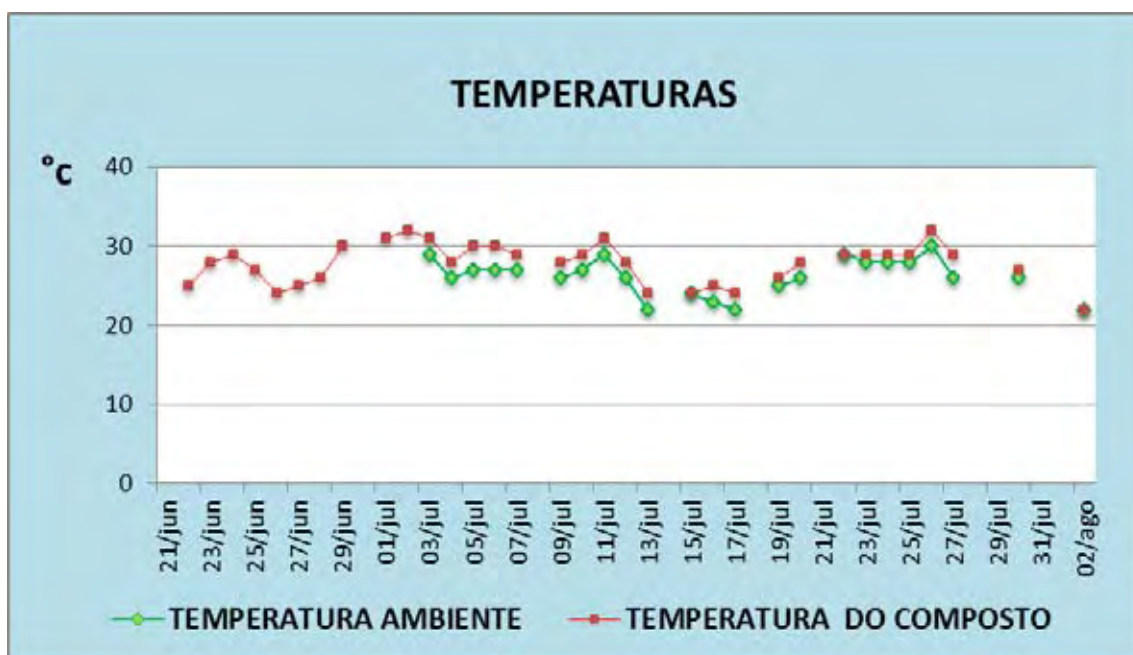


Gráfico 56 – Evolução da temperatura ambiente e da temperatura do composto durante o processo de co-compostagem da terceira batelada.

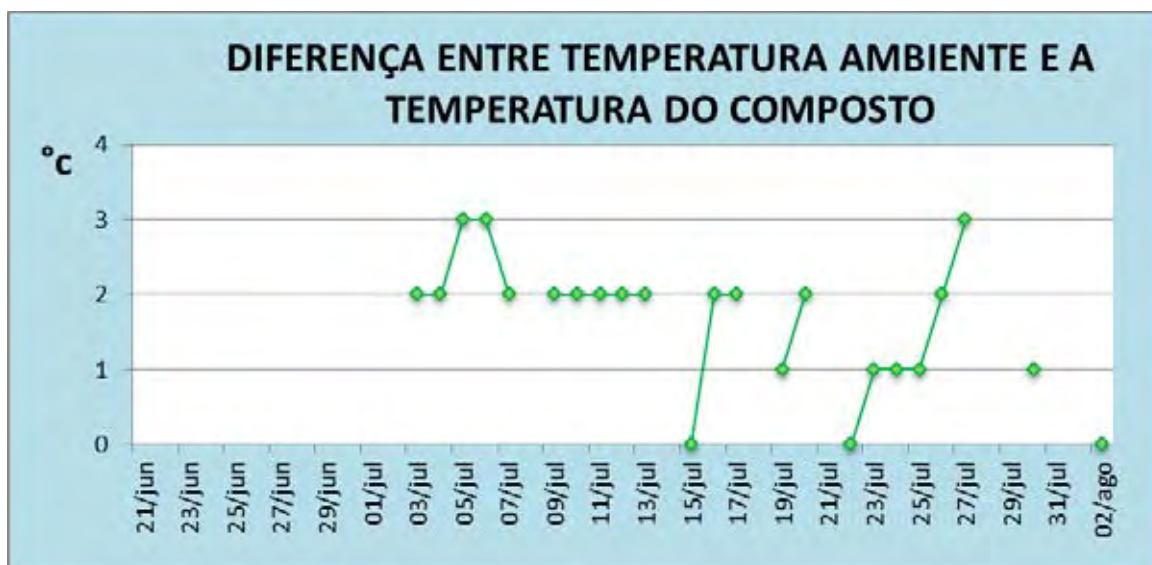


Gráfico 577 – Diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura do composto durante o processo de co-compostagem da terceira batelada.

Estes valores sugerem novos experimentos para comprovação dos valores obtidos e discussão da sua relevância dentro dos processos de compostagem.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a análise da literatura e dos resultados obtidos, nos ensaios realizados, conclui-se que o método respirométrico demonstrou ser uma ferramenta extremamente útil e confiável com relação às respostas que o mesmo pode fornecer no acompanhamento operacional e na avaliação do andamento progressivo do processo de degradação dos resíduos sólidos.

O método respirométrico permite avaliações de parâmetros na fase gasosa, através da evolução temporal do consumo de O_2 e respectiva geração de CO_2 , demonstraram ser muito superiores em termos de representatividade, precisão e confiabilidade quando comparado ao método tradicional que efetua a avaliação do processo de degradação segundo análise da fase sólida.

Observou-se que se faz necessário a implementação de um controle operacional, igualmente automatizado e de forma constante, da umidade do composto, parâmetro fundamental para eficácia e rapidez do processo.

Outro parâmetro não automatizado e necessário ser acompanhado em trabalhos futuros, é a temperatura do processo, visto que seu acompanhamento manual, somente foi possível ser realizado quando dos momentos de purga. Mesmo sendo aferido manualmente, este parâmetro em reator rotativo, apresentou valores de temperatura muito inferiores aos explicitados na literatura, o que propicia um projeto de pesquisa a ser realizado analisando-o criteriosamente, para aferir seu grau de importância no processo.

Por apresentar respostas em tempo real "*on line*" em intervalos de tempo reduzidos, o método respirométrico permite uma operação muito mais ajustada e eficiente, incluindo ainda a possibilidade de intervenções em tempo hábil para corrigir determinados erros ou falhas que eventualmente venham a ocorrer no decorrer do processo.

Como os valores são apresentados em forma de texto, o desenvolvimento de software que garanta a exibição dos dados no formato Gráfico, de forma "*on line*" na tela do computador, permitiria a avaliação de maneira mais rápida e eficaz.

Verificou-se ainda que em todo processo de co-compostagem faz-se necessário também, um dimensionamento do balanceamento de valores de

carbono e nitrogênio (relação C/N), entre os resíduos a serem utilizados nos processos de co-compostagem.

O processo de co-compostagem, utilizando os resíduos de lodo de estação de tratamento de esgoto, é viável e importante ferramenta na destinação e tratamento deste resíduo. Mas seu processo deve ser realizado de forma segura, utilizando-se da análise laboratorial, tanto para caracterização dos resíduos a serem co-compostados, quanto do composto obtido, permitindo produção de composto de qualidade, através dos diversos parâmetros de controle e dimensionamento do sistema. Ressalta-se a necessidade de utilizar equipamentos de proteção individual, que garantam a integridade do manuseador do lodo de estação de tratamento de esgotos, visto o alto grau de contaminação que pode oferecer.

Tais conclusões demonstram viabilidade e potencialidade de projetos, voltados para o desenvolvimento de ferramentas tecnológicas para aplicação na automação de processos para destinação de resíduos sólidos orgânicos, através da compostagem, especialmente, quando estamos diante da necessidade do cumprimento das metas da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos Sólidos – Classificação**. 2ª Ed. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ADANI, F.; CONFALONIERE, R.; TAMBONE, F. **Dynamic Respiration Index as a Descriptor of the Biological Stability of Organic Wastes**. Journal of Environmental Quality, vol.33: pp.1866-1876, 2004.

AGRAWAL, R.P. SINGHAND M., **Potential benefits and risks of land application of sewage sludge**. Department of Botany, Banaras Hindu University, Varanasi, India. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science>> Acesso em: 10/03/2011.

AKUTSU J, MARTINS J.E.M.P., CASTILHO G.S., RENÓFIO A, ISA M.M. **Avaliação e Controle Operacional de Processo de Compostagem de Resíduos Sólidos através de Método Respirométrico**. In: XVI SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção, 2009, Bauru. Anais... Bauru: SIMPEP, 2009.

ALBUQUERQUE, H.C., MARQUES, C.C.; ARAÚJO, P.G.C.; GONÇALVES, W.P.; MAIA, R.; BARBOSA, E.A. **Caracterização de resíduos sólidos orgânicos produzidos no restaurante universitário de uma instituição pública**. XXVII ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2007, Foz do Iguaçu. Anais... ABEPRO-Associação Brasileira de Engenharia de Produção, ENEGEP, 2007.

ANDREOLI, C.V. , PEGORINI, E.S.; FERNANDES, E F. **Disposição do lodo no solo**. In: C.V. Andreoli, M. von Sperling e F. Fernandes. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 6. Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. DESA- UFPRG, Sanepar, 2001.

ANDREOTTOLA, G.; OLIVEIRA, E.L.; FOLADOR, P.; DALLAGOIV, L.; PETERLINIV, R.; CADONNAGIANNI, M. **Método respirométrico para o monitoramento de processos biológicos**. Engenharia Sanitária Ambiental. 2005, vol.10, n.1, pp. 14-23. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522005000100003&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: 15 abr. 2010.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. Pedra Sul Mineração. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Disponível em: <http://www.abnt.org.br/m5.asp?cod_noticia=30&cod_pagina=965>. Acesso em 10/02/2011.

BAPTISTA, F.R.M. **Caracterização física e comercial do lixo urbano de Vitória - ES, em função da classe social da população geradora**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, 2001.

BARREIRA, L. P. **Avaliação das usinas de compostagem do estado de São Paulo em função da qualidade dos compostos e processos de produção**. 2005. Tese (Doutorado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

BETTIOL, W. & CAMARGO, O. **A disposição de lodo de esgoto em solo agrícola.** In: LODO de esgoto: Impactos ambientais na agricultura. Jaguariúna, Embrapa Meio Ambiente, 2006. 347p

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Versão preliminar. Dispon. em: http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_arquivos/versao_preliminar_pnrs_wm_253.pdf. Acesso em: 05 março 2012.

_____. **Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Lei n 12305 de 02 de agosto de 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 05 fevereiro 2012.

BRITO, M. J. C. **Processo de compostagem de resíduos urbanos em pequena escala e potencial de utilização do composto como substrato.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju, SE, 2008.

CAMARGO, L.B. **As dimensões e os desafios do desenvolvimento sustentável: concepções, entraves e implicações à sociedade humana.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CAMPOS, A. L. O.; BLUNDI, C. E. **Avaliação de matéria orgânica em compostagem: metodologia e correlações.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 1999

CARDOSO, R. S.; ADISSI, P.J; XAVIER, L.H; XAVIER, V.A. **Ciclo de Vida do Produto, Tecnologia e Sustentabilidade:** Breve Análise da Gestão Ambiental de Resíduos Sólidos no Brasil. Foz do Iguaçu - PR: ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 09 a 11 de outubro de 2007. Anais... XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção 2007.

CATUNDA, S.; DEEP, G.; HAANDEL, A.; FREIRE, R. **Métodos alternativos para medição da taxa de consumo de oxigênio em sistemas de Lodo Ativado. Controle e Automação,** São Paulo: v.9, n.2, 57-64, mai./ago. 1998.

CHIBA, M.K.; MATTIAZZO, M.E; OLIVEIRA, F.C. **Cultivo de cana-de-açúcar em Argissolo tratado com lodo de esgoto.** Revista Brasileira de Ciências do Solo, vol.32, nº.2, Viçosa, 2008.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. (CETESB). **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas: critérios para projeto e operação.** São Paulo: Cetesb, 1999. 32p. (Norma P 4230).

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano1.cfm?codlegitipo=3&ano=1993>. Acesso em 30/07/2011.

CORREA, R. S.; FONSECA, Y. M. F.; CORREA, A. S. **Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental, vol.11, n.4, pp. 420-426. 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Uso da compostagem em sistemas agrícolas orgânicos.** Fortaleza: EMBRAPA, 2004.

- EPSTEIN, E. **The science of composting**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1997
- FADINI, P. S; FADINI, A.B. **Lixo: desafios e compromissos**. In Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola. Edição especial, maio 2001.
- FERNANDES, F., SILVA, S. M. C. P. da. **Manual Prático para a Compostagem de Biossólidos**. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), 1999. Disponível em: <<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/Livro%20Compostagem.pdf>>. Acesso em 20/10/2011.
- FERNANDES, F; SOUZA, S.G. de; NUNES, C.W.; NOGUEIRA, R.G.; IZUME, F. **Automação para o controle da aeração em reator piloto para compostagem do lodo**. Semina: Ci. Exatas/Tecnol. Londrina, v. 21, n. 4, p. 89-94, dez. 2000.<<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/3017/2560>>. Acesso em: 06 Mar. 2012..
- GAJALAKSHMI, S.; ABBASI, S. A. **Solid waste management by composting: state of art**. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v. 38, n. 5, p.311-400, 2008.
- GEA T. ; ARTOLA A. ; SÁNCHEZ A. ; **Composting of de-inking sludge from the recycled paper manufacturing industry**. Bioresource Technology 96 (2005) 1161-1167, 2004.
- GONÇALVES, R. **Proposta de um instrumento de avaliação para subsidiar processos de licenciamento ambiental de centrais de triagem e compostagem de resíduos sólidos domiciliares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.
- HAUG, R. T. **The practical handbook of compost engineering**. Boca Ratón, FL: Lewis Publ., 1993.
- HERBETS, R. A.; COELHO, C. R. de A.; MILETTI, L. C.; MENDONÇA, M. M. Compostagem de resíduos sólidos orgânicos: aspectos biotecnológicos. **Health and Environment Journal**, v. 6, n. 1, p. 41-50, maio 2005.
- INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA (IPT). Disponível em: <http://www.ipt.br/consultas_online>. Acesso em 28/07/2011.
- JACOBI, P. R.; BESEN, G.R. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade**. Estudos Avançados, vol.25, n.71, pp. 135-158, 2011.
- KALAMDHAD, A.; PASHA M.; KAZMI A. **Stability evaluation of compost by respiration techniques in a rotary drum composter** . Resources Conservation and Recycling , 54 829-834. 2008.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1985.
- _____. **Manual de Compostagem - Maturação e Qualidade do Composto**. Edição própria; Piracicaba, 1998
- KOVACS, R.; HAZI, F.; CSIKOR, Z.; MIHALTZ, P.; **Connection between oxygen uptake rate and carbon dioxide evolution rate in aerobic thermophilic sludge digestion**. Periodica Polytechnica-Chemical Engineering, pp17-22, , Hungary. 2007.

KREUSCH, M. A. **Avaliação com propostas de melhoria do processo industrial de reciclagem do chumbo e indicação de aplicabilidade para a escória gerada.** 2005. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

KUTER, G. A. **Biosolids composting**. Water Environmental Federation, Alexandria, VA, 1995.

LASARIDI, K., LOANNA, P; KOTSOU M, P; THAKIS, M.G. **Quality assessment of composts in the greek market: the need for standards and quality assurance.** Journal of Environmental anagement, London, v. 80, p. 58-65, 2006.

LELIS, M.P.N.; PEREIRA NETO, J. T. **A contaminação biológica na compostagem.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABES, 2001

LOPES, P. A. **Estudo Comparativo e Avaliação de Diferentes Sistemas de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

MAIORINO L., BUTTOL, P; TARANTINI, M. **Applicazione della metodologia di Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) alla gestione di fanghi di depurazione. Rapporto sullo stato ambientale delle acque nel bacino scolante dei regi laghi e nelle aree afferenti l'impianto di depurazione di Cuma.** 2002, Bologna, Itália. Disponível em: <http://www.bologna.enea.it/ambtd/> Acesso em: 10/03/2011.

MARAGNO, E. S.; TROMBIN, D. F.; VIANA, E. **O uso da serragem no processo de minicompostagem.** Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, 2007.

MARTINS, J. E. M. ; AKUTSU, J.; KAJINO, H.S.; MANFRINATO, J.W.S.; CASTILHO Fº, G.S. **Desenvolvimento de um Sistema Computacional Para Automação e Gerenciamento de Processos de Compostagem de Resíduos Sólidos.** In: XVI SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção, 2009, Bauru. Anais... Bauru: SIMPEP, 2009.

OLIVEIRA, A. M. G. **Compostagem caseira de lixo orgânico doméstico.** Bahia: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2005.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de compostagem: processo de baixo custo.** Belo Horizonte: UNICEF, 1996.

PETIOT, C., GUARDIA, A. **Composting in a Laboratory Reactor: A Review.** Compost Science & Utilization, v.12, n.1, p.69-79, 2004.

RUSSO, M. A. T. **Tratamento de resíduos sólidos.** Coimbra: Universidade de Coimbra, 2003. Disponível em: <http://www1.ci.uc.pt/mhidro/edicoes_antigas/Tratamentos_Residuos_Solidos.pdf> Acesso em 20 novembro 2011.

SANTOS, J.L.D. dos. **Caracterização físico-química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis.** Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) -

Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2007

SCAGLIA B. ; ERRIQUENS F.G.; GIGLIOTTI G. ; TACCARI M.; CIANI M. ; GENEVINI P.L.; ADANI F. **Precision determination for the specific oxygen uptake rate (SOUR) method used for biological stability evaluation of compost and biostabilized products.** Università degli Studi di Milano , Università di Perugia , Università Politecnica delle Marche , pp0-8 , 2005 .

SILVA, A G; LEITE, V.D.; SILVA, M.M.P.; PRASAD, S.; FEITOSA, W.B.S. **Compostagem aeróbia conjugada de lodo de tanque séptico e resíduos sólidos vegetais.** Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 371-379, 2008.

TOCCHETTO, M. R. L. **Implantação de Gestão Ambiental em Grandes Empresas com Atividade Galvânica no Rio Grande do Sul.** 2004. 176 p. Doutorado em Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Engenharia Metalúrgica, dos Materiais e de Minas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

UBAY E. ; OZDEMIR S. ; KARAHAN O. ; INSEL G. ; ORHON D. ; **Critical appraisal of respirometric methods for metal inhibition on activated sludge.** Journal of Hazardous Materials B139 332-339., 2007.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - U.S.EPA. **A plain English guide to the EPA Part 503 Biossolids Rule.** Whashington, 1994

ZANETI, I.C.B. **Educação Ambiental, resíduos sólidos urbanos e sustentabilidade. Um estudo de caso.** Porto Alegre, RS. Tese de Doutorado. Centro de Desenvolvimento Sustentável-UnB. Brasília, 2003.