



TRATAMENTO DE LIXIVIADOS PRODUZIDOS EM ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS POR MEIO DE EVAPORAÇÃO FORÇADA

Harley Alves da Mata Bacelar

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Cláudio Fernando Mahler

Iene Christie Figueiredo

Rio de Janeiro
Dezembro de 2010

TRATAMENTO DE LIXIVIADOS PRODUZIDOS EM ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS POR MEIO DE EVAPORAÇÃO FORÇADA

Harley Alves da Mata Bacelar

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Cláudio Fernando Mahler, D. Sc.

Prof^a. Iene Christie Figueiredo, D. Sc.

Prof. Francisco José Casanova de Oliveira e Castro, D. Sc.

Prof^a. Fabiana Valéria da Fonseca Araújo, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2010

Bacelar, Harley Alves da Mata

Tratamento de Lixiviados Produzidos em Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos por meio de Evaporação Forçada/ Harley Alves da Mata Bacelar. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XVIII, 76 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Cláudio Fernando Mahler

Iene Christie Figueiredo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 69-74.

1. Evaporação forçada. 2. Tratamento de lixiviados. 3. Aterro de RSU. I. Mahler, Cláudio Fernando *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

A DEUS por ser minha fonte de fé e por ter concedido força, perseverança e coragem para enfrentar com entusiasmo mais esta oportunidade de aprendizado e conquista.

À minha esposa Mônica Queiroz Bacelar pelo incentivo e compreensão, principalmente nos momentos de dificuldade e ausência, e às minhas queridas filhas Rafaela e Bianca.

Aos meus pais, Harley Tilden e Regina Helena, meus primeiros professores, a quem eu devo minha conduta e que sempre me apoiaram no caminho percorrido até aqui.

Aos meus irmãos Alexandre e Viviane, grandes amigos e companheiros.

Aos meus avós (in memorian) Evandro e Laura Bacellar, Adalberto e Julieta Alves, e às minhas avós de coração (in memorian) Adalvina Pires e Maria Benevenuta.

À minha sogra Maria José, minha segunda mãe, que esteve sempre presente, e a todos os meus familiares que compreenderam esta escolha, torceram e oraram por mim.

Ao meu professor e orientador Cláudio Fernando Mahler, do qual tenho um enorme respeito, e que sempre contribuiu propondo melhorias nas metodologias desta pesquisa.

À minha orientadora Iene Christie Figueiredo, uma pessoa competente e admirável que muito me ajudou e incentivou no desenvolvimento de toda dissertação.

Pobre é o homem que busca no trabalho apenas a realização material, pois não há dinheiro que pague os ideais perdidos e a moral corrompida.

Escravo é aquele que se entrega à sôfrega e insaciável fome do poder, vendendo a dignidade e anestesiando sua consciência, porque o dinheiro e o poder conseguidos a este preço conduzem unicamente ao tédio e à desilusão.

Rico é aquele que encontrou no trabalho o caminho para a sua realização humana e profissional, vencendo barreiras, saltando obstáculos e colocando a sua profissão e inteligência a serviço do bem comum.

Livre é o homem que enriqueceu com a cabeça erguida e que, podendo pisar e esmagar, recolheu e ajudou.

Sábio é o profissional que lutou por um princípio, que admitiu suas falhas e delas tirou suas verdades.

Homem é aquele que, demolindo os medos e os preconceitos, ampliou-se, auto-afirmou-se e cresceu.

Fortes são os que acreditam no trabalho como uma das preciosas fontes de evolução.

A vida é um projeto que nós mesmos construímos. Nossas atitudes e escolhas de hoje, estão construindo o lar onde iremos morar amanhã. Construamos com sabedoria.

"Nós devemos ser a mudança que queremos ver no mundo"

MOHANDAS KARAMCHAND GANDHI

AGRADECIMENTOS

Àqueles que nos bastidores, com ajudas imensuráveis, motivaram a conclusão desta pesquisa.

A todos os professores que contribuíram com este enorme tesouro que é o conhecimento. Em especial aos professores dos cursos: da escola técnica do CEFET-RJ; Engenharia da UVA; PROMINP - UFRJ; Geotecnia / Meio Ambiente da COPPE/UFRJ; e da POLI - UFRJ.

Ao professor e amigo Danilo de Hollanda que me orientou nos primeiros passos para o ingresso no curso da COPPE/UFRJ, além do professor César Luiz França Pires, e a Glauco Aguilar Oliveira, também presentes neste momento inicial.

Aos amigos e colegas de curso, Fábio Hirsch, Graziella Jannuzzi, José Simão, Rafael Silva, Leonardo Cavalcanti, Flávia Carvalho, Lydice Polanco, Maurício Andrade, Mário Nacinovic, Alessandra Silva, Luciano Bressan, Márcia Ferreira, Vinícius Guedes, Gustavo Guimarães, Christian Santana, Petrônio Montezuma, Abdoul Diene, Luíza Cantuária, Talita Miranda, Louis Losier, Beatriz Triane, Danielle Brum, Carolina Tarazona, Débora Pereira, Juliana Rose, Ronaldo Izzo e William Martins, que permitiram que a jornada fosse ainda mais satisfatória e que participaram com conselhos e sugestões.

A todo corpo docente, mestrandos, doutorandos e funcionários do laboratório de Geotecnia, da Secretaria Acadêmica, do transporte, limpeza, e segurança da UFRJ, que participaram e contribuíram para as aulas do curso e para realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do DRHIMA e aqueles que lá eu conheci: Álvaro Cantanhede, Iene Figueiredo, Ana Sílvia, Lana Gopfert, Marcelo Fonseca, Daniel Minegatti, Rodrigo Takahashi, Aline Veról, Jackeline Bahé, Isaac Volschan, Jorge Prodanoff, Eduardo Jordão, Paulo Renato, Theóphilo Ottoni, Josiel, Rosana, Ângela, Vânia e Ronilda.

Aos alunos da iniciação científica, e bolsistas que contribuíram na pesquisa, em especial à Lana Gopfert, Ana Sílvia, Vanessa Rocha, Livia, Adriana Santos e Bernardo Tavares.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente – LEMA/UFRJ, Maria Cristina, Éder, Cláudia, Darlise e Cida.

À COMLURB, principalmente ao coordenador de projetos do aterro metropolitano de Jardim Gramacho Lúcio Vianna Alves, e ao Eng^o João C. Xavier de Brito.

Aos funcionários Ayr Jr., Célio de Souza e Antônio Teixeira do PEQ-COPPE/UFRJ.

Ao vidreiro Valdenir e ao representante de materiais de laboratório José Carlos.

Ao Instituto de Microbiologia Professor Paulo de Góes (IMPPG), Laboratório de Microbiologia – UFRJ, especialmente à Adriana Santos e Alexandre Rosado.

Ao professor Carlos Alberto da Silva Riehl, do Instituto de Química da UFRJ e à professora Márcia Dezotti do PEQ-COPPE/UFRJ.

Aos membros da banca, além de meus orientadores, Prof. Francisco José Casanova de Oliveira e Castro e Prof^a. Fabiana Valéria da Fonseca Araújo, por terem aceitado o convite para o enriquecimento desta pesquisa, e ao Prof. Armando Borges de Castilhos Júnior.

Aos novos amigos e colegas de trabalho do ETU e da UFRJ, principalmente àqueles que compreenderam este momento de maior esforço e dificuldade.

Ao PROSAB, CNPQ, FINEP, FAPERJ, CAIXA, e ao Ministério da Ciência e Tecnologia, que continuam investindo nesta instituição e na capacidade intelectual dos alunos, professores, e na educação deste País.

A todos que porventura não mencionei, mas que me ajudaram de alguma forma para que este sonho tornasse realidade.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

TRATAMENTO DE LIXIVIADOS PRODUZIDOS EM ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS POR MEIO DE EVAPORAÇÃO FORÇADA

Harley Alves da Mata Bacelar

Dezembro/2010

Orientadores: Cláudio Fernando Mahler
Iene Christie Figueiredo

Programa: Engenharia Civil

Esta pesquisa aborda a evaporação forçada como tecnologia de tratamento de lixiviados a fim de avaliar as características dos vapores condensados e resíduos produzidos por este efluente. Os experimentos foram conduzidos em laboratório, utilizando diferentes amostras e variando a temperatura de aquecimento, de 100°C a 700°C, na evaporação do lixiviado proveniente do aterro metropolitano de Jardim Gramacho, localizado no Rio de Janeiro - Brasil.

Os resultados obtidos para este tipo de tratamento permitem uma redução de 99% do seu volume, além da remoção de mais de 75% dos parâmetros encontrados no lixiviado bruto. Contudo existe a necessidade de tratamento do resíduo em forma de vapor que é emitido para atmosfera, já que os ensaios em laboratório identificaram quantidades acima do valor máximo estabelecido pelos órgãos ambientais para alguns parâmetros como: dioxinas, furanos, cloretos, amônia e alguns metais, em determinadas temperaturas de aquecimento estudadas.

Nas análises microbiológicas verificou-se que nenhum grupo bacteriano, existente no lixiviado bruto, é transportado para os vapores emitidos à atmosfera no processo da evaporação.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

LEACHATE TREATMENT PRODUCED IN LANDFILL FORCED THROUGH EVAPORATION

Harley Alves da Mata Bacelar

Dezembro/2010

Advisors: Cláudio Fernando Mahler
Iene Christie Figueiredo

Department: Civil Engineering

The objective of this work was the evaluation of forced evaporation process in municipal solid waste leachate treatment technology in order to characterize its condensation vapors and residues.

The experiments were conducted in laboratory, using different samples and heating temperatures, varying from 100°C to 700°C, to evaporate the leachate from the metropolitan landfill Jardim Gramacho, located in Rio de Janeiro - Brazil.

The results obtained for this type of treatment allowed a reduction of 99% in the leachate volume, and, in addition, removed more than 75% of all analyzed parameters of the leachate. However, there is a need to treat the resulting vapors from the leachate process which are emitted to the atmosphere, since laboratory tests have identified quantities above the maximum limit established by the environmental agencies for some parameters such as: dioxins, furans, chlorides, ammonia and other metals at heating temperatures given in this study.

Microbiological analyses verified that no bacterial group that exists in leachate is transported by the emitted vapors to the atmosphere, in the process of evaporation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS	5
2.1. OBJETIVO GERAL	5
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU).....	6
3.2. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	8
3.3. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	11
3.4. TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	12
3.5. DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	13
3.6. DEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	17
3.7. BIOGÁS.....	19
3.8. LIXIVIADO	22
3.8.1. Definição.....	22
3.8.2. Quantidade de Lixiviado Gerado.....	22
3.8.3. Composição do Lixiviado	23
3.8.4. Tratamento do Lixiviado.....	26
3.9. EVAPORAÇÃO DO LIXIVIADO	28
3.9.1. Evaporação Natural do Lixiviado.....	29
3.9.2. Evaporação Forçada do Lixiviado	30
CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO LIXIVIADO GERADO NO ATERRO	35
4.1.1. Coleta do Lixiviado.....	35
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA EVAPORAÇÃO FORÇADA	38
4.2.1. Ensaio de Laboratório para as Amostras Geradas no Campo.....	39
4.2.2. Ensaio de Laboratório com Diferentes Lixiviados – ETAPA 01.....	39
4.2.3. Ensaio de Laboratório com Diferentes Temperaturas – ETAPA 02	41
4.3. METODOLOGIAS ANALÍTICAS	45
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO LIXIVIADO GERADO NO ATERRO	47

5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA EVAPORAÇÃO FORÇADA	50
5.2.1. Ensaio de Laboratório para as Amostras Geradas no Campo.....	50
5.2.2. Ensaio de Laboratório com Diferentes Lixiviados – ETAPA 01.....	54
5.2.3. Ensaio de Laboratório com Diferentes Temperaturas – ETAPA 02	57
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	66
6.1. CONCLUSÕES.....	66
6.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	67
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXO I - Equipamento de evaporação forçada denominado Evaporador Unitário – utilizado em caráter experimental no aterro de Jardim Gramacho – RJ.....	75
ANEXO II - Certificado de calibração do banho Maria ultratermostato criostato	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Detalhes das etapas para realização de um aterro sanitário.	16
Figura 3.2 – Vista geral do aterro sanitário da Caximba em Curitiba.....	17
Figura 3.3 – Fluxograma da estação de tratamento do Aterro de Jardim Gramacho.	27
Figura 4.1 – Vista superior do Aterro metropolitano de Jardim Gramacho – RJ.....	35
Figura 4.2 – Lagoa de equalização do lixiviado do aterro de Gramacho, com destaque para o ponto de coleta	36
Figura 4.3 – Coleta e homogeneização da amostra de lixiviado bruto – Lagoa de Equalização do Aterro de Gramacho.	37
Figura 4.4 – Transferência do lixiviado para os frascos de armazenamento.	37
Figura 4.5 – Medição da temperatura no local de coleta.....	38
Figura 4.6 – Equipamento de evaporação em bancada.	40
Figura 4.7 – Equipamento utilizado para as análises de compostos orgânicos voláteis. .	41
Figura 4.8 – Aparato experimental da evaporação em bancada – temperatura variável. .	43
Figura 4.9 – Formação de espuma e refluxo durante a evaporação, com destaque para a adaptação do erlenmeyer.	44
Figura 5.1 – Gráfico Box plot para os parâmetros DQO, DBO e NH_4 , na caracterização do lixiviado bruto do aterro de Gramacho.	49
Figura 5.2 – Gráfico Box plot para os parâmetros Cloreto, Alcalinidade e Cor, na caracterização do lixiviado bruto do aterro de Gramacho.	49
Figura 5.3 – Gráfico Box plot para os parâmetros SST, pH e Turbidez, na caracterização do lixiviado bruto do aterro de Gramacho.	50
Figura 5.4 – Gráfico Box plot para os parâmetros DQO, Alcalinidade e NH_4 , na caracterização do vapor condensado de lixiviado em campo.....	52
Figura 5.5 – Gráfico Box plot para os parâmetros Cloreto e Cor, na caracterização do vapor condensado de lixiviado em campo	52
Figura 5.6 – Gráfico Box plot para os parâmetros SST, pH e Turbidez, na caracterização do vapor condensado de lixiviado em campo.....	53
Figura 5.7 – Resultados comparativos das amostras de campo (lixiviado bruto, Resíduo 1 e vapor condensado).	54
Figura 5.8 – Resultados comparativos das amostras de bancada (lixiviado, resíduo e vapor condensado).	55
Figura 5.9 – Técnica de DGGE utilizada para as análises microbiológicas nas amostras do	

vapor condensado.	57
Figura 5.10 – Resultados para parâmetros indicadores de matéria orgânica, cloretos e nutrientes, considerando amostras de condensado obtidas para diferentes temperaturas de aquecimento..	59
Figura 5.11 – Resultados para parâmetros indicadores de nutrientes, considerando amostras de condensado obtidas para diferentes temperaturas de aquecimento.	60
Figura 5.12 – Resultados para parâmetros indicadores de sólidos, considerando amostras de condensado obtidas para diferentes temperaturas de aquecimento... ..	61
Figura 5.13 – Resultados para parâmetros indicadores de cor e pH, considerando amostras de condensado obtidas para diferentes temperaturas de aquecimento.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classificação dos resíduos sólidos em função de seus riscos.....	07
Tabela 3.2 – Classificação dos resíduos sólidos em função da sua origem.	07
Tabela 3.3 – Características dos resíduos sólidos segundo aspectos físicos, químicos e biológicos.....	08
Tabela 3.4 - Composição típica de resíduos sólidos municipais brasileiros.	10
Tabela 3.5 - Composição gravimétrica do lixo na cidade do RJ (2003 a 2007).	11
Tabela 3.6 – Composição típica do lixiviado para aterros sanitários jovens no mundo. ...	24
Tabela 3.7 - Composição típica do lixiviado para aterros de RSU nos EUA.	24
Tabela 3.8 – Variação da composição típica do lixiviado para aterros de RSU no Brasil. 25	
Tabela 5.1 – Caracterização do Lixiviado Bruto do Aterro de Gramacho.	47
Tabela 5.2 – Resultados das análises das amostras do Resíduo 1..	50
Tabela 5.3 – Resultados das análises das amostras do vapor condensado	51
Tabela 5.4 – Resultados das análises da amostra do Resíduo 2.	53
Tabela 5.5 – Resultados das análises de evaporação em bancada.....	54
Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios complementares para as amostras de evaporação em bancada.....	56
Tabela 5.7 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado e condensado.	58
Tabela 5.8 – Resultados encontrados nas análises de metais e semi-metals (mg/L).....	64

LISTA DE SÍMBOLOS OU NOMENCLATURA

°C	Grau Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ag	Prata
Al	Alumínio
AOV	Ácidos Orgânicos Voláteis
As	Arsênio
B	Boro
Ba	Bário
C	Carbono
Cd	Cádmio
CH ₄	Metano
Cl	Cloro
cm	Centímetro
CN	Cianetos
C/N	Relação teor de carbono/nitrogênio
Co	Cobalto
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COMLURB	Companhia Municipal de Limpeza Urbana
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
COSV	Compostos Orgânicos Semi-Voláteis
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DBO/DQO	Relação da Demanda Biológica de Oxigênio pela Demanda Química de Oxigênio
DGGE	Eletroforese em Gel de Gradiente Desnaturante
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EU	Evaporador Unitário

F	Flúor
Fe	Ferro
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente do Estado do RJ
g	Grama
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
h	Hora
H	Hidrogênio
H ₂	Hidrogênio
Hg	Mercúrio
H ₂ S	Ácido sulfídrico
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMPPG	Instituto de Microbiologia Professor Paulo de Góes – UFRJ
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
Kcal	Quilocaloria
Kg	Quilograma
LADA	Laboratório de Desenvolvimento Analítico - Instituto de Química da UFRJ
LEMA	Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente - UFRJ
L/min.	Litro por minuto
m ³	Metro cúbico
mg/L	Miligramas por litro
ml	Mililitro
mm	milímetros
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
N ₂	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira
ND	Parâmetro Não Detectado
NH ₃	Amônia
NH ₄ ⁺	Amônio
Ni	Níquel
Nm ³	Normal metro cúbico
NO ₂	Nitrito

NO ₃	Nitrato
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
O ₂	Oxigênio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
PCR	Reação de Polimerização em Cadeia
Pd	Paládio
pg/L	Picogramas por litro
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ppm	Partes por milhão
PROCON AR	Programa de Autocontrole de Emissões para Atmosfera
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
Pt	Platina
RCC	Resíduos da Construção Civil
ReCESA	Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento
Rh	Ródio
RS	Resíduos Sólidos
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S	Enxofre
S ₂	Enxofre
Sb	Antimônio
Se	Selênio
Sn	Estanho
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SSF	Sólidos Suspensos Fixos
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
SV	Sólidos Voláteis
Te	Telúrio

TI	Tálio
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
US\$	Dólar
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
V	Vanádio
Zn	Zinco
µg/L	Microgramas por litro

CAPÍTULO 01

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial associado ao desenvolvimento econômico estimula o consumo de bens e, conseqüentemente, dos recursos naturais. Esse cenário conduz ao aumento da geração dos resíduos, cuja disposição muitas vezes inadequada, agrava a poluição ambiental e favorece o aquecimento global.

Países em desenvolvimento como o Brasil, China e Índia, possuem dificuldade de gerenciar o crescimento demográfico com a infra-estrutura adequada. A deficiência na prestação de serviços relacionados ao saneamento básico torna-se mais evidente nos centros urbanos, cujo adensamento populacional tem crescido em função do êxodo dos habitantes do campo para as cidades em busca de alternativas de trabalho.

O governo federal realiza desde 1995 um diagnóstico dos serviços de saneamento do Brasil vinculado ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). A partir de 2004, com dados do ano base 2002, o sistema introduziu informações sobre o setor de resíduos sólidos. A pesquisa do SNIS divulgada em 2007, que abrangeu 291 municípios brasileiros e 83,8 milhões de pessoas (54,8% da população urbana), apresentou os seguintes resultados: 31,1% da disposição final dos resíduos ainda são os

lixões; e 31,8% são os aterros controlados, que também não se adéquam às exigências técnicas para proteção do meio ambiente. Portanto, somente 37,1% dos resíduos são dispostos em aterros sanitários, tecnicamente instalados de modo a garantir o atendimento aos requisitos ambientais vigentes.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pelo governo federal (Lei nº 12.305, 02 de agosto de 2010), determinou responsabilidades desde o gerador até o consumidor comum. Esta política define uma nova ótica sobre o gerenciamento dos resíduos sólidos no país para todos os atores envolvidos: população, poder público, empresas e iniciativa privada.

Destacam-se também desta lei outras diretrizes, tais como: proibição do lançamento inadequado de resíduos sólidos e da sua queima a céu aberto ou em instalações e equipamentos não licenciados; proibição da utilização de áreas de disposição final para construção de habitações e para catação de materiais recicláveis. A PNRS corrobora a Lei nº 11.445 (Lei do Saneamento Básico) no que tange a prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo dos resíduos sólidos.

Independente da forma de manejo dos resíduos sólidos, destacando-se aqui aqueles de origem urbana, efluentes líquidos e gasosos são produzidos a partir da degradação da matéria orgânica e lixiviação de outros contaminantes presentes na massa de resíduo disposta. A gestão inadequada destes resíduos e de seus efluentes pode provocar a proliferação de vetores e agentes patogênicos, poluição do solo, do ar e de recursos hídricos.

Os lixiviados de aterros de resíduos sólidos têm como características a difícil tratabilidade devido a sua composição variável ao longo do tempo, os altos valores de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio), além de componentes perigosos de difícil controle oriundos dos inúmeros resíduos dispostos pela

população de forma aleatória e pouco controlados. Sendo assim, as soluções tecnológicas indicadas para o seu tratamento devem ser avaliadas caso a caso.

As técnicas comumente empregadas para tratamento de lixiviado são baseadas em processos físico-químicos e biológicos, utilizando como referência a operação de sistemas de tratamento de esgotos sanitários. No entanto, as características dos lixiviados limitam o desempenho de processos biológicos e, conseqüentemente, dificultam o atendimento dos padrões ambientais para efluentes líquidos definidos pelos órgãos responsáveis.

O biogás é o efluente gasoso produzido nos aterros de resíduos sólidos e apresenta como principal característica elevada concentração de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), gases comumente conhecidos como responsáveis pelo efeito estufa. Para minimização do impacto do seu lançamento na atmosfera, é usual que se proceda a queima do biogás sem o aproveitamento do seu potencial energético. Este desperdício também se deve a deficiência da regulamentação do setor de energia do país que possibilite a integração da produção de energias alternativas ao sistema convencionalmente instalado. Com a tecnologia atual e regulamentos instituídos, é possível ter-se uma real sustentabilidade mundial, seja no consumo energético ou na recuperação e controle dos próprios aterros após o encerramento, desde que, evidentemente todos os atores cumpram corretamente com seus papéis.

Tendo em vista que a utilização dos métodos convencionais de tratamento do lixiviado implica num elevado custo operacional, a utilização da evaporação forçada deste resíduo a partir da queima do biogás produzido no próprio aterro sanitário, pode ser uma alternativa economicamente viável para o adequado manejo destas duas emissões (líquida e gasosa) possibilitando ainda a geração de créditos de carbono.

Nesta perspectiva, o presente trabalho, cujos objetivos estão definidos no Capítulo 2, faz uma avaliação da viabilidade do tratamento de lixiviado pela evaporação forçada,

considerando os gases gerados por este processo e seus impactos sobre o meio ambiente. Todo o embasamento teórico relacionado ao tema é abordado no Capítulo 3 (Revisão Bibliográfica), com destaque para os processos que envolvem a produção de lixiviado e de biogás no aterro e para os conceitos de evaporação natural e forçada.

O Capítulo 4 detalha a metodologia experimental utilizada para atender aos objetivos propostos para este estudo. Os resultados obtidos apresentam-se discutidos no Capítulo 5 sob a luz da literatura pesquisada. Por fim, o Capítulo 6 sintetiza as conclusões obtidas neste trabalho e dá sugestões para futuras pesquisas, seguido das Referências Bibliográficas (Capítulo 7).

CAPÍTULO 2

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar, a partir de ensaios de laboratório, a aplicação da evaporação forçada como tecnologia de tratamento de lixiviados produzidos em aterros de resíduos sólidos urbanos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar as características dos resíduos sólidos e dos vapores condensados produzidos pela evaporação do lixiviado, utilizando diferentes amostras deste efluente e variando a temperatura de aquecimento (entre 100°C e 700°C). Para controle das análises foram utilizados parâmetros físicos, químicos e biológicos.

CAPÍTULO 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Os RSU são todos os rejeitos no estado sólido ou semi-sólido produzidos pela população de forma direta ou indireta, oriundos das atividades humanas decorrentes da utilização e manutenção da infra-estrutura urbana.

A norma NBR 10004 (2004) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos à saúde da população e ao meio ambiente. Neste caso, as características destes resíduos podem definir o grau de impacto gerado. A classificação dos resíduos sólidos em função de seus riscos está resumida na Tabela 3.1.

Os resíduos também podem ser identificados segundo sua natureza ou origem, sendo esta a principal referência para sua caracterização. Os cinco grupos assim definidos pelo Instituto Brasileiro de Administração Municipal - IBAM (2001) encontram-se descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Classificação dos resíduos sólidos em função de seus riscos.

CLASSIFICAÇÃO		DEFINIÇÃO	EXEMPLO
Classe I	Perigosos	Aqueles cujas propriedades físicas, químicas e/ou infecto-contagiosas geram riscos à saúde pública e/ou ao meio ambiente.	Pilhas, baterias e lâmpadas fluorescentes compostas por metais.
Classe II A	Não Perigosos e Não Inertes	Além dos riscos, estes resíduos apresentam biodegradabilidade, combustibilidade, e/ou solubilidade em água.	Restos de alimentos, sucata de metais ferrosos e não ferrosos.
Classe II B	Não Perigosos e Inertes	Não apresentam risco à saúde ou ao meio ambiente. Resíduos que não solubilizam seus constituintes em concentrações superiores aos limites definidos pelos padrões de potabilidade de água.	Papel, papelão, plástico polimerizado, borracha, madeira e materiais têxteis.

Fonte: adaptado da NBR 10004/ABNT (2004).

Tabela 3.2 – Classificação dos resíduos sólidos em função da sua origem.

CLASSIFICAÇÃO	DEFINIÇÃO
Lixos residenciais	Resíduos diários produzidos pela população em qualquer tipo de moradia.
Lixos comerciais	Resíduos diários produzidos por todos os estabelecimentos comerciais.
Lixos públicos	Resíduos deixados irregularmente pela população ou gerados pela própria natureza nas ruas e logradouros públicos, incluindo parte dos entulhos de obras e materiais inservíveis.
Lixos domiciliares especiais	Entulhos de obras retirados regularmente por carros diversos, lâmpadas fluorescentes, pilhas, baterias e pneus.
Lixo de fontes especiais	Resíduos que precisam de uma atenção especial devido ao risco que eles apresentam à saúde da população e ao meio ambiente. Neste grupo estão os lixos industriais, radioativos, agrícolas, resíduos de serviços de saúde (RSS) e lixos de portos, aeroportos e terminais rodo-ferroviários.

Fonte: adaptado do IBAM (2001).

3.2. CARACTERÍSTICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

São diversos os fatores que determinam as características dos resíduos sólidos. Elas estão associadas principalmente aos hábitos populacionais, aos diferentes climas, aspectos geográficos, e também ao grau de evolução tecnológica existente em cada localidade. A Tabela 3.3 resume as informações sobre estas características divididas em três grupos: físicas, químicas e biológicas.

Tabela 3.3 – Características dos resíduos sólidos segundo aspectos físicos, químicos e biológicos.

CARACTERÍSTICAS		DEFINIÇÃO	OBSERVAÇÕES
FÍSICAS	Composição gravimétrica	Percentual de cada componente em relação ao peso total do resíduo analisado.	São apresentados diferentes métodos. O mais utilizado se baseia no quarteamento das amostras (NBR 10007, 1987)
	Geração <i>per capita</i>	Relação entre a quantidade de resíduo gerado diariamente em um determinado local e o seu número de habitantes.	Deve-se considerar todas as fontes geradores (residências, centros comerciais, lixo público, entulho e RSS).
	Peso específico aparente	Relação entre o peso dos resíduos e o volume ocupado por eles.	Sua determinação influencia no dimensionamento de equipamentos e instalações. Os valores usuais são: 230 kg/m ³ para os RSU; 280 kg/m ³ para os RSS; 1.300 kg/m ³ para os resíduos da construção civil (RCC).
	Teor de umidade	Relação entre a quantidade de água presente nos resíduos e seu peso.	Determina os processos de destinação dos resíduos e tratamento dos lixiviados. Seu valor varia muito em função das estações do ano e da incidência de chuvas nos aterros
	Compressibilidade (Grau de Compactação)	Capacidade de redução de volume da massa de lixo.	O lixo pode reduzir entre 1/3 a 1/4 do seu volume inicial quando aplicada uma pressão equivalente a 4 kg/cm ² .

QUÍMICAS	Poder calorífico	Capacidade potencial do resíduo de desprender calor quando submetido à queima.	Característica utilizada para dimensionar incineradores. Com a produção média de 5000Kcal/Kg, os RSU apresentam potencial de cogeração de energia
	Potencial hidrogeniônico (pH)	Teor de acidez ou alcalinidade do resíduo, retratando o processo de decomposição biológica da matéria orgânica.	O pH do lixiviado geralmente requer ajuste para que se proceda seu adequado tratamento e atendimento aos padrões de lançamento em corpos d'água.
	Composição Química	Composição química variada dependente das diferentes origens dos resíduos. Pode ser determinada por: teor de cinzas, matéria orgânica, carbono, cálcio, nitrogênio, potássio, enxofre, fósforo, etc.	Orienta a escolha do processo de tratamento e disposição dos RSU.
	Relação teor de carbono/nitrogênio (C/N)	Compostos cuja relação adequada é imprescindível para decomposição da matéria orgânica do lixo.	Determina a qualidade do composto. A relação C/N geralmente é da ordem de 35/1 a 20/1
BIOLÓGICAS	<p>Os microrganismos presentes nos RSU são responsáveis pela metabolização dos resíduos orgânicos. Sua caracterização, juntamente com as características químicas, definem as melhores formas de tratamento e disposição final. Atuam também como inibidores de cheiro utilizados nos veículos de coleta de resíduos sólidos, minimizando o incômodo à população durante todo o percurso realizado diariamente.</p> <p>Deve-se considerar, no entanto, que muitos microrganismos são patogênicos e, quando em desacordo com os limites legais, podem promover a contaminação de ambientes.</p>		

Fontes: adaptado de NBR 10007/ABNT (1987); IBAM (2001).

A Tabela 3.4 apresenta a composição típica do lixo domiciliar das cidades brasileiras (FARQUHAR, 1988, apud SEGATO & SILVA, 2000). Os valores são fornecidos em percentagem em relação ao peso total. As diferentes categorias (A, B, C e D) são referentes ao grau de degradabilidade dos resíduos sólidos.

Tabela 3.4 - Composição típica de resíduos sólidos municipais brasileiros.

Categoria	Componentes	Valores
A Componentes orgânicos facilmente degradáveis	Alimentos	5 – 20
	Resíduos de jardim	15 – 25
B Componentes orgânicos pouco degradáveis	Papéis	40 – 50
	Plásticos	1 – 5
	Madeiras	2 – 5
	Outros orgânicos	2 – 10
C Componentes inorgânicos metálicos	Ferro	5 – 10
	Outros metais	0 – 1
D Componentes inorgânicos não metálicos	Vidro	5 – 10
	Outros inorgânicos	2 – 5
	Umidade	20 – 30

Fonte: adaptado de FARQUHAR (1988), apud SEGATO & SILVA (2000).

O lixiviado, principal fonte de contaminação de uma disposição de RSU mal executada, é proveniente da decomposição dos resíduos da Categoria A, podendo carrear consigo uma boa parcela dos metais solúveis presentes na Categoria C. Por isso, ao se planejar um Aterro Sanitário é de fundamental importância que se projete um sistema de coleta de lixiviados acoplado a um eficiente sistema de tratamento de efluentes, minimizando desta forma os impactos ambientais.

Em um levantamento realizado pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana da cidade do Rio de Janeiro – COMLURB (2009), os materiais mais encontrados em aterros de RSU foram: alumínio, agregados finos, borrachas, cerâmicas, couros, fraldas, louças, madeiras, matérias orgânicas, metais ferrosos, metais não ferrosos, ossos, pedras, plásticos maleáveis, plásticos rígidos, tecidos e vidros. Na Tabela 3.5, são apresentados os resultados dos estudos da COMLURB para a cidade do Rio de Janeiro. Os valores

obtidos são uma relação percentual entre o peso de cada composto e o peso total da amostra obtida por quarteamento. A amostra anual coletada entre os anos de 2003 e 2007 corresponde a aproximadamente 17 toneladas.

Tabela 3.5 - Composição gravimétrica do lixo na cidade do Rio de Janeiro (2003 a 2007).

Compostos (%)	Cidade do Rio de Janeiro				
	2003	2004	2005	2006	2007
Recicláveis	40,2	32,8	33,7	33,8	36,3
Papel - Papelão	16,1	12,5	13,5	14,8	14,6
Plástico	19,2	15,4	15,3	14,7	17,2
Vidro	3,0	3,2	3,2	2,7	2,9
Metal	1,9	1,7	1,7	1,6	1,6
Matéria Orgânica	53,0	59,7	60,7	61,4	58,1
Rejeitos	6,8	7,5	5,6	4,8	5,6
Inerte Total	1,5	1,4	0,9	0,8	0,7
Folha / flores	2,3	2,1	1,1	1,3	1,75
Madeira	0,7	0,7	0,3	0,3	0,4
Borracha	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2
Pano - Trapo	1,8	1,5	1,6	1,6	1,75
Couro	0,26	0,27	0,22	0,07	0,21
Osso	0,01	0	0,04	0,02	0,00
Coco	...	1,27	1,17	0,41	0,58
Vela / Parafina	...	0,01	0,01	0,01	0,01
Total (%)	100	100	100	100	100

Fonte: adaptado da COMLURB (2009).

3.3. PRODUÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os resíduos gerados pela população de uma determinada cidade estão diretamente relacionados com o número de habitantes e com seus hábitos de consumo, nível cultural e poder aquisitivo.

De acordo com dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2000, no Brasil em média é gerado de 0,45 a 0,7 kg/habitante/dia de resíduos nos municípios com população inferior a 200 mil habitantes; e de 0,70 a 1,2 kg/habitante/dia nos municípios com população

maior que 200 mil habitantes. Estes dados evidenciam que a elevação do adensamento populacional implica no aumento da geração per capita de RSU, sendo este outro fator a ser considerado na estimativa de produção de resíduos.

Segundo o SNIS, no ano de 2007 foram coletadas 29,6 milhões de toneladas de resíduos domiciliares e públicos de 54,8% da população urbana do país. Esta quantidade permitiu determinar uma média de 0,97 kg/habitante/dia de resíduos gerados. Como em 2007 a população total do Brasil era de 183.987.291 habitantes, pôde-se estimar a geração total de resíduos em 190 mil toneladas diárias.

Fazendo-se a mesma consideração para o município do Rio de Janeiro, cuja população é de 15.420.375 habitantes e a média *per capita* de RSU igual a 1,09 kg/habitante/dia (SNIS, 2007), estima-se uma produção média diária de 16,8 mil toneladas. Portanto, ao considerar o peso específico do resíduo igual a 230 kg/m³ (Tabela 3.3), esta quantidade equivale ao volume total de aproximadamente 73.000 m³ de resíduos.

3.4. TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O tratamento dos resíduos sólidos urbanos relaciona-se com seu adequado manejo e tem por objetivo reduzir sua quantidade e/ou seu grau de poluição. As técnicas mais utilizadas são: reciclagem, compostagem, incineração e tratamento dos resíduos especiais.

A reciclagem contempla a separação e o reaproveitamento de materiais que podem ser utilizados como matéria prima pela indústria, contribuindo para a diminuição do volume de resíduos sólidos depositados nos aterros. Para que sua implementação seja eficiente, torna-se necessária a participação efetiva da sociedade na etapa inicial de separação do resíduo. Segundo levantamento do SNIS (2007), aproximadamente 1,8% do total dos resíduos (equivalente a 2.400 toneladas/dia) são recolhidos pelos catadores e

revendidos para indústrias que reaproveitam estes materiais na fabricação de novos produtos. A reciclagem no Brasil é de fato realizada por uma pequena parte da população com o objetivo de garantir fonte de renda, não fazendo parte da rotina da maioria.

A compostagem consiste na decomposição biológica natural da matéria orgânica dos resíduos pela ação de microrganismos. A presença de oxigênio durante o processo vai definir se a compostagem ocorrerá por via aeróbia ou anaeróbia. Na decomposição aeróbia, processo mais adequado aos RSU, é possível produzir a partir do resíduo um material apropriado para o emprego na fertilização do solo.

A incineração se resume na queima dos resíduos sob temperaturas que variam de 800°C a 1000°C. Neste processo é empregado oxigênio em excesso para estimular a combustão e são gerados gases, cinzas e escórias. Estes subprodutos tóxicos devem ser adequadamente tratados de modo a atender os limites estabelecidos pela Resolução de nº 316/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Esta normativa dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. A incineração, dada a energia requerida e o controle criterioso dos seus subprodutos, demanda um alto custo operacional.

Destaca-se que o PNRS proíbe a queima de resíduos a céu aberto ou em equipamentos e instalações não licenciados para esse intuito. Também foi vedada a catação de materiais recicláveis, bem como a construção de habitações nas áreas de disposição final de resíduos sólidos.

3.5. DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Alguns autores consideram a disposição final como a mais importante das fases de uma boa gestão dos resíduos sólidos, sendo o Aterro Sanitário considerado o método de destinação final mais econômico dos processos conhecidos, e o mais adequado para ser implantado nas cidades de todo mundo (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993). Mesmo

assim, a maioria dos municípios brasileiros não dispõe de aterros sanitários, efetuando a disposição dos resíduos diretamente no solo sem qualquer tipo de proteção ou cuidado, solução popularmente conhecida como lixão.

Segundo Rocha *et al.* (2003), a população se preocupa somente em ter um sistema de limpeza eficiente que colete o lixo e transporte-o para longe, sem se preocupar com os efeitos deletérios que uma disposição final mal executada causa ao meio ambiente. Os impactos ambientais negativos causados por um lixão afetam todos os aspectos do ambiente, seja no meio físico, pela contaminação do ar, do solo e das águas; seja no meio biótico, pois deteriora o habitat natural de diversas espécies; ou seja no meio antrópico pela disseminação de doenças de veiculação hídrica, transportadas por vetores ou por contaminantes lançados na atmosfera.

De acordo com dados do Plano Nacional de Saneamento Básico - PNSB (IBGE, 2000), a destinação final dos resíduos sólidos no Brasil está assim dividida: 21% em lixões, 37% em aterros controlados, 36% em aterros sanitários, e 6% são dispostos em outros locais como em usinas de compostagem e de incineração. Contudo, os dados mais recentes apresentados pelo SNIS em 2007 indicam a seguinte distribuição das soluções de disposição adotadas no país: 31,1% ainda são os lixões; 31,8% são os aterros controlados; e 37,1% são dispostos em aterros sanitários.

O lixão, também conhecido como vazadouro, é uma forma de manejo inadequada dos resíduos sólidos, pois este é disposto diretamente no solo sem nenhum controle. Esta operação indevida gera impactos ambientais negativos, atrai animais, vetores de doenças, além de catadores de qualquer idade e sem proteção ou preparo apropriados que sobrevivem da coleta do lixo.

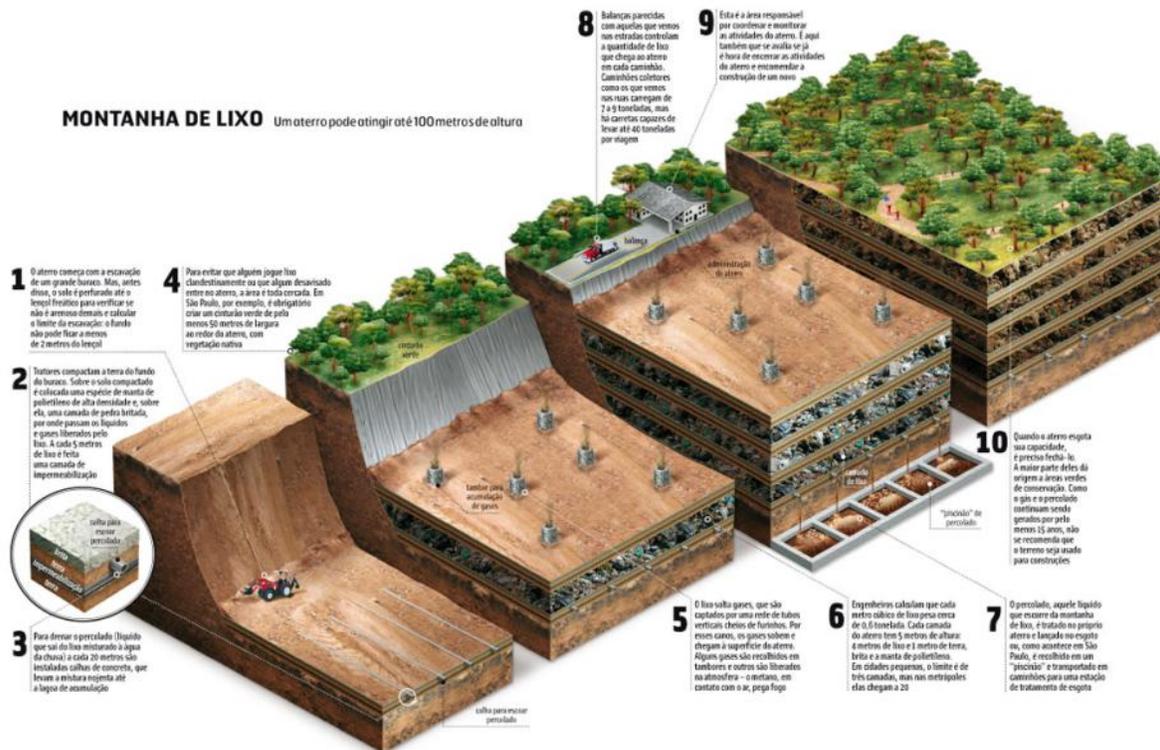
O aterro controlado é uma solução intermediária entre o lixão e o aterro sanitário destinado para o depósito de resíduos sólidos, onde são adotadas medidas que minimizam os impactos negativos produzidos pelos vazadouros, mas ainda não atendem

plenamente as normativas legais de controle ambiental. Muitas das vezes são antigos lixões que sofreram adaptações. Os aterros controlados possuem células com cobertura de argila, grama, captação de gás e lixiviado, além da recirculação deste para lançamento nas pistas onde circulam os veículos ou ainda aspergido em cima das pilhas de lixo. Contudo ainda são observados catadores, animais e insetos, além de não existir impermeabilização do solo a fim de impedir a contaminação dos lençóis freáticos pela percolação do lixiviado.

Já o aterro sanitário é a técnica mais adequada para disposição dos RSU, pois parte de um projeto que considera um conjunto de normas que garantem a boa operação da unidade e a redução dos impactos ao meio ambiente e à população. De acordo com a norma brasileira NBR 10.157 (1987), são estabelecidos critérios técnicos para que uma determinada área possa ser transformada em um aterro sanitário, destacando-se:

- Localização em área rural ou industrial;
- Distância mínima de 50 metros de corpos d'água, e de 200 metros de rios, lagos, lagoas e oceano;
- Distância mínima de 1.000 metros de núcleos residenciais urbanos com mais de 200 habitantes;
- Não pode ter proximidade a aeroportos ou aeródromos;
- Vida útil mínima desejada de 5 anos;
- Permeabilidade natural do terreno com características argilosas;
- Facilidade de acesso a veículos coletores de resíduos;
- Disponibilidade de material de cobertura ou proximidade às jazidas.

Na Figura 3.1 é possível observar as diversas etapas de um aterro sanitário (da construção até o seu encerramento), e em seguida apresenta-se um resumo destas 10 etapas.



Fonte: <http://autossustentavel.blogspot.com>

Figura 3.1 – Detalhes das etapas para realização de um aterro sanitário.

1. Preparação do aterro por meio de escavação do terreno;
2. Compactação do fundo do aterro, colocação de manta de polietileno para impermeabilização e de camada de brita para condução do lixiviado e do biogás;
3. Instalação de calhas para conduzir o lixiviado até a lagoa de acumulação;
4. Cercamento do aterro para não permitir a entrada de pessoas ou animais;
5. Instalação de calhas verticais para condução do biogás à superfície;
6. Compactação das camadas de RSU com separação destas a cada 5 metros de altura;
7. Criação de um sistema de tratamento do lixiviado no próprio aterro. Pode-se também prever o transporte deste efluente da lagoa de acumulação para uma estação fora do aterro;

8. Controle de todo o resíduo depositado no aterro (fonte geradora, transporte, volume, idade e o local exato do depósito);
9. Encerramento do aterro, com a finalização do recebimento de RSU;
10. Construção de áreas verdes em toda sua extensão, dando continuidade ao tratamento do lixiviado e do biogás por aproximadamente 15 anos.

Na Figura 3.2 apresenta-se um exemplo de aterro sanitário adequadamente instalado.



Fonte: <http://autossustentavel.blogspot.com>

Figura 3.2 – Vista geral do aterro sanitário da Caximba em Curitiba.

3.6. DEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Pode-se considerar o aterro sanitário como um grande reator a céu aberto, onde a mistura dos componentes orgânicos e inorgânicos sofre processos de oxidação e decomposição biológica em presença ou ausência de oxigênio e água. ROCHA (2005)

cita que o processo de degradação da matéria orgânica é um processo longo que depende da velocidade de degradação dos diferentes substratos, e seqüencial em razão dos metabolismos distintos que se sucedem ou se superpõem.

De acordo com MONTEIRO (2003), os principais fatores que influenciam o processo de decomposição da matéria orgânica são: a composição dos resíduos; a quantidade de água introduzida no processo; a temperatura; a forma de operação do aterro; o alto teor de ácidos voláteis; o pH; a quantidade de nutrientes e inibidores do processo; a presença de oxigênio e de hidrogênio; o tamanho das partículas; o grau de compactação dos resíduos; e a quantidade de matéria orgânica dos resíduos.

Já Lu *et al.* (1985) afirmam que o processo de estabilização dos resíduos pode ser dividido em apenas duas principais etapas biológicas: uma fase de degradação aeróbia, geralmente de curta duração, seguida de uma fase de degradação anaeróbia. CHERNICHARO (1999) descreve este processo de forma semelhante ao que ocorre em reatores anaeróbios para tratamento de águas residuárias.

WILLIAMS (2002) apresenta os conceitos e descreve o processo de decomposição dos RSU, dividindo-o em cinco etapas distintas como se mostra a seguir:

- Fase 1: Degradação Aeróbia ou Hidrólise é uma etapa cuja duração é de dias ou de, no máximo, semanas. Sua ocorrência depende da presença de oxigênio;
- Fase 2: Hidrólise e Fermentação, em que os microrganismos presentes são facultativos, tolerando o decaimento do teor de oxigênio. Hidrocarbonetos são hidrolisados para açúcares e há a formação de ácidos orgânicos;
- Fase 3: Fase Acetogênica, em que os ácidos orgânicos formados na fase anterior são convertidos por microrganismos acetogênicos para ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio;
- Fase 4: Fase Metanogênica, é a fase mais longa de todo o processo em que ocorre a produção do biogás pelas bactérias mesofílicas e termofílicas. A produção de biogás

pode durar até 30 anos após a deposição dos resíduos. Segundo QIAN *et al.* (2002) aterros encerrados em regiões de clima árido podem gerar uma quantidade mínima de gás por um longo tempo, talvez por até 100 anos;

- Fase 5: Oxidação, que é a fase final da degradação orgânica, com baixa produção de biogás e presença de lixiviados com menores concentrações.

3.7. BIOGÁS

O biogás ou gás de aterro é uma mistura gasosa, composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Sua geração é proveniente tanto da volatilização de compostos químicos como da biodegradação principalmente anaeróbia da matéria orgânica devido à ação de bactérias, fungos e protozoários. A presença de outros gases e sua distribuição percentual varia segundo o tipo e a quantidade dos resíduos degradados e ainda em função da idade do aterro. Para aterros antigos (iniciados a mais de 10 anos) QIAN *et al.* (2002) indicam uma produção média anual de $2,50 \text{ Nm}^3$ por tonelada de resíduo aterrado. O ReCESA (2008) estima uma geração de 370 a 400 Nm^3 por tonelada de matéria seca digerida.

Segundo QIAN *et al.* (2002) o gás produzido em aterros de resíduos sólidos é comumente composto de: 48 a 55% de metano; 35 a 45% de dióxido de carbono; 1 a 20% de nitrogênio (N_2); 1 a 5% de oxigênio (O_2), hidrogênio (H_2) e vapor d'água; 1 a 3% de outros gases. Já TCHOBANOGLUS *et al.* (1993) apresenta os seguintes percentuais para composição do biogás: 45 a 70% para metano; 40 a 60% para dióxido de carbono; 2 a 5% para nitrogênio; 0,1 a 1,0% para oxigênio; 0 a 1,0% para enxofre (S_2), mercaptanos e outros; 0,1 a 1,0% para amônia (NH_3); 0 a 1% para hidrogênio; 0 a 0,2% para monóxido de carbono (CO), e 0,01 a 0,6% para outros gases.

Em medições de campo realizadas por BACELAR *et al.* (2009), foi detectada a seguinte composição do gás gerado no aterro metropolitano de Gramacho: aproximadamente 55% de metano; 40% de dióxido de carbono; e 5% de outros gases, incluindo o hidrogênio, oxigênio, ácido sulfídrico (H₂S), amônia e nitrogênio.

O metano presente no biogás é produto da decomposição anaeróbia e, a partir de concentrações de 5%, pode ser explosivo. O dióxido de carbono é um subproduto das fases aeróbia e anaeróbia de decomposição do maciço de resíduos, que contribui para o aumento da dureza e diminuição do pH da água de percolação. A presença de nitrogênio e oxigênio em gás de aterro pode ser resultado da intrusão de ar através da cobertura do aterro, ou do vazamento de ar no controle do sistema recuperação de gás, ou ainda do vazamento de ar durante a coleta de amostras. Tipicamente o volume combinado destes dois gases deve ser menor que 10%, e o seu aumento pode indicar vazamento de ar no sistema de coleta.

No mesmo contexto, o hidrogênio é somente produzido durante a decomposição aeróbia e nos primeiros estágios da decomposição anaeróbia. Concentrações residuais de hidrogênio em um aterro velho (em fase metanogênica) podem indicar áreas com baixa produtividade de biogás. Já o vapor d'água é proveniente da água evaporada do percolado no maciço de resíduos e conseqüentemente incorporado ao gás.

Ainda que represente um percentual pequeno (<0,1%) na composição do biogás, a concentração de gás sulfídrico detectada (entre 150 e 350 ppm) é capaz de causar efeitos sobre os seres humanos como a perda de olfato e irritação nos olhos quando em exposição entre 2 e 15 minutos (MAINIER & VIOLA, 2005).

Por fim, a presença de outros gases é provavelmente causada pela disposição de resíduos no aterro contendo estes compostos, embora alguns possam também estar presentes como resultado de processos naturais de decomposição. Cerca de 150

diferentes gases podem ser identificados no biogás, embora nem todos os aterros apresentem todos estes compostos (QIAN *at al.* 2002).

No Brasil, cerca de 5 a 10% do total de gases poluentes existentes na atmosfera foram gerados pelos aterros sanitários, aterros controlados e lixões (REAL, 2005 *apud* GUEDES, 2007). Este aspecto reforça a necessidade de tratamento do biogás gerado no aterro sanitário antes deste ser lançado para atmosfera. Deve-se destacar a queima e a recuperação de energia como métodos de tratamento do biogás usualmente empregados.

A queima é um método comum de tratamento efetivo no controle de odores desde que o gás apresente quantidade suficiente de metano (valores superiores a 20% do volume total). Sua combustão converte este em calor, água e dióxido de carbono. Sendo o metano um dos principais responsáveis pelo efeito estufa, e 21 vezes mais poluente que o CO₂, este processo é valorizado no mercado de carbono conforme estabelecido no protocolo de Kyoto. O tratado ambiental entrou em vigor em 2005, com o objetivo de reduzir em 5,2% as emissões de gases de efeito estufa referente às quantidades registradas em 1990.

A recuperação de energia, que depende da qualidade e da quantidade do gás gerado, é utilizada em muitos aterros, particularmente em unidades de maior porte, onde a operação e o projeto fazem dela economicamente viável. Em aterros menores o biogás pode ser utilizado tanto para conversão em energia elétrica como principalmente para promover combustão que seja requerida dentro do próprio aterro. Neste sentido, torna-se viável a evaporação do lixiviado gerado utilizando como fonte de calor o próprio biogás.

No Brasil já existem projetos implantados de aproveitamento do biogás em aterros sanitários para geração de energia elétrica e/ou obtenção de créditos de carbono, com destaque para quatro deles: i) Consórcio Biogás, que gera energia elétrica com gás proveniente do aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo; ii) Projeto Nova Gerar, pioneiro no mercado internacional de crédito de carbono, utilizando biogás gerado no

aterro sanitário de Nova Iguaçu/RJ; iii) Projeto VEGA, responsável pela geração de energia a partir do gás do aterro sanitário de Salvador/BA; iv) Contrato firmado em 18 de janeiro de 2010, no âmbito do Consórcio Novo Gramacho, responsável pelo sistema de captação, tratamento e venda de biogás do aterro metropolitano de Gramacho/RJ para a refinaria de petróleo da Petrobrás em Duque de Caxias /RJ (Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010).

Salienta-se que a queima do biogás com intuito de reduzir a emissão de metano para a atmosfera também proporciona o lançamento de contaminantes para o meio ambiente. A evaporação de lixiviado não reduz estas emissões, mas dá um melhor aproveitamento à energia gerada na queima.

3.8. LIXIVIADO

3.8.1. Definição

Segundo a NBR 8849/1985, o lixiviado, também denominado chorume, pode ser definido como líquido percolado resultante da decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, tendo como características: cor escura, mau cheiro, elevada concentração de amônia e DBO. Na maioria dos aterros sanitários o lixiviado sofre ainda interferências de fontes externas, tais como: sistemas de drenagem superficial, precipitação atmosférica, evapotranspiração, existência de lençol freático e de nascentes, recirculação dos líquidos gerados, umidade, vegetação, dentre outras.

3.8.2. Quantidade de Lixiviado Gerado

A quantidade de lixiviado gerado no aterro sanitário pode ser calculada através do balanço hídrico, que deve levar em consideração todos os fatores que interferem direta e indiretamente no seu processo de formação, tais como: teor de umidade do lixo e do

material de cobertura; infiltração de água superficial; consumo de água nas reações químicas; evaporação e drenagem do percolado.

A quantificação da vazão de lixiviado também pode ser feita pelo método suíço, conforme a Equação 3.1.

$$Q = \frac{P \cdot A \cdot k}{t} \quad \text{Equação 3.1}$$

onde,

Q - vazão média do lixiviado (L/s);

P - precipitação média anual (mm);

A - área do aterro (m²);

k - coeficiente utilizado para caracterizar o grau de compactação dos resíduos,

t - número de segundos em um ano (s).

Os valores atribuídos para **k** são oriundos da observação experimental e dependente do peso específico dos resíduos, variando entre 0,15 e 0,50. O grau de compactação e o coeficiente **k** são inversamente proporcionais (Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento - ReCESA, 2008).

3.8.3. Composição do Lixiviado

Pode-se destacar como fatores que influenciam nas características do lixiviado: tipo de resíduo, grau de decomposição, clima, época do ano, idade do aterro, profundidade do resíduo aterrado, tipo de operação do aterro, dentre outros (REINHART & GROSH, 1998). A Tabela 3.6 reúne informações de alguns aterros sanitários jovens em cinco países em diferentes partes do mundo. Já na Tabela 3.7 é apresentada a composição típica média característica do lixiviado para aterros de RSU dos Estados Unidos, ressaltando a diferença de composição entre aterros novos e antigos.

Tabela 3.6 – Composição típica do lixiviado para aterros sanitários jovens no mundo.

Aterros Sanitários	pH	DQO	DBO	NH ₄	NTK	DBO/DQO
Montreal, Canadá	5,7	12.760	5.000	179	218	0,39
Montevideú, Uruguai	8,0	18.550	10.500	1.470	1.640	0,57
Istambul – Komurcuoda, Turquia	7,5	21.500	13.150	2.160	2.410	0,61
Kyungjoo, Coréia	7,3	24.400	10.800	1.682	1.766	0,44
Thessaloniki, Grécia	6,2	70.900	26.800	3.100	3.400	0,38

Fonte: adaptado de Santos (2010).

Tabela 3.7 - Composição típica do lixiviado para aterros de RSU nos EUA.

Parâmetros	Idade do aterro (anos)			
	0 a 5	5 a 10	10 a 15	> 20
DBO (mg/L)	10.000 - 25.000	1.000 - 4.000	50 - 1.000	< 50
DQO (mg/L)	15.000 - 40.000	10.000 - 20.000	1.000 - 5.000	< 1.000
NTK (mg/L)	1.000 - 3.000	400 - 600	75 - 300	< 50
N - NH ₃ (mg/L)	500 - 1500	300 - 500	50 - 200	< 30
ST (mg/L)	10.000 - 25.000	5.000 - 10.000	2.000 - 5.000	< 1.000
pH	3 - 6	6 - 7	7 - 7,5	7,5
Cálcio (mg/L)	2.000 - 4.000	500 - 2.000	300 - 500	< 300
Sódio e Potássio (mg/L)	2.000 - 4.000	500 - 1.500	100 - 500	< 100
Ferro e Magnésio (mg/L)	500 - 1.500	500 - 1.000	100 - 500	< 100
Zinco (mg/L)	100 - 200	50 - 100	10 - 50	< 10
Cloreto (mg/L)	1.000 - 3.000	500 - 2.000	100 - 500	< 100
Sulfato (mg/L)	500 - 2.000	200 - 1.000	50 - 200	< 50
Fósforo (mg/L)	100 - 300	10 - 100	-	<10

Fonte: adaptado de Gomes *et al.* (2009).

É possível observar na Tabela 3.6, pela composição dos lixiviados, que os aterros sanitários apresentam idade entre 0 a 5 anos se comparados às composições típicas dos aterros norte americanos, ilustradas na Tabela 3.7, com exceção do aterro de Montreal que se emoldura aos de idade entre 5 a 10 anos de idade (também considerados jovens).

Por fim, para demonstrar as faixas de cada parâmetro físico-químico analisado, são apresentadas na Tabela 3.8 as características para os lixiviados gerados nos aterros de RSU nacionais, com destaque para o aterro metropolitano de Jardim Gramacho que atende aproximadamente 80% da cidade do Rio de Janeiro, e produz uma média de 1.500 m³ de lixiviado diariamente.

Tabela 3.8 – Variação da composição típica do lixiviado para aterros de RSU no Brasil.

Variáveis	Faixa máxima Brasileira	Faixa mais provável	Aterro de Gramacho
DBO (mg/L)	< 20.000 - 30.000	< 20.000 - 8.600	118 - 857
DQO (mg/L)	190 - 80.000	190 - 22.300	804 - 4255
Cloreto (mg/L)	500 - 5.200	500 - 3.000	-
Alcalinidade total (mg/L)	750 - 11.400	750 - 7.100	2.800 - 24.000
Dureza (mg/L)	95 - 3.100	95 - 2.100	-
N-amoniaco (mg/L)	0,4 - 3.000	0,4 - 1.800	76 - 3.565
N-orgânico (mg/L)	5 - 1.200	400 - 1.200	-
N-nitrito (mg/L)	0 - 50	0 - 15	0,02 - 2,4
N-nitrato (mg/L)	0 - 11	0 - 3,5	0,1 - 6,2
NTK (mg/L)	80 - 3.100	Não há	-
pH	5,7 - 8,6	7,2 - 8,6	7,7 - 9,1
Fósforo total (mg/L)	0,1 - 40	0,1 - 15	14 - 60
SST (mg/L)	5 - 2.800	5 - 700	13 - 256
SSV (mg/L)	5 - 530	5 - 200	2 - 153
ST (mg/L)	3 200 - 21.900	3 200 - 14.400	440 - 18.160
STF (mg/L)	630 - 20.000	630 - 5.000	-
STV (mg/L)	2 100 - 14 500	2 100 - 8.300	-
Ferro (mg/L)	0,01 - 260	0,01 - 65	-
Manganês (mg/L)	0,04 - 2,6	0,04 - 2,0	-
Cobre (mg/L)	0,005 - 0,6	0,05 - 0,15	-
Níquel (mg/L)	0,03 - 1,1	0,03 - 0,5	-
Cromo (mg/L)	0,003 - 0,8	0,003 - 0,5	-
Cádmio (mg/L)	0 - 0,26	0 - 0,065	-
Chumbo (mg/L)	0,01 - 2,8	0,01 - 0,5	-

Fonte: adaptado de Souto e Povinelli (2007), e Gomes *et al.* (2009).

3.8.4. Tratamento do Lixiviado

Diante da composição variável do lixiviado é fácil se compreender a dificuldade de tratá-lo de forma adequada. Diversas técnicas podem ser empregadas para o manejo do lixiviado dentro de um aterro sanitário, dentre as quais se destacam: recirculação, evaporação, tratamento biológico seguido de disposição e tratamento combinado em estações de tratamento de esgotos domésticos.

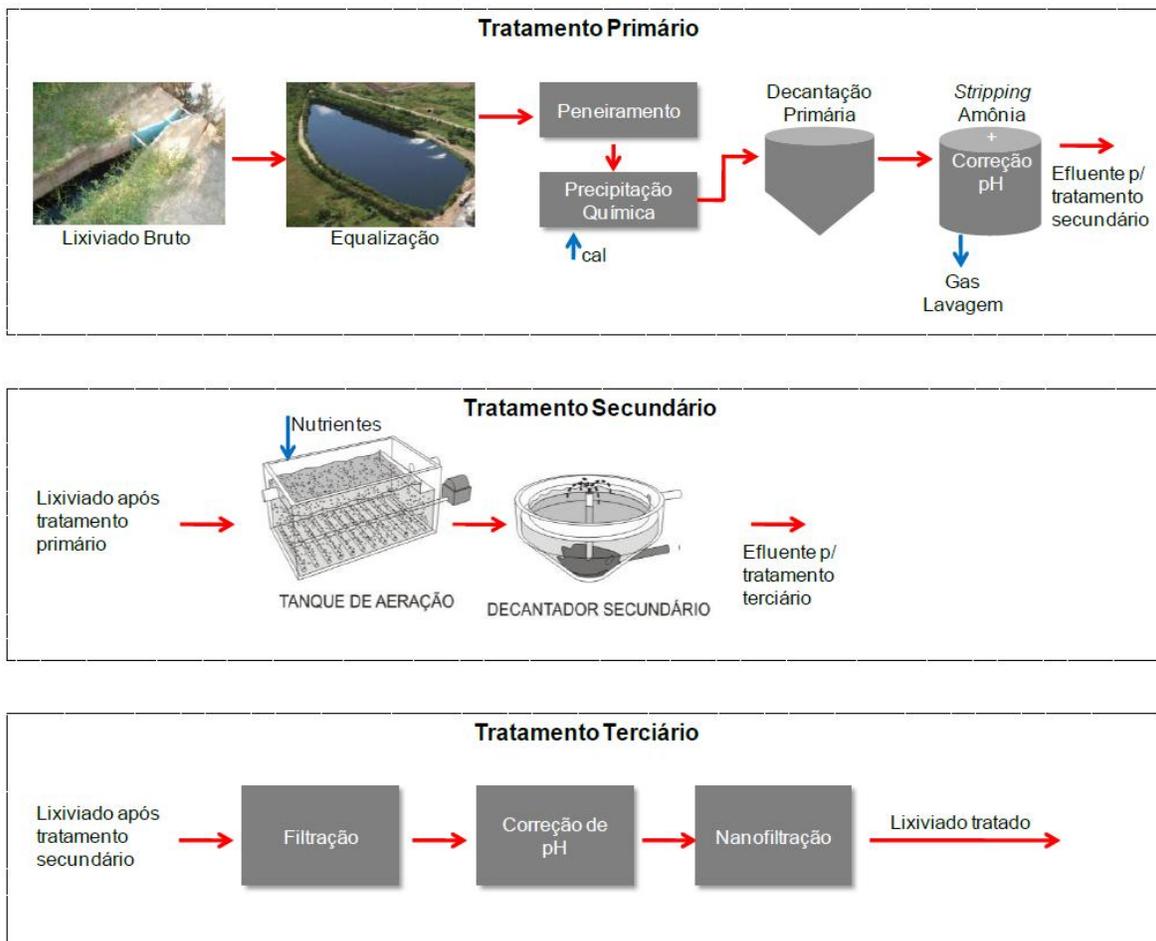
JUCÁ (2003) considera que tais técnicas apresentam limitações para obter bom desempenho na remoção de contaminantes e consequente atendimento aos padrões ambientais vigentes. Processos biológicos convencionais, assim como a recirculação, em geral não são eficientes na remoção de nitritos, nitratos, amônia, metais pesados e/ou sais dos lixiviados. As estações de tratamento de esgoto que não foram projetadas e não estão dimensionadas para receber este tipo de efluente, ainda que sob pequenas diluições.

O tratamento secundário via processo biológico, normalmente lodos ativados têm sido largamente empregados para lixiviados. Esta tecnologia requer a implantação de tratamento terciário por processo físico-químico de filtração, com destaque para a osmose reversa, a nanofiltração e a ultrafiltração.

Segundo POVINELLI e SOUTO (2007), o tratamento do lixiviado é o principal problema encontrado nos aterros diagnosticado pelos profissionais que atuam nesta área, e que ainda não foi encontrada uma técnica para solucionar esta dificuldade.

.A Figura 3.3 apresenta o fluxograma de tratamento do lixiviado produzido no aterro de Gramacho (SANTOS, 2010), cujas etapas são: (a) tratamento preliminar instalado à montante da estação, composto por lagoa de equalização; (b) tratamento primário físico-químico com coagulação/floculação, clarificação, *stripping* de amônia e correção de pH; (c) tratamento secundário biológico por processo de lodos ativados e; (d)

tratamento terciário por filtração e nanofiltração. Segundo PENIDO (2009), a operação desta unidade, que opera desde maio de 2009, demanda um gasto de aproximadamente R\$ 25,00/m³ de lixiviado tratado.



Fonte: SANTOS (2010) adaptado de PENIDO (2009).

Figura 3.3 – Fluxograma da estação de tratamento do Aterro de Jardim Gramacho.

Embora existam opções tecnológicas eficientes para tratamento de lixiviados, estas demandam custos de implantação e operação que, dependendo da capacidade econômico-financeira do gestor dos serviços, dificultam sua adoção em larga escala. Portanto, processos como a evaporação do lixiviado pode ser uma alternativa viável de tratamento.

3.9. EVAPORAÇÃO DO LIXIVIADO

A evaporação, um dos três tipos da vaporização, trata-se de um processo no qual as moléculas ou átomos ganham energia suficiente e passam do estado líquido para o estado de vapor (em um processo lento), pelo aumento da temperatura e sob pressão constante.

Já a ebulição, outro tipo de vaporização, é uma forma mais rápida de um líquido passar para o estado gasoso quando comparado à evaporação. Mantendo a pressão constante, a ebulição ocorre a uma determinada temperatura com agitação das partículas do líquido e com formação de bolhas. Contudo ela não ocorre quando o líquido é aquecido em um sistema fechado, pois a pressão e a massa específica do vapor elevam-se a medida que a temperatura se eleva. Ao mesmo tempo, a massa específica do líquido diminui em consequência da sua expansão. (ATKINS & DE PAULA, 2008).

Ao contrário da evaporação, a condensação ocorre pela atração entre as moléculas dos gases a baixas temperaturas, e não havendo energia cinética suficiente para escapar desta atração, o gás é convertido em líquido. (ATKINS & DE PAULA, 2008).

A evaporação do lixiviado, utilizada como alternativa de tratamento em alguns países europeus, nos Estados Unidos e no Brasil, apresenta como vantagem a considerável redução de volume do efluente tratado (GOMES, 2009). Duas metodologias distintas são utilizadas no processo da evaporação: (a) evaporação natural, que utiliza como fonte de energia calórica a radiação solar, a umidade relativa e o vento, principalmente em tratamentos por aspersão do lixiviado; (b) evaporação forçada, que utiliza como fonte de energia calórica a queima do biogás ou do gás GLP, a energia elétrica, dentre outros.

De acordo com GOMES *et al*, (PROSAB 2009), a evaporação natural ou forçada do lixiviado apresenta-se como uma tecnologia limpa, de baixo custo de implantação,

operação, e de fácil manutenção, adequando-se principalmente a aterros de pequeno e médio porte, e possibilitando ainda, a obtenção de créditos de carbono.

3.9.1. Evaporação Natural do Lixiviado

A evaporação natural pode fazer uso de tanques abertos ou de lagoas de equalização, onde o lixiviado é evaporado pela combinação do vento e da radiação solar. Por depender da energia solar, é aplicada em locais com altos índices de insolação. Esta metodologia pode ser associada à aspersão do lixiviado a fim de acelerar o processo de evaporação. No entanto, deve-se considerar que esta aspersão pode ocasionar um aumento do odor no entorno da instalação de tratamento.

QASIM & CHIANG (1994) citam um trabalho realizado por Chiang, Patel e Associados que desenvolveram estimativas de custos de implantação, operação e manutenção de diferentes tecnologias de tratamento de lixiviados. No caso das lagoas de evaporação, o custo total de tratamento (implantação e operação) varia de US\$ 0,36/m³ a US\$ 1,78/m³ para uma faixa de vazão entre 20 L/min a 380 L/min. Ressalta-se que esses valores foram alcançados considerando-se uma taxa anual de evaporação de 30 cm.

JORGE (2008) realizou seu estudo em uma planta piloto para avaliar o desempenho da evaporação natural de lixiviado. A unidade era composta por tanques, aspersores, e um grande painel de evaporação onde o lixiviado era pulverizado. Os resultados indicaram que a contaminação do ar em função da dispersão se limita a uma pequena área ao redor da unidade, com a presença de microrganismos num raio de até 8 metros.

Estudos de SÁ (2008) utilizaram como unidade experimental um tanque raso de aço galvanizado onde era depositado o lixiviado, coberto com placas de vidro inclinadas em relação à sua superfície. Esta configuração visou otimizar o aquecimento provocado pela incidência de radiação solar, com o funcionamento similar ao de uma estufa. O vapor

gerado era condensado ao atingir a superfície mais fria das placas de vidro e, devido à inclinação destas, se deslocava por gravidade até as canaletas coletoras laterais. A configuração desta unidade minimiza os impactos negativos produzidos sobre o entorno da instalação, diferentemente do observado na evaporação por aspersão. O rendimento horário obtido foi de 135,4 ml de lixiviado evaporado.

3.9.2. Evaporação Forçada do Lixiviado

A evaporação forçada é uma alternativa à natural, pois, utilizando o mesmo conceito, consegue elevar o rendimento do processo a partir de uma maior demanda energética. Esta técnica pode ser implantada no próprio aterro utilizando o biogás ali gerado como fonte de energia calórica.

A operacionalização das unidades de evaporação forçada devem considerar algumas propriedades do lixiviado, tais como: concentração do lixiviado, solubilidade, formação de espumas, temperatura, pressão e incrustações de resíduos (GEANKOPLIS, 1993 *apud* BAHÉ, 2008).

Segundo BIRCHLER *et al.* (1994), a evaporação, que produz uma elevada quantidade de condensado, é mais facilmente descartada do que em processos convencionalmente utilizados em tratamento de lixiviados. Os volumes dos resíduos concentrados representam uma pequena fração do volume de lixiviado original. Neste estudo foram utilizadas amostras de aterro novo e antigo sob diferentes ajustes de pH (ácido, básico e ácido-base).

O processo da evaporação forçada resulta em fluidos formados por componentes voláteis, amônia, organoclorados além de resíduos pastosos formado por partículas sólidas presentes no lixiviado. De acordo com os pesquisadores o processo de evaporação produz espumas, incrustações e possíveis corrosões (IPT, 2000).

Segundo BAHÉ (2008), o tratamento de lixiviado pela evaporação forçada reduz o volume em 90%, e pode aproveitar o biogás gerado no próprio aterro como fonte de energia calórica. De acordo com GOMES (2009), equipamentos com função de aquecer o líquido percolado são utilizados atualmente na Europa, nos Estados Unidos e no Brasil, contudo se faz necessário o controle de emissões dos resíduos gerados, de acordo com as leis instituídas em cada local a fim de se obter recursos com o crédito de carbono. No intuito de avaliar esta tecnologia, foram desenvolvidos em laboratório diversos ensaios por um equipamento semelhante à destilação fracionada, obtendo amostras (vapor condensado) de 70% do volume inicial para condução das análises físico-químicas. Os resultados destas apontaram uma redução significativa de DQO, DBO, cloretos, além da detecção de alta concentração de nitrogênio amoniacal.

Os compostos de nitrogênio são tratados como: nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrogênio Kjeldahl, nitrato e nitrito. Em uma análise química, estes parâmetros podem ser definidos como série nitrogenada.

A amônia é a forma mais reduzida de nitrogênio orgânico, compreendendo o NH_3 (amônia) e NH_4^+ (ion amônio) dissolvidos. Apesar da amônia ter uma pequena representação no ciclo total do nitrogênio, contribui para a fertilização da água, pois o nitrogênio é um essencial nutriente para as plantas. Águas naturais contém concentrações de nitrogênio amoniacal inferiores a 0,1 mg/L. Sabe-se ainda que a presença de matéria orgânica na água pode ser indicada por compostos de nitrogênio.

A amônia não afeta ao homem ou aos mamíferos em geral, entretanto peixes são mortos por asfixia em águas com grande quantidade de amônia, pois a capacidade de transporte de oxigênio do sangue destes animais é reduzida. Sais de amônia também destroem os concretos, e a interação da amônia com o cloro pode afetar a eficiência da desinfecção da água (UTFPR, 2002).

MARKS *et al.* (1994) e BIRCHER *et al.* (1994), realizaram experimentos com amostras de lixiviado acidificado com ácido sulfúrico, obtendo 99% de remoção para amônia e de 98,5% para demanda química de oxigênio (DQO), no entanto foi determinada uma concentração de 64,32 mg/L para ácidos orgânicos voláteis (AOV), devido a acidificação.

GIUST *et al.* (2007) realizou um estudo em dois aterros sanitários localizados no norte de Paris, onde foram utilizadas duas diferentes tecnologias de tratamento do lixiviado: a evaporação e a osmose reversa. As amostras de efluentes dos dois aterros, apresentando diferentes características, foram encaminhadas para um tratamento combinado. A primeira amostra de lixiviado era proveniente de um aterro ainda em operação, e a segunda amostra proveniente de um aterro já encerrado. O tratamento do lixiviado do primeiro aterro utilizou o processo de evaporação. Já o lixiviado proveniente do segundo aterro foi submetido à osmose reversa. O vapor condensado da evaporação e o efluente da osmose reversa foram conduzidos a uma segunda unidade de osmose reversa. O efluente final de ambos lixiviados apresentaram concentrações de DQO < 30 mg/L, de DBO < 5 mg/L e de Nitrogênio amoniacal < 0,5 mg/L. As duas linhas de tratamento implementadas apresentaram um custo de 8,4 euros/m³ de lixiviado tratado. Este valor considera o aproveitamento do biogás na produção de energia elétrica.

Estudos do Programa de Saneamento Básico (PROSAB) – Edital 05 - desenvolvidos pela UFRJ (GOMES *et al.*, 2009) avaliaram o desempenho de equipamento de evaporação forçada instalado no aterro de Gramacho. A alimentação do equipamento, denominado Evaporador Unitário (EU), era feita a partir de uma lagoa de armazenamento próxima a um poço de biogás. Este era conduzido ao interior do equipamento e então queimado para a liberação de energia calórica, conduzindo a evaporação do lixiviado.

O EU operou sob rendimento médio diário de 30 litros evaporados por hora. Com este desempenho, e considerando uma vida útil do equipamento igual a 5 anos, foi possível estimar os seguintes custos operacionais do tratamento:

- Fabricação (incluindo a lagoa ou reservatório de acumulação do lixiviado): US\$ 4.500,00;
- Operação (parcela referente ao salário do funcionário responsável pelo monitoramento diário): US\$ 2.500,00/ano;
- Manutenção (material e mão de obra para limpeza bimensal, pintura de proteção e para a substituição das flautas internas de aço inox): US\$ 650,00/ano.

Considerando um custo total anual para operação e manutenção do EU de US\$ 4.050,00 e, sabendo-se que o equipamento tem capacidade para evaporar até 350 m³ de lixiviado por ano (considerando a capacidade máxima de evaporação do EU igual a 1m³/dia), o custo total operacional do tratamento será de aproximadamente US\$ 11,60/m³ de lixiviado tratado.

Naturalmente existirão ainda os custos referentes às avaliações periódicas, destinadas a atender às exigências requeridas pelos órgãos ambientais responsáveis, além das adaptações necessárias para satisfazer as normas vigentes. Porém existirão como arrecadações, os créditos de carbono relativo ao aproveitamento do biogás no aterro (BACELAR, 2009).

CAPÍTULO 4

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve a metodologia e os equipamentos utilizados para o desenvolvimento da parte experimental desta pesquisa. Para melhor compreensão da estrutura dada optou-se por apresentá-la segundo dois grandes temas: caracterização do lixiviado e caracterização dos resíduos da evaporação.

Destaca-se que todas as etapas conduzidas neste trabalho utilizaram amostras coletadas no aterro metropolitano de Jardim Gramacho/RJ (Figura 4.1), unidade sob responsabilidade da COMLURB. Este aterro possui uma área de 1.300.000 m², iniciou sua operação em 1978 e tem previsão para encerramento das atividades em 2011.

A descrição detalhada dos procedimentos adotados encontra-se apresentada nos itens a seguir.



Fonte: Google maps – agosto de 2010.

Figura 4.1 – Vista superior do Aterro Metropolitano de Jardim Gramacho – RJ.

4.1. Caracterização do Lixiviado Gerado no Aterro

4.1.1. Coleta do Lixiviado

As amostras foram coletadas na entrada da lagoa de equalização (Figura 4.2), por onde aflui parte do lixiviado proveniente das células do aterro de Gramacho.



Figura 4.2 – Lagoa de equalização do lixiviado do aterro de Gramacho, com destaque para o ponto de coleta.

Nos ensaios de evaporação em bancada sob temperatura constante (Etapa 1 – item 4.2.2) as amostras foram coletadas em campanhas diferentes, realizadas no período entre Abril/2007 e Outubro/2008. Já para os experimentos conduzidos sob diferentes temperaturas (Etapa 2 – item 4.2.3), foi realizada a coleta de uma única alíquota no dia 01 de dezembro de 2009. Neste caso, todo o procedimento de amostragem e preservação encontra-se descrito a seguir.

As amostras coletadas foram colocadas inicialmente em um recipiente de 50 litros, conforme ilustra a Figura 4.3. Após adequada homogeneização, a amostra foi transferida para frascos de vidros âmbar autoclavados (Figura 4.4), mais adequados para o armazenamento deste efluente. O lixiviado foi então preservado a uma temperatura de aproximadamente 10^o C no laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.



Figura 4.3 – Coleta e homogeneização da amostra de lixiviado bruto – Lagoa de Equalização do Aterro de Gramacho.



Figura 4.4 – Transferência do lixiviado para os frascos de armazenamento.

No dia da coleta foram medidas as temperaturas ambientes (31°C) e do lixiviado bruto no ponto de coleta ($30,7^{\circ}\text{C}$ – Figura 4.5).



Figura 4.5 – Medição da temperatura no local de coleta.

Para a caracterização do lixiviado bruto foram considerados os seguintes parâmetros: DQO, DBO, cloretos, alcalinidade, NH_4 , SST (sólidos suspensos totais), pH, cor e turbidez. Essas análises foram realizadas pelo Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA) da UFRJ.

Análises complementares de metais, semi-metais e não metal foram realizadas pelo Laboratório de Desenvolvimento Analítico (LADA) do Instituto de Química da UFRJ. Os elementos especificamente quantificados foram: alumínio, arsênio, prata, boro, bário, cádmio, cobalto, cromo, cobre, ferro, manganês, molibdênio, níquel, chumbo, antimônio, selênio, vanádio e zinco.

4.2. Caracterização dos Resíduos da Evaporação Forçada

Os resíduos gerados no processo de evaporação do lixiviado podem ser identificados como: (a) vapor gerado que, neste caso, foi condensado para facilitar a análise laboratorial; (b) resíduo pastoso, que se trata do material concentrado que não é evaporado durante os experimentos, convencionado como Resíduo 1.

Os experimentos de evaporação se desenvolveram em laboratório, conforme descrito nas seguintes etapas a seguir.

4.2.1. Ensaios de Laboratório para as Amostras Geradas no Campo

As amostras geradas no campo foram coletadas de um equipamento de evaporação forçada, instalado em caráter experimental no aterro de Gramacho. Nesta etapa o equipamento operou, em períodos diferentes, em quatro poços de biogás e foi alimentado continuamente com lixiviado proveniente de uma lagoa de acumulação, construída próxima ao equipamento (ANEXO I).

Um segundo resíduo (sólido), convencionado como Resíduo 2, foi coletado durante as limpezas do equipamento, realizadas em intervalos bimestrais. Os parâmetros de controle utilizados para avaliação dos vapores condensados e resíduos 1 e 2 foram os mesmos utilizados para o lixiviado bruto: DQO, DBO, cloretos, alcalinidade, NH_4 , SST, pH, cor e turbidez.

4.2.2. Ensaios de Laboratório com Diferentes Lixiviados - ETAPA 01

A etapa 01 se caracterizou pela evaporação sob temperatura constante do líquido (aproximadamente 100°C), sendo utilizadas nos ensaios amostras de lixiviado coletadas em diferentes campanhas realizadas no aterro de Gramacho. Os experimentos desta etapa (Figura 4.6) foram conduzidos no Laboratório de Geotecnia (COPPE/UFRJ). No ensaio, 1 litro de lixiviado bruto foi colocado dentro de um balão de 3 litros juntamente com pérolas de vidro. O aquecimento foi viabilizado pelo emprego de uma manta elétrica, porém nesta etapa do experimento não foi monitorada a temperatura de aquecimento. Os vapores gerados foram conduzidos por uma coluna de vidro até alcançar o condensador, permitindo sua condensação e posterior coleta em erlenmeyer de 2 litros. Para garantir a

preservação da amônia na amostra procedeu-se o resfriamento do recipiente de coleta com bolsas térmicas de propilenoglicol refrigeradas.

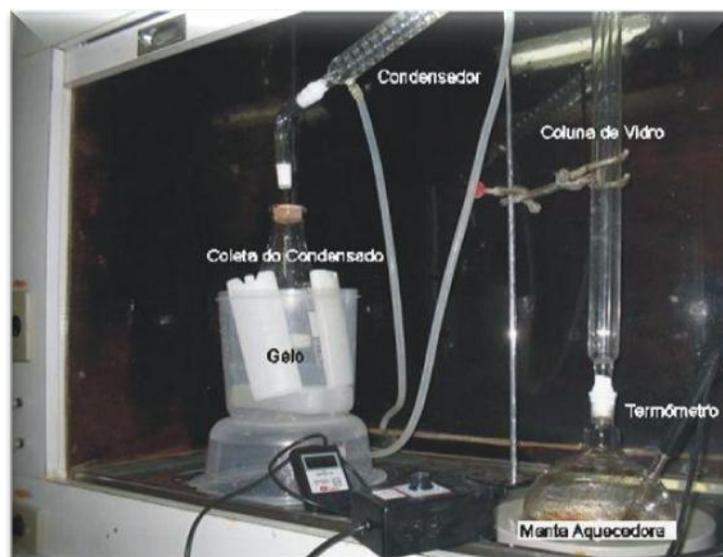


Figura 4.6 – Equipamento de evaporação em bancada.

As amostras do vapor condensado e do resíduo 01 da evaporação foram analisadas pelo LEMA/UFRJ, segundo os mesmos parâmetros apresentados no item 4.1.1.

Especificamente para o vapor condensado foram obtidas ainda as seguintes determinações: metais (USEPA 3005A e 7470A); compostos orgânicos voláteis (Método USEPA 8260B - Figura 4.7); compostos orgânicos semi-voláteis (Método USEPA 8270C); dioxinas e furanos (Método USEPA 8290 e 1613). Estas análises foram executadas por laboratório externo (*Analytical Solutions S.A.*).



Figura 4.7 – Equipamento utilizado para as análises de compostos orgânicos voláteis.

Para verificação da presença de algum fragmento de DNA de bactéria, foi aplicada a técnica de PCR (Polymerase Chain Reaction ou Reação de Polimerização em Cadeia) nas amostras do vapor condensado obtidas em bancada. O PCR é uma metodologia que se baseia na amplificação exponencial seletiva de uma quantidade reduzida de DNA em uma amostra. Após esta amplificação, o material é submetido à técnica de DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis ou Eletroforese em Gel de Gradiente Desnaturante). O DGGE é um método de separação eletroforético baseado em diferenças no comportamento de desnaturação de fragmentos de DNA de cadeia dupla. Estes testes foram realizados no Instituto de Microbiologia Prof. Paulo de Góes (IMPPG/UFRJ).

4.2.3. Ensaios de Laboratório com Diferentes Temperaturas - ETAPA 02

Os experimentos de evaporação forçada em bancada foram conduzidos sob diferentes temperaturas de aquecimento, utilizando uma única amostra de lixiviado (item 4.1.1).

Para a realização desta etapa um novo aparato experimental foi montado a fim de permitir o monitoramento das temperaturas, minimizar o efeito de refluxo de espuma gerada durante o ensaio e possibilitar a coleta das amostras de vapores condensados. Os equipamentos utilizados foram: forno composto de 02 resistências meia cana; controlador universal microprocessado; banho ultratermostato; 02 termopares; 02 saturadores (01 célula de vidro e 01 célula de quartzo); erlenmeyer de 2 litros; unha de destilação; condensador de vidro com tubo em espiral; suporte universal com garras; pérolas de vidro; balão Kitassato de 500 ml; mangueiras de silicone; fitas de teflon; caixa de isopor; almofadas térmicas de 100 g (propilenoglicol); proveta de 300 ml; 20 frascos de vidro âmbar de 500 ml; funis de plástico.

Os experimentos consistiram em evaporar 200 ml de lixiviado acondicionados em célula de quartzo, juntamente com pérolas de vidro, com auxílio de um forno para o aquecimento. Este equipamento é composto de duas resistências meia cana e está interligado a um controlador universal microprocessado que permite o monitoramento das temperaturas de dois termopares - um responsável por controlar a temperatura de aquecimento do forno e outro a temperatura do lixiviado dentro da célula. O condensador de vidro com tubo em espiral foi ligado ao erlenmeyer por uma unha de destilação, e a água existente no condensador foi refrigerada à 15°C com a ajuda de um banho Maria ultratermostato criostato com controlador micro-processado, o que permitiu a condensação dos vapores gerados. Este condensado foi então conduzido ao balão kitassato. Para garantir a preservação da amônia na amostra optou-se pelo resfriamento do kitassato com almofadas térmicas congeladas posicionadas dentro de uma caixa de isopor. O detalhamento do aparato experimental está ilustrado na Figura 4.8.

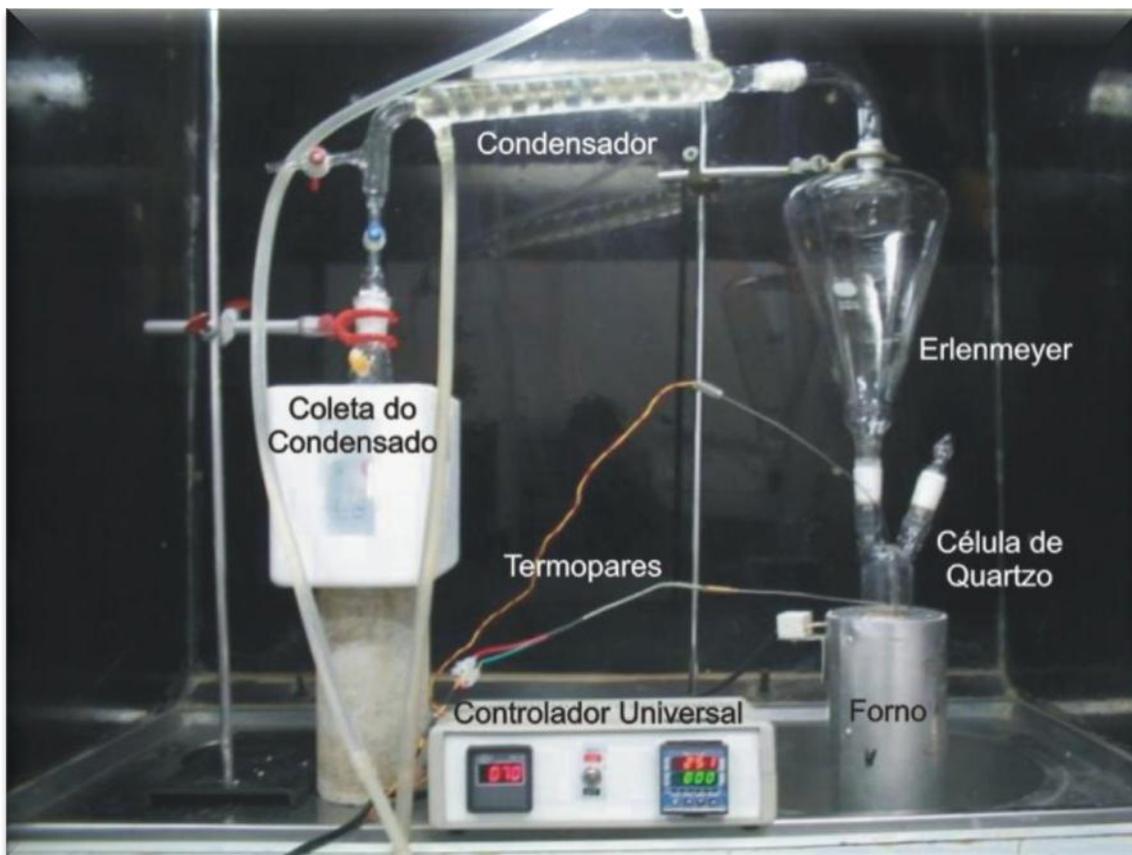


Figura 4.8 – Aparato experimental da evaporação em bancada – temperatura variável.

A dificuldade de condução destes ensaios, foi devido principalmente à formação de espuma e a ocorrência de refluxos e de saltos, mais evidentes sob temperaturas elevadas (Figuras 4.9). De acordo com ATKINS e DE PAULA (2008), o superaquecimento de um líquido ocorre porque a pressão de vapor no interior de uma bolha é artificialmente baixa, de maneira que qualquer cavidade que se forme desapareça. Sendo assim, é comum ocorrer uma ebulição violenta e tumultuada quando a nucleação espontânea provoca a formação de bolhas.

Para contornar este problema foi adaptado um erlenmeyer de 2 litros instalado na saída superior da célula, além das pérolas de vidro colocadas na célula de quartzo com o lixiviado bruto.



Figura 4.9 – Formação de espuma e refluxo durante a evaporação, com destaque para a adaptação do Erlenmeyer.

As temperaturas de evaporação (medidas no forno de aquecimento) tomadas como referência nos ensaios foram: 140°C, 300°C, 500°C e 700°C. Para cada temperatura testada foram registradas as seguintes informações: início do ensaio; início da evaporação; início da condensação; término do ensaio; volume de vapor condensado coletado; temperaturas do forno e do lixiviado. Com estes dados foi possível determinar o tempo de duração de cada ensaio, além do rendimento obtido para cada temperatura.

O encerramento de cada ensaio era determinado pela estabilização do sistema, caracterizado pelo fim dos refluxos e saltos observados no processo de evaporação (fim do fluxo de condensado dentro da espiral do condensador). Essa condição operacional resultava em um volume de condensado de aproximadamente 180 ml.

As amostras do vapor condensado foram analisadas segundo os seguintes parâmetros: DQO, cloretos, alcalinidade, NH_4 , NO_2 , NO_3 , NTK (nitrogênio total kjeldahl), Fósforo Total, Ortofosfato, SST (sólidos suspensos totais), SSF (sólidos suspensos fixos),

SSV (sólidos suspensos voláteis), ST (sólidos totais), SV (sólidos voláteis), cor, turbidez e pH.

4.3. METODOLOGIAS ANALÍTICAS

Para a realização dos ensaios físico-químicos e biológicos nas amostras de lixiviado bruto e no vapor condensado, foram utilizados os seguintes métodos relacionados a seguir:

- Demanda Química de Oxigênio - Metodologia do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998);
- Demanda Bioquímica de Oxigênio – Metodologia Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998), método 5210 B (método das diluições) sem utilização de sementes;
- Cor - Método 8025 (APHA – Platinun-Cobalt Standard Method) – HACH;
- Turbidez – Método 8237 (Attenuated Radiation Method – direct reading) – HACH;
- Cloretos – Método 4500 Cl – B –Método de Mohr –Argentométrico – Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA -20º Edição;
- Alcalinidade – MF – 441 – Método Titulométrico com indicador - FEEMA;
- pH – Método 4500 B – Potenciométrico – Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA -20º Edição;
- Sólidos Totais / Fixos e Voláteis – Método 2540 – B – (Secagem 103º C) e 2540 – E (Ignição 550º C) - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA - 20º Edição;
- Sólidos Suspensos Totais/Fixos/Voláteis – Método 2540 D - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA -20º Edição;

- Nitrato – Método 8171 (Cadmium Reduction Method) –HACH;
- Nitrito –Método 4500 NO₂ – B – Colorimétrico - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA -20^o Edição;
- Amônia – Método 4500- NH₃ F – Método Indofenol - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA -20^o Edição;
- Nitrogênio Kjeldahl – Método 4500 Norg – C (digestão, destilação e titulação) - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA -20^o Edição;
- FósforoTotal – Método 4500 P – E – (digestão com ácido ascórbico) - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA -20^o Edição;
- Metais – Método USEPA 3005A e 7470A, e equipamento utilizado para fazer as análises - ICP-OES PERKIN ELMER 2010;
- Compostos Orgânicos Voláteis - Método USEPA 8260B;
- Compostos Orgânicos Semi-Voláteis - Método USEPA 8270C;
- Dioxinas e Furanos - Método USEPA 8290 e 1613.

CAPÍTULO 05

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos a partir dos experimentos conduzidos no trabalho.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO LIXIVIADO GERADO NO ATERRO

Para caracterização do lixiviado bruto foram coletadas diversas amostras na entrada da lagoa de equalização no aterro de Gramacho, entre outubro de 2007 a dezembro de 2009, e os resultados podem ser observados na Tabela 5.1 abaixo.

Tabela 5.1 – Caracterização do lixiviado bruto do Aterro de Gramacho.

DADOS	DQO	DBO	Cloretos	Alcalinidade	NH ₄	SST	pH	Cor	Turbidez
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		PtCo	FAU
Média	2442	326	3925	5883	1850	69	7,8	5327	226
Mínimo	2015	151	3094	5300	1091	31	7,3	4160	170
Máximo	3160	591	4903	7000	2741	193	8,9	6950	371
D. Padrão	286	164	517	643	612	39	0,4	683	59
Coef. Var.	12%	50%	13%	11%	33%	57%	6%	13%	26%
Dados	23	6	23	23	23	23	23	23	23

É possível verificar que as amostras do lixiviado apresentaram elevados valores de desvio padrão e coeficiente de variação para a maior parte dos parâmetros analisados.

A média da relação DQO/DBO obtida é elevada (>7,0), o que indica uma alta presença de compostos orgânicos com baixa biodegradabilidade. Esta característica, associada a elevadas concentrações de cloretos (média de 3.925mg/l) e de nitrogênio amoniacal (média de 1.850mg/l para NH₄), implica na redução do desempenho de processos biológicos convencionais no tratamento deste efluente. Pode-se afirmar ainda que, tomando-se como referência a relação DBO/DQO média de 0,13, o lixiviado em questão é proveniente de um aterro de idade avançada. Característica também apontada nos resultados do pH, que se manteve próximo à neutralidade nas análises realizadas.

De acordo com os resultados encontrados nas amostras de lixiviado bruto, no aterro de Gramacho, é possível encontrar semelhança com valores obtidos em outros aterros brasileiros, como o aterro de Gericinó também localizado no Rio de Janeiro, e o aterro de Belo Horizonte – Minas Gerais (GOMES *et al.*, 2009).

No intuito de se ter uma melhor compreensão dos dados obtidos nos experimentos, foi utilizado um método que permite uma descrição estatística das variáveis quantitativas, bem como a distribuição da frequência relacionando os percentis na caracterização de uma amostra. Para tal optou-se pelo gráfico do tipo Box Plot onde é possível observar: os valores mínimo e máximo (demonstrado por um "X" nas

extremidades do gráfico); os percentis 25% e 75% (nas extremidades superior e inferior da caixa); os percentis 10% e 90% (entre as extremidades mínima e máxima da caixa e do gráfico); e a mediana (percentil 50%) representada pelo quadrado preto dentro da caixa plotada no gráfico.

Nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3, são ilustrados pelo gráfico Box plot os diversos parâmetros, analisados na caracterização do lixiviado bruto do aterro de Jardim Gramacho.

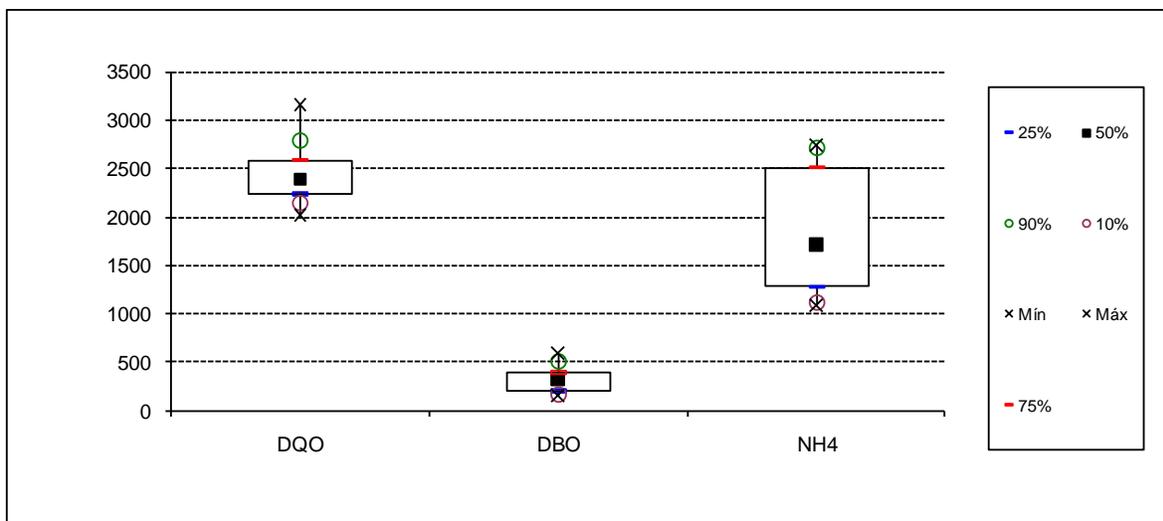


Figura 5.1 – Gráfico Box plot para os parâmetros DQO, DBO e NH₄, na caracterização do lixiviado bruto do aterro de Gramacho.

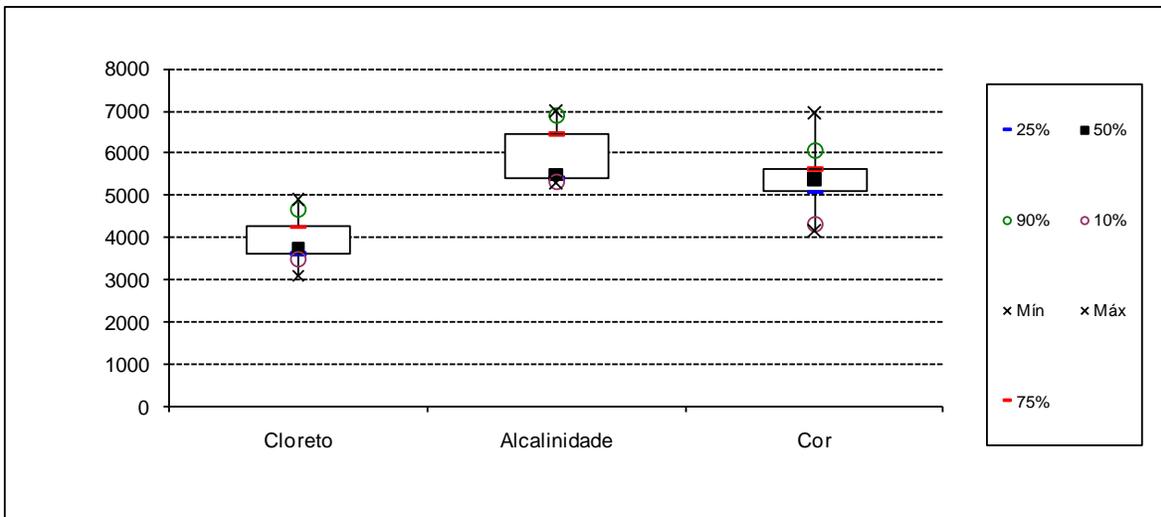


Figura 5.2 – Gráfico Box plot para os parâmetros Cloreto, Alcalinidade e Cor, na caracterização do lixiviado bruto do aterro de Gramacho.

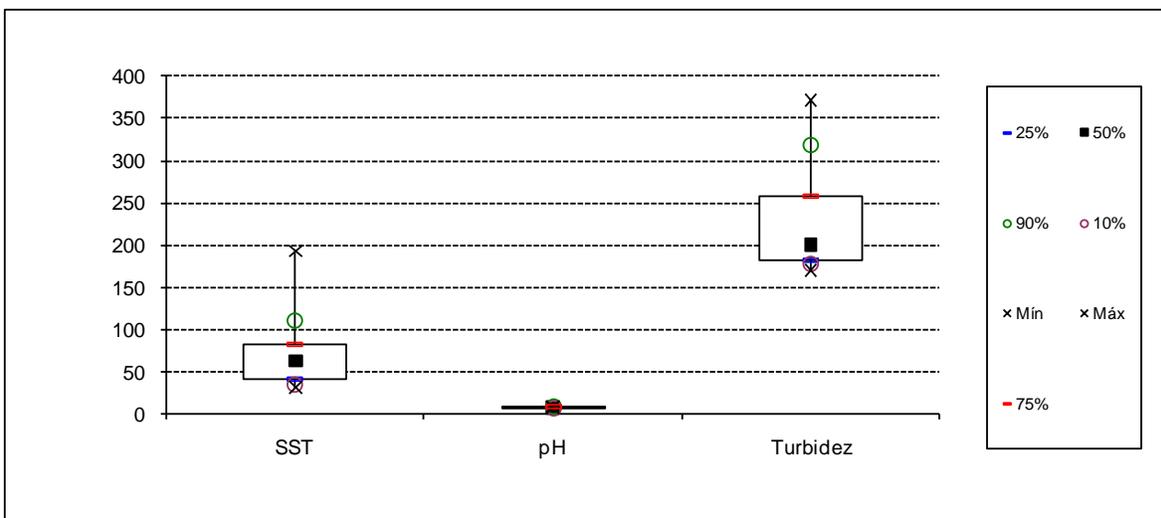


Figura 5.3 – Gráfico Box plot para os parâmetros SST, pH e Turbidez, na caracterização do lixiviado bruto do aterro de Gramacho.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DA EVAPORAÇÃO FORÇADA

5.2.1. Ensaio de Laboratório para as Amostras Geradas no Campo

Para os ensaios realizados em laboratório com as amostras geradas no campo, são apresentados nas Tabelas 5.2, 5.3, e 5.4 os resultados do Resíduo 1 (pastoso), vapor

condensado de lixiviado e, Resíduo 2 (sólido). Os gráficos comparativos destes dados encontram-se na Figura 5.7.

Tabela 5.2 – Resultados das análises das amostras do Resíduo 1.

DADOS	DQO	DBO	Cloretos	Alcalinidade	NH ₄	SST	pH	Cor	Turbidez
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		PtCo	FAU
Média	39631	nd	65152	37278	291	6136	8,9	90389	5674
Mínimo	26800	nd	37250	11000	62	1575	8,4	23800	2300
Máximo	47500	nd	111865	71000	955	11320	9,5	151500	9000
Dados	16	8	14	18	16	18	18	14	14

Para as amostras de Resíduo 1 coletadas no campo, não foram considerados os desvios padrões e os coeficientes de variação devido a falta de padronização utilizada na coleta. O Resíduo 1 encontra-se na forma pastosa e deposita-se abaixo do evaporador, pois é composto do material que não evapora, saindo do equipamento devido à pressão interna e ao refluxo existente no processo da evaporação forçada.

Observou-se pelas análises que o Resíduo 1 apresenta elevada concentração de matéria orgânica, amônia, sólidos e cloretos, e que seu pH é caracteristicamente básico.

Tabela 5.3 – Resultados das análises das amostras do vapor condensado.

DADOS	DQO	DBO	Cloretos	Alcalinidade	NH ₄	SST	pH	Cor	Turbidez
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		PtCo	FAU
Média	99	nd	48	290	159	8	7,8	34	2
Mínimo	52	nd	14	250	127	2	7,2	29	1
Máximo	163	nd	94	340	193	12	8,3	37	3
D. Padrão	42	-	30	33	28	4	0,4	3	1
Coef. Var.	43%	%	63%	11%	18%	56%	5%	10%	50%
Dados	6	6	6	5	6	6	6	5	5

O vapor condensado apresentou pH próximo à neutralidade (similar ao lixiviado bruto), baixa concentração de DQO, amônia e cloretos. Supõe-se que as condições ambientais dificultem a fixação da amônia na amostra e, conseqüentemente, sua detecção;

Para os resultados das amostras de vapor condensado de lixiviado, também é possível observar pequenos desvios padrões e coeficientes de variação, diferentemente dos resultados observados para o lixiviado bruto e Resíduo 1. Sendo assim para estas amostras são apresentadas nas figuras 5.4, 5.5 e 5.6, pelo gráfico Box plot, os diversos parâmetros analisados na caracterização dos vapores condensados coletados em campo.

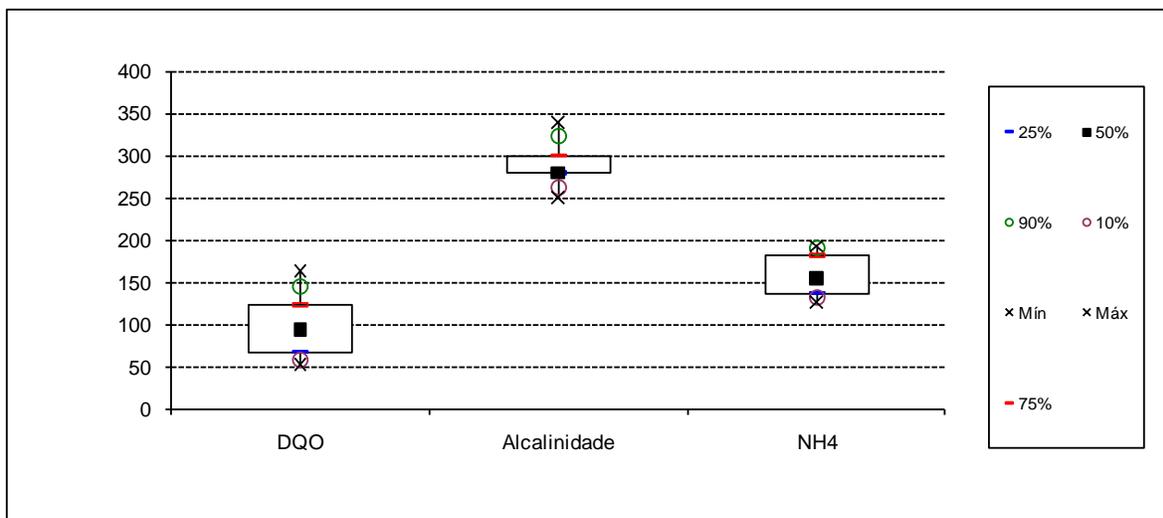


Figura 5.4 – Gráfico Box plot para os parâmetros DQO, Alcalinidade e NH₄, na caracterização do vapor condensado de lixiviado, coletado em campo.

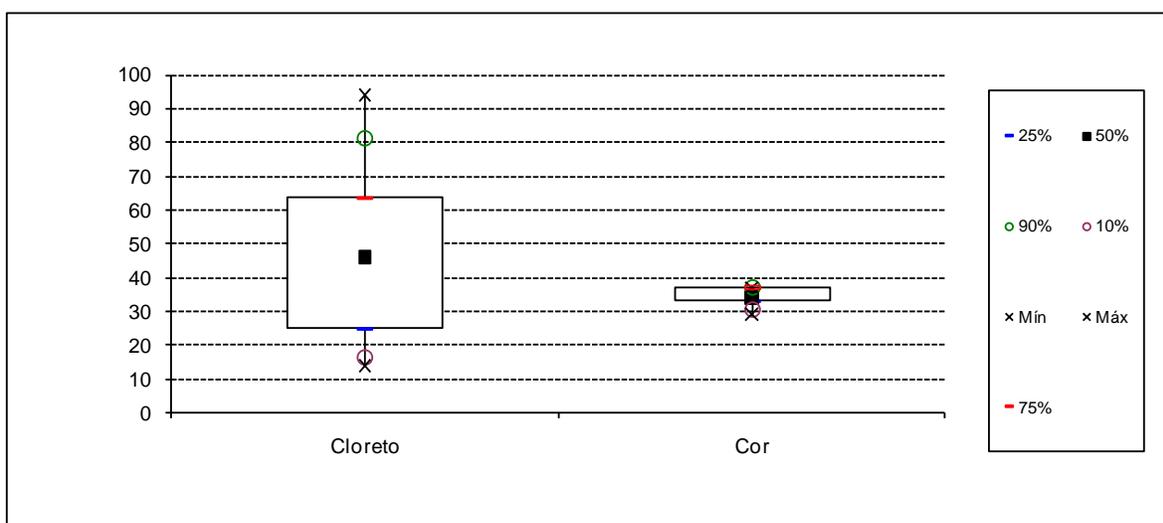


Figura 5.5 – Gráfico Box plot para os parâmetros Cloreto e Cor, na caracterização do vapor condensado de lixiviado, coletado em campo.

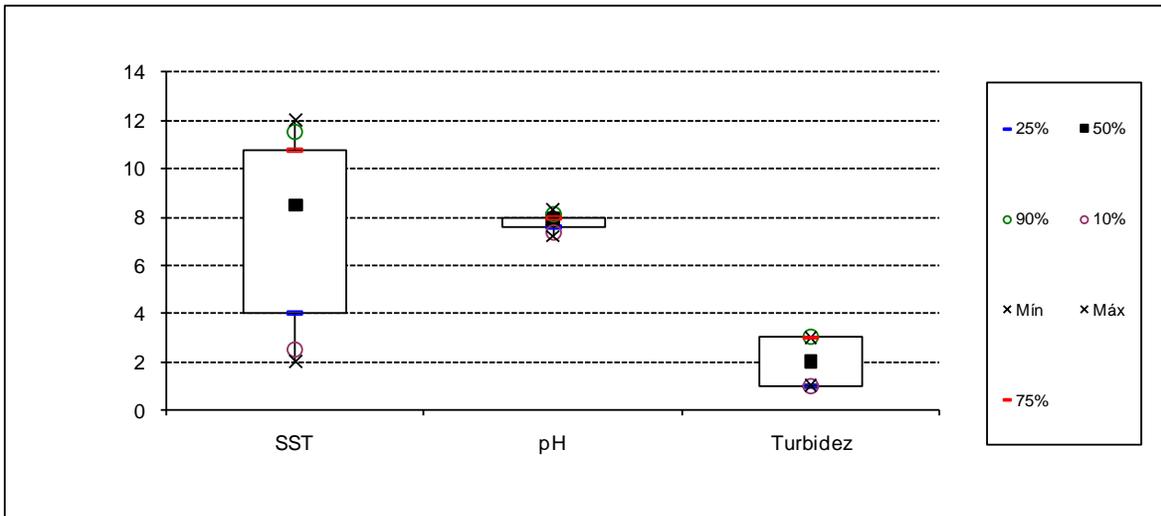


Figura 5.6 – Gráfico Box plot para os parâmetros SST, pH e Turbidez, na caracterização do vapor condensado de lixiviado, coletado em campo.

Tabela 5.4 – Resultados das análises da amostra do Resíduo 2.

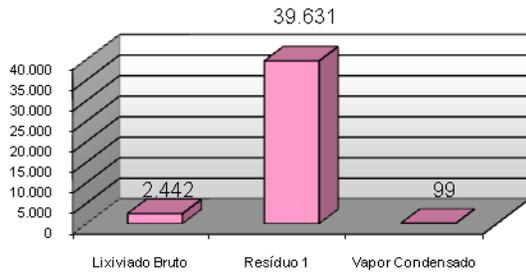
DADOS	DQO mg/l	NH ₄ mg/l	pH
Resultado	23260	3915	4,08
Dados	1	1	1

A única amostra de Resíduo 2 coletada no campo apresentou pH ácido, elevada concentração de DQO e amônia. Seu peso específico foi de 973,4 kg/m³. Para gerar 13 kg deste resíduo foi necessário evaporar 25.240 litros de lixiviado. Estima-se assim que para cada 1,94 m³ de lixiviado evaporado, há uma produção de aproximadamente 1 kg de Resíduo 2.

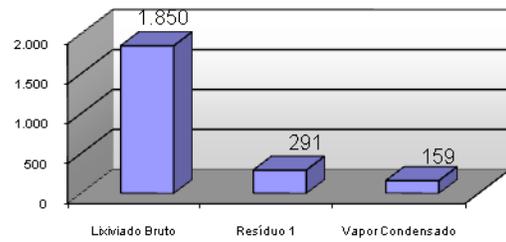
É importante mencionar que devido a pequena quantidade gerada, em torno de 1% do volume total de lixiviado, os Resíduos 1 e 2 podem ser dispostos no próprio aterro.

Para que se tenha uma melhor visualização das diferenças dos valores obtidos em alguns dos parâmetros analisados em campo, são apresentados a seguir na Figura 5.7 gráficos comparativos entre o lixiviado bruto, Resíduo 1 e vapor condensado.

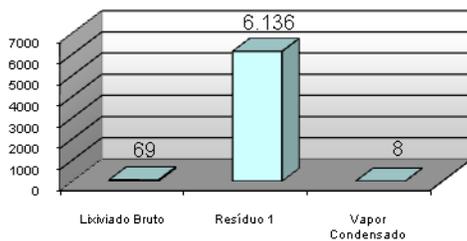
Comparativo DQO (mg/l) das amostras de campo



Comparativo NH₄ (mg/l) das amostras de campo



Comparativo SST (mg/l) das amostras de campo



Comparativo pH das amostras de campo

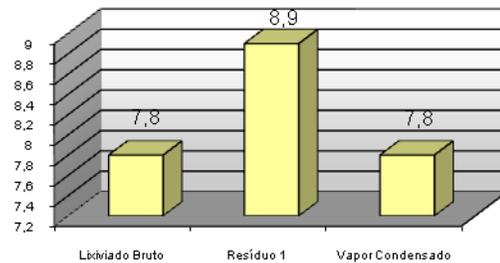


Figura 5.7 – Resultados comparativos das amostras de campo (lixiviado bruto, Resíduo 1 e vapor condensado).

5.2.2. Ensaios de Laboratório com Diferentes Lixiviados - ETAPA 01

A Tabela 5.5 apresenta os resultados analíticos das amostras de (a) Resíduo; e (b) vapor condensado. Os gráficos comparativos destes dados apresentam-se na Figura 5.8.

Tabela 5.5 – Resultados das análises de evaporação em bancada.

(a) Resíduo

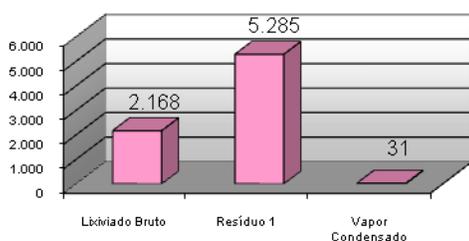
DADOS	DQO mg/l	Cloretos mg/l	Alcalinidade mg/l	NH ₄ mg/l	SST mg/l	pH
Média	5285	53346	4333	2	1691	8,7
Dados	3	3	3	3	3	3

(b) Vapor Condensado

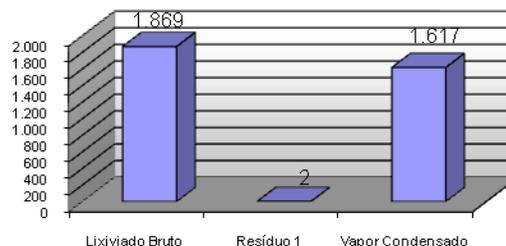
DADOS	DQO mg/l	Cloretos mg/l	Alcalinidade mg/l	NH ₄ mg/l	SST mg/l	pH
Média	31	376	2747	1617	9	8,5
Dados	3	3	3	3	3	3

Devido ao pequeno número de ensaios realizados para cada parâmetro, não foi determinado para as amostras de bancada o desvio padrão, coeficiente de variação e demais dados estatísticos.

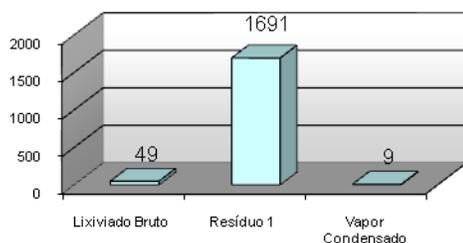
Comparativo DQO (mg/l) das amostras de bancada



Comparativo NH₄ (mg/l) das amostras de bancada



Comparativo SST (mg/l) das amostras de bancada



Comparativo pH das amostras de bancada

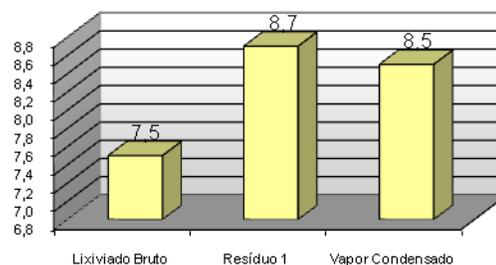


Figura 5.8 – Resultados comparativos das amostras de bancada (lixiviado, resíduo e vapor condensado).

Os ensaios apontaram para as seguintes conclusões: (a) elevação do pH nas amostras de Resíduo e de Condensado; (b) acúmulo de sólidos e de matéria orgânica no Resíduo retido no balão após o ensaio de evaporação; (c) necessidade de refrigeração constante da amostra de condensado durante a coleta para minimizar a volatilização da amônia;

(d) detecção de elevada concentração da amônia no vapor condensado.

Também para esta etapa foram realizados 03 ensaios complementares nas amostras de vapor condensado obtido em bancada. A Tabela 5.6 apresenta os resultados

de cada análise e das médias dos compostos orgânicos voláteis, compostos orgânicos semi-voláteis, metais e de dioxinas e furanos.

Tabela 5.6 – Resultados dos ensaios complementares para as amostras de evaporação em bancada.

Parâmetros Analisados	Unidades	1ª Análise 11/07/08	2ª Análise 18/08/08	3ª Análise 21/08/08	Média
Análise de COSV's (detectados 14 parâmetros dos 62 analisados)					
Fenol	µg/L	3,90	3,55	2,93	3,46
2-Metilfenol	µg/L	<u>48,74</u>	<u>7,19</u>	<u>28,58</u>	28,17
3-Metilfenol	µg/L	<u>12,26</u>	<u>1,01</u>	<u>1,08</u>	4,78
4-Metilfenol	µg/L	<u>7,59</u>	<u>0,66</u>	<u>0,77</u>	3,01
2,4-Dimetilfenol	µg/L	7,30	5,37	9,34	7,34
Naftaleno	µg/L	1,91	3,54	0,71	2,05
Fenantreno	µg/L	0,73	1,32	ND	1,03
Fluoranteno	µg/L	0,81	1,28	ND	1,05
Pireno	µg/L	0,81	1,18	ND	1,00
Benzo[a]antraceno	µg/L	0,44	0,36	ND	0,40
Criseno	µg/L	0,55	0,59	ND	0,57
Dietilftalato	µg/L	5,75	ND	ND	5,75
Dibutilftalato	µg/L	0,66	ND	ND	0,66
Bis(2-etilhexil)ftalato	µg/L	147,55	404,77	538,50	363,61
Análise de Dioxinas e Furanos					
Dioxinas	pg/L	30	13	40	27,7
Furanos	pg/L	7,7	2,6	7,8	6,0
Total	pg/L	37,7	15,6	47,8	33,7
Análise de COV's (detectados 4 parâmetros dos 61 analisados)					
Clorofórmio	µg/L	ND	12,32	4,49	8,41
Benzeno	µg/L	ND	ND	1,10	1,10
4-Metil-2-pentanona	µg/L	ND	ND	7,61	7,61
Tolueno	µg/L	ND	ND	1,93	1,93
Análise de Metais e Semi-metais (detectado 1 parâmetro dos 19 analisados)					
Boro	mg/L	ND	0,04	0,12	0,08

Obs: µg (micrograma) = 10⁻⁶g; pg (picograma) = 10⁻¹²g; ND – Valor não detectado.

Para a etapa 1 as análises de dioxinas e furanos detectaram uma média de 27,7 pg/L de dioxinas e 6,0 pg/L de furanos, cujo somatório é cerca de 70 vezes superior ao limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA 316 (2002). Esta normativa, que dispõe sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, apresenta como limite máximo equivalente a 0,50 pg/L.

Já a EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) estabelece um valor máximo de 30,0 pg/L.

Os valores sublinhados na Tabela 5.6 destacam as grandes diferenças de resultados observadas entre as três amostras coletadas. Ainda assim, esses valores foram considerados no cálculo da média. Deve-se salientar que os parâmetros não detectados (ND) não interferiram na determinação das médias apresentadas.

Nas análises microbiológicas realizadas (Figura 5.9), foi verificado que nenhum grupo bacteriano existente no lixiviado bruto é transportado para os vapores emitidos para a atmosfera, no processo de evaporação.

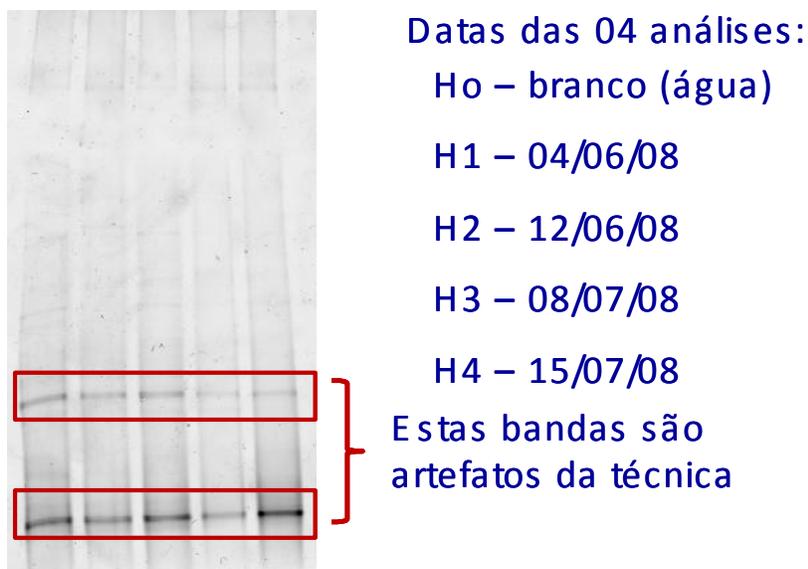


Figura 5.9 – Técnica de DGGE utilizada para as análises microbiológicas nas amostras do vapor condensado.

5.2.3. Ensaios de Laboratório com Diferentes Temperaturas - ETAPA 02

Nesta etapa foram caracterizadas amostras de lixiviado bruto e vapores condensados obtidos a partir da evaporação daquele efluente. Na Tabela 5.7 estão

resumidos os resultados médios deste estudo para os parâmetros físico-químicos e biológicos do lixiviado bruto e do vapor condensado.

Tabela 5.7 - Caracterização físico-química das amostras de lixiviado e condensado.

Amostras		Lixiviado Bruto	Vapor Condensado		
Temperatura do Forno		Ambiente	300° C	500° C	700° C
Parâmetros	Unidade				
DQO	mg/l	2325	55	67	68
Cloretos		6146	1680	1730	1237
Alcalinidade		5500	8050	8375	7775
NH ₄ (Amônio)		1420	1245	1190	1464
NO ₂ (Nitrito)		0,34	0,18	0,21	0,21
NO ₃ (Nitrato)		0,36	14,30	14,50	14,85
NTK		2296	2310	2219	2114
Fósforo Total		123	72	103	130
Ortofosfato		133	28	34	25
SST		92	20	13	7
SSF		21	7	6	2
SSV		42,5	5,0	7,5	5
ST		9100	75,0	50,7	26,6
SV		1600,0	13,4	15,8	- *
Cor		PtCo	5125	19,0	18,5
Turbidez	FAU	164	4	3	3
pH		8,50	9,67	9,42	9,20

* Não foram realizadas análises de SV para o vapor condensado à temperatura de 700° C.

As Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 resumem os resultados dos parâmetros apresentados na tabela anterior, fazendo uma comparação entre o lixiviado bruto e o vapor condensado (para as diferentes temperaturas de análise).

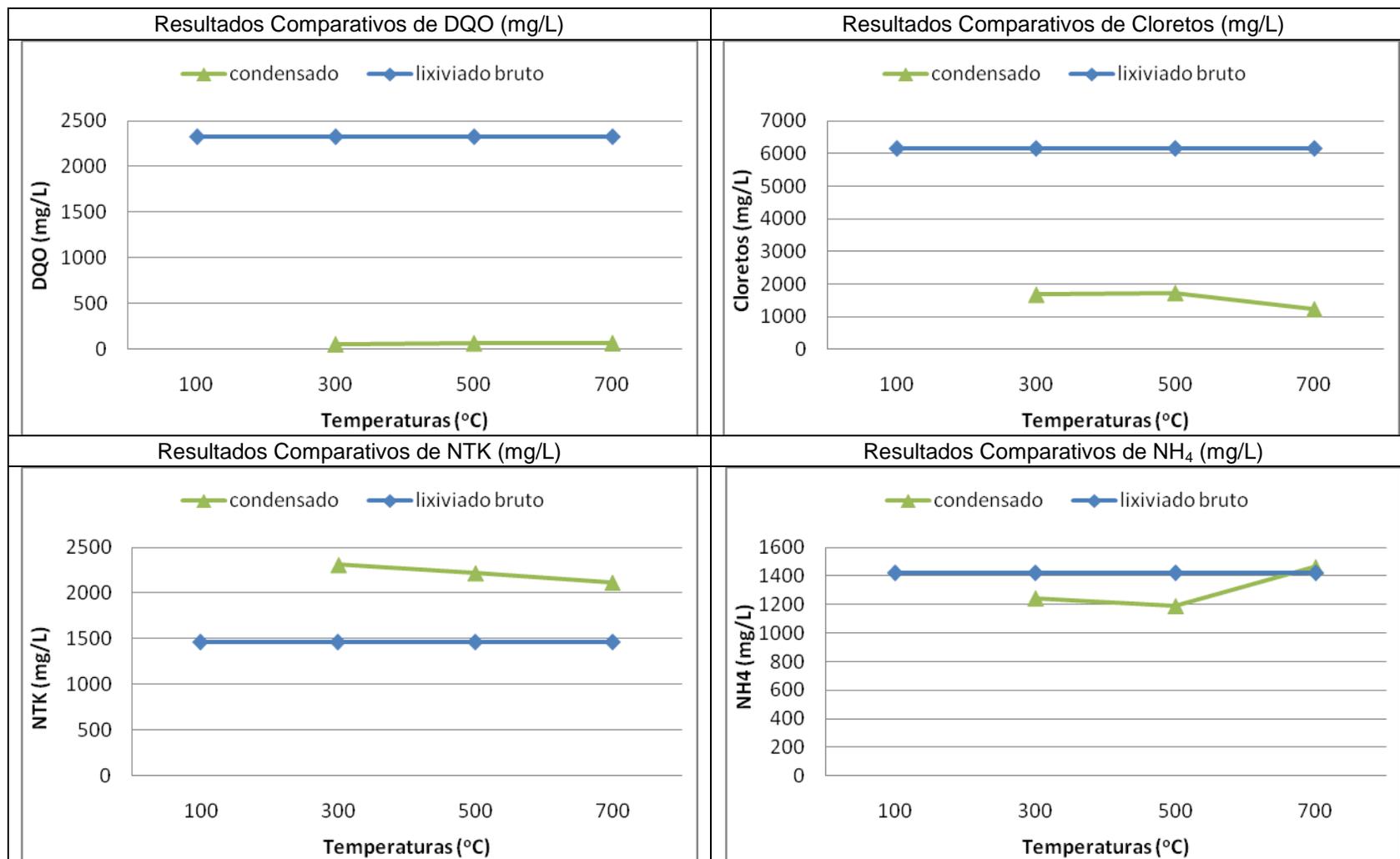


Figura 5.10 – Resultados para parâmetros indicadores de matéria orgânica, cloretos e nutrientes, considerando amostras de condensado obtidas para diferentes temperaturas de aquecimento.

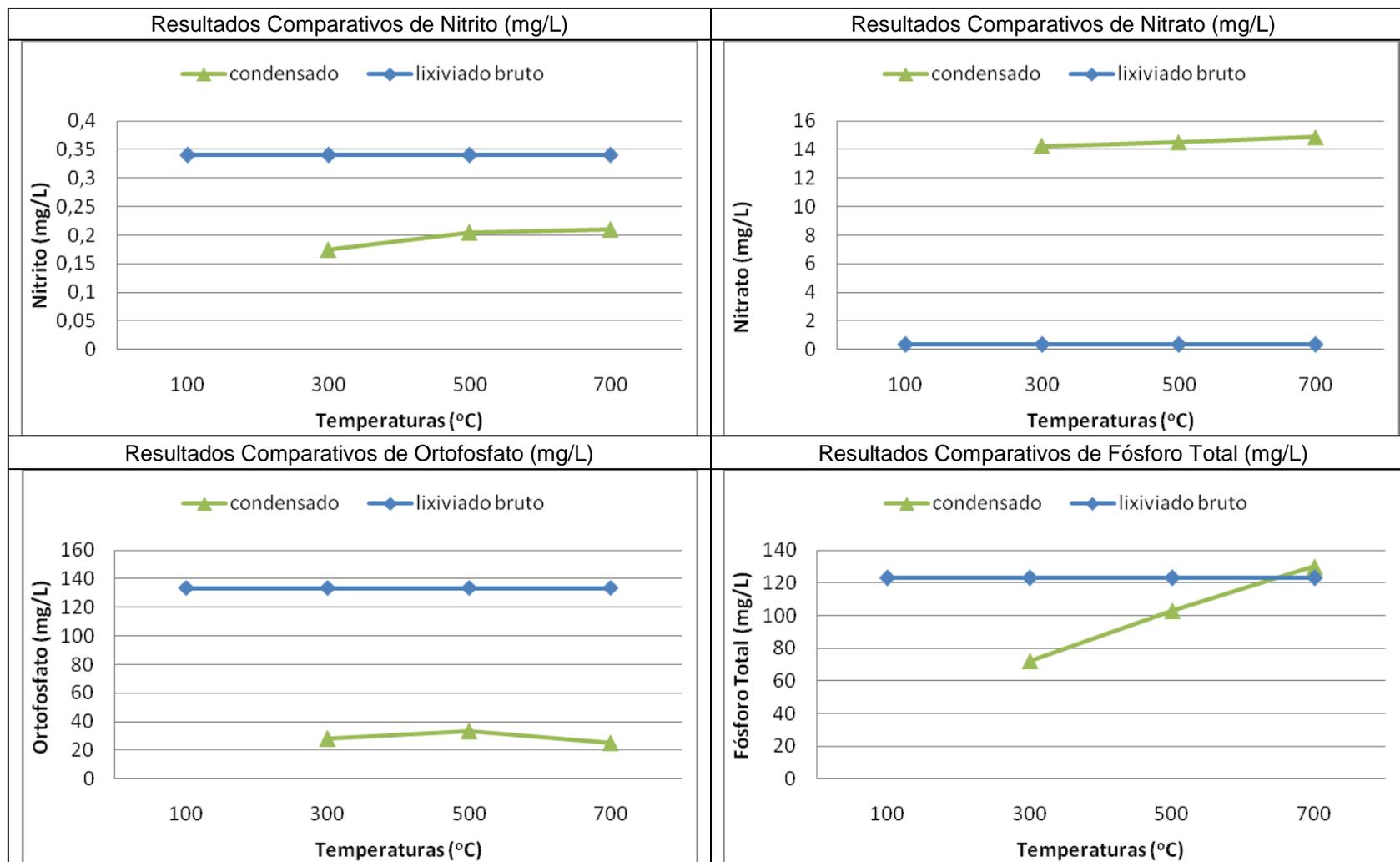


Figura 5.11 – Resultados para parâmetros indicadores de nutrientes, considerando amostras de condensado obtidas para diferentes temperaturas de aquecimento.

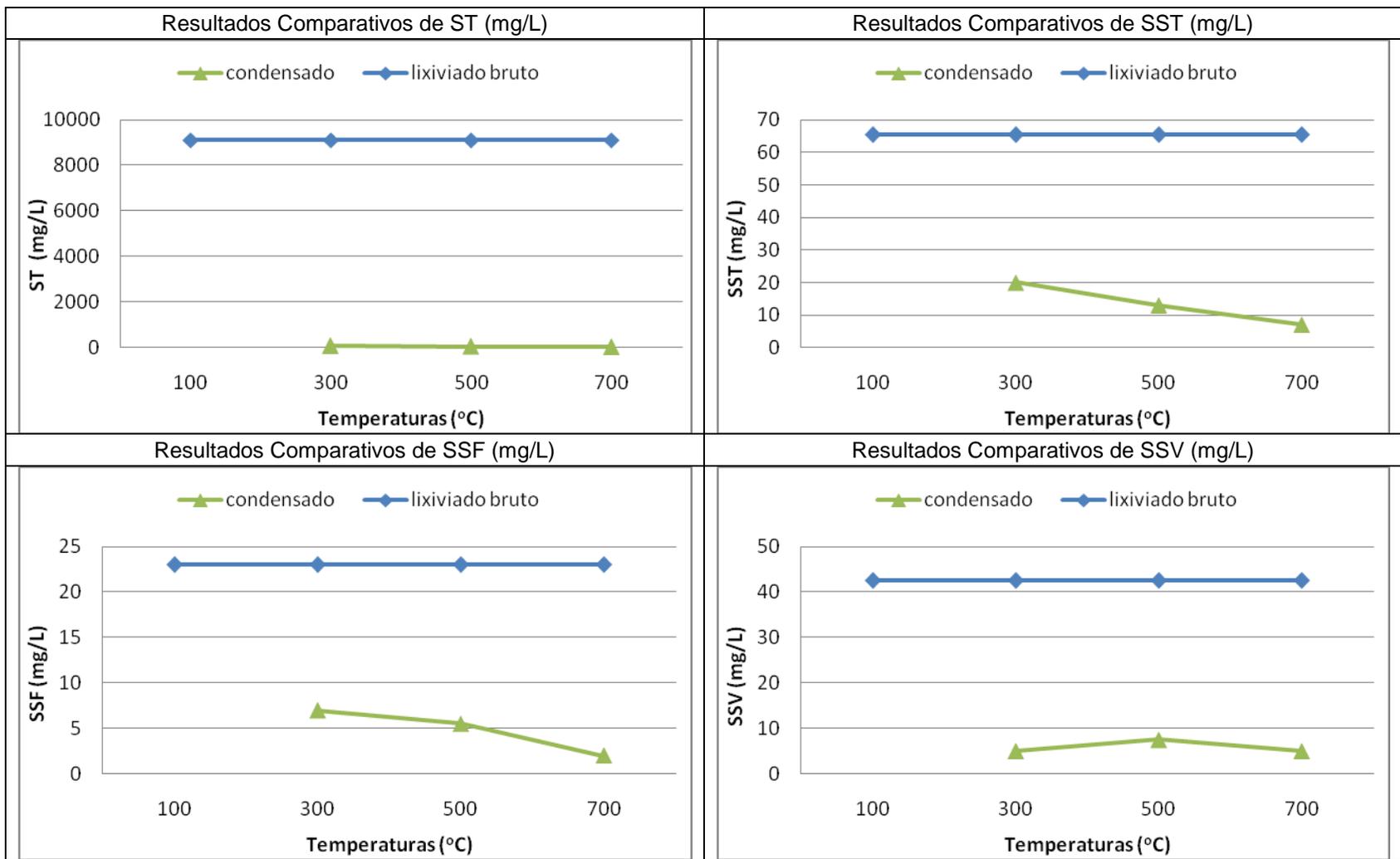


Figura 5.12 – Resultados para parâmetros indicadores de sólidos, considerando amostras de condensado obtidas para diferentes temperaturas de aquecimento.

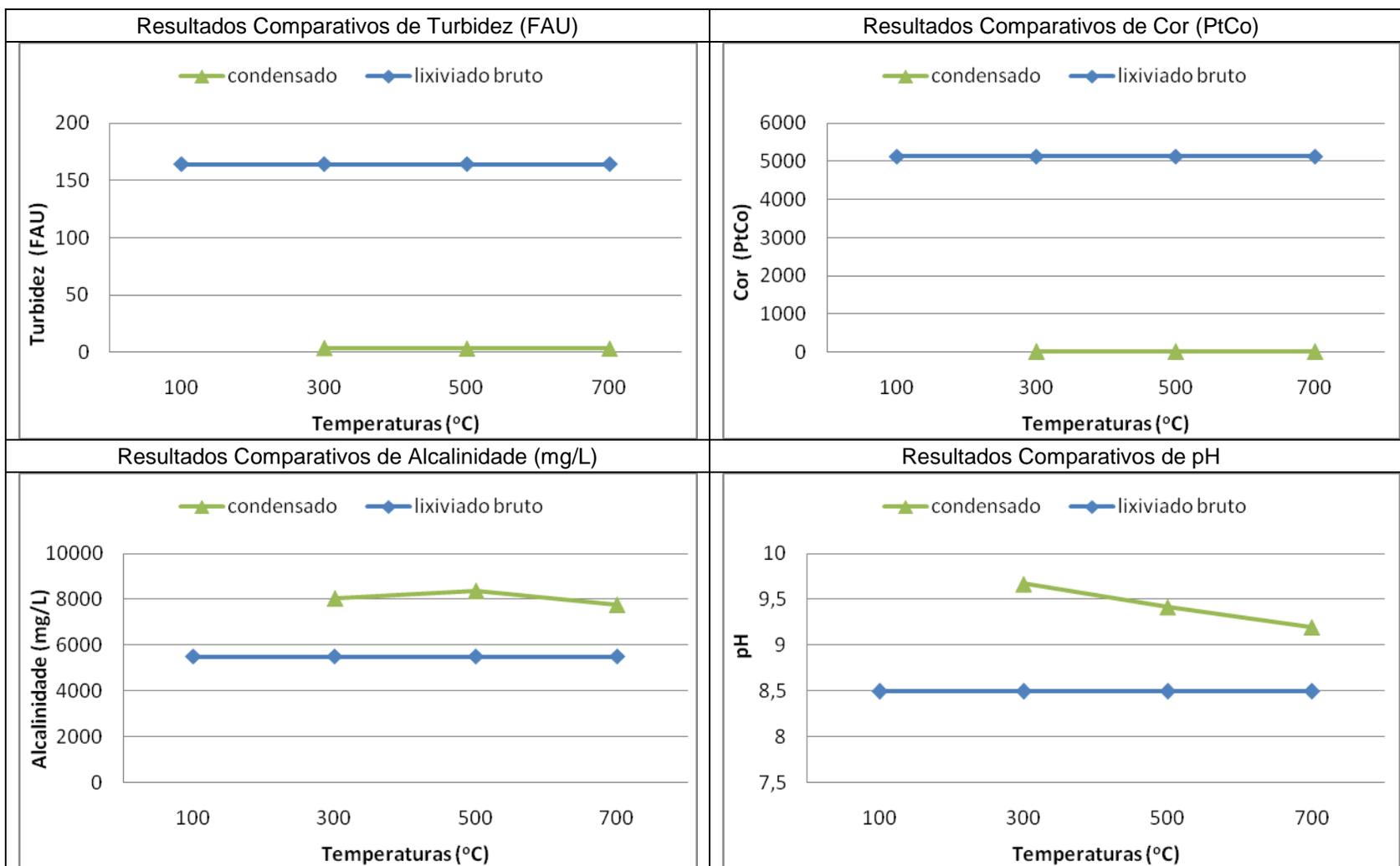


Figura 5.13 – Resultados para parâmetros indicadores de cor e pH, considerando amostras de condensado obtidas para diferentes temperaturas de aquecimento.

Os resultados apresentados acima apontam para as seguintes observações:

(a) Sensível redução da concentração de matéria orgânica (máximo de 68 mg DQO/L) no condensado quando comparado ao lixiviado, independente da temperatura de ensaio.

(b) Elevada redução da concentração de cloretos nas amostras de condensado destacando-se, no entanto, valores inferiores a partir de 500°C de temperatura de ensaio.

(c) Redução da concentração dos compostos nitrogenados no condensado, menos sensível para o caso do íon amônio (NH_4). Para esta substância, observa-se ainda uma elevação da sua concentração para valores similares ao do lixiviado à temperatura de 700°C. Destacam-se ainda os resultados obtidos para NTK, em que as amostras de condensado apresentaram resultados bem maiores aos detectados no lixiviado. Ainda assim, pode-se verificar uma diminuição da sua concentração no condensado à medida que se aumenta a temperatura do ensaio.

(d) O condensado apresenta concentrações inferiores de fósforo comparado ao lixiviado. Todavia, a elevação da temperatura do experimento provoca o arraste de fósforo total para o condensado, igualando sua concentração à do lixiviado em 700°C, enquanto que as concentrações de ortofosfatos se mantêm constantes.

(e) Redução considerável na concentração de sólidos nas amostras de condensado, evoluindo juntamente com a temperatura. No caso da cor e da turbidez, estes se reduzem drasticamente já para a temperatura de 300°C.

(f) Concentração de alcalinidade na amostra de condensado constante e superior à do lixiviado. Dada a faixa de pH da amostra, esta alcalinidade é provavelmente devido aos carbonatos e bicarbonatos. Para essas condições, verificou-se uma redução do pH do condensado, ainda que superior ao do lixiviado, à medida que se elevou a temperatura do experimento.

Na Tabela 5.8 é possível observar os resultados de metais, semi-metais (As, B e Sb) e ametal (Se) determinados nas amostras de lixiviado e de vapor condensado. Devido ao número reduzido de amostras coletadas para esta análise, os valores apresentados referem-se aos máximos obtidos para cada parâmetro.

Tabela 5.8 – Resultados¹ encontrados nas análises de metais e semi-metais (mg/L).

Parâmetros Analisados	Lixiviado Bruto	Condensado 140°C	Condensado 300°C	Condensado 500°C	Condensado 700°C
Alumínio (Al)	0,40	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Arsênio (As)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Prata (Ag)	0,02	0,04	0,03	0,08	0,03
Boro (B)	2,69	<0,01	0,03	<0,01	<0,01
Bário (Ba)	0,21	<0,01	0,01	<0,01	<0,01
Cádmio (Cd)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cobalto (Co)	0,07	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cromo (Cr)	0,10	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cobre (Cu)	<0,01	<0,01	0,41	0,05	0,22
Ferro (Fe)	3,84	<0,01	<0,01	0,01	<0,01
Manganês (Mn)	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Molibdênio (Mo)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Níquel (Ni)	1,30	<0,01	<0,01	0,06	<0,01
Chumbo (Pb)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Antimônio (Sb)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Selênio (Se)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Vanádio (V)	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zinco (Zn)	0,07	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

¹ Os resultados apresentados são os valores máximos obtidos para cada parâmetro.

Tomando-se como referência a Resolução CONAMA 316/2002, que dispõe sobre os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, destacam-se as seguintes observações a partir dos resultados encontrados:

(a) Para os poluentes Classe 1, definidos pelas substâncias Cd, mercúrio (Hg) e tálio (Tl), limita-se a concentração de 0,028 mg/N.m³ para emissão atmosférica. Neste trabalho só foi analisado o cádmio, cuja concentração apresentou-se abaixo do limite de detecção do equipamento (< 0,01 mg/L) independente da temperatura do ensaio.

(b) O somatório dos poluentes Classe 2 (Ar+Co+Ni+Te+Se) não deve superar o valor de 1,4 mg/Nm³, segundo a normativa citada. Apesar de não se ter a determinação de Telúrio (Te), os demais compostos apresentaram concentrações abaixo do limite de detecção do equipamento (< 0,01 mg/L). Caso esta concentração fosse tomada como referência na avaliação, o somatório destes compostos seria menor que 0,04 mg/L (40 mg/m³), valor bem superior ao máximo permitido. Para estas substâncias não se verificou variação na sua concentração mesmo com o aumento da temperatura do ensaio, exceto para o Ni. Neste caso, detectou-se para a temperatura de 500°C uma concentração de 0,06 mg/L (60 mg/m³) que, sozinho, já supera o limite estipulado pela norma.

(c) São elementos Classe 3, cujo limite é 7,0 mg/Nm³: Sb, Pb, Cr, CN (cianetos), Cu, Sn (estanho), F (flúor), Mn, Pt (platina), Pd (paládio), Rh (ródio) e V. Destes foram analisados nesta pesquisa: Sb, Pb, Cr, Cu, Mn e V. Todas estas substâncias, exceto o cobre, apresentaram resultados abaixo do limite de detecção do equipamento (< 0,01 mg/L). No caso do Cu, esta verificação ocorreu apenas na temperatura de 140°C. Nas demais temperaturas as concentrações variaram entre 0,05 mg/L (500°C) e 0,41 mg/L (300°C). Destaca-se que, neste caso, o comportamento do cobre não foi linear em relação à variação de temperatura.

CAPÍTULO 06

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

6.1. CONCLUSÕES

Os estudos conduzidos nesta pesquisa apontam para as seguintes conclusões:

- ✓ Pela presença de dioxinas e furanos observados, em média 70 vezes acima do limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA 316 (2002), conclui-se que o procedimento não pode ser empregado em aterros de resíduos sólidos à céu aberto e sem processos de tratamento e lavagem das emissões.

- ✓ Dada a faixa de pH da amostra, o condensado mostrou-se alcalino provavelmente fruto da presença de carbonatos e bicarbonatos. Verificou-se uma redução do pH do condensado, à medida que se elevou a temperatura do experimento.

- ✓ As amostras de condensado apresentaram resultados percentuais de NTK bem maiores aos detectados no lixiviado bruto. Ainda assim, pode-se verificar uma diminuição da sua concentração no condensado à medida que se aumenta a temperatura do ensaio.
- ✓ Nas análises microbiológicas realizadas (PCR e DGGE), foi verificado que nenhum grupo bacteriano existente no lixiviado bruto é transportado aos vapores emitidos para a atmosfera, no processo de evaporação.

6.2. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para ampliar o conhecimento dentro desta linha de pesquisa, são apresentadas algumas recomendações:

- ✓ Devido a dificuldade encontrada para realização dos ensaios com temperaturas abaixo de 140°C e acima de 700°C, com o equipamento desenvolvido em laboratório, recomenda-se para trabalhos futuros adequações ao equipamento de evaporação, permitindo uma faixa maior de temperaturas a serem avaliadas, e possibilitando uma coleta de maior volume para análises das amostras obtidas no processo de condensação.
- ✓ Estudos de evaporação no campo em escala real utilizando equipamentos que possam confirmar a viabilidade técnica e econômica para esta opção de tratamento.
- ✓ Pesquisas em outros aterros, com objetivo de estudar a evaporação para as diversas características de lixiviados existentes, conforme elucidado na literatura.

- ✓ Realização de novos ensaios e em maiores quantidades, no intuito de obter resultados mais consistentes, além de análises a 140°C para todos parâmetros.

- ✓ Estudos mais aprofundados para os vapores condensados e resíduos gerados no processo da evaporação forçada, buscando o seu reaproveitamento.

- ✓ Novas análises para detecção dos seguintes parâmetros: Compostos Orgânicos Voláteis; Compostos Orgânicos Semi-Voláteis; Dioxinas e Furanos. Com estes dados será possível avaliar de maneira mais consistente as características do vapor produzido no processo de evaporação do lixiviado e seu impacto sobre a atmosfera.

CAPÍTULO 07

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8.849 - *Apresentação de Projetos de Aterros Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos - Procedimento*. Rio de Janeiro, Brasil, 1985.

_____NBR 10.004 - *Resíduos Sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

_____NBR 10.007 - *Amostragem de Resíduos Sólidos*. Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

_____NBR 10.157 - *Aterros de Resíduos Perigosos - Critérios para Projeto, Construção e Operação - Procedimento*. Rio de Janeiro, Brasil, 1987.

ATKINS, P. W. e DE PAULA, J. *Físico-química*, 8ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2008.

BACELAR, H. A. M., CANTANHEDE. A. L. G., FIGUEIREDO, I. C. e SANTOS, A. S. P. "Sanitary Landfill Leachate Treatment Using Unitary Evaporation Equipment". *XII International Waste Management and Landfill Symposium*. Sardinia, Italy, 2009.

BIRCHLER, D. R.; MILKE, M. W.; MARKS, A. L.; LUTHY, R. G. *Landfill leachate treatment by evaporation*. Journal of Environmental Engineering – ASCE. v.120, n.5, p.1109-1131, 1994.

BAHÉ, J. M. *Estudo da Evaporação de Lixiviados de Aterros Sanitários como Alternativa Tecnológica de Tratamento: Testes em Bancada*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

_____ Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução 307/2002. Dispõe sobre critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais*. E sua correção. CONAMA 348, 2004.

_____ Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução 316/2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos*. Brasília, 2002.

_____ Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução 357. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências*. Diário Oficial da União. Brasília, 18 de março de 2005.

_____ Lei 11.445/2007. PNSB – Plano Nacional de Saneamento Básico. *Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico*. Brasília/Distrito Federal, 05 de janeiro de 2007.

_____ Lei 12.305. *Dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências*. Brasília/Distrito Federal, 02 de agosto de 2010.

CASTILHOS Jr., A. B. (coordenador). *Resíduos sólidos urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte - Projeto PROSAB – tema III, edital III*. Rio de Janeiro, 2003.

CASTILHOS Jr., A. B. (coordenador). *Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Ênfase na Proteção de Corpos D'água: Prevenção, Geração e Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários*. PROSAB – tema III edital IV. Florianópolis, 2006.

CHERNICHARO, C. A. L., *Reatores Anaeróbicos*. DESA, Belo Horizonte, 1999.

Companhia Municipal de Limpeza Urbana da cidade do Rio de Janeiro (COMLURB). Disponível em: <http://comlurb.rio.rj.gov.br>. Acesso em: 20 de dezembro de 2009.

Environmental Protection Agency (EPA). Disponível em: <http://www.epa.gov>. Acesso em: 15 de setembro de 2010.

FARQUHAR G. J. *Leachate: production and characterization*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Waterloo, Canadá, 1988.

GEANKOPLIS, CHRISTIE. J., *Transport Processes and Unit Operations*. Third Edition. Prentice – Hall, 1993.

GIUST, E., VISINTIN, D e DEL PICCOLO, C. *A Combination of Cogeneration, Evaporation and Membrane Technique for Landfill Leachate Treatment*. In: XI International Waste Management and Landfill Symposium. Sardinia, Italy – 2007.

GOMES, L. P. (coordenadora). *Estudos de Caracterização e Tratabilidade de Lixiviados de Aterros Sanitários para as Condições Brasileiras*. PROSAB – tema III, edital V. Rio de Janeiro, 2009.

GUEDES, V. P., *Estudo do Fluxo de Gases através do solo de Cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

IBAM, Instituto Brasileiro de Administração Municipal. *Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos*. Brasil, 2001.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS, IPT, *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. 2 ed. São Paulo, IPT/CEMPRE, 2000.

JORGE, J. A. S. C. *Análise em Instalação Piloto da Dispersão de Microrganismos, Compostos Orgânicos Voláteis e Aspectos Toxicológicos no Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários*. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2008.

JUCÁ, J. F. T. "Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil". *5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental*, Porto Alegre, RS, 2003.

LU, J. C. S.; EICHENBERGER, B.; STEARNS, R. J., *Leachate from Municipal Landfills*, New Jersey - US. 1985.

MAINIER F. B., VIOLA E. D. M. O Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) e o Meio Ambiente. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT, 2005.

MARKS, A. L.; LUTHY, R. G.; DIWEKAR, U.M. *Semi-continuous evaporation model for leachate treatment process evaluation*. *Environmental Progress*, v.13, n.4, p.278-288, 1994.

MONTEIRO, V. E. D., *Análises Físicas, Químicas e Biológicas no Estudo do Comportamento do Aterro da Muribeca*. Tese de Doutorado, UFPE, Recife, PE, Brasil, 2003.

PENIDO J.H.M. *Transformando um Passivo Ambiental em Recurso Energético: El Metano como Fuente de Energia y de Recursos*. In: III Congreso Interamericano de Residuos – AIDIS. Buenos Aires, 2009.

POVINELLI, J. e SOUTO, G.D.B. Ammonia Stripping from Landfill Leachate Using Packed Towers. In: XII International Waste Management and Landfill Symposium. Sardinia, Italy – 2009.

- QASIM, S. R. & CHIANG, W. *Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment*. USA: Technomic Publishing Company, 1994.
- QIAN, X., KOERNER, R. M., GRAY, D.H. *Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction* – Mc-Graw Hill Editions, Prentice Hall, New Jersey, 2002.
- REAL, J.L.G. (2005). Riscos Ambientais em Aterros de Resíduos Sólidos com Ênfase nas Emissões de Gases, Dissertação M. Sc. Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- ReCESA – Rede Nacional de Extensão e Capacitação Tecnológica em Saneamento Ambiental. *Resíduos Sólidos: Projeto, Operação e Monitoramento de Aterros Sanitários. Guia do Profissional em Treinamento – nível 2*. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Belo Horizonte, MG, 2008.
- ROCHA, E. M. R., FILHO, C. O., LUCZYNKI, M., *Proposta de Gerenciamento Integrado dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Santa Izabel do Pará*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Pará, PA, Brasil, 2003.
- ROCHA, R., *Desempenho de um Sistema de Lagoas de Estabilização na Redução da Carga Orgânica do Percolado Gerado no Aterro da Muribeca*. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife, PE, Brasil, 2005.
- SÁ, L. F. *Evaporação Natural do Lixiviado do Aterro de Muribeca Através de um Destilador Solar*. Dissertação de M.Sc. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, 2008.
- SANTOS, A. S. P. *Aspectos Técnicos e Econômicos do Tratamento Combinado de Lixiviado de Aterro Sanitário com Esgoto Doméstico em Lagoas de Estabilização*. Tese de D. Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- SEGATO, L. M., SILVA, C. L., “Caracterização do Lixiviado do Aterro Sanitário de Bauru”. *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental* – ABES. Porto Alegre, RS, 2000.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. *Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2007*. Ministério das Cidades. Parte 01 – Texto-Visão Geral da Prestação de Serviços, Brasília, 2009.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. *Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2007*. Ministério das Cidades. Parte 02 – Tabelas de Informações e Indicadores, Brasília, 2009.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S.A. *Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues*. Mc-Graw Hill Education, 1993.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR) – *Determinação de Amônia – Análises de Contaminantes Ambientais*. Departamento de Química e Biologia, 2002.

VON SPERLING, M. "Introdução à Qualidade da Água e ao Tratamento de Esgotos". Volume 1, 3ª Edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG, 2005.

WILLIAMS, P. T., "Environmental and Health Impact of Solid Waste Management Activities". *In chapter: Emissions from Solid Waste Management Activities*, pp. 141-165, Leeds – UK, 2002.

**ANEXO I – Equipamento de evaporação forçada denominado Evaporador Unitário –
utilizado em caráter experimental no aterro de Jardim Gramacho – RJ.**



ANEXO II – Certificado de calibração do banho Maria ultratermostato criostato



Contemp

LABORATÓRIO DE METROLOGIA
Acreditado pelo CGCRE/INMETRO sob nº 224



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

LMC 1195-10

FOLHA 01/01

1 - DADOS

Contratante: Nova Ética Prods. Equip. Científicos Ltda.

Endereço: Rua Francisca Manoel Oliveira, nº 500 - Portão Vermelho - Vargem Grande Paulista - SP

Interessado: Nova Ética Prods. Equip. Científicos Ltda.

Instrumento: Controlador de temperatura	Identif. cliente: NE-4254
Tipo de entrada: PT-100	Valor de uma divisão: 0,1°C
Faixa de medição: -50 a 530°C	Marca: Contemp
Modelo: ETC 45	N° série: 218062

Local da calibração: Laboratório de Metrologia Contemp **Cond. amb:** (23 ± 5)°C / (65 ± 20)%U.R.

Data da calibração: 26/fev/10 **Data da emissão:** 04/mar/10

Localização: Não consta

2 - PADRÕES UTILIZADOS:

Multímetro digital, LMUL-013, certificado YOKOGAWA (RBC) nº 0118/10, válido até 01/2011.

3 - PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

A calibração foi realizada pelo método de comparação entre o instrumento em calibração e um indicador padrão, conforme procedimento de rotina PR-11.01.040.

4 - RESULTADOS

Instrumento [°C]	V.V.C. Ohms	V.V.C. [°C]	Erro [°C]
-30,0	88,228	-30,0	0,0
0,0	100,001	0,0	0,0
50,0	119,406	50,0	0,0
150,0	157,334	150,0	0,0
300,0	212,058	300,0	0,0
Incerteza de Medição (±) °C			0,2
Fator de Abrangência k			2,00
Graus de liberdade Veff			infinito

5 - NOTAS

a - Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990.

b - A incerteza expandida de medição relatada é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição "t" com Veff graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

c - Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre/ Inmetro, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

d - Os resultados apresentados neste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento calibrado não sendo extensivo a quaisquer lotes.

e - A reprodução parcial deste certificado requer aprovação prévia por escrito pela Contemp.

f - Erro = Instrumento [°C] - V.V.C [°C].

g - O valor apresentado no campo erro em °C foi arredondado para o mesmo número de casas decimais da incerteza de medição.

h - Os valores do campo V.V.C [°C] e Erro [°C] foram referenciados a norma ASTM E- 1137

Ney Apinhanese / Responsável Técnico

GC 100304 LMC 1195-10 6

CONTEMP INDUSTRIA COMERCIO E SERVIÇOS LTDA.
Al. Araguaia, 204 - Santa Maria - São Caetano do Sul - SP - TELEFAX: {0xx11}4223-5100