



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**MONITORAMENTO DE CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS QUANTO A ASPECTOS
FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS**

ELAINE PATRÍCIA ARAÚJO

CAMPINA GRANDE-PB
2015

Elaine Patrícia Araújo

**MONITORAMENTO DE CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS QUANTO A ASPECTOS
FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande, como exigência para obtenção do Título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Durabilidade e Reciclagem de Materiais.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Campina Grande-PB
2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A665m Araújo, Elaine Patrícia .
Monitoramento de células experimentais de resíduos sólidos urbanos quanto a aspectos físico-químicos e microbiológicos / Elaine Patrícia Araújo. – Campina Grande, 2015.
122 f. : color.

Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.

"Orientação: Prof^a. Dr^a. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro".

Referências.

1. Biodegradação. 2. Microrganismos. 3. Células Experimentais. 4. Monitoramento. I. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. II. Título.

CDU 628.4(043)

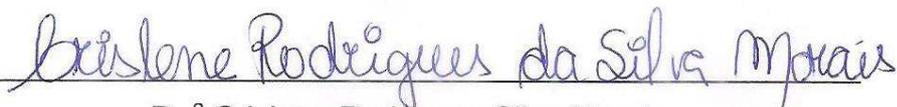
**MONITORAMENTO DE CÉLULAS EXPERIMENTAIS DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS QUANTO A ASPECTOS FÍSICO – QUÍMICOS E
MICROBIOLÓGICOS**

ELAINE PATRÍCIA ARAÚJO

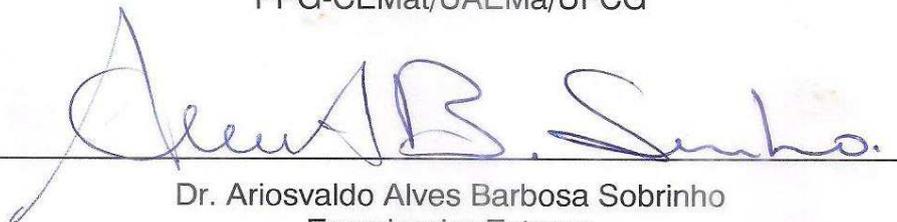
Tese Aprovada em 30/01/2015 pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:



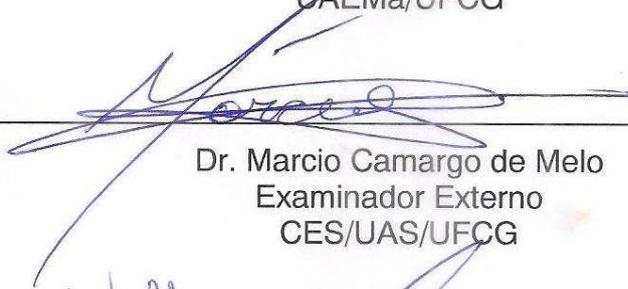
Dr.ª Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
Orientadora
PPG-CEMat/UAEC/UFCG



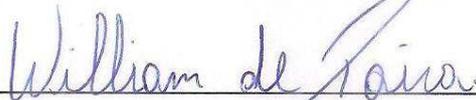
Dr.ª Crislene Rodrigues Silva Moraes
Examinadora Interna
PPG-CEMat/UAEMa/UFCG



Dr. Ariosvaldo Alves Barbosa Sobrinho
Examinador Externo
UAEMa/UFCG



Dr. Marcio Camargo de Melo
Examinador Externo
CES/UAS/UFCG



Dr. William de Paiva
Examinador Externo
DESA/UEPB

VITAE DO CANDIDATO

- Graduação em Ciências Biológicas pela UEPB (2004).
- Especialização em Gestão e Análise Ambiental pela UEPB (2006).
- Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFCG (2009).
- Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela UFCG (2011).

Quando uma pessoa não é HÚMILDE, ela põe a culpa de sua INCAPACIDADE em tudo e em todos. Os sábios reconhecem seus erros, e buscam em DEUS corrigí-los.

(Billy Graham)

AGRADECIMENTOS

A Nossa Senhora e ao seu Filho Jesus Cristo por nunca terem me abandonado em todas as etapas da minha vida, por me guiarem sempre para o caminho do bem...Amém.

A minha Creusa Araújo e a minha Edvaldo Araújo por sempre me incentivarem a ESTUDAR e rezarem pelo meu sucesso...

As minhas irmãs Edcleide Araújo e Suely Araújo por sempre estarem ao meu lado, me ajudando e aconselhando...Obrigada...

A minha amiga-irmã Elizabete (Bety) por nunca me negar ajuda quando precisei, pelos conselhos e dicas que foram de grande importância para a conclusão desta pesquisa...

Aos meus cunhados Ronaldo e Alexandre que sempre me ajudaram na vida acadêmica...

As minhas amigas funcionárias das secretarias de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e Pós-Graduação de Engenharia Civil nas pessoas de Marcia (Marcinha raposeira) e Josete (raposeira) pela dedicação ao trabalho e ajuda nos tramites dos recursos solicitados.

A secretaria Maria José e ao Netinho técnico de laboratório pelas contribuições e ajuda para o desenvolvimento da pesquisa.

A professora Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, minha orientadora, agradeço pelas orientações e sugestões ao longo desses quatro anos de convívio.

Ao professor e diretor do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) Dr. Jonh Kennedy Guedes Rodrigues pela ajuda e disponibilização de equipamentos para o andamento da pesquisa.

Ao grupo GGA pela ajuda nas realizações das coletas, ensaios laboratoriais e interpretação dos resultados e em especial a Libânia e a Alessandra que sempre me ajudaram quando mais precisei. Obrigada por tudo galera!!!

Ao Netinho, técnico de laboratório de solos que me ajudou na realização e análise dos solos coletados.

A todos os professores que estiveram presentes na minha banca examinadora. Obrigada pelas contribuições e sugestões...

A Prefeitura Municipal de Campina Grande (PMCG) pela liberação dos equipamentos necessários para o enchimento das células experimentais.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pela liberação dos dados que foram importantes para interpretação dos resultados desta pesquisa.

A Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários-Núcleo de Pesquisa da Universidade Federal de Campina Grande-PB e Universidade Estadual da Paraíba-PB (EXTRABES) pela liberação dos equipamentos e ensaios necessários para realização desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) apoio financeiro para ao desenvolvimento deste projeto.

A bolsa concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Superior (CAPES).

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais e ao coordenador Romualdo Rodrigues Menezes pelo apoio na execução desta pesquisa. Muito obrigada por tudo...!!!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composição dos resíduos sólidos urbanos do Brasil.....	26
Figura 2: Bairros selecionados pela Prefeitura municipal de Campina Grande-PB para realização da coleta dos resíduos sólidos urbanos, 2009.....	40
Figura 3: Célula experimental I de RSU e seus pontos de coleta, 2009.....	42
Figura 4: Desenho esquemático da célula experimental I, 2009.....	44
Figura 5: Célula experimental II de RSU localizada na UFCG, 2011.....	46
Figura 6: Croqui longitudinal da célula experimental.....	47
Figura 7: Croqui transversal da célula experimental.....	47
Figura 8: (a) Descarregamento dos resíduos; (b) Homogeneização dos resíduos;(c) Quarteamento dos resíduos; (d) Homogeneização das pilhas de resíduos; (e) Preparação do local para triagem dos resíduos; (f) Triagem dos resíduos.....	51
Figura 9: Mapa das zonas e dos bairros da cidade de Campina Grande, destacando os bairros sorteados.....	53
Figura 10: (a, b e c) Descarregamento dos resíduos; (d) Homogeneização dos resíduos; (e) Quarteamento dos resíduos; (e) Homogeneização das pilhas de resíduos; (f) Preparação do local para triagem dos resíduos.....	56
Figura 11: Modelo do recipiente usado para realização da composição volumétrica.....	57
Figura 12: Composição volumétrica dos resíduos sólidos.....	58
Figura 13: Perfil granulométrico do solo analisado para camada de base e cobertura.....	67
Figura 14: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental I.....	69
Figura 15: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental II.....	70
Figura 16: Composição volumétrica (solto) dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental I.....	73
Figura 17: Composição volumétrica (solto) dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental II.....	74

Figura 18: Composição Volumétrica (Compactado) dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental I.....	75
Figura 19: Composição Volumétrica (Compactado) dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental II.....	76
Figura 20: Comportamento de bactérias aeróbias totais na célula experimental I nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.....	78
Figura 21: Comportamento de bactérias aeróbias totais na célula experimental I nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.....	78
Figura 22: Comportamento de fungos totais nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.....	80
Figura 23: Comportamento de fungos totais nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.....	81
Figura 24: Potencial hidrogeniônico (pH) nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.....	84
Figura 25: Potencial hidrogeniônico (pH) nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.....	84
Figura 26: Alcalinidade nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.....	87
Figura 27: Alcalinidade nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.....	87
Figura 28: Teor de umidade nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.....	89

Figura 29: Teor de umidade nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.....	90
Figura 30: Precipitação x Evaporação em Campina Grande-PB, no período de outubro 2009 a outubro de 2011.....	93
Figura 31: Precipitação x Evaporação em Campina Grande-PB, no período de setembro 2011 a setembro de 2013.....	93
Figura 32: Teor de sólidos voláteis nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.....	95
Figura 33: Teor de sólidos voláteis nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.....	96
Figura 34: Evolução temporal dos ácidos voláteis nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior), no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.....	97
Figura 35: Evolução temporal dos ácidos voláteis nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior), no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.....	98
Figura 36: Evolução temporal dos cloretos nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.....	100
Figura 37: Evolução temporal dos cloretos nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Massa de resíduos coletados nos bairros sorteados.....53

Tabela 2: Granulometria do solo usado para compor as camadas de base e cobertura nas células experimentais.....66

Tabela 3: Parâmetros de compactação do solo em Laboratório.....68

Tabela 4: Parâmetros de compactação do solo *in situ*.....68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Descrição dos Ensaios de Solos realizados no laboratório e Norma correspondente.....40

Quadro 2: Guia para triagem dos componentes para determinação da composição gravimétrica LIPOR (2000).....58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
Ácidos Voláteis - AV
AgNO₃ - Nitrato de prata
APHA - American Public Health Association PNSB
CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH₄ - Metano
CO- Monóxido de carbono
CO₂ - Dióxido de Carbono
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
DLU - Departamento de Limpeza Urbana
DQO - Demanda Química de Oxigênio
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EXTRABES - Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários
GGA - Grupo de Geotecnia Ambiental
H₂ - Hidrogênio
H₂S - Sulfeto de hidrogênio
H₂SO₄ - Ácido sulfúrico
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K₂CrO₄ - Cromato de potássio
LIPOR - Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grandeporto
N₂ - Nitrogênio
NaOH - Hidróxido de sódio
NBR - Normas Técnicas Brasileiras
NH₃ - Amoníaco
NMP - Número Mais Provável
O₂ - Oxigênio
PCA - Plate Count Agar
pH - Potencial hidrogeniônico

PMCG - Prefeitura Municipal de Campina Grande

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SV - Sólidos Voláteis

UEPB - Universidade Estadual da Paraíba

UFC - Unidade Formadora de Colônias

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

UEPB - Universidade Estadual da Paraíba

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

O estudo com células experimentais de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) permite avaliar a degradação dos diferentes tipos de resíduos sólidos por meio da ação dos microrganismos bactérias e fungos totais em um curto período de tempo, ao contrário do que ocorre em aterros sanitários tradicionais. Assim, o objetivo dessa pesquisa foi realizar o monitoramento de células experimentais de RSU quanto a aspectos físico-químicos e microbiológicos, preenchidas com resíduos da cidade de Campina Grande-PB, com o intuito de avaliar a eficiência dos processos degradativos. Para isso, realizou-se a construção, preenchimento e monitoramento de 2 (duas) células experimentais localizadas na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Essas células foram preenchidas com RSU da Cidade de Campina Grande, coletados em locais e quantidades previamente selecionadas. As células foram instrumentadas com medidores de temperatura e recalque ao longo da profundidade, piezômetro e dreno de gás, além de 12 pontos de coleta de resíduos. Os períodos de monitoramento foram de: outubro de 2009 a outubro de 2011 na célula experimental I e de setembro de 2011 a setembro de 2013 na célula experimental II, onde amostras de resíduos sólidos foram retiradas de cada camada (superior, intermediária e inferior) para realização das análises físico-químicas e microbiológicas. Foram realizadas análises de granulometria do solo para compor as camadas de base e cobertura, composição gravimétrica, volumétrica, pH, sólidos voláteis, teor de umidade, cloretos, alcalinidade, ácidos voláteis, precipitação e evaporação, contagem de bactérias aeróbias e fungos totais de acordo com normas e metodologias adaptadas com o propósito de observar o processo de degradação nas diferentes células experimentais. De acordo com os resultados obtidos verificou-se que as composições gravimétricas e volumétricas realizadas, nos diferentes períodos de tempo, foram típicas de cidades em desenvolvimento, com elevados teores de matéria orgânica e que o desenvolvimento dos parâmetros pH, alcalinidade, teor de umidade, concentrações de ácidos voláteis, sólidos voláteis e cloretos favoreceu o crescimento dos microrganismos bactérias aeróbias e fungos totais, em ambas as células estudadas propiciando comportamento semelhante dos microrganismos, ao longo do tempo de monitoramento. Observou-se que os teores de pH nas duas células experimentais monitoradas foram favoráveis no crescimento desse grupo de bactérias e que os resíduos sólidos urbanos encontram-se em estágio avançado de degradação. A redução dos sólidos voláteis em todos os níveis de profundidade das células experimentais indicou a degradação da matéria orgânica. Pode-se concluir que as fases de degradação nas células experimentais I e II ocorreram de maneira mais rápida quando comparadas a aterros sanitários em decorrência da área/superfície ser maior que o volume dos resíduos, o que facilitou a interação do meio ambiente com atividade enzimática dos diferentes grupos de bactérias e fungos totais presentes nas diferentes camadas das células experimentais.

Palavras-chave: biodegradação, microrganismos, células experimentais, monitoramento.

ABSTRACT

The study with experimental cells of Municipal Solid Waste (MSW) allows evaluating the degradation of the different types of solid waste through the action of the microorganisms bacteria and total fungi in a short period of time, unlike what occurs in traditional landfills. Thus the objective of this research was to carry out the monitoring of experimental cells of MSW as the physical-chemical and microbiological aspects, filled with waste from the city of Campina Grande-PB, in order to evaluate the efficiency of degradative processes. For this, realized the construction, the fill and monitoring of two (2) experimental cells located at the Federal University of Campina Grande. These cells were filled with RSU of the City of Campina Grande, collected in places and amounts previously selected. Cells were instrumented with temperature gauges and repression along the deep, piezometer and gas drain, beyond 12 points of waste collection. The monitoring periods were: October 2009 to October 2011 in the experimental cell I and from September 2011 to September 2013 in the experimental cell II, where solid waste samples were taken from each layer (upper, middle and lower) for realization of the physicochemical analysis and microbiological. Were realized soil granulometry analyzes to compose the layers of the base and cover, gravimetric composition, volumetric, pH, volatile solids, moisture content, chlorides, alkalinity, volatile acids, precipitation and evaporation, the count of aerobic bacteria and total fungi of agreement with standards and adapted methodologies in order to observe the degradation process in the different experimental cells. According to the results obtained it was found that the gravimetric and volumetric compositions realized, in the different time periods, were typical of cities in developing, with high contents of organic matter and that the development of the parameters pH, alkalinity, moisture content, concentrations of volatile acids, volatile solids and chlorides favored the growth of the microorganisms aerobic bacteria and total fungi, in both studied cells providing similar behavior of microorganisms, during the monitoring time. It was observed that the pH levels in the two experimental cells monitored were favorable in the growth of this group of bacteria and that municipal solid waste are at an advanced stage of degradation. The reduction of volatile solids in all depth levels of the experimental cells indicated the degradation of organic matter. It can be concluded that the degradation stages in the experimental cells I and II occurred more rapidly when compared to landfills due to the area/surface be greater than the volume of waste, facilitating the interaction of the environment with enzymatic activity of different groups of bacteria and total fungi present in the different layers of the experimental cells.

Keywords: biodegradation, microorganisms, experimental cells, monitoring.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2.1. Objetivo Geral.....	21
2.2. Objetivos Específicos	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 A problemática dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....	22
3.2. Células experimentais que simulam condições reais de aterros sanitários.....	24
3.3 Importância das composições gravimétricas e volumétricas no comportamento de aterros de RSU.....	25
3.4 Degradação microbiológica	27
3.4.1. Bactérias degradadoras de RSU	27
3.4.2. Fungos degradadores de RSU	30
3.5. Fatores interferentes na biodegradação dos resíduos sólidos	32
3.5.1. Teor de umidade	33
3.5.2. Potencial hidrogeniônico (pH).....	33
3.5.3. Sólidos Voláteis (SV)	34
3.5.4. Alcalinidade.....	34
3.5.5. Ácidos Voláteis (AV).....	35
3.5.6. Cloretos.....	36
3.5.7. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	36
3.5.8. Demanda Química de Oxigênio (DQO)	37
4. METODOLOGIA	38
4.1. Campo de estudo	38
4.2. Descrição do local de estudo das células experimentais I e II	38
4.3. Camadas de solo de base e cobertura, construção e instrumentação da célula experimental I.....	39
4.4. Construção da célula experimental II	45
4.4.1. Instrumentação, preenchimento e caracterização dos resíduos sólidos urbanos para célula experimental II.....	48
4.4.2.1. Ensaio de caracterização do solo nas células experimentais I e II	50
4.4.3. Plano de amostragem para o enchimento da célula experimental I	50
Fonte: Dados da pesquisa, 2011.	51
4.4.4. Plano de amostragem e planejamento estatístico para o enchimento da célula experimental II	52
4.4.5. Coleta e amostragem.....	54
4.4.6. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos.....	54
4.4.7. Composição gravimétrica	55
4.4.11. Composição volumétrica	56
4.5. Análises microbiológicas de bactérias aeróbias totais nas células experimentais I e II	60
4.5.1. Diluição das amostras.....	60

4.6. Análises microbiológicas de fungos totais nas células experimentais I e II.....	61
4.7. Potencial Hidrogênionico (pH).....	61
4.8. Teor de Umidade	62
4.9. Sólidos Voláteis (SV)	63
4.10. Alcalinidade	63
4.11. Ácidos Voláteis (AC).....	64
4.12. Cloretos.....	64
4.13. Monitoramento através das medições in situ e realização de ensaios laboratoriais.....	65
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
5.1. Caracterização física do solo e dos resíduos sólidos urbanos antes do enchimento das células experimentais I e II.....	66
5.2. Composição Gravimétrica dos RSU nas células experimentais I e II .	69
5.3. Composições volumétricas solta e compactada dos RSU nas células experimentais I e II	73
5.4. Bactérias aeróbias totais nas células experimentais I e II	77
5.5. Fungos totais nas células experimentais I e II.....	80
5.6. Potencial hidrogeniônico nas células experimentais I e II	83
5.7. Alcalinidade nas células experimentais I e II	87
5.8. Teor de umidade nas células experimentais I e II	89
5.9. Precipitação e Evaporação da cidade de Campina Grande/PB	92
5.10. Teor de sólidos voláteis	95
5.11. Ácidos voláteis nas células experimentais I e II.....	97
5.12. Cloretos nas células experimentais I e II.....	99
6. CONCLUSÕES	103
6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105
7. REFERÊNCIAS.....	106

1. INTRODUÇÃO

A geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) está diretamente vinculada a fatores como: renda e padrões de vida das populações, desenvolvimento econômico, diversidade de grupos populacionais e a elementos culturais e climáticos, sendo essa geração função das atividades básicas de manutenção da vida.

Estudos relacionados à gestão de RSU estão sendo discutidos nos diferentes cenários nacionais e internacionais, devido à falta de locais adequados de disposição final desses resíduos, bem como aos impactos por eles gerados.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2012), mais de 80% das cidades brasileiras dispõem seus resíduos em locais a céu aberto (popularmente conhecidos como lixões), em cursos d'água ou em áreas ambientalmente protegidas, ocasionando problemas ambientais e sociais devido à má gestão. Uma das maneiras de minimizar esses problemas é dispor os resíduos em aterros sanitários, no entanto, essa é uma forma de disposição relativamente criteriosa no que se refere ao aspecto técnico de sua instalação, sendo por isso, sua implantação dificultada na maioria das cidades brasileiras. A construção de aterros sanitários é uma das formas mais adequadas e econômicas para disposição dos resíduos sólidos gerados pela atividade humana (CONTRERA et al., 2014).

A operação de células experimentais de RSU permite a degradação dos resíduos em um curto período de tempo, ao contrário do que ocorre em aterros tradicionais. Uma das vantagens de conhecer o comportamento biodegradativo através da utilização dessas células é favorecer, no dimensionamento de projetos, a recuperação de energia, aperfeiçoando aspectos qualitativos e quantitativos relacionados a geração de gás, buscar tecnologias para reduzir o volume total dos resíduos gerados e, conseqüentemente, os custos de aterramento, propor soluções para tratamento do lixiviado e redução dos impactos ambientais (JOHN, 2004).

As células experimentais representam uma técnica de suma importância, pois permitem obter parâmetros para projetos, dimensionamento, construção e monitoramento de aterros sob condições conhecidas e controladas, podendo ser aplicada com as devidas adaptações em escala real. Estas células são planejadas com a finalidade de avaliar o processo biodegradativo dos resíduos que são depositados, correlacionando diferentes parâmetros como recalque, temperatura e quantificação de microrganismos. Monitorar células experimentais é importante, pois podem servir de justificativas para o melhor entendimento do comportamento de aterros sanitários devido à facilidade de conhecimento e das condições internas e externas. Muito dos conhecimentos atuais sobre o comportamento de aterros foram adquiridos através de estudos em células experimentais.

A decomposição dos resíduos no interior das células experimentais ocorre pela ação de diferentes grupos de microrganismos, sejam eles aeróbios ou anaeróbios. A atividade destes microrganismos contribui para acelerar os processos de biodegradação, visto que nestes ambientes encontram condições adequadas para o seu desenvolvimento. Desta forma, o ineditismo desta pesquisa se baseia no entendimento dos processos de biodegradação, realizados por ação de microrganismos, através do monitoramento de diferentes células experimentais de RSU.

A avaliação da eficiência dos processos de biodegradação será validada através do monitoramento de células experimentais. O entendimento das variações no monitoramento ao longo do tempo é importante, pois através do conhecimento dos processos que ocorrem durante a decomposição dos resíduos aterrados será possível sugerir mudanças para melhorar a eficiência dos processos de degradação de resíduos de aterros sanitários.

Os resultados obtidos através do monitoramento dessas células experimentais de RSU possibilitarão a verificação da representatividade quanto ao comportamento degradativo dos resíduos sólidos urbanos submetidos a diferentes condições: tempo de aterramento, condições ambientais e composição física dos resíduos, sendo possível verificar aspectos como: viabilidade técnica, facilidade de obtenção dos parâmetros e simplicidade operacional, reduzindo os custos na sua aplicabilidade prática.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Realizar o monitoramento de células experimentais de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) com o intuito de avaliar a eficiência dos processos degradativos quanto a aspectos físico-químicos e microbiológicos.

2.2. Objetivos Específicos

- Monitorar as células experimentais que simulam condições reais de um aterro sanitário para obtenção de parâmetros físico-químicos e microbiológicos durante o processo de decomposição dos resíduos sólidos urbanos, estabelecendo correlações entre eles;
- Estudar as influências das composições gravimétricas e volumétricas realizadas para a cidade de Campina Grande-PB, em diferentes períodos de tempo nos processos biodegradativos;
- Compreender a ação de microrganismos (bactérias aeróbias e fungos totais) na biodegradação dos resíduos sólidos urbanos ao longo do tempo de monitoramento;
- Estudar o comportamento biodegradativo dos dados obtidos nos diferentes parâmetros físico-químicos por meio do monitoramento das células experimentais de RSU nos processos de biodegradação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A problemática dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

A quantidade de RSU gerados pelo ser humano praticamente dobrou nos últimos anos. O processo de geração é um fator inevitável. Além da capacidade do ser humano crescer numericamente, a cada dia o homem amplia seus conhecimentos, criando novas necessidades de conforto e bem-estar, promovendo o aumento excessivo na exploração e transformação dos recursos naturais e, conseqüentemente, gerando maiores quantidades de resíduos (OLIVEIRA, 2004).

A crescente degradação ambiental que vem ocorrendo nestas últimas décadas, traz muitos questionamentos acerca dos problemas que a contaminação urbana pode desencadear sobre a saúde da população. O aumento na quantidade e variedade dos resíduos sólidos gerados pelas atividades domésticas, sociais e industriais emerge como um dos principais problemas da sociedade atual (MUÑOS, 2002; HOORNWEG et al., 2000; NARAYANA, 2009).

O consumo cotidiano de produtos industrializados é responsável pela contínua produção de resíduos sólidos. Nas cidades esta produção é tão intensa que não é possível conceber uma cidade sem considerar a problemática dos resíduos, isto é, desde a etapa de geração até a sua disposição final (MUCELIM & BELLINI, 2012)

Segundo Carvalho (1997) a disposição final adequada dos resíduos sólidos gerados pela sociedade moderna é um dos grandes problemas ambientais enfrentados pela maioria dos municípios brasileiros, dos quais geralmente apresentam como forma de disposição dos resíduos, os “lixões”. Os resíduos dispostos inadequadamente, sem qualquer tratamento, podem poluir o solo, alterando suas características físicas, químicas e biológicas, causando problemas de ordem estética e na saúde pública.

As atividades humanas, de um modo geral, provocam alterações nos meios físicos, químicos e biológicos. Essas modificações, chamadas de impactos ambientais produz no meio natural e social, conseqüências muitas

vezes com danos irreparáveis ao meio ambiente. Segundo John (2004) a poluição provocada principalmente em decorrência das atividades humanas pode ser conceituada como a degradação da qualidade ambiental resultantes de atividades que direta ou indiretamente prejudiquem a saúde, a segurança e o bem estar da população, criem condições adversas às atividades sociais e econômicas, afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente e lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

A sociedade e a administração pública se deparam nos dias atuais com um grande desafio quanto à gestão dos resíduos sólidos urbanos, que vem aumentando devido à intensificação das atividades humanas nas últimas décadas, dificultando o manejo e sua disposição final correta. Uma gestão eficiente de resíduos sólidos deve estar voltada para a diminuição da quantidade final de resíduos a ser eliminada, da minimização de impactos e da previsão das consequências para saúde humana e ambiental (COELHO, 2010; SANTOLERI, 2011).

De acordo com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (2010), através da lei 12.305, ressalva a importância da adequada gestão integrada dos resíduos sólidos, estabelecendo a responsabilidade compartilhada e fazendo com que toda a cadeia responsável pela produção de um bem ou produto de consumo se responsabilize pelo seu destino final. Uma de suas metas era de que até agosto de 2014, todos os lixões fossem erradicados do país e substituídos por aterros sanitários, instalações ambientalmente adequadas para o manejo e depósito de rejeitos. Porém, como a meta não foi alcançada em algumas cidades brasileiras, atualmente está no congresso uma proposta para prorrogar o prazo para erradicar os lixões por mais dois anos.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (2010) reporta que apenas os rejeitos devem ser depositados em aterros sanitários, diferenciando-os dos resíduos: rejeitos são resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada, enquanto que resíduos sólidos são materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se

propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

3.2. Células experimentais que simulam condições reais de aterros sanitários

Uma célula experimental pode ser considerada um reator que simula um aterro em escala real. Esta célula é dotada de um sistema de drenagem de líquidos e gases e possui em sistema de monitoramento de inúmeros parâmetros físico-químicos e microbiológicos.

Na ausência de aterros em escala real, uma opção para conhecimento e avaliação do comportamento dos resíduos sólidos, após disposição final, é o estudo de células experimentais, que em função de suas características área/volume aceleram o processo de biodegradação permitindo entender, as relações existentes entre os diversos parâmetros envolvidos no processo de degradação.

De acordo com Silva et al. (2010), uma célula experimental é um biorreator representativo de uma célula de resíduos em escala reduzida, dotado de sistema de drenagem de líquidos e gases, tubos de coleta de amostras sólidas, medidores de recalque superficial (placas e disco magnético) e profundo (disco magnético), temperatura, concentração e fluxo de gases, proporcionando a obtenção de parâmetros sob condições controladas e monitoradas.

As células experimentais são importantes, pois viabilizam as condições para decomposição microbiológica e aceleram a estabilização da massa de resíduos permitindo a disposição adicional de resíduos ou reuso mais rápido do aterro, e são projetadas para que a água de infiltração da chuva nesses resíduos seja feita sob condições controladas (MONTEIRO et al.,2006).

As células experimentais constam de uma estrutura cilíndrica rígida, com seção transversal circular que visa facilitar a distribuição e a compactação dos resíduos no seu interior, uniformizando a distribuição das pressões laterais na

parede interna da célula, evitando caminhos preferenciais de percolação do lixiviado e reduzindo a área de superfície lateral interna diminuindo desta forma o contato entre os resíduos e a parede interna da estrutura. Além do sistema de drenagem de líquidos e gases e da instrumentação prevista, a célula possui orifícios com acesso à massa de resíduos para coletas de amostras sólidas (ALCÂNTARA, 2007).

A disponibilidade de terras, aliado ao baixo custo de construção e operação, quando comparado a outros sistemas, além da utilização do biogás como fonte alternativa de energia faz dos aterros sanitários uma das soluções mais viáveis para o tratamento e disposição dos RSU no Brasil (VAZOLLER et al., 2001). Porém, estudar aterros em escala real, ainda é um problema no país, principalmente devido à sua escassez. Por isso, simular, por meio de células experimentais, o comportamento de um aterro em escala real é uma atividade de grande importância, uma vez que permite o estudo de todas as dinâmicas que ocorrem em seu interior, bem como a avaliação do comportamento dos resíduos quanto aos aspectos físicos, químicos e microbiológicos.

O estudo com biorreatores é importante, pois otimizam as condições para decomposição microbiológica e aceleram a estabilização da massa de RSU permitindo a disposição adicional de resíduos sólidos ou reuso mais rápido do aterro. Estes biorreatores são projetados geralmente para que a água de infiltração da chuva nos resíduos seja feita sob condições controladas.

Os biorreatores, se executados e controlados corretamente, reduzem os impactos ambientais, pois controlam a produção do lixiviado e as emissões de biogás, reduzindo assim a contaminação do solo e as emissões de gás ao ambiente.

3.3 Importância das composições gravimétricas e volumétricas no comportamento de aterros de RSU

As composições gravimétricas e volumétricas dos resíduos sólidos urbanos são ferramentas de extrema importância, pois servem como

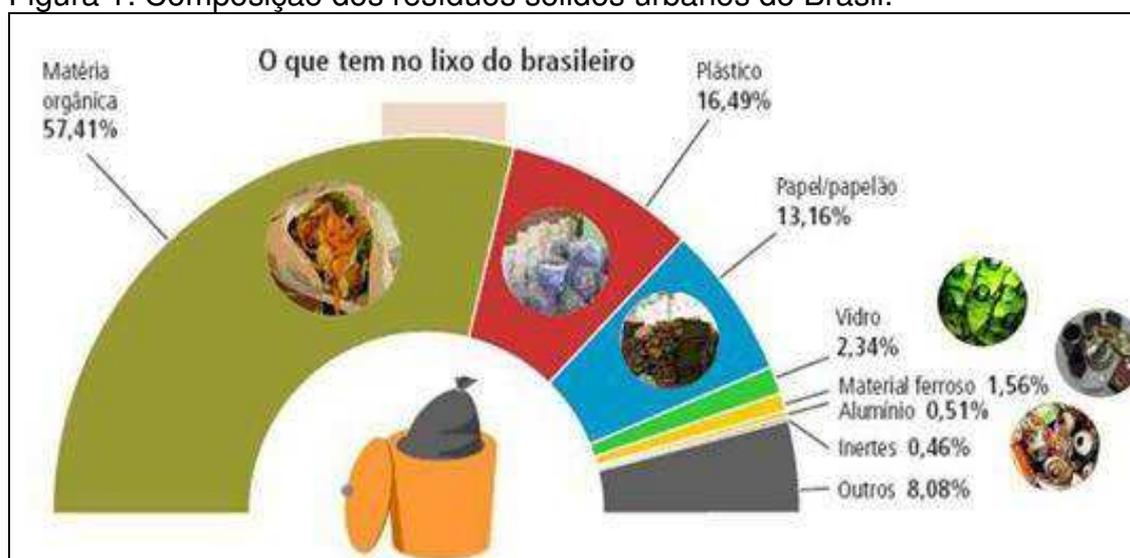
indicadores da quantidade que cada tipo de resíduos ocupa em peso e em volume nas células de um aterro sanitário (PEREIRA, et al., 2010).

A composição gravimétrica indica o percentual em peso dos materiais que compõem os resíduos em estudo. Para sua realização, normalmente é feito o processo de quarteamento associado a uma análise estatística (QUEZADO, 2010). Segundo Santos (2010) a composição gravimétrica representa o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra analisada. Alguns autores citam os componentes papel/papelão, metais, vidros, plásticos, matéria orgânica como os principais materiais utilizados na determinação da composição gravimétrica.

Quando dispostos nos aterros sanitários, a caracterização dos resíduos passa a ter mais importância, pois o conhecimento individual de cada constituinte, em peso e em volume, informa a quantidade da fração biodegradável existente dentro da massa de resíduos, o que contribui para o correto dimensionamento dos sistemas de drenagem e tratamento de lixiviado, além de permitir avaliar o potencial de geração de biogás.

Segundo ABRELPE (2011) e Cirne (2010) todos os dias são gerados no Brasil 240.000 toneladas de resíduos, dos quais a maior percentagem é de matéria orgânica, representada por 57,41% como pode ser observado na Figura 1. Os outros tipos de resíduos apresentaram baixos percentuais o que pode ser justificado pela recuperação física por meio da reciclagem.

Figura 1: Composição dos resíduos sólidos urbanos do Brasil.



Fonte: ABRELPE, 2011.

De acordo com Oliveira (1999) quando se caracteriza os RSU em uma cidade, deve-se definir o objetivo desta caracterização. Geralmente, o principal objetivo é definir a forma de disposição final dos resíduos sólidos gerados em uma determinada comunidade ou avaliar a implantação de algum sistema de tratamento de resíduos, viabilizando o aproveitamento do material orgânico (compostagem) e do inorgânico (coleta seletiva). As características destes resíduos são influenciadas por vários fatores como: número de habitantes, poder aquisitivo, nível educacional, hábitos e costumes da população; condições meteorológicas, sazonais e as mudanças na política econômica de um país.

Destaca-se que tanto a composição gravimétrica como volumétrica estão diretamente ligadas aos processos de recalques e, portanto também podem afetar o comportamento mecânico dos resíduos (MELO, 2011).

Os estudos de caracterização física dos resíduos contribuem, ainda, para o monitoramento ambiental, na compreensão do processo de decomposição dos resíduos e na estimativa da vida útil da área (LIMA, 2004).

3.4 Degradação microbiológica

A biodegradação por microrganismos é o processo de degradação de materiais por ação de fungos ou bactérias em ambientes aeróbios ou anaeróbios. A biodegradação ocorre naturalmente no ambiente e transforma compostos orgânicos em compostos mais simples, mineralizados e redistribuídos através de ciclos elementares como o do carbono, nitrogênio e enxofre (ROSA & FILHO, 2003).

3.4.1. Bactérias degradadoras de RSU

A degradação aeróbia ocorre na presença do elétron acceptor O_2 e os microrganismos são capazes de degradar a matéria orgânica a um composto inorgânico. Nas regiões superiores de um aterro, o O_2 deve ser suficiente para manter tal condição, onde o carbono orgânico será convertido a CO_2 ; o

nitrogênio orgânico a NO_3 ; o hidrogênio a H_2O ; o fósforo a PO_4^{-2} e o enxofre a SO_4^{-2} (CARVALHO, 1997). Esta fase apresenta curta duração, pois a própria operação dos aterros sanitários, dos quais usualmente são usados camadas de cobertura diária, se torna um fator limitante de disponibilidade de oxigênio. Esta fase é responsável por uma parcela reduzida da decomposição. A reação da matéria degradável com oxigênio produz dióxido de carbono, água, materiais parcialmente degradados e biomassa, além de promover uma elevação da temperatura do meio (MELO, 2003).

Com a falta do elétron aceptor O_2 disponível à oxidação aeróbia, a decomposição passa a ser realizada em condição anaeróbia, em função dos elétrons aceptores existentes, temperatura, pH, nutrientes, materiais tóxicos, umidade e potencial oxirredução (CARVALHO, 1997).

As bactérias degradadoras são microrganismos importantes no processo de decomposição de diversos tipos de materiais. Podem aparecer em todos os tipos de *habitats* e, devido a sua versatilidade metabólica, podem sobreviver em ambientes que não sustentam outras formas de vida. Sua ação degradativa ocorre principalmente na produção de enzimas, responsáveis pela quebra das cadeias para obterem nutrientes. Diferente dos fungos, os processos biodegradativos realizados pelas bactérias podem ocorrer basicamente, em dois ambientes distintos: o aeróbio, no qual há presença de oxigênio que pode funcionar como oxidante de material orgânico, e o anaeróbio, no qual este oxidante não existe (ROSA & FILHO, 2003; CAMPOS, 1999; MADIGAN, et al., 2002).

Os microrganismos anaeróbios são aqueles, que segundo Pelczar et al. (1997), não sobrevivem na presença de oxigênio gasoso, não podem crescer na presença de ar e não utilizam oxigênio para as reações de produção de energia.

Dentre as células bacterianas existentes, três tipos básicos de bactérias participam do processo de decomposição anaeróbia:

- As bactérias fermentativas que, por hidrólise, transformam os compostos orgânicos complexos, os polímeros, em compostos mais simples, os monômeros;

- As bactérias acetogênicas, ou produtoras de hidrogênio, que convertem os produtos gerados pelo primeiro grupo em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- As bactérias arqueas metanogênicas que utilizam os substratos produzidos pelas bactérias do segundo grupo, transformando-os em metano e dióxido de carbono. Estas bactérias são muito importantes para o processo, pois elas produzem o gás metano, possibilitando a remoção do carbono orgânico do ambiente, resultando na perda de massa, e utilizam o hidrogênio favorecendo o ambiente para que as bactérias acidogênicas fermentem compostos orgânicos com a produção de ácido acético, que é convertido em metano.

A degradação anaeróbia para aterros sanitários ocorre em quatro fases distintas (SIMÕES, 2000; CAMPOS, 1999; HAANDEL & LETTINGA, 1994):

- A primeira fase é a hidrólise, fase esta em que o material orgânico particulado é convertido em compostos dissolvidos de menor peso molecular. Nesta fase as bactérias degradam estes compostos complexos em compostos simples. Uma vez transformados em compostos mais simples estes podem atravessar a parede das bactérias fermentativas. O processo requer a interferência das chamadas exoenzimas que são excretadas por estas bactérias. São vários os fatores que interferem na velocidade desta fase: temperatura operacional, composição do substrato, tamanho das partículas, pH do meio e tempo de residência.
- A acidogênese é a segunda fase, onde os compostos dissolvidos na fase de hidrólise são absorvidos e metabolizados pelas células fermentativas, sendo convertidos em compostos mais simples como ácidos graxos voláteis, alcoóis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. A fermentação acidogênica é realizada por um grupo diversificado de bactérias, das quais a maioria é anaeróbia obrigatória. Entretanto, algumas são facultativas e podem metabolizar o material orgânico pela via oxidativa.
- Na terceira fase, a acetogênica, ocorre à conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam os substratos para produção de

metano: acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Dependendo do estado de oxidação do material orgânico a ser digerido, a formação de ácido acético pode ser acompanhada pelo surgimento de dióxido de carbono ou hidrogênio.

- A metanogênese é a quarta fase, na qual o metano é produzido por bactérias acetotróficas a partir da redução do ácido acético, ou pelas bactérias hidrogenotróficas, a partir da redução do dióxido de carbono. É o passo que limita a velocidade do processo da digestão como um todo.

O gás produzido em aterro é composto principalmente de gases provenientes da decomposição anaeróbia da matéria orgânica dos resíduos sólidos. Os gases que são encontrados nos aterros incluem o amoníaco (NH_3), o dióxido de carbono (CO_2), o monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), metano (CH_4), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2). Destes, os principais gases provenientes da decomposição anaeróbia dos componentes biodegradáveis dos resíduos orgânicos são o metano e o dióxido de carbono (GARCEZ, 2009; BÖRJESSON et al., 2004).

O gás metano é um dos produtos formados a partir de uma série de reações biológicas envolvidas na decomposição dos resíduos orgânicos em aterros sanitários. Esse gás produzido em aterros representa uma forma de energia renovável. A formação e a taxa de geração dos principais constituintes do biogás são variáveis ao longo dos anos. A conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o grande volume de resíduos produzidos por atividades agrícolas e pecuárias, destilarias, tratamento de esgotos domésticos e aterros sanitários, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano ao mesmo tempo em que produz energia elétrica agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos (BARLAZ et al., 1989; PECORA et al., 2010; MOR et al., 2006) .

3.4.2. Fungos degradadores de RSU

De acordo com CITIZENDIUM (2012) os fungos são microrganismos filamentosos, heterotróficos, os quais se desenvolvem em baixas e altas faixas

de pH. O habitat preferencial dos fungos é o de ambientes ácidos a levemente alcalinos, com pH variando de 2,0 a 9,0.

Abundantes em todo mundo, os fungos desempenham um papel essencial na decomposição da matéria orgânica e têm papéis fundamentais nas trocas e ciclos de nutrientes. Desde a década de 1940, os fungos são usados na produção de antibióticos, e, mais recentemente, várias enzimas produzidas por fungos são usadas industrialmente e em detergentes. Os fungos podem decompor materiais artificiais e até materiais utilizados na construção civil.

Os fungos por apresentarem características notadamente degradadoras podem e devem ser utilizados como recursos na degradação de compostos sintéticos, como os plásticos, por exemplo. De acordo com Conceição et al., (2005) com o avanço da ciência, diferentes compostos foram sintetizados e produzidos industrialmente. Consequentemente, novos resíduos foram introduzidos no ambiente. Muitas vezes, estes resíduos são de difícil degradação ou reciclagem na forma em que se encontram e, assim, persistem no ambiente prejudicando a biota (conjunto de seres vivos de um ecossistema, o que inclui a flora, a fauna e outros organismos).

A utilização de microrganismos nativos ou introduzidos no ambiente alterado, ou mesmo a captação e disposição dos resíduos nocivos em locais de tratamento, é realizada com sucesso em refinarias de petróleo, indústrias têxtil, de celulose, farmacêutica, entre outras (CONCEIÇÃO et al., 2005).

Os fungos secretam uma grande diversidade de eficientes enzimas no ambiente que são utilizadas para auxiliar sua nutrição. Desta maneira, são responsáveis pela deterioração de vários materiais naturais, refinados ou processados. Nas últimas décadas, a utilização dos fungos filamentosos e seus metabólitos nos processos de biorremediação vêm crescendo em virtude do alto potencial, biossorbitivo (metais pesados e corantes) e dos mecanismos de resistência em condições ambientais adversas (JARA, 2007).

De acordo com Rosa & Filho (2003), os fungos são um dos microrganismos responsáveis pela biodegradação de materiais poliméricos, principalmente os de origem natural, como o amido e a celulose. Estes microrganismos produzem enzimas como lipases, invertases, lactases entre outras, que hidrolisam os substratos para suprir-se de materiais nutrientes.

Segundo Gimenes (2010), a maioria dos processos biotecnológicos utilizando fungos baseia-se nos seus produtos metabólicos (enzimas e polissacarídeos). A importância do processo enzimático desses microrganismos está ligada na transformação dos resíduos lignocelulósicos, para a produção de polissacarídeos utilizados nas indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética e para a produção de alimentos, como exemplo, o cultivo de cogumelos. Ainda, esse processo enzimático está relacionado também com os processos de biodegradação de compostos xenobióticos (compostos orgânicos sintetizados industrialmente), como também para biorremediação ambiental de solos e tratamento de efluentes da indústria papelreira e têxtil (HOFRICHTER, 2002; FABBRINI et al. 2002; SHAH & NERUD 2002).

De acordo com Conceição (2005), nem sempre os indivíduos fundamentais para os processos de biorremediação estão presentes, ou quando são encontrados estão em número reduzido. Uma das soluções para este problema é procurar no ambiente, espécies que possuam os dispositivos metabólicos apropriados para mineralizar, iniciar a degradação ou diminuir o efeito tóxico de determinados compostos.

Como os fungos são microrganismos esporógenos, ou seja, organismos que formam esporos, a presença deles ao longo do processo de degradação de RSU em aterros sugere que estes possam permanecer por muito tempo no ambiente do aterro, mesmo após a estabilização da matéria orgânica. Além do mais os fungos, de um modo geral, têm grande tendência a se fixar em superfície sólida para se desenvolver. Estes microrganismos em resíduos sólidos podem aderir-se a materiais fibrosos tais como celulose ou sólidos inertes (TORTORA et al., 2000; PALMIZANO & BARLAZ, 1996).

3.5. Fatores interferentes na biodegradação dos resíduos sólidos

A decomposição dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários é um processo complexo e para que ocorra desenvolvimento dos microrganismos de maneira satisfatória, estes necessitam de condições mínimas para sobrevivência e posterior reprodução. Fontes nutricionais,

oxigênio, pH, umidade são exemplos de fatores essenciais para o desenvolvimento microbiano (MELO, 2003).

3.5.1. Teor de umidade

O teor de umidade que representa a quantidade de água contida na massa de resíduos é um dado importante para a escolha do sistema de tratamento e aquisição de equipamentos de coleta. Este teor presente no resíduo depende diretamente das condições meteorológicas e varia de um lugar para outro (LIMA, 2004).

Os microrganismos dependem de um meio aquoso para se desenvolverem. De acordo com Monteiro (2003), a água dilui nutrientes requeridos pelos microrganismos, além de possibilitar sua rápida percolação/lixiviação no meio sólido. Esta também possibilita o transporte de enzimas e outros metabólitos importantes no processo de decomposição. Alguns autores sugerem que o teor de umidade e o teor de matéria orgânica constantes dos resíduos fornecem os pré-requisitos necessários à fase inicial do crescimento bacteriano.

Segundo Monteiro (2003) a quantidade de água infiltrada pode prejudicar a degradação elevando o teor de umidade no interior da massa de lixo. A faixa ótima de umidade para a degradação biológica está entre 20-40%, sendo que valores fora desta faixa podem desestabilizar a célula de resíduos. O aumento do teor de umidade em uma massa de resíduos contribui para um aumento da velocidade de degradação.

3.5.2. Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH é usado para expressar o grau ácido/básico de uma solução, ou seja, expressa a concentração de íons hidrogênio e hidroxilas nessa solução. Este parâmetro é muito importante, pois influencia muitas reações químicas e bioquímicas, o que pode afetar várias populações de microrganismos (ALCÂNTARA, 2007).

A massa dos resíduos sólidos domiciliares costuma ser ácida, com pH inicial na faixa de 4,5 a 5,5. No processo de bioestabilização desta massa de resíduos, o pH tende a se neutralizar, situando-se entre 7,0 - 8,0. Em função do pH e sua capacidade de crescimento no meio, os microrganismos podem ser classificados em acidófilos, neutrófilos e basófilos. Os primeiros microrganismos apresentam crescimento ótimo em pH baixo, enquanto no último, a taxa de crescimento ocorre em meios alcalinos. Boa parte dos microrganismos são neutrófilos com crescimento na faixa de pH próximo a 7 (OLIVEIRA, 2004).

A maioria das bactérias adapta-se a um meio cujo pH ótimo é em torno da neutralidade, pois é o mais adequado para absorção de nutrientes.

3.5.3. Sólidos Voláteis (SV)

De acordo com Monteiro (2003), é através da determinação dos sólidos voláteis que se determina a percentagem de cinzas e a quantidade de matéria orgânica existentes nos resíduos sólidos. Este parâmetro pode ser considerado como um indicador de degradabilidade dos resíduos ao longo do tempo. Altos teores de sólidos voláteis indicam a presença de muita matéria orgânica a ser degradada e baixos valores indicam que a matéria orgânica já passou por um processo acentuado de degradação.

É um parâmetro de grande importância para o acompanhamento das alterações de propriedades químicas, biológicas e físicas da massa de resíduos depositados em aterros. Os sólidos voláteis presentes na fração líquida resultante do processo de decomposição representam a parcela facilmente degradável, ou seja, os primeiros resultados da atividade microbiana (MONTEIRO, 2003).

3.5.4. Alcalinidade

A alcalinidade de um sistema é o resultado da presença de espécies químicas de caráter alcalino, indicando a capacidade de tamponamento do sistema em neutralizar ácidos. De acordo com Isoldi et al. (2001) a acidez de

um sistema é a capacidade que ele tem de neutralizar bases. Acidez elevada não significa pH baixo, mas elevada resistência ao aumento de pH quando uma base é introduzida no sistema. A ocorrência simultânea de substâncias ácidas e alcalinas confere ao sistema um efeito tampão/base, que é a capacidade de manter seu pH, mesmo quando ácidos ou bases são adicionados. A queda do pH é preocupante na biodigestão, e, portanto, só se focaliza a importância do tampão alcalino.

Leite (2008) diz que a alcalinidade é a medida de uma propriedade do líquido associada à sua capacidade de tamponação e só pode ser interpretada em função de substâncias específicas, quando a composição química da amostra analisada é conhecida. O valor determinado pode variar, dependendo do valor do pH final usado como referência.

3.5.5. Ácidos Voláteis (AV)

Dillenburg (2006) reporta que os ácidos voláteis estão entre os compostos mais importantes para a digestão anaeróbia e seu estudo é de fundamental importância para compreender esta digestão. Os ácidos voláteis possuem até seis carbonos e apresentam baixo peso molecular. Podem ser definidos como ácidos graxos solúveis em água, que podem ser destilados a pressão atmosférica.

Na decomposição bioquímica da matéria orgânica, uma variedade de bactérias saprófitas hidrolisa e converte o material complexo em compostos de menor peso molecular como os ácidos graxos (ácido acético, propiônico e butírico). Estes ácidos são chamados de voláteis porque podem ser destilados sob pressão atmosférica. O acúmulo destes ácidos pode prejudicar a digestão anaeróbia se a capacidade de tamponamento extrapolar e o pH baixar (LEITE, 2008). A instabilidade do processo anaeróbio pode ocorrer quando a produção de ácidos voláteis é maior que seu consumo, provocando queda do pH e inibição das atividades de bactérias metanogênicas.

3.5.6. Cloretos

De acordo com Junqueira (2000) a importância do monitoramento dos níveis de cloretos produzidos em um aterro está relacionada à utilização desse parâmetro como um “traçador natural”. O nível de cloretos pode indicar o comportamento de uma pluma de contaminação, pois os cloretos são os primeiros compostos a serem identificados permitindo que ações sejam tomadas no sentido de conter a contaminação a partir da fonte de origem. As concentrações de cloretos, mesmo elevadas, não são alteradas em função de processos biológicos e essa variável não possui efeito tóxico.

A toxicidade por sais está normalmente associada ao cátion, e não ao ânion do sal. Ademais, a combinação de íons cloreto com cátions metálicos pode levar à formação de complexos estáveis, reduzindo a concentração e a toxicidade pela disponibilidade de metais solúveis. Os íons de cloretos são um dos principais íons inorgânicos presentes em águas em geral, águas residuárias, resíduos sólidos e lixiviado (CHERNICHARO,1997; SAWYER & McCARTY, 1985).

3.5.7. Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A análise de demanda bioquímica de oxigênio de acordo com Alcântara (2007) indica a quantidade de oxigênio de uma determinada amostra de lixiviado consumido por meio de reações biológicas. A DBO representa a quantidade de oxigênio consumido para oxidar a matéria orgânica através da biodegradação aeróbia.

Segundo Lima (2004) a demanda bioquímica de oxigênio pode ser definida como a quantidade de oxigênio requerida durante a estabilização da matéria orgânica disponível e a matéria orgânica oxidável pela ação biológica aeróbia.

O teste da DBO é utilizado para determinar o potencial poluidor de líquidos em termos do consumo de oxigênio que os mesmos necessitarão se forem despejados em líquidos em que existam condições aeróbias. Esse teste é um dos mais importantes para as atividades de controle de poluição de

líquidos, além de ser indispensável nos trabalhos de regulamentação de qualidade de líquidos e em estudos para avaliar a capacidade de depuração de líquidos percolados.

O teste da DBO é um bioensaio, baseado na medida do oxigênio consumido por organismos vivos, bactérias em sua maioria, que utilizam matéria orgânica presente nos despejos. A completa estabilização de determinado despejo pode requerer um período longo demais para efeitos práticos e, portanto, o período de 5 dias na determinação da DBO tem sido aceito como um padrão satisfatório para sua estimativa (SILVA e OLIVEIRA, 2001).

3.5.8. Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A Demanda Química de Oxigênio (DQO) pode ser expressa como a quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente todos os compostos sujeitos a esta reação (oxiredução) presentes em uma determinada amostra. A DQO é diretamente proporcional a poluição de um corpo d'água, ou seja, rios altamente poluídos têm DQO elevada. Esta representa um dos principais parâmetros para quantificação de contaminantes nos líquidos percolados, indicando a carga de matéria orgânica transportada e a quantidade de oxigênio necessária para sua estabilização. Uma análise mais específica mostra que a medida da demanda química de oxigênio serve como um importante parâmetro na avaliação do processo de decomposição, em particular, na compreensão dos efeitos da lixiviação microbiana (MEIRA, 2009).

A DQO representa de modo indireto, a quantidade de oxigênio consumido num processo de degradação química da matéria orgânica dissolvida, presente no lixiviado, seja ela biodegradável ou não (ALCÂNTARA, (2007).

4. METODOLOGIA

4.1. Campo de estudo

Esta pesquisa foi desenvolvida na cidade de Campina Grande-PB que é considerada um dos principais polos industriais da Região Nordeste e também um dos maiores polos tecnológicos da América Latina. De acordo com estimativas do IBGE (2014), sua população é de 402.912 habitantes, sendo a segunda cidade mais populosa da Paraíba. A cidade localiza-se no interior do estado da Paraíba, no agreste paraibano, na parte oriental do Planalto da Borborema, na serra do Boturité/Bacamarte, que se estende do Piauí até a Bahia. Está a uma altitude média de 555 m acima do nível do mar e possui uma área que abrange 594,2 Km².

Campina Grande possui um relevo forte e ondulado com curvas de nível variando entre 325 m e 670 m acima do nível médio do mar e situa-se na região oriental do Planalto da Borborema. O clima da região é do tipo semiárido apresentando temperatura do ar média anual em torno de 22,2 °C e com precipitação anual em torno de 472.6 mm (AESAS, 2012; CUNHA et al., 2009).

A cidade de Campina Grande não dispõe de uma área de disposição final ambientalmente adequada de resíduos sólidos, sendo estes resíduos encaminhados para a cidade de Puxinanã, localizada a 17,1 Km de distância da cidade de Campina Grande. Os serviços de coleta de resíduos domiciliares, hospitalares e industriais além de outros são terceirizados pela prefeitura municipal.

4.2. Descrição do local de estudo das células experimentais I e II

A pesquisa foi realizada na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde foram construídas duas células experimentais, uma em 2009 e a segunda célula em 2011 que simulam aterros sanitários. Os ensaios de campo, como coleta das amostras, análises físico-químicas, microbiológicas, medição de recalques e gás foram realizados nos Laboratórios de Geotecnia Ambiental

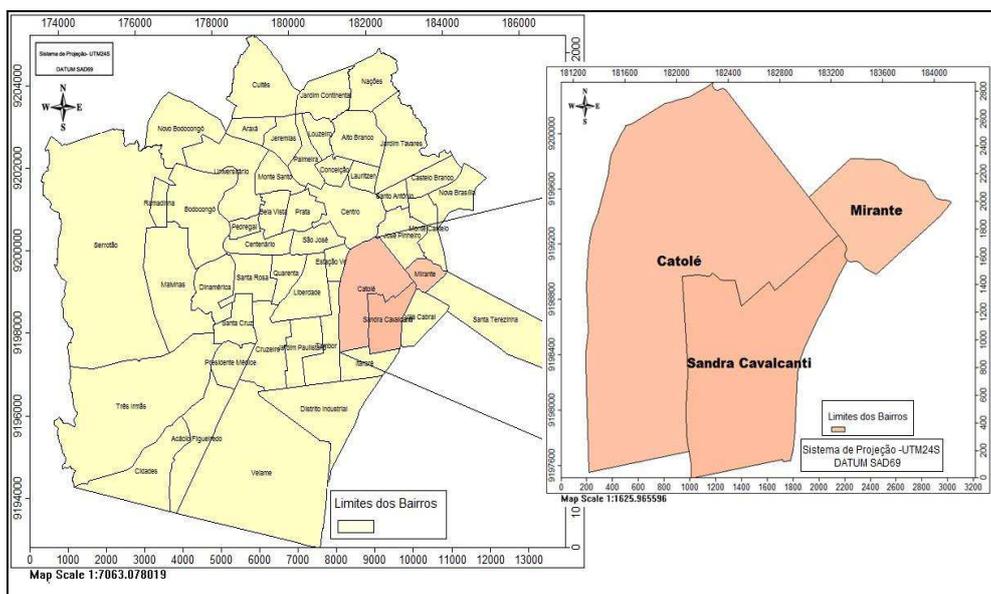
da referida instituição, no laboratório da Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários- Núcleo de Pesquisa da Universidade Federal de Campina Grande-PB e Universidade Estadual da Paraíba-PB (EXTRABES) e no Laboratório de Antibióticos da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

As coletas das amostras de resíduos sólidos urbanos, as análises de laboratório e as medições “*in situ*” foram realizadas pelo Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA), composto por graduandos, mestrandos e doutorandos de diferentes áreas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

4.3. Camadas de solo de base e cobertura, construção e instrumentação da célula experimental I

Os resíduos sólidos urbanos destinados ao enchimento da célula experimental I foram coletados em três bairros distintos em outubro de 2009, com rotas de coletas definidas pelo Departamento de Limpeza Urbana (DLU) da cidade de Campina Grande-PB. Estes bairros foram selecionados pelo DLU de acordo com as diferentes classes sociais e para se ter uma melhor representatividade dos resíduos da cidade. Os bairros selecionados e com rotas definidas foram: Mirante, Catolé e Conjunto Argemiro Figueiredo situado no bairro Sandra Cavalcanti (Figura 2). A coleta dos resíduos nos bairros selecionados pelo DLU foi realizada por um caminhão compactador em outubro de 2009. Para a realização da coleta e amostragem dos resíduos utilizou-se o procedimento recomendado pela norma NBR 10.007 (ABNT, 2004) - Amostragem de Resíduos.

Figura 2: Bairros selecionados pela Prefeitura Municipal de Campina Grande-PB para realização da coleta dos resíduos sólidos urbanos, 2009.



Fonte: Dados da pesquisa, 2009.

O solo selecionado para o estudo e a caracterização da célula experimental I foi coletado na cidade de Lagoa Seca - PB de acordo com as exigências normativas. Depois de realizados vários ensaios laboratoriais, utilizou o solo para compor a camada de base e cobertura da célula experimental monitorada.

Todos os ensaios de caracterização das amostras de solos para as células experimentais I e II foram realizados no Laboratório de Solos da UFCG, conforme as normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), apresentados no quadro 1.

Quadro 1: Descrição dos Ensaios de Solos realizados no laboratório e Norma correspondente.

Ensaio	Norma referente	Comentário
Preparação das Amostras Determinação do Teor de Umidade com Secagem em Estufa	NBR 6.457/86 – Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização	Esta Norma prescreve o método para a preparação de amostras de solos para os ensaios de compactação e caracterização (análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade, massa específica dos grãos que passam na peneira de 4,8 mm, massa específica aparente e absorção de água dos grãos retidos na peneira de 4,8 mm). No anexo desta Norma apresenta-se, ainda, o método para determinação do teor de umidade de

		solos, em laboratório. A determinação do teor de umidade é parte integrante de ensaios que objetivam a determinação de outros parâmetros do solo tais como, por exemplo, os limites de consistência e ensaio de compactação.
Determinação da Massa Específica dos grãos	NBR 6.508/84 – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica	Esta Norma prescreve o método para a determinação da massa específica dos grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm, por meio de picnômetro. A massa específica dos grãos é necessária nos cálculos de outros ensaios, inclusive a granulometria por sedimentação e na determinação das relações peso/volume, isto é, índice de vazios, grau de saturação e outros índices físicos.
Ensaio de Granulometria	NBR 7181/84 – Solo – Análise Granulométrica	Esta Norma prescreve o método para análise granulométrica de solos, realizada por peneiramento ou pela combinação de sedimentação e peneiramento. O processo consiste em passar a amostra através de um conjunto de peneiras, empilhadas em ordem decrescente da abertura de malha, e pesar o material retido em cada peneira. Com isso obtêm-se as coordenadas que permitam traçar a curva granulométrica.
Determinação do Limite de Plasticidade	NBR 7.180/84 - Solo – Determinação do limite de plasticidade	Esta Norma prescreve o método para a determinação do limite de plasticidade e para o cálculo do índice de plasticidade dos solos. O Limite de Plasticidade (LP) é o teor de umidade em que o solo começa a se fraturar quando se tenta moldar com ele, um cilindro com as dimensões de 3 mm de diâmetro e cerca de 100 mm de comprimento.
Determinação do Limite de Liquidez	NBR 6.459/84 – Solo – Determinação do limite de liquidez	Esta norma prescreve o método para a determinação do limite de liquidez dos solos. O limite de liquidez foi concebido como o menor teor de umidade com que uma amostra de um solo pode ser capaz de fluir. Embora tal capacidade seja mais relacionada com o grau de saturação do solo do que com o teor de umidade, os ensaios para determinar os limites de liquidez de solos finos têm o teor de umidade como parâmetro, por causa da dificuldade de medir e controlar o grau de saturação.
Ensaio de Compactação	NBR 7.182/86 – Solo – Ensaio de compactação	Prescreve o método para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos quando compactados, de acordo com os processos especificados.

Permeabilidade à carga constante	NBR 13.292/95 - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante	Prescreve método para a determinação do coeficiente de permeabilidade à carga constante, com a água percolando através do solo, em regime de escoamento laminar. A aplicação deste método é restrita a solos granulares, contendo no máximo 10 por cento, em massa, de material que passa na peneira de 0,075 mm.
Permeabilidade à carga variável	NBR 14.545/00 - Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável	Prescreve os métodos para determinação do coeficiente de permeabilidade a carga variável, com a água percolando através do solo em regime de escoamento laminar.

A célula experimental I (Figura 3) consiste em uma célula de resíduos em escala piloto com uma altura de 3,0 m e um diâmetro interno de 2,0 m, com volume aproximado de 9 m³. É uma célula dotada de sistemas de drenagem de líquidos e gases, medição de nível dos líquidos, placas de recalque e medidores de temperatura, além dos pontos de coleta das amostras de resíduos posicionados ao longo de sua profundidade representando as camadas superior, intermediária e inferior. Camadas de solo para base e cobertura da célula foram selecionadas com características de baixa permeabilidade (ABNT, 2004).

Figura 3: Célula experimental I de RSU e seus pontos de coleta, 2009.

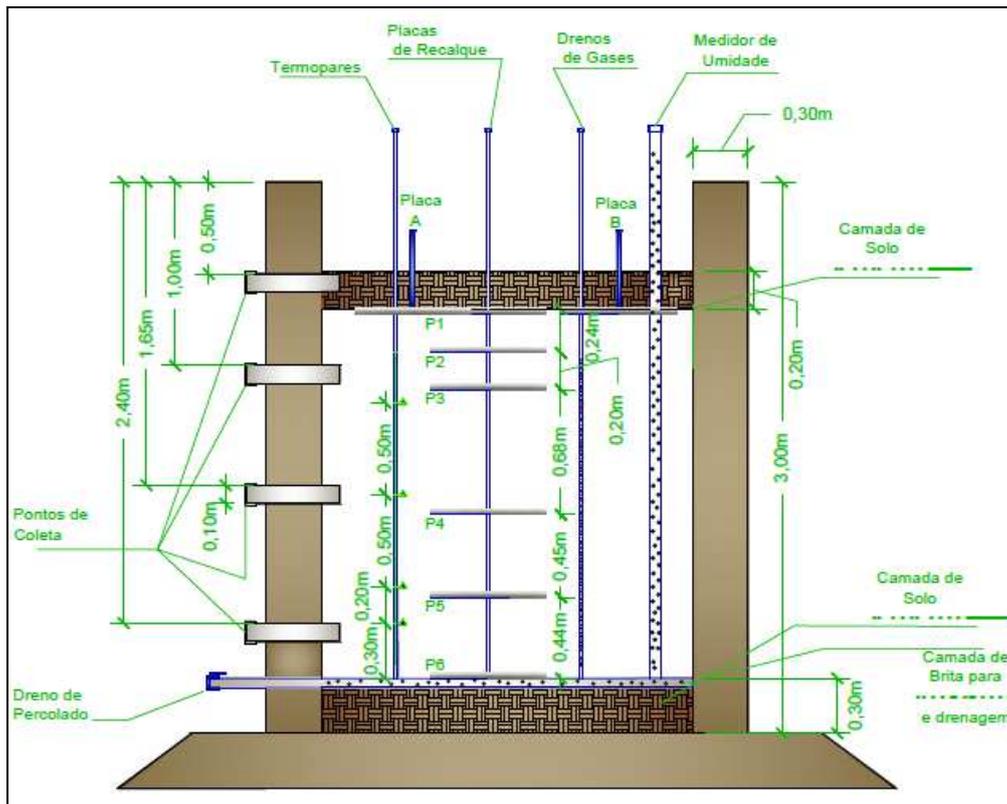


Fonte: Dados da pesquisa, 2009.

As etapas realizadas para a construção e instrumentação da célula experimental I foram:

- Construção da célula experimental (Figura 3);
- Ajuste de metodologias específicas para análises de resíduos sólidos urbanos;
- Determinação dos locais de amostragem dos resíduos em três bairros de classe alta, média e baixa da cidade;
- Instrumentação da célula experimental: drenos de líquidos e gases, piezômetros, medidores de temperatura, instalação de placas de recalque superficiais e em profundidade;
- Realização de amostragem dos resíduos antes do enchimento da célula experimental usando o procedimento recomendado pela norma NBR 10.004/ NBR 10.007 (ABNT, 2004);
- Caracterização dos resíduos através de determinação da composição gravimétrica e volumétrica segundo Rocha e Lang (2003) e recomendações da CETESB (1990);
- Enchimento da célula experimental ocorrido no mês de outubro de 2009 e término do monitoramento das análises para esta pesquisa em outubro de 2011;
- Realização dos ensaios físico-químicos, microbiológicos e mecânicos para determinação das características iniciais dos resíduos que foram depositados na célula experimental;
- Monitoramento mensal de sólidos através de medições “*in situ*” e realização de ensaios laboratoriais com amostras coletadas na célula experimental.

Figura 4: Desenho esquemático da célula experimental I, 2009.



Fonte: Dados da pesquisa, 2009.

A instrumentação da célula experimental I consistiu dos seguintes elementos:

- **Termopares:** instrumentos usados para o monitoramento da temperatura no interior da célula experimental. Foram instalados quatro termopares a cada 0,5 m de profundidade. Estes termopares consistem em um par de metais de cobre e cromo unidos em uma ponta, que são sensíveis à temperatura, gerando correntes elétricas proporcionais à temperatura. Estas correntes foram medidas na superfície por um termômetro elétrico.
- **Piezômetro:** o piezômetro foi confeccionado pelo grupo GGA para monitorar o nível de líquidos. Consiste de um tubo de PVC de 25 mm, com furos na parte inferior das paredes do tubo e coberto com tela de nylon.
- **Medidor de recalque superficial e em profundidade:** para o monitoramento dos recalques foram utilizadas placas de recalques circulares com diâmetros aproximados de 150 mm, confeccionadas em aço e revestidas com uma

película anti-corrosiva. Estas placas foram instaladas na superfície e em profundidade, respectivamente.

- **Tubo para drenagem de gases:** este tubo foi instalado na lateral da célula, e foi confeccionado em PVC com furos verticais. Apresenta um diâmetro de 40 mm envolvido por uma tela de nylon para evitar a obstrução dos furos.
- **Pontos para coleta das amostras sólidas:** foram construídos 12 pontos de coleta de resíduos na célula experimental I, sendo três pontos para cada camada estudada. As camadas da célula experimental estão baseadas nos pontos de coleta (superior, intermediário e inferior). Cada ponto apresentava uma abertura lateral para coletar as amostras com um diâmetro de 100 mm.

4.4. Construção da célula experimental II

A célula experimental II foi construída em alvenaria de tijolos manuais, com 2,0 m de diâmetro interno e 3,5 m de altura com volume aproximado de 11 m³ (Figura 5). Esta célula foi dotada de sistemas de drenagens de líquidos e gases, medidores de nível dos líquidos, medidores de recalque superficiais e profundos e de temperatura ao longo da profundidade (ao longo das camadas da célula). O sistema de drenagem de lixiviados foi constituído por um tubo de PVC perfurado, sendo apoiado diretamente sobre o solo compactado e por uma camada de pedra britada que promove a drenagem de toda área do fundo da célula. Nas camadas de base e de cobertura foi selecionado um solo com características de baixa permeabilidade de acordo com a ABNT (2004).

O solo para compor as camadas de base e cobertura da célula experimental II foi coletado em uma jazida localizada na cidade de Boa Vista, nas proximidades da cidade de Campina Grande/PB, de acordo com as exigências normativas.

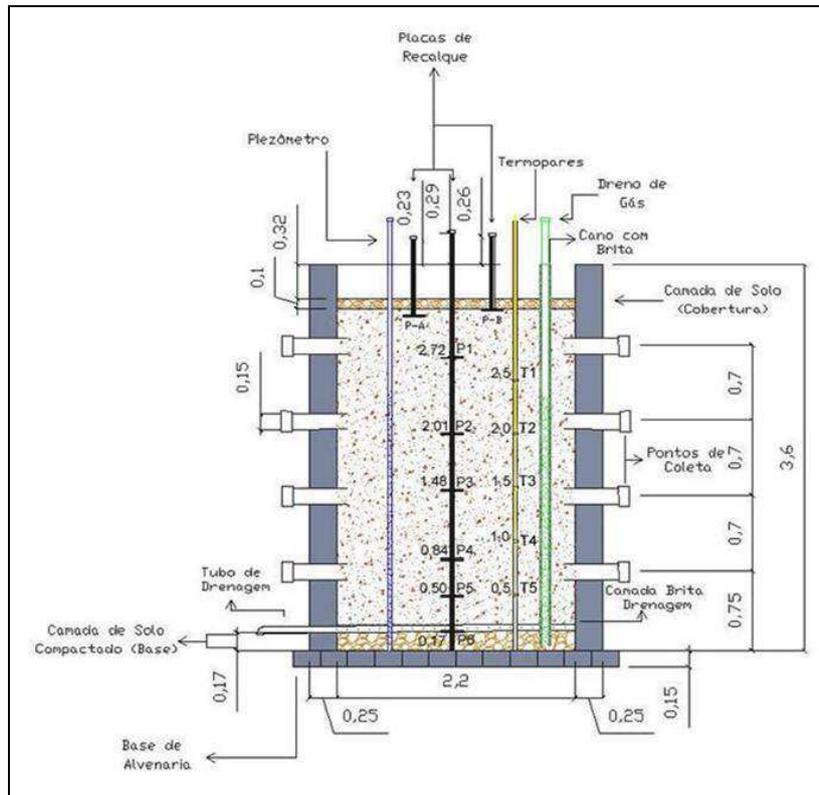
Figura 5: Célula experimental II de RSU localizada na UFCG, 2011.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

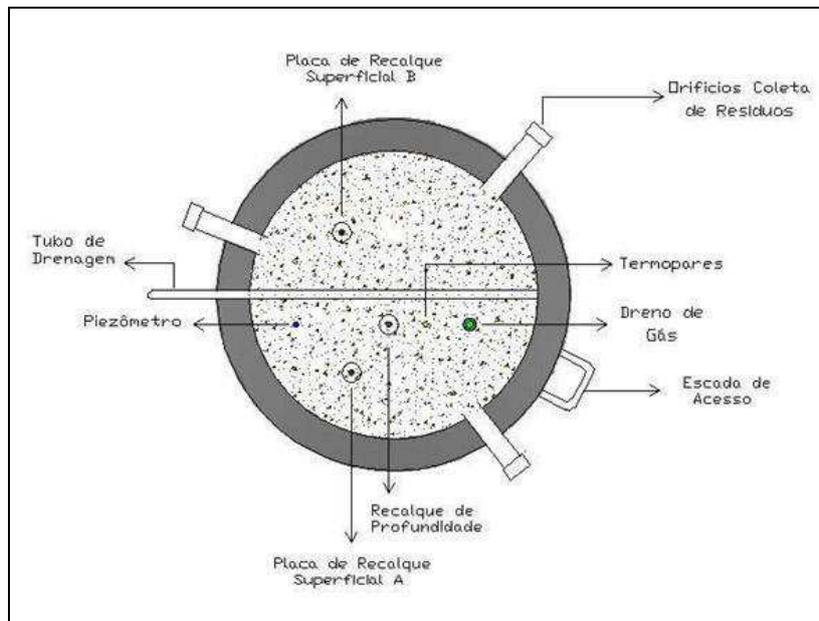
A célula experimental consta de uma estrutura cilíndrica rígida, com seção transversal circular (Figuras 6 e 7). Segundo Alcântara (2007) aterros simulados com seção transversal circular visa facilitar a distribuição e a compactação dos resíduos no seu interior, uniformizarem a distribuição das pressões laterais na parede interna da célula, evitar caminhos preferenciais de percolação do lixiviado e reduzir a área de superfície lateral interna diminuindo o contato entre os resíduos e a parede interna da estrutura. Além do sistema de drenagem de líquidos e gases e da instrumentação prevista, a célula experimental possui aberturas com acesso à massa de resíduos para coleta de amostras sólidas.

Figura 6: Croqui longitudinal da célula experimental.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Figura 7: Croqui transversal da célula experimental.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

As etapas para a construção e instrumentação da célula experimental II foram:

- Construção da célula experimental em 2011;
- Ajustes de metodologias específicas para análises de resíduos sólidos urbanos;
- Determinação dos locais de amostragem dos resíduos em diferentes zonas da cidade de Campina Grande-PB;
- Instrumentação da célula experimental: drenos de líquidos e gases, piezômetros, medidores de temperatura, instalação de placas de recalque superficiais e em profundidade, pontos de coleta das amostras;
- Realização de amostragem dos resíduos antes do enchimento da célula experimental II usando o procedimento recomendado pela norma NBR 10.004/ NBR 10.007 (ABNT, 2004);
- Caracterização dos resíduos através de determinação da composição gravimétrica segundo LIPOR (2000) adaptado por Leite (2008) e Pereira et al. (2010) e volumétrica segundo Rocha e Lang (2003) e recomendações da CETESB (1990);
- Enchimento da célula experimental II em setembro de 2011 e finalização do monitoramento das análises para esta pesquisa em setembro de 2013;
- Monitoramento da célula experimental: análises físico-químicas, microbiológicas e medições de temperatura, recalque e gás.

4.4.1. Instrumentação, preenchimento e caracterização dos resíduos sólidos urbanos para célula experimental II

A célula experimental II foi dotada da instrumentação descrita a seguir:

- **Piezômetro:** utilizado para o monitoramento do nível de líquidos. Consiste em um tubo de PVC de 25 mm, com furos nas paredes do tubo e coberto com tela de nylon. O sistema de drenagem de lixiviado foi constituído por um tubo de PVC perfurado, sendo apoiado diretamente sobre o solo compactado.

- **Termopares:** usados para o monitoramento das temperaturas no interior da célula experimental. Estão conectados três termopares que consistem em um par de metais de cobre e cromo unidos em uma ponta, que são sensíveis à temperatura, gerando desta forma corrente elétrica proporcional. Esta corrente é medida na superfície por um termômetro elétrico.
- **Medidor de recalque superficial e em profundidade:** para o monitoramento do recalque foram utilizadas placas de recalques circulares com diâmetros aproximados de 150 mm, confeccionadas em aço e revestidas com uma película anti-corrosiva. Estas placas se encontram instaladas na superfície e em profundidade da célula.
- **Tubo para drenagem de gases:** o dreno de gás, instalado no centro geométrico da célula, consiste em um tubo de PVC perfurado de 40 mm de diâmetro inserido dentro de um tubo de PVC de 100 mm envolvido por uma tela de nylon para evitar a obstrução dos furos e apoiado por uma camada de pedra britada de 19 mm que promoveu a drenagem de toda área do fundo da célula.
- **Pontos de coleta das amostras dos resíduos sólidos:** constituído por 12 aberturas na parede da célula, sendo três a cada 70 cm de altura distribuída em três pontos diferentes. Cada abertura tem um diâmetro de aproximadamente 150 mm.

4.4.2. Camada de base e cobertura nas células experimentais I e II

Os solos selecionados para estudos e caracterizações, de acordo com as exigências normativas da ABNT, foram coletados nas cidades de Lagoa Seca (Célula experimental I) e Boa Vista (Célula experimental II), nas proximidades da cidade de Campina Grande/PB. Após diversos ensaios realizados, os solos foram utilizados para compor as camadas de base e cobertura das células de RSU. O estudo do solo para camada de base e cobertura das células foi realizado segundo a norma NBR 6.457 (ABNT, 1986) que prescreve o método para a preparação de amostras de solos para os ensaios de compactação e caracterização (análise granulométrica, determinação dos limites de Atterberg, massa específica dos grãos e

massa específica aparente e absorção de água dos grãos). Esse processo consiste em secar, destorroar, quartear, pesar e peneirar a amostra, para no fim das operações, obterem-se uma quantidade suficiente, homogênea e representativa do solo a ser analisado.

4.4.2.1. Ensaio de caracterização do solo nas células experimentais I e II

Os ensaios de caracterização das amostras de solos foram realizados no Laboratório de Solos da UFCG, conforme normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Para a execução da camada de base, foi utilizado o método Speedy para identificar a umidade do solo. A partir desse método, foi calculada a quantidade de água necessária para alcançar a umidade ótima e foi misturado ao solo com o auxílio de enxadas. Com o solo na umidade adequada e com o auxílio de um soquete manual, a camada de base foi executada com uma camada de 20 cm. Após o enchimento das células experimentais, foram realizados os mesmos procedimentos para a execução da camada de cobertura.

Após a confecção da camada de base, cravou-se um cilindro vazado com volume e peso conhecido na camada de solo compactado e retirou uma amostra de solo, para a verificação da densidade e umidade *in situ*.

4.4.3. Plano de amostragem para o enchimento da célula experimental I

Para a realização da amostragem foi utilizado o procedimento recomendado pela norma NBR 10.007 (ABNT, 2004) – Amostragem de Resíduos. A coleta das amostras foi realizada por um caminhão compactador com capacidade aproximada de nove toneladas de resíduos. Os procedimentos para a composição gravimétrica foram realizados segundo LIPOR (2000) adaptado por Leite (2008) e Pereira et al. (2010).

A coleta dos resíduos sólidos foi realizada durante o período noturno no dia 16 de outubro de 2009. No dia 17 de outubro o caminhão dirigiu-se para a UFCG para descarregar os resíduos. Para a obtenção de uma amostra significativa para a composição dos resíduos foram realizadas as seguintes etapas:

1– Descarregamento dos resíduos do caminhão compactador. (Figura 8a), homogeneização formando uma única pilha com auxílio de uma enchedeira. (Figura 8b) e quarteamento (Figura 8c). Das quatro pilhas resultantes, duas foram descartadas. As outras duas foram homogeneizadas, formando uma única pilha. (Figura 8d). Após esse procedimento, foram retiradas amostras sólidas para a caracterização física dos resíduos sólidos.

2– Foram usados recipientes de aproximadamente 65 litros para as análises e foram retiradas amostras sólidas resultando aproximadamente 160 kg de resíduos ou 585 litros.

3– A amostra retirada foi pesada e em seguida disposta em local previamente preparado com lona plástica para o processo de triagem. (Figura 8e e 8f). A classificação dos resíduos foi realizada segundo LIPOR (2000) adaptado por Leite (2008), de acordo com as seguintes categorias: plásticos, metal, vidro, compósitos, têxteis sanitários (papel higiênico, absorventes, fraldas descartáveis), papel e papelão, matéria orgânica.

4 – Em recipientes previamente pesados e etiquetados, foram realizadas as medições do peso dos resíduos sólidos urbanos separados por categorias e os dados anotados em planilhas.

Figura 8: (a) Descarregamento dos resíduos; (b) Homogeneização dos resíduos; (c) Quarteamento dos resíduos; (d) Homogeneização das pilhas de resíduos; (e) Preparação do local para triagem dos resíduos; (f) Triagem dos resíduos.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

4.4.4. Plano de amostragem e planejamento estatístico para o enchimento da célula experimental II

Para obter amostras representativas dos RSU da Cidade de Campina Grande verificou-se a necessidade de se estabelecer um plano de amostragem, através de um planejamento estatístico. Este plano baseou-se nas informações obtidas junto a Diretoria de Limpeza Urbana (DLU) e ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Para isso, foram utilizados dados do censo populacional do IBGE 2010, dados da geração de resíduos na cidade e foi desenvolvida uma metodologia inédita de amostragem, com o intuito de representar a composição dos resíduos sólidos gerados na cidade de Campina Grande.

Os bairros selecionados e o quantitativo de resíduos sólidos utilizados para preenchimento da célula experimental II foram definidos a partir de um planejamento estatístico, realizado com o intuito de obter maior representatividade dos RSU da cidade de Campina Grande/PB. Este planejamento estatístico foi realizado com base nas informações obtidas junto a Diretoria de Limpeza Urbana (DLU) e ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Foi utilizada uma estatística probabilística e estratificada por zonas da cidade. Foram utilizados dados da contagem populacional realizada pelo IBGE (2010) e dados da geração *per capita* de resíduos sólidos na cidade (Equação 1).

Para determinar n usou-se a seguinte equação:

$$n = \frac{Z^2 \cdot \sigma^2 \cdot n}{e^2 (n-1) + Z^2 \cdot \sigma^2} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

N é o tamanho da população;
n é o tamanho da amostra (amplitude amostral);
 σ é o desvio padrão da população
 α é o nível de significância (10%)
e é o erro máximo cometido (10%)

A coleta dos RSU amostrados da cidade de Campina Grande foi realizada por meio de uma rota especial (Figura 9).

Figura 9: Mapa das zonas e dos bairros da cidade de Campina Grande, destacando os bairros sorteados.



Fonte - Prefeitura Municipal de Campina Grande-PB, 2011. (Adaptado)

A Tabela 1 apresenta a massa de RSU coletada por bairro para garantir a representatividade da amostra.

Tabela 1: Massa de resíduos coletados nos bairros sorteados.

Zona	Bairro	Resíduos (Kg)
Norte	Conceição	271,13
	Nações	110,85
	Palmeira	448,66
Sul	Estação Velha	261,20
	Jardim Paulistano	632,84

	São José	311,41
	Velame	475,90
Leste	José Pinheiro	1.270,24
	Nova Brasília	739,97
Oeste	Dinamérica	431,95
	Malvinas	3.052,04
	Quarenta	393,87

Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

A frequência do sistema de coleta em Campina Grande ocorre em dias alternados, sendo este sistema dividido em 24 roteiros, em função da frequência, horário e percurso do caminhão de coleta. Analisando o roteiro de coleta da cidade fornecido pelo DLU da Prefeitura Municipal de Campina Grande (PMCG) e os bairros sorteados determinou-se estatisticamente uma rota de coleta especial.

4.4.5. Coleta e amostragem

Para a realização da coleta e amostragem utilizou-se o procedimento recomendado pela norma NBR 10.007 (ABNT, 2004) - Amostragem de Resíduos. A coleta das amostras foi realizada utilizando-se um caminhão com capacidade aproximada de 2 ton, com rota definida de acordo com os dias de coleta nos bairros sorteados.

Em cada bairro existia uma quantidade de resíduos a ser coletado, variando de acordo com sua população. Após a coleta da quantidade previamente estabelecida, os resíduos eram encaminhados às dependências da UFCG, setor C, descarregados e cobertos com lona até o descarregamento da quantidade total de resíduos coletados em todos os bairros, para posterior caracterização e enchimento da célula experimental II.

4.4.6. Caracterização dos resíduos sólidos urbanos

Antes do enchimento da célula experimental foi realizada a caracterização físico-química e microbiológica dos resíduos. Os resíduos

sólidos quando foram dispostos na lona, foi realizado o quarteamento, onde foi obtida uma pilha resultante para caracterização destes resíduos. Para obtenção da amostra foi utilizado o procedimento descrito na NBR 10.007 – (ABNT, 2004). As composições gravimétricas e volumétricas foram realizadas de acordo com as metodologias de Simões (2000), Mariano (2007) e Rocha (2003).

4.4.7. Composição gravimétrica

Para realização da amostragem foi utilizado o procedimento recomendado pela norma NBR 10.007 (ABNT, 2004) – Amostragem de Resíduos. A coleta das amostras foi realizada por um caminhão com capacidade de 1ton de resíduos. Os procedimentos para a composição gravimétrica foram realizados segundo LIPOR (2000) adaptado por Leite (2008) e Pereira et al. (2010).

A coleta dos RSU foi realizada no período de 8 a 10 de setembro de 2011 nos turnos diurnos e noturnos. O enchimento da célula experimental II foi realizado no dia 10 de setembro de 2011 com a participação do Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) da UFCG, agentes de limpeza da prefeitura municipal e catadores que auxiliaram na triagem dos materiais. Posteriormente realizou-se a pesagem dos resíduos e sua classificação segundo as subclasses: plásticos, metal, vidro, compósitos, têxteis sanitários, papel e papelão, matéria orgânica e outros, definindo desta forma a composição gravimétrica.

Para a obtenção de uma amostra significativa para a composição dos resíduos foram realizadas as seguintes etapas:

1– Descarregamento dos resíduos do caminhão (Figura 10 a, b e c). (Figura 10d), homogeneização formando uma única pilha com auxílio de uma enchedeira.(Figura 10e) quarteamento dos resíduos. Das quatro pilhas resultantes, duas foram descartadas. As outras duas foram homogeneizadas, formando uma única pilha. Após esse procedimento, foram retiradas amostras sólidas para a caracterização física dos resíduos sólidos (Figura 10f).

2– Foram usados 9 recipientes de aproximadamente 65 litros para as análises e foram retiradas amostras sólidas resultando aproximadamente 215 kg de resíduos ou 585 litros.

3– A amostra retirada foi pesada e em seguida disposta em local previamente preparado com lona plástica para o processo de triagem). A classificação dos resíduos foi realizada segundo LIPOR (2000) adaptado por Leite (2008), de acordo com as seguintes categorias: plásticos, metal, vidro, compósitos, têxteis sanitários (papel higiênico, absorventes, fraldas descartáveis), papel e papelão, matéria orgânica.

4 – Em recipientes previamente pesados e etiquetados, foram realizadas as medições do peso dos resíduos sólidos urbanos separados por categorias e os dados anotados em planilhas.

Figura 10: (a, b e c) Descarregamento dos resíduos; (d) Homogeneização dos resíduos; (e) Quarteamento dos resíduos; (e) Homogeneização das pilhas de resíduos; (f) Preparação do local para triagem dos resíduos.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

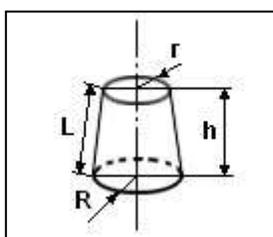
4.4.11. Composição volumétrica

A metodologia para a composição volumétrica dos resíduos sólidos foi baseada em Catapreta e Simões (2008) e Mariano et al. (2007). Esse

procedimento foi realizado após a caracterização gravimétrica, no qual, após a pesagem mediu-se o volume desses resíduos.

Os recipientes utilizados foram na forma de cone (Figura 11), cujo diâmetro variou de acordo com a altura do recipiente. Portanto, com medida do diâmetro menor (base do recipiente) passou-se a medir a altura e o diâmetro maior com o auxílio de uma régua e trena métrica, e, por meio da Equação 2 obteve-se o volume dos resíduos soltos.

Figura 11: Modelo do recipiente usado para realização da composição volumétrica.



$$V = \frac{\pi h(R^2 + Rr + r^2)}{3} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

h: altura encontrada;

R: raio maior e

r: raio menor.

Após o procedimento da composição gravimétrica (composição dos resíduos em peso) foi realizada a composição volumétrica com o mesmo material que foi utilizado na composição gravimétrica, onde foram realizadas leituras de volumes dos resíduos soltos. Em seguida, os resíduos foram compactados estaticamente, simulando a compactação que ocorreria na célula experimental, com o auxílio de um soquete de peso igual a 49 kg, obtendo-se a composição volumétrica dos resíduos sólidos compactados.

Figura 12: Composição volumétrica dos resíduos sólidos.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Quadro 2: Guia para triagem dos componentes para determinação da composição gravimétrica LIPOR (2000).

Categoria	Subcategoria	Exemplos
Resíduos putrescíveis	Resíduos alimentares	Restos de alimentos, outros resíduos putrescíveis exceto resíduos de jardins
	Resíduos de jardim	Ervas, flores, folhas, podas de arbustos, ramagens.
Papéis	Embalagens de papel	Sacos de papel, papel de embalagem.
	Jornais, revistas e folhetos	Jornais, revistas, listas telefônicas, catálogos, turísticos.
	Papéis de escritório	Papel de fotocópias, papel de computador, folhas soltas, papel de carta.
	Outros papéis	Papéis de uso doméstico, agendas, livros, bilhetes de ônibus, fotografias, papel químico, papéis coloridos ou pintados, envelopes.
Papelões	Embalagens de papelão	Embalagens de cereais, caixas de lenços de papel, embalagens de ovos, caixas de leite em pó, caixas de jogos, papelões de embalagem ondulada, caixas de transporte de bebidas (cerveja, vinho, iogurtes etc), caixas de acondicionamento de eletrodomésticos.
	Outros papelões	Cartões de aniversário, de natal, calendários, rolos de papelão (de papel higiênico, de papel de cozinha etc).
Compósitos	Embalagens compósitas de cartão	Embalagens tetra-pak: leite, sucos.

	Outras embalagens compósitas	Embalagens compósitas de vários materiais diferentes (papéis, plásticos, alumínio): embalagens de café.
	Outros compósitos (não embalagem)	Resíduos elétricos e eletrônicos: calculadoras, rádios portáteis, cabos; resíduos constituídos por vários materiais: partes de sofás, almofadas, tapetes ou panos de mesa; sapatos.
Têxteis		Embalagens têxteis; têxteis de fibras naturais e/ou sintéticas (vestuário, atalhados, panos de limpeza, lenços, guardanapos, novelos etc), de fibras sintéticas (sacos de desporto, de viagem, meias, panos etc).
Têxteis sanitários		Fraldas descartáveis, absorventes higiênicos, lenços de papel, papéis de uso doméstico sujos, algodões.
Plásticos	Filmes poliolefinicos (E, PP)	Tipos de plásticos de acordo com a sua categoria (PET, PEAD, PVC, PEBD, PP, PS, OUTROS).
	Garrafas e frascos (PVC, PET, PEAD,...)	
	Outras embalagens plásticas	
	Outros resíduos plásticos	
Combustíveis não especificados	Embalagens combustíveis nas especificadas	Embalagens de queijo, barquetas de fruta, embalagens em vime.
	Outros combustíveis não especificados	Madeira (tábuas), couro (sapatos, sacos), borracha, lápis, cigarros, tapetes, pelúcias, ossos, bolas de tênis, pneus, chupetas, lápis, borrachas, sacos de aspirador (com o conteúdo).
Vidro	Embalagens de vidro	Garrafas (água, vinho, sucos etc), embalagens de alimentos (massa de tomate, maionese, óleos e azeites, ketchup, café, cogumelos).
	Outros resíduos em vidro	Outros resíduos em vidro (não embalagem) Louças em vidro, pirex, espelhos, pedaços de vidro de janela
Metais	Embalagens ferrosas	Latas de bebidas (cerveja, cola etc), de conservas (legumes, frutas, carne, peixe), latas de alimentos para animais etc
	Embalagens não ferrosas	Embalagens de alumínio: Latas de bebidas (cerveja, refrigerantes etc), latas de conserva, folha de alumínio, cápsulas de garrafas
	Outros resíduos metálicos (não embalagem)	Louças, utensílios de cozinha e de outros usos domésticos, peças moldadas (torneiras etc), fios de cobre, peças de automóveis, chaves e outros utensílios anti-roubo, armações de guarda-chuvas, talheres
Incombustíveis não especificados		Materiais inertes não classificados nas outras categorias (gravetos, pedras, tijolos), cerâmica, louças de barro e porcelanas.
Resíduos domésticos especiais	Pilhas e acumuladores	Baterias, pilhas-botão, pilhas alcalinas, outras pilhas.
	Outros resíduos domésticos especiais	Embalagens sujas: frascos de tinta de escrita, de verniz, embalagens sujas contendo dissolventes, tolueno, embalagens contaminadas por fungicidas, herbicidas, inseticidas; tubos de néon, lâmpadas

		fluorescentes, seringas, medicamentos, filtros de óleo, produtos contendo gases que provoquem efeito estufa.
Elementos finos (< 20 mm)		Cinzas, areia, pequenos fragmentos de vidro e de resíduos orgânicos (cascas de legumes, frutas etc).

4.5. Análises microbiológicas de bactérias aeróbias totais nas células experimentais I e II

4.5.1. Diluição das amostras

Para as análises microbiológicas foram retiradas 10 g de resíduos sólidos urbanos de cada camada (superior, intermediária e inferior) da célula experimental. Cada amostra foi diluída em 90 mL de água destilada (que foi previamente autoclavada). As amostras foram agitadas manualmente com o auxílio de um bastão durante 5 minutos. Logo em seguida, a porção líquida foi separada da porção sólida através de uma peneira de plástico e foram realizadas diluições de 10^{-3} até 10^{-6} . Este procedimento foi utilizado para o inóculo das amostras de bactérias aeróbias totais e fungos. Das diluições 10^{-3} a 10^{-6} foram retiradas 0,1 mL de cada amostra e com o auxílio de uma alça de Drigalski esta amostra foi espalhada em toda a superfície da placa de Petri (3 repetições para cada diluição selecionada).

O meio usado para o crescimento das bactérias foi o Plate Count Agar (PCA). Após este procedimento as placas foram colocadas em estufa a 36,5°C, durante 48 horas. Em seguida foi realizada a contagem do número de colônias (Unidade Formadora de Colônia-UFC) (AWWA/APHA/WEF, 2012).

Após o período de 48 horas, verificou-se em qual diluição foi possível fazer a melhor contagem de organismos em placas (triplicatas). Posteriormente, na diluição escolhida, fez-se o cálculo efetuando-se a média do número de colônias das três placas multiplicando pela diluição correspondente. O método de contagem em placa é a técnica mais utilizada na determinação do tamanho de uma população bacteriana. A grande vantagem deste método é que as células viáveis são quantificadas.

O crescimento de bactérias aeróbias totais foi determinado segundo metodologia (AWWA/APHA/WEF, 2012).

4.6. Análises microbiológicas de fungos totais nas células experimentais I e II

Os fungos são microrganismos que se desenvolvem em meios especiais de cultivos, como o meio Ágar Sabouraud Dextrose, formando colônias leveduriformes, que em geral apresentam aspecto pastoso ou cremoso; e colônias filamentosas caracterizadas por aspectos aveludados algodonosos, pulverulentos, com os mais variados tipos de pigmentação. Tortora (2000) reporta que a maioria dos fungos é aeróbia, porém há espécies anaeróbias facultativas e poucas, não muito conhecidas, são anaeróbias e se reproduzem por esporos, forma de reprodução ou de resistência a agressões ou estresse externos.

Para as análises de fungos totais, foi coletada 10 g de amostra de resíduos sólidos. Foi realizada a diluição da amostra de 10^{-1} a 10^{-6} e posteriormente selecionada as diluições que pudessem prover a contagem de fungos totais de maneira mais significativa. Foi espalhada em cada placa de Petri previamente esterilizada com meio Ágar-Sabouraud Dextrose, 0,1 mL de amostra de resíduos, com auxílio de uma alça de Drigalski. Para evitar que ocorresse o crescimento bacteriano na placa fez-se necessário a adição do antibiótico cloranfenicol, permitindo deste modo que ocorra apenas crescimento de fungos. Em seguida a amostra foi incubada numa estufa com temperatura em torno de 35°C, durante um período de cinco a sete dias. Após esse período, foi realizada a contagem de fungos totais e o cálculo das unidades formadoras de colônias (UFC) fúngicas (AWWA/APHA/WEF, 2012).

4.7. Potencial Hidrogênico (pH)

O sistema ácido/base de processos biológicos anaeróbios é descrito basicamente por três parâmetros: pH, alcalinidade e ácidos graxos voláteis. Estes três fatores encontram-se intrinsecamente relacionados e, portanto, a

interpretação dos dados relativos ao seu monitoramento envolve a compreensão conjunta desses parâmetros (POHLAND, 1996; BALDOCHI et al., 1996).

O sistema ácido/base descreve as condições nas quais os fenômenos bioquímicos se processam, direcionando as reações no sentido da síntese ou dissociação de certos compostos, favorecendo ou não sua concentração no meio, regulando as formas e espécies químicas predominantes (MONTEGGIA et al., 2006).

De acordo com Lima (2004) o valor do pH pode ser definido como o logaritmo da concentração de íons de hidrogênio na mistura de uma analítica e água. É um termo que expressa a intensidade da condição ácida ou básica de um determinado meio (SILVA & OLIVEIRA, 2001). A análise quantitativa do pH é fundamentado na diferença de potencial existente entre uma solução aquosa e uma superfície de vidro quando em contato. Desta forma, o pH pode ser determinado pela medição desta voltagem.

A determinação do pH foi realizada eletrometricamente com a utilização de um potenciômetro e eletrodos. O princípio da medição eletrométrica do pH foi a determinação da atividade iônica do hidrogênio, utilizando o eletrodo padrão de hidrogênio, que consiste de uma haste de platina sobre o qual o gás hidrogênio flui a uma pressão de 101 kPa (AWWA/APHA/WEF, 2012).

4.8. Teor de Umidade

Para determinação do teor de umidade foi utilizado a metodologia segundo Manassero et al. (1996), da qual o teor de umidade foi determinado pelo método da base úmida, o mais comumente utilizado em resíduos sólidos. Uma quantidade representativa da amostra dos resíduos sólidos foi pesada e em seguida foi levada a estufa a 60°C por 24 horas; depois desse período realizou-se a pesagem do material seco em balança digital e então determinada a umidade da amostra de resíduos. Desta forma a água contida na amostra foi dada pelo peso perdido durante o processo, sendo o teor de umidade em cada amostra determinado pela Equação 3.

$$w = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad \text{equação (3)}$$

Onde: w = Teor de Umidade (%);

P_i = peso inicial (g);

P_f = peso final (g).

4.9. Sólidos Voláteis (SV)

A determinação da percentagem de sólidos voláteis presentes nos resíduos sólidos foi realizada segundo (WHO, 1979). Depois do processo de teor de umidade, o material foi levado a mufla até atingir gradativamente 550° C pelo período de duas horas, e em seguida foi resfriada, para encontrar o peso seco do material. O teor de sólidos voláteis da amostra foi determinado de acordo com a equação 4. Segundo Lima (2004) a fração de matéria que se volatiliza no processo é definida como Sólidos Voláteis (SV). Podem-se considerar como Sólidos Voláteis o total de matéria orgânica contida nos resíduos sólidos.

$$\%SV = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100 \quad \text{equação (4)}$$

Onde: %SV=Sólidos Voláteis (%);

P_i = peso inicial (g);

P_f = peso final (g).

4.10. Alcalinidade

Para determinação da alcalinidade total foi realizada a titulação do extrato do resíduo, com solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de normalidade 1 0,1 N, sob discreta agitação até atingir o pH específico de pH = 4,0, esperando estabilizar e através do volume do (H_2SO_4) gasto, determinou-se a alcalinidade total por meio da Equação 5.

$$AT = \frac{(N \times V_a \times 5000)}{V_A} \quad \text{equação (5)}$$

Onde: AT = alcalinidade total (mgCaCO₃/L);

N = normalidade do H₂SO₄ (N);

V_a = volume de ácido adicionado à amostra (mL);

V_A = volume da amostra.

4.11. Ácidos Voláteis (AC)

Para determinação dos ácidos voláteis, foi utilizada a metodologia AWWA/APHA/WEF (2012), na qual se calibrou o pH para 3,0 e em seguida a amostra foi levada a fervura até reduzir o seu volume à metade. Após esfriar, novamente sobre agitação, elevou-se o pH para 4,0 com NaOH. Por fim, foi medido o volume de hidróxido de sódio necessário para calibrar o pH a 7,0. Desta forma os ácidos voláteis foram calculados a partir da equação 6.

$$AV = \frac{N \times VT}{V_A} \times 60000 \quad \text{equação 6}$$

Onde: AV = ácidos voláteis (mgH_{AC}/L);

VT = volume de NaOH gasto na titulação (mL);

V_A = volume da amostra (mL);

N = normalidade do NaOH (N)

4.12. Cloretos

Para determinação dos cloretos foi utilizado um frasco Erlenmeyer de 100 mL onde foram adicionados 50 mL do estrato com pH ajustado entre 7 e

10, utilizando hidróxido de sódio (NaOH) ou ácido sulfúrico (H₂SO₄). Em seguida, adicionou a este 1 mL de solução indicadora de cromato de potássio (K₂CrO₄) e titulou-se com uma solução padrão de nitrato de prata (AgNO₃) a 0,0141 N até a cor apresentar-se amarelo avermelhado, ponto final da titulação (AWWA/APHA/WEF, 2012).

A prova em branco seguiu a mesma sequência, a diferença foi que utilizou água destilada em vez do estrato. A concentração de cloreto foi calculada por meio da Equação 7.

$$\text{Cl}^{-}(\text{mg/L}) = \frac{(A-B) \times N \times 35450}{VA} \quad \text{equação 7}$$

Onde: A= volume gasto de nitrato de prata (mL);

B= volume gasto de nitrato de prata na prova em branco (mL);

N = normalidade do titulante;

VA = volume da amostra (mL).

4.13. Monitoramento através das medições *in situ* e realização de ensaios laboratoriais

Após as etapas de construção, caracterização e enchimento da célula experimental, foi iniciada a fase do monitoramento, que consistiu em acompanhar e analisar o processo de biodegradação dos resíduos sólidos. Com a degradação da matéria orgânica, amostras sólidas de resíduos foram coletadas e levadas aos laboratórios, onde foram realizados os diferentes tipos de análises físico-químicas e microbiológicas. A frequência das coletas era mensal e as medições *in situ* eram realizadas semanalmente com leituras de temperatura e recalques da massa de resíduos ao longo da profundidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização física do solo e dos resíduos sólidos urbanos antes do enchimento das células experimentais I e II

A caracterização física do solo e dos resíduos sólidos nas células experimentais I e II envolveu os ensaios de granulometria do solo, as composições gravimétricas e volumétricas solta e compactada.

Após a caracterização e controle realizado em laboratório e *in situ*, pode-se afirmar que o solo usado para as camadas de base e cobertura apresentou características adequadas esta finalidade. Os controles realizados durante a sua execução mostraram conformidade entre os dados obtidos em laboratório e em campo, indicando que a camada de base e cobertura de solo compactado foi realizada de forma satisfatória e de acordo com as normas e técnicas disponíveis.

A partir dos ensaios realizados, verificou-se que se trata de um solo seco de umidade higroscópica igual a 4,19%. A massa específica dos grãos do solo estudado foi de 2,66 g/cm³, valor que se encontra dentro da faixa admissível de acordo com a literatura (ABNT, 1984).

A Tabela 2 apresenta os resultados de granulometria obtidos através do ensaio de peneiramento.

Tabela 2: Granulometria do solo usado para compor as camadas de base e cobertura nas células experimentais.

Solo	% Retida na peneira
Pedregulho (acima de 4,8 mm)	0,05
Areia Grossa (0,84 – 4,8 mm)	2,28
Areia Média (0,25 – 0,84 mm)	16,22
Areia Fina (0,05 – 0,25 mm)	39,25
Silte + Argila (< 0,05 mm)	42,20
TOTAL	100,00

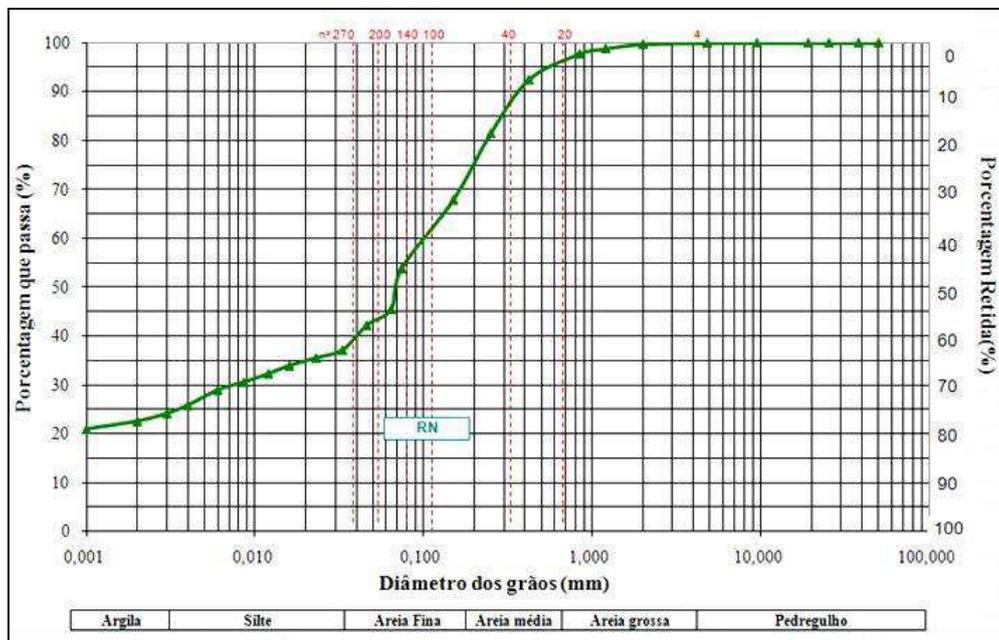
Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Através do ensaio granulométrico pode-se observar que o solo utilizado é formado por uma faixa granulométrica contendo 0,05% de pedregulho, 2,28%

de areia grossa, 16,22% de areia média, 39,25% de areia fina e 42,20% de silte + argila. A granulometria e a estrutura apresentam influência direta sobre o espaço poroso do solo, sua porosidade total e distribuição de poros, dificultando em maior ou menor intensidade o movimento da água (ROCHA & NISHIYAMA, 2012).

A Figura 13 representa a curva granulométrica do solo analisado. A curva granulométrica encontra aplicação rápida principalmente na classificação do solo quanto à textura, na estimativa do coeficiente de permeabilidade e no dimensionamento dos filtros de proteção (TAYLOR, 1948).

Figura 13: Curva granulométrica do solo analisado para camada de base e cobertura.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

A partir dos dados obtidos, observou-se que o solo analisado possui um alto teor de finos (mais de 50%, em peso, passando na peneira 200 – 0,075 mm). Pelo sistema de classificação Unificado de solos para propósito de engenharia (ASTM D – 2487 – 69), baseado nos dados de granulometria, o solo foi classificado como CL, o qual é caracterizado por um solo formado por argilas siltosas inorgânicas de plasticidade baixa a média. E pelo sistema de classificação AASHTO o solo foi classificado como A-4, o qual é caracterizado por um solo do tipo solo siltoso.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados dos ensaios de compactação, em laboratório e em campo (após a conclusão da camada de cobertura).

Tabela 3: Parâmetros de compactação do solo em Laboratório.

Propriedades	Resultados
Massa específica seca máxima	2,01 g/cm ³
Umidade ótima	11,00%

Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Tabela 4: Parâmetros de compactação do solo *in situ*.

Propriedades	Resultados
Massa específica seca máxima	2,00 g/cm ³
Umidade ótima	11,05%

Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Os resultados dos parâmetros de umidade ótima e massa específica seca máxima, obtidos tanto em campo como laboratório, são praticamente iguais, mostrando que as camadas de base e cobertura de solo compactado foram executadas de maneira eficiente.

Quanto a constante de permeabilidade determinada pelo ensaio realizado através do permeâmetro de carga variável vertical foi de $K = 5,97 \times 10^{-6}$ cm/s e alcançou um grau de saturação de $S = 100\%$. Este resultado pode ser considerado satisfatório conferindo ao solo características de baixa permeabilidade o que é importante já que uma camada de base e cobertura de solo compactado deve apresentar características de impermeabilidade. Segundo alguns autores o coeficiente de permeabilidade adequado para utilização de solos como camada de cobertura em aterros deve pertencer à faixa de 10^{-5} a 10^{-9} cm/s (MARIANO et al., 2007; FERREIRA et al., 2006). De acordo com Martins et al. (2002) a permeabilidade do solo é um atributo físico de grande importância para a engenharia, sendo necessária a sua determinação nos trabalhos com movimento d'água no solo.

Vários são os atributos físicos do solo que influenciam os valores do seu coeficiente de permeabilidade, principalmente a granulometria, densidade,

porosidade, macro e microporosidade (MESQUITA & MORAES, 2004). Ela pode ser definida como a maior ou menor facilidade que os solos oferecem à passagem de água (REYNOLDS et al., 1985; GUPTA et al., 1985).

Os ensaios de laboratório, mesmo realizado de forma cuidadosa, representam somente pequenos volumes de solo em pontos individuais de uma grande massa. Portanto, a validade de aplicação dos valores neles obtidos aos problemas de percolação e drenagem dependerá de como possam ser considerados representativos da massa de solo.

5.2. Composição Gravimétrica dos RSU nas células experimentais I e II

A composição gravimétrica é uma ferramenta de suma importância na interpretação do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e expressa, em percentual, a presença de cada componente, em relação ao peso total da amostra de resíduos. O conhecimento dessa composição permite avaliar a capacidade de degradação dos resíduos, o poder de contaminação ambiental, as possibilidades de reutilização e reciclagem, além de fornecer dados sobre a potencialidade dos resíduos na produção de biogás. As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados obtidos das composições gravimétricas nas células experimentais de RSU I e II.

Figura 14: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental I.

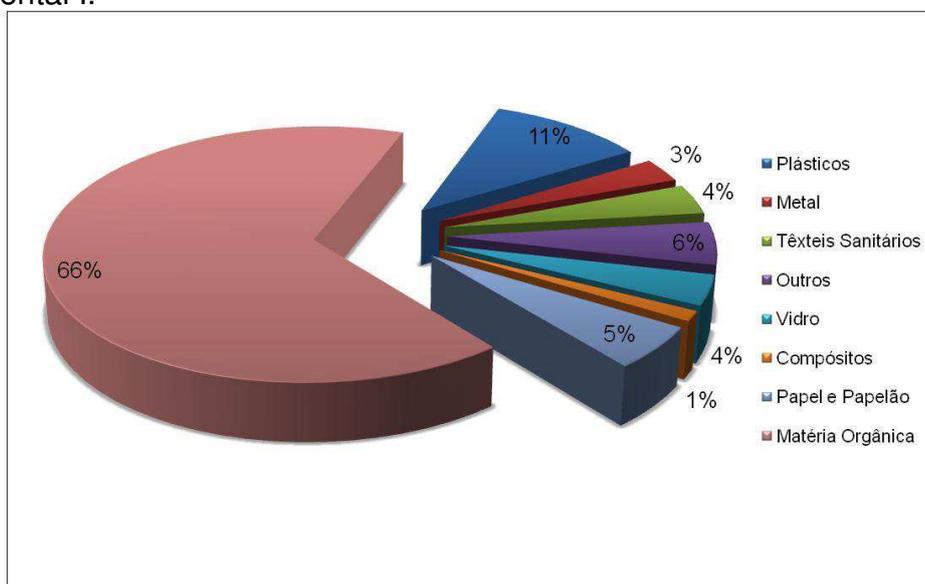
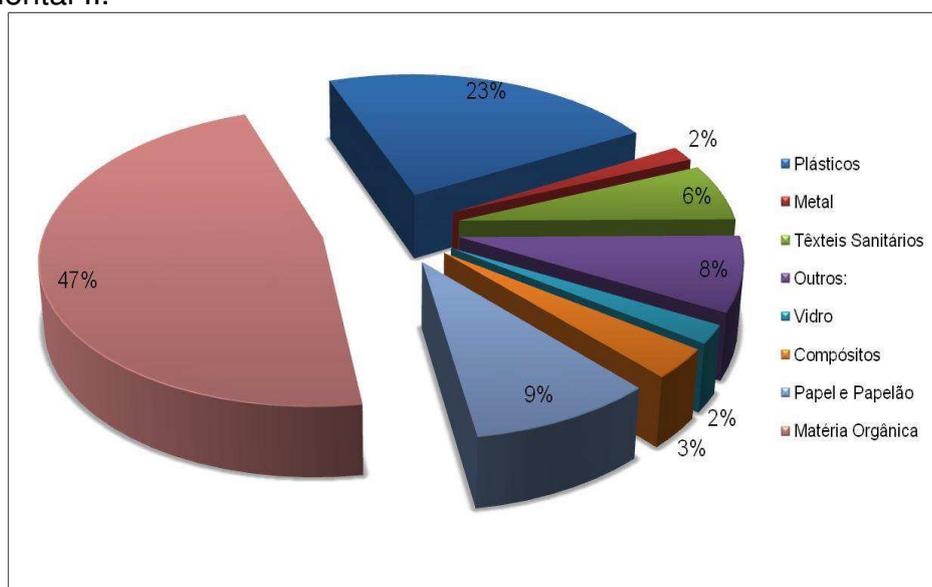


Figura 15: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental II.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Os dados obtidos inferem que a maior parcela dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB é formada por matéria orgânica putrescível, atingindo um valor aproximado de 66% (percentagem em peso) na célula experimental I e 47% (percentagem em peso) na célula experimental II do total dos resíduos coletados na cidade. Percentuais maiores de matéria orgânica podem indicar um menor desenvolvimento econômico da região, pois cidades mais desenvolvidas têm percentuais menores de matéria orgânica (PEREIRA et al., 2010).

No caso da célula experimental II, pode-se observar um aumento considerável da percentagem de plásticos (23%) quando comparado com a célula experimental I, que apresentou apenas 11% de plásticos. Aires (2013) relata que o aumento da quantidade de plásticos, faz sentido, já que se observa um aumento nos percentuais desse material nas grandes cidades nos últimos anos, devido ao acelerado consumo e descarte de plásticos usados principalmente como embalagens, o que está induzindo um acúmulo nos depósitos de resíduos de materiais que podem levar centenas de anos para se degradarem. Rosa et al. (2001) afirmam que a produção anual de plásticos no Brasil é de aproximadamente 3 milhões de toneladas, dos quais 40% vem da indústria de embalagem. Um dos problemas destas embalagens é o descarte rápido em aterros sanitários e por serem produtos de difícil biodegradação. Seu

acúmulo em aterros dificulta a circulação de líquidos e gases, além de atrasar a estabilização da matéria orgânica, causando danos ao ambiente (Mattei & Ecosteguy, 2007).

Estas informações são importantes, pois, podem fornecer de forma mais precisa o comportamento biodegradativo que sugestiona as produções de biogás e lixiviado. Além disso, durante a realização dos ensaios de composição nas duas células experimentais percebeu-se o grande desperdício de material reciclável presente nos resíduos sólidos de Campina Grande. Observou-se que o grande volume de plásticos, papel e papelão que poderia ser reciclado era descartado, provocando o aumento da poluição no solo, no ar e no lençol freático já que estes materiais por serem leves são facilmente espalhados pela ação dos ventos e de difícil degradação pelos microrganismos, como no caso dos plásticos (AL-SALEM, LETTIERI e BAEYENS, 2010; SRIVASTAVA & SRIVASTAVA, 2006).

A grande quantidade de plásticos e papéis encontrada nas diferentes células experimentais pode ser considerada fator prejudicial do ponto de vista operacional para aterros sanitários, uma vez que estes materiais formam um “colchão” na compactação, passando uma falsa impressão de compactação (SIMÕES, 2008).

Uma comparação feita entre diversos países do mundo mostra que os resíduos domiciliares brasileiro possuem uma das taxas mais elevadas de detritos orgânicos em sua composição, sendo caracterizado, portanto, como resíduos que produzem grande quantidade de chorume (MARIANO et al., 2009). Este dado corrobora com os resultados obtidos nas composições gravimétricas nas células experimentais, onde as maiores parcelas encontradas foram de matéria orgânica.

O elevado percentual de matéria orgânica presente nos resíduos de Campina Grande corrobora com dados obtidos por Oliveira (1999) que relatou que a produção de resíduos de um município não varia significativamente em função das estações do ano, mas verificou que onde residem comunidades de baixa renda a produção de matéria orgânica é maior, e nas de poder aquisitivo elevado às proporções de plásticos e papel são maiores. Ela relatou também que a quantidade de matéria orgânica contida nos resíduos sólidos é inversamente proporcional ao desenvolvimento e evolução das cidades, e que

a porcentagem de papel, plástico, metal e vidro aumentou com o passar dos anos, sendo esta a tendência de geração dos RSU pelas comunidades.

De acordo os dados calculados do IPC Maps com base no levantamento do IBGE (2014) o consumo de bens pelos campinenses cresceu 23% em 2012 em relação a 2011. No mesmo período, o país teve crescimento de apenas 9,3%. A economia campinense foi alavancada principalmente pela população de 'classe média alta', que consumiu mais de R\$ 2,14 bilhões em 2012. Este dado é importante, pois pode ter refletido nas mudanças de consumo nos materiais adquiridos pelos campinenses nos últimos anos o que provocou mudanças nas composições gravimétricas entre 2009 e 2011.

A cidade de Campina Grande possui o segundo maior PIB entre as cidades paraibanas, representando 15,63% do total das riquezas produzidas na Paraíba. Uma evidência do desenvolvimento da cidade nos últimos tempos é o ranking da revista Você S/A, no qual Campina Grande aparece como uma das 10 melhores cidades para se trabalhar e fazer carreira do Brasil, única cidade do interior entre as capitais escolhidas no país. A cidade é ainda considerada a cidade mais dinâmica do Nordeste e a 6ª mais dinâmica do Brasil segundo "A Gazeta Mercantil" e foi apontada como uma das 20 metrópoles brasileiras do futuro. Campina Grande tem um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) maior que 97 países no mundo, com valoração 0,720 (no valor máximo até 1). A estatística que mensura a qualidade de vida conciliando aspectos de renda, educação e saúde aponta que o município está à frente de nações como China, Índia, África do Sul, Egito, Colômbia, Paraguai, Bolívia, Marrocos e Camarões. O IDH de Campina Grande é considerado em nível 'alto' pela Organização das Nações Unidas (ONU), crescendo 20% nos números registrados pelo último censo IBGE de 2010, sobre o índice anterior de 0,601 que foi atingido uma década antes.

Os resultados de composição gravimétrica nas células experimentais mostram que a matéria orgânica atingiu um valor aproximado de 66% e os plásticos 11% na célula experimental I e 47% de matéria orgânica e 23% de plásticos na célula experimental II. O alto percentual de matéria orgânica encontrada nas duas células de RSU podem indicar numa maior geração de biogás, o que justificaria a utilização para a matriz energética e tratamento do lixiviado. Pode-se observar também que a elevada composição da matéria

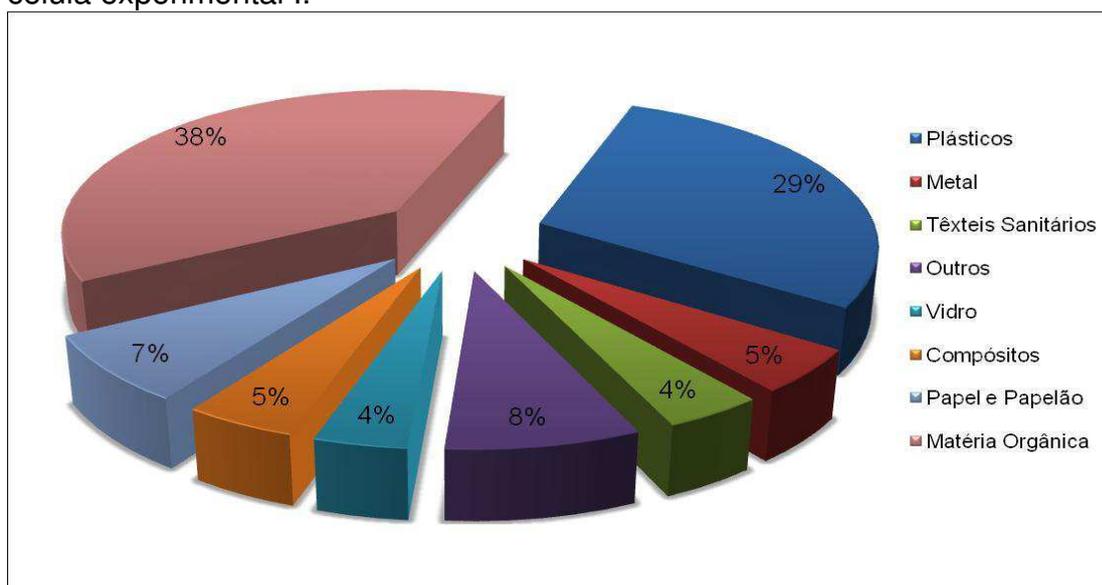
orgânica encontrada nas células experimentais I e II pode favorecer o desenvolvimento de microrganismos, dentre eles, as bactérias aeróbias e fungos totais, responsáveis pela biodegradação dos resíduos sólidos (OLIVEIRA, 1999). A presença de plásticos não foi elevada neste tipo de composição devido as suas baixas massas específicas que contribuem para um menor valor em seu peso.

A cidade de Campina Grande produz em média 240 toneladas por dia de RSU, com taxa de produção *per capita* de aproximadamente 540g. hab⁻¹. dia⁻¹ dos quais 80% apresentam capacidade de reaproveitamento. Contudo a cidade dispõe de poucas alternativas tecnológicas para disposição e reaproveitamento dos resíduos coletados (SOUZA et al., 2007).

5.3. Composições volumétricas solta e compactada dos RSU nas células experimentais I e II

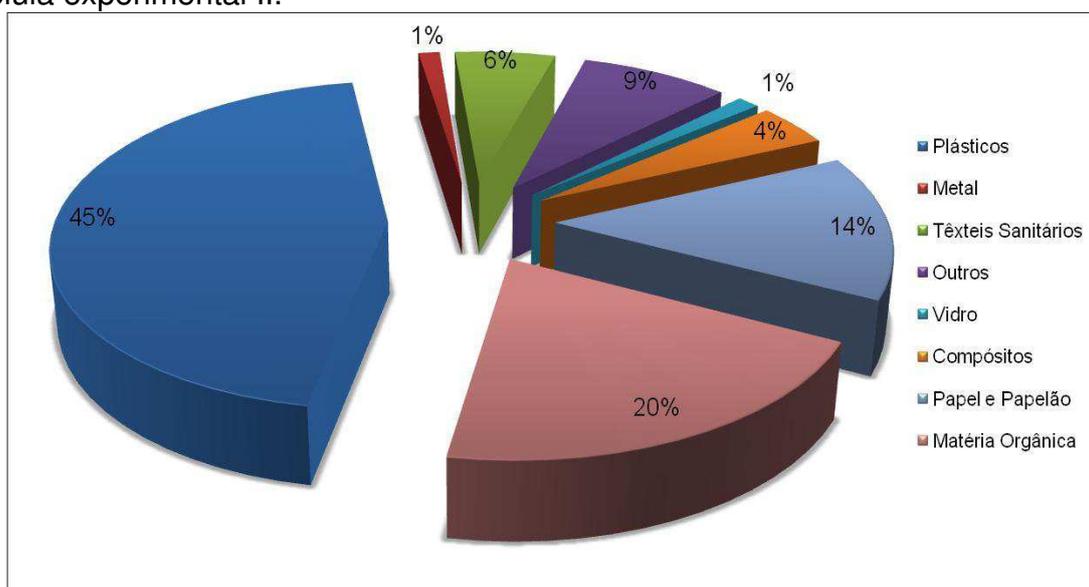
As Figuras 16 e 17 ilustram os resultados obtidos por meio das composições volumétricas dos resíduos sólidos soltos e compactados nas células experimentais I e II.

Figura 16: Composição volumétrica (solto) dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental I.



Fonte: Dados da pesquisa, 2009.

Figura 17: Composição volumétrica (solto) dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental II.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

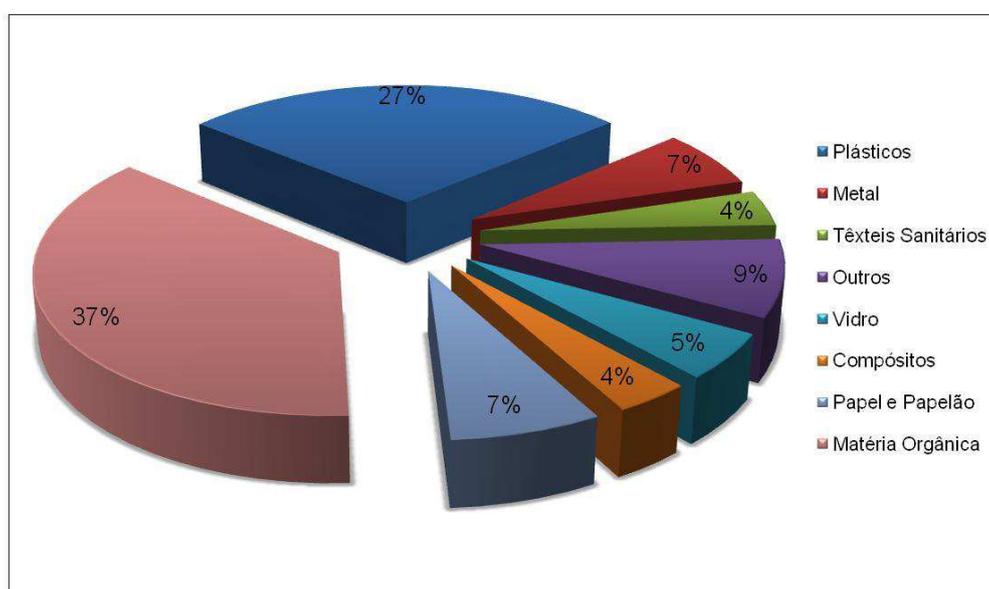
Os resultados obtidos pela composição volumétrica dos resíduos soltos (Figura 16) apresentam que as maiores percentagens dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande são formadas por matéria orgânica putrescível e plásticos, com valores de 38% e 29% na célula experimental I, e com valores de 20% e 45% de matéria orgânica e plásticos na célula experimental II (Figura 17). Lima (2004) reporta que a matéria orgânica contida nos resíduos é maior em países em desenvolvimento e suas características podem variar de uma região para outra. Com relação à quantidade de plásticos presentes nos resíduos sólidos nas duas células, pode ser justificada principalmente, por falta de uma triagem preliminar, falta de políticas públicas que incentivem a coleta seletiva na cidade, além da sensibilização da população. Os plásticos podem formar bolsões (micro-regiões) que podem prejudicar determinada região do aterro ou da célula, além de comprometer o crescimento dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica.

Segundo Catapreta e Simões (2008) nos períodos de chuva a quantidade elevada de plásticos prejudica a operação de compactação, pois dependendo da umidade da massa de resíduos, faz com que as máquinas compactadoras deslizem, não permitindo que estes possam trabalhar em uma inclinação ideal para que se possa atingir uma compactação adequada dos

resíduos. Os plásticos também podem exercer efeitos negativos sobre o sistema de drenagem de líquidos de um aterro sanitário, pois, se a proteção proporcionada a esse sistema não for adequada e o acúmulo de plásticos for elevado pode dificultar o escoamento dos líquidos lixiviados, contribuindo para o aumento do nível desses líquidos em seu interior e, conseqüentemente para a instabilidade da massa de resíduos.

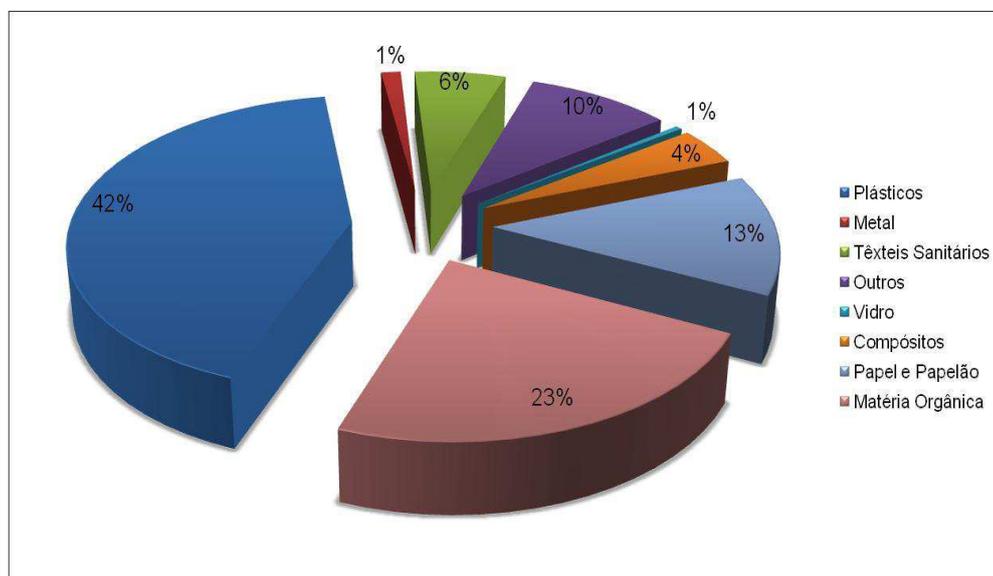
Foi observada uma quantidade significativa de diferentes tipos de plásticos no momento do enchimento da célula experimental. Estes plásticos podem dificultar a biodegradação dos resíduos orgânicos uma vez que, demoram décadas e até centenas de anos para sofrer total degradação, além de criar bolsões impermeáveis impedindo o processo de lixiviação na célula. Pôde-se ainda observar que os plásticos dificultavam a retirada de amostras durante as coletas, mostrando o seu papel de agregação dos demais compostos no interior da célula experimental de resíduos. Hopewell et al. (2009) e WRAP (2010) reportam que devido à imensa variedade de plásticos existentes no mercado e do grande volume descartado, a gestão de resíduos plásticos é complexa, e a destinação escolhida irá depender de diversos fatores, como do tipo de polímero ou do produto descartado, dentre outros.

Figura 18: Composição Volumétrica (Compactado) dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental I.



Fonte: Dados da pesquisa, 2009.

Figura 19: Composição Volumétrica (Compactado) dos resíduos sólidos urbanos na célula experimental II.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

É importante observar que o percentual de plásticos, papéis e papelão tiveram valores significativos. No caso específico de plásticos a percentagem em peso é de apenas 23%, mas em volume representou 45% do total de resíduos da célula experimental II. Na célula experimental I os plásticos representaram 11% em peso e 29% em volume. Pode-se dizer que esses dados são importantes para direcionar a gestão de resíduos da cidade. Evidencia-se através desses dados, que os programas de coleta seletiva e reciclagem não estão sendo eficazes na cidade ou estão ocorrendo de maneira isolada. O mais importante é que a vida útil de um aterro de resíduos sólidos pode ser aumentada se dados como esses forem enviados para os responsáveis pela gestão pública de resíduos sólidos urbanos da cidade (LEITE et al., 2008; PEREIRA, et al. 2010).

Quanto à composição volumétrica dos resíduos compactados nas duas células experimentais, observou-se que a quantidade de plásticos (27% na célula experimental I e 42% na célula experimental II) foram maiores quando comparados com os dados obtidos na composição gravimétrica (11% na célula experimental I e 23% na célula experimental II), mostrando que, apesar de ser

materiais leves, apresentam maiores volumes. De acordo com Leite (2008), percentuais elevados de plásticos muitas vezes estão relacionados à falta de programas de reciclagem na cidade e à falta de sensibilização da população local, fatos estes que poderão levar a uma diminuição do tempo de vida útil de um aterro sanitário local.

Os resultados demonstram que a quantidade de plásticos, papéis e matéria orgânica varia bastante quando o percentual em massa é convertido para volume, indicando que estes materiais podem influenciar no comportamento de um aterro sanitário. Garcez (2009) relatou que os materiais plásticos podem dificultar a compactação dos resíduos e prejudicar a degradação da matéria orgânica criando camadas impermeáveis que afetam as trocas de líquidos e gases gerados no processo de biodegradação dessa matéria quando são lançados em aterros sanitários.

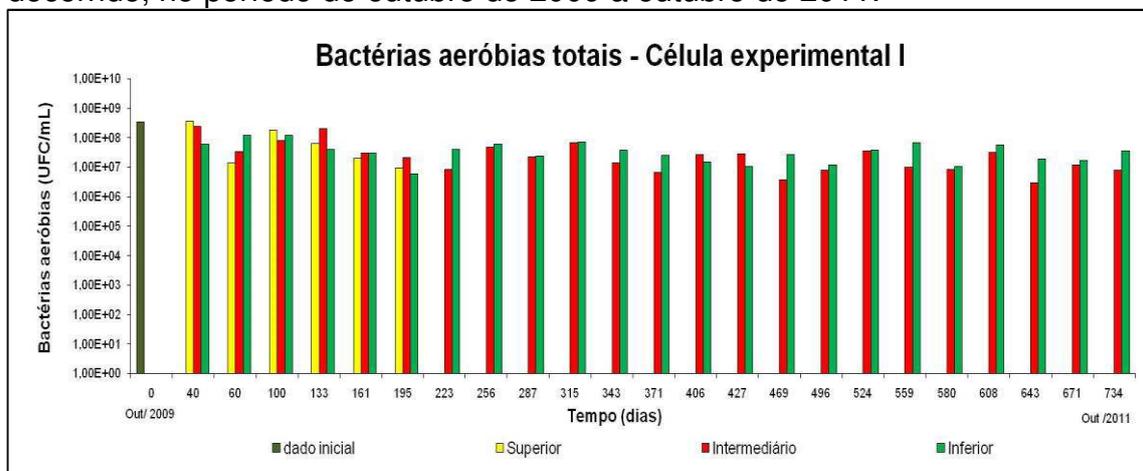
Nas células experimentais I e II estudadas a compactação teve influencia positiva no interior da massa desses resíduos, já que a contagem de microrganismos não variou significativamente nas diferentes camadas.

5.4. Bactérias aeróbias totais nas células experimentais I e II

As Figuras 20 e 21 ilustram os resultados do comportamento das bactérias aeróbias ao longo do tempo de monitoramento nas células experimentais I e II.

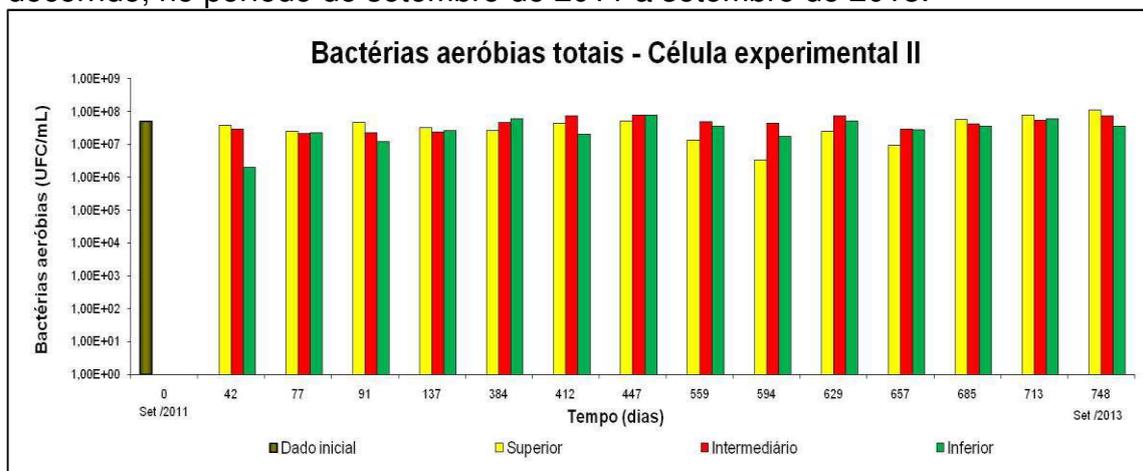
É de extrema importância o estudo do comportamento desses microrganismos em células experimentais, pois, podem indicar a evolução do comportamento biodegradativo, isto é, a fase em que o aterro de resíduos sólidos se encontra.

Figura 20: Comportamento de bactérias aeróbias totais na célula experimental I nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Figura 21: Comportamento de bactérias aeróbias totais na célula experimental I nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.



Fonte: Dados da pesquisa, 2013.

Analisando as Figuras 20 e 21 pode-se observar que não houve variação significativa no comportamento das bactérias aeróbias totais durante todo o processo de monitoramento nas células experimentais I e II.

Durante os primeiros 40 dias de monitoramento das células experimentais, observou-se decaimento, em ordem de grandeza, de 10^8 para 10^7 nos diferentes níveis de profundidade. Esse fato pode estar relacionado à redução da quantidade de matéria orgânica, decorrente da biodegradação,

uma vez que, as bactérias aeróbias dependem de fontes nutricionais para se desenvolverem, e também ao processo de cobertura e compactação dos resíduos que promoveu a redução das concentrações de oxigênio no meio. A presença dessas bactérias está intimamente relacionada com a quantidade de matéria orgânica, pois com a diminuição da matéria orgânica nos resíduos sólidos ocorre a redução deste grupo de bactérias (LEITE, 2008).

A variação discreta dessas bactérias, nas células experimentais, provavelmente ocorreu pelo fato desses microrganismos sofrerem menos influência do meio, uma vez que são menos sensíveis a mudanças ambientais que outros grupos de bactérias a exemplo das anaeróbias. De acordo com Alves (2012), as bactérias aeróbias podem sofrer interferência das condições meteorológicas, como trocas gasosas e energéticas com o meio externo da célula, através dos pontos de coleta e fissuras na camada de solo de cobertura. A umidade do ar, a temperatura ambiente, a infiltração de água, nos períodos chuvosos, que transporta para seu interior oxigênio dissolvido, contribuiu para a pouca variação do comportamento dessas bactérias no período monitorado.

Na camada superior da célula experimental I, a partir dos 223 dias de monitoramento não foi possível realizar as coletas das amostras, impossibilitando a realização das análises de bactérias aeróbias totais, pH, sólidos voláteis e os demais parâmetros físico-químicos, devido ao processo de biodegradação que promoveu o deslocamento vertical da massa de resíduos (recalque), inviabilizando este ponto de coleta.

Nas camadas intermediárias e inferiores das células experimentais I e II foram observadas elevadas quantidades desses grupos de microrganismos. Resultados semelhantes foram obtidos por Leite (2008) e Garcez (2009) que também realizaram estudos em células experimentais de RSU, observando a presença deste grupo de bactérias nos níveis inferiores das células. Fato que pode estar associado ao processo de lixiviação, que permite que nutrientes presentes nos níveis mais superiores das células sejam carregados para as camadas mais inferiores.

Um aspecto importante a ser mencionado foi à presença elevada de macrovetores (principalmente baratas) encontrados durante as coletas, nas células experimentais I e II, tal presença é um indicativo de concentrações de oxigênio do meio que pode estar presente devido à existência de fissuras nas

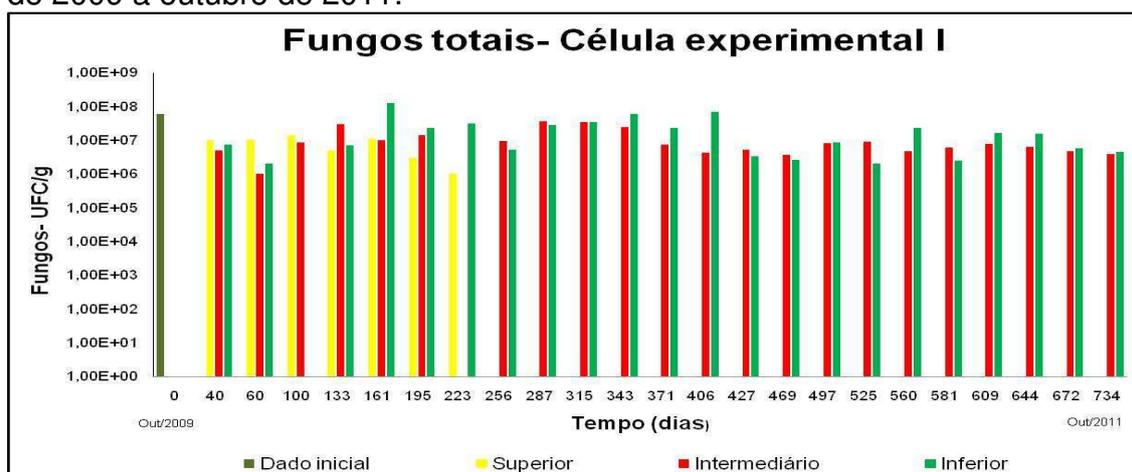
camadas de cobertura e/ou abertura nos pontos de coleta das amostras. De acordo com Garcia et al. (2011) as baratas gostam de lugares quentes e úmidos e muitas das espécies silvestres participam da cadeia alimentar como saprófagos, por se alimentarem de material animal e vegetal em decomposição. A maioria das espécies de baratas é onívora (se alimentam tanto de vegetais como animais), como por exemplo, as existentes em ambientes urbanos (LIVESCIENCE, 2011).

Mendes (2009) relata que os resíduos por conterem substâncias de alto teor de energia, e por oferecer disponibilidade de água, alimento e abrigo torna um dos lugares preferidos por vários tipos de organismos vivos, ao ponto de algumas espécies usufruírem como nicho ecológico, onde se classifica dois grandes grupos que habitam o lixo: os macrovetores, como os ratos, as baratas, as moscas e mesmo animais de maior porte, como cães e aves.

5.5. Fungos totais nas células experimentais I e II

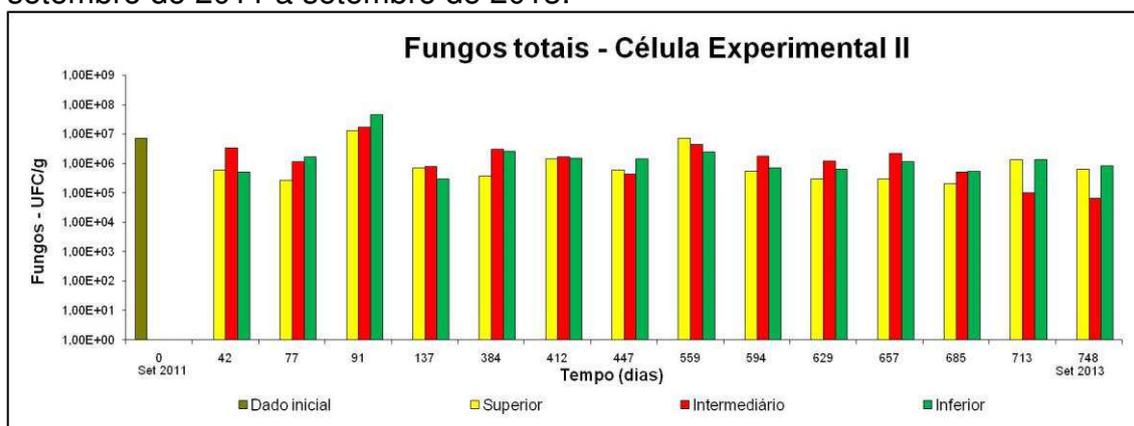
As figuras 22 e 23 mostram o comportamento dos fungos totais com o passar do tempo nas células experimentais I e II.

Figura 22: Comportamento de fungos totais nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Figura 23: Comportamento de fungos totais nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.



Fonte: Dados da pesquisa, 2013.

Pode-se observar que nas duas células experimentais os fungos se encontraram presentes no tempo inicial ($t=0$) numa ordem de grandeza de 10^{-7} a 10^{-8} . Isto já era de se esperar, pois a maioria dos fungos é aeróbia e se desenvolvem em ambientes que apresentam maior disponibilidade de oxigênio e matéria orgânica. De acordo com Leite (2008) os fungos são microrganismos heterotróficos e representam um dos principais grupos de microrganismos decompositores da biosfera, isto é, quebram produtos orgânicos e reciclam carbono, nitrogênio e outros compostos do solo e do ar em produtos com menores pesos moleculares.

Zaidi et al (1999), Putzke e Putzke (2002) e Sarkar et al. (2005) reportam que os fungos como biodegradadores naturais, encontram as substâncias necessárias para o seu desenvolvimento no meio ambiente, principalmente, macromoléculas insolúveis, que precisam ser primeiramente degradadas em unidades monoméricas solúveis antes de sua assimilação (polissacarídeos, proteínas, ácidos nucleicos, lignina, lipídios e outros compostos de grande peso molecular, ou insolúveis, não podem ser incorporados diretamente sem antes terem sido reduzidos). Os fungos absorvem nutrientes através da membrana plasmática, como compostos de baixo peso molecular dissolvidos em água, o que justifica essa necessidade. Para isso, esses microrganismos secretam enzimas específicas para o meio exterior, conseguindo reduzir o tamanho das moléculas e aumentar a sua solubilidade. Assim, essas substâncias passam pela membrana, que tem poder seletivo para moléculas pequenas.

Foi possível observar também que em ambas as células experimentais houve um crescimento satisfatório dos fungos em todas as camadas (superior, intermediária e inferior). Estes microrganismos necessitam basicamente de umidade, calor e fonte de carbono para sobreviver e como as células experimentais em estudo apresentaram valores de umidade (40-60%) e matéria orgânica (em torno ou acima de 50%) houve influência de maneira positiva em seu crescimento. Segundo Meira (2009) o crescimento de fungos também pode ser explicado pelo fato da grande quantidade de matéria orgânica ser a celulose presente na massa de resíduos. Estes compostos são hidrolisados por estes microrganismos que secretam enzimas que irão degradá-los a compostos que poderão ser absorvidos posteriormente.

Observando a célula experimental I aos 195 dias não houve crescimento de fungos na camada intermediária, o que pode ser explicado devido os resíduos apresentarem uma grande heterogeneidade entre as camadas das células o que pode dificultado o desenvolvimento desses microrganismos. A partir dos 223 dias, não foi possível realizar a coleta de resíduos na camada superior devido ao recalque sofrido na célula e a quantidades significativas de sacolas plásticas e solos retirados, o que inviabilizou a coleta nesse ponto e dificultou o desenvolvimento desse grupo de microrganismos nessa camada.

Na célula experimental II pode-se observar um ligeiro decréscimo na quantificação dos fungos em relação à célula experimental I, fato que pode ser explicado devido às diferenças nas quantidades de matéria orgânica encontradas nas células experimentais (66% na célula experimental I e 47% na célula experimental II) que pode ter influenciado no comportamento desses microrganismos.

Durante o período de monitoramento, observou-se a predominância desses microrganismos em todas as camadas estudadas. Este fato pode ser explicado pela pequena dimensão das células experimentais (célula I com 9 m³ e célula II com 11 m³ de resíduos) o que favorece um meio mais homogêneo em relação às propriedades físico-químicas e também devido aos fungos passarem por um período de sucessão, ou seja, embora tenha encontrado fungos em todas as camadas das células durante todo o período monitorado, não indica que estes fungos são das mesmas espécies (HANG et al., 2001; ARAÚJO, 2010). Os fungos por serem microrganismos esporógenos, a sua

presença ao longo do processo de degradação de resíduos sólidos em aterros sanitários, sugere que eles possam permanecer por muito tempo, no ambiente desse aterro, mesmo após a estabilização da matéria orgânica, segundo Alcântara (2007).

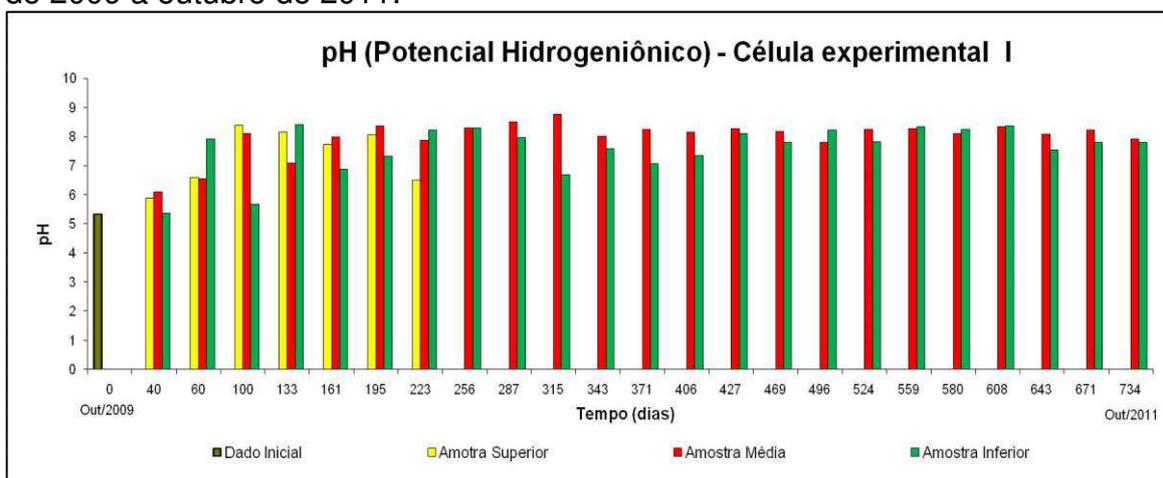
Sabe-se que os fungos são degradadores em potencial e apresentam boas respostas às condições de estresse, como sobrevivência em meios com baixos valores de pH e pobres em nutrientes. Os fungos estão presentes em qualquer sistema contaminado e podem utilizar até compostos recalcitrantes existentes no petróleo como fonte de energia. Quando comparados com as bactérias e as leveduras, os fungos apresentam uma capacidade maior de adaptação em meios com baixa atividade de água, tornando-se os microrganismos mais promissores em condições de baixa umidade relativa e conseguem sobreviver em sistemas inóspitos, geralmente características de ambientes contaminados (SARKAR et al., 2005).

5.6. Potencial hidrogeniônico nas células experimentais I e II

O pH indica as condições ácidas e básicas do meio, e nos resíduos está relacionado com as fases de degradação da matéria orgânica nos sistemas aeróbios e anaeróbios (GARCEZ, 2009). Este parâmetro tem importância fundamental na digestão dos resíduos, pois suas variações podem diminuir ou acelerar os processos de biodegradação dos resíduos pelos microrganismos.

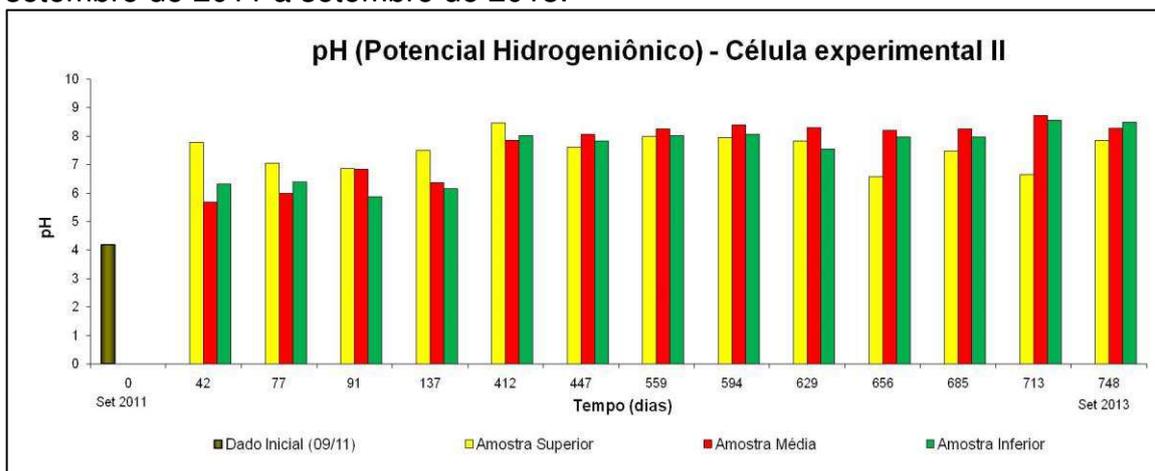
As Figuras 24 e 25 apresentam as variações do pH ao longo do tempo e das camadas superior, intermediária e inferior dos resíduos.

Figura 24: Potencial hidrogeniônico (pH) nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Figura 25: Potencial hidrogeniônico (pH) nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.



Fonte: Dados da pesquisa, 2013.

O comportamento do pH no interior da massa dos resíduos está diretamente relacionado aos produtos formados a partir das várias fases de degradação da matéria orgânica no processo biodegradativo. Analisando as Figuras 24 e 25, pode-se observar que o pH inicial ($t=0$) foi de 5,5 na célula experimental I e de 4,1 na célula experimental II, esses valores de pH baixos ocorrem em decorrência da ação das bactérias acidogênicas, as quais liberam rapidamente concentrações de ácido láctico, amônia e ácidos graxos voláteis, estes em maior quantidade, o que confere ao meio pH abaixo da neutralidade (CASTILHOS JR, 2003). De acordo com a literatura técnica esse

não é um valor comumente encontrado para resíduos frescos, pois segundo Alcântara (2007) o valor 6,0 estaria dentro dos padrões normais devido a maior fração dos resíduos ser composta de matéria orgânica. O valor inicial ácido pode ter sido decorrente do acúmulo de ácidos orgânicos em quantidade suficiente para alterar o pH, devido à fermentação inicial dos RSU que ocorre durante o tempo decorrido de disposição dos resíduos nas lixeiras, a coleta e o transporte até a disposição final. Após o aterramento dos resíduos, normalmente ocorre a fase de adaptação dos microrganismos, podendo ocorrer oscilações no pH. No caso dos primeiros dias de monitoramento o pH do meio manteve-se na faixa ácida com um leve aumento após 40 dias na célula experimental I e 42 dias na célula experimental II sendo este comportamento típico de aterros de resíduos sólidos urbanos com características semelhantes.

Na fase inicial do processo de degradação, o pH é normalmente mais baixo devido à produção de ácidos pelas bactérias participantes deste processo, mas ao longo do tempo esses ácidos tendem a ser consumidos por outros grupos de bactérias, as arqueas metanogênicas, nesta fase o pH sofre um aumento gradativo (MEIRA, 2009).

No atual estágio de monitoramento na célula experimental I o pH encontra-se na fase básica. Pode-se observar que entre os 42 e 734 dias houve um acréscimo em todas as profundidades, chegando próximo a 8. As leituras de pH subsequentes ficaram sempre próximas a 8 apesar das oscilações nas medidas, o que pode ser normal em se tratando de resíduos sólidos que são bastante heterogêneos. Estes altos valores encontrados nas duas células experimentais monitoradas indicam, possivelmente, que a célula experimental passou da fase de hidrólise para as fases posteriores de degradação da matéria orgânica, sendo que essas fases não são claramente perceptíveis.

As leituras, a partir de 60 dias na célula experimental I e 42 dias na célula experimental II, apresentaram um aumento nos valores de pH ficando próximos ou superiores a 7,0. Isso pode ser devido ao rápido metabolismo das bactérias aeróbias, consumindo assim materiais facilmente degradados por este grupo. Até os 60 dias de aterramento na célula experimental I e 91 dias na célula experimental II, as fases de degradação provavelmente, passaram da fase de hidrólise para as fases acidogênia/acetogênica. Não se pode afirmar

em que fase ocorreu a acidogênese e a acetogênese, pois estas fases não estão visivelmente perceptíveis nem tão bem definidas.

Apesar das pequenas oscilações nos valores de pH, o que pode ser normal por se tratar de resíduos bastante heterogêneos, observou-se que a partir dos 133 dias na célula experimental I e 137 dias na célula experimental II todas as camadas de profundidade apresentam valores em torno de 8 chegando a valores próximo a 9. Estes valores de pH nas duas células monitoradas já se aproximam de valores acima da neutralidade que corresponde a fase de adaptação metanogênica, na qual, segundo Tchobanoglous et al. (1993) os valores de pH para esta fase corresponde a uma faixa de 6,8 a 8,0. Através desses dados pode-se dizer que a biodegradação dos resíduos sólidos urbanos depositados nas células experimentais se desenvolveram de maneira satisfatória e que a matéria orgânica encontra-se em estágio avançado de degradação, podendo está na fase metanogênica (RIBEIRO, 2012).

Estes dados corroboram com estudos realizados por Alcântara (2007) em que mostram valores iniciais de pH em aterros sanitários em torno de 5 e este permanece até os primeiros meses de deposição dos resíduos. Decorridos alguns anos de aterramento o pH sobe continuamente até chegar a fase metanogênica com pH em torno de 8,0.

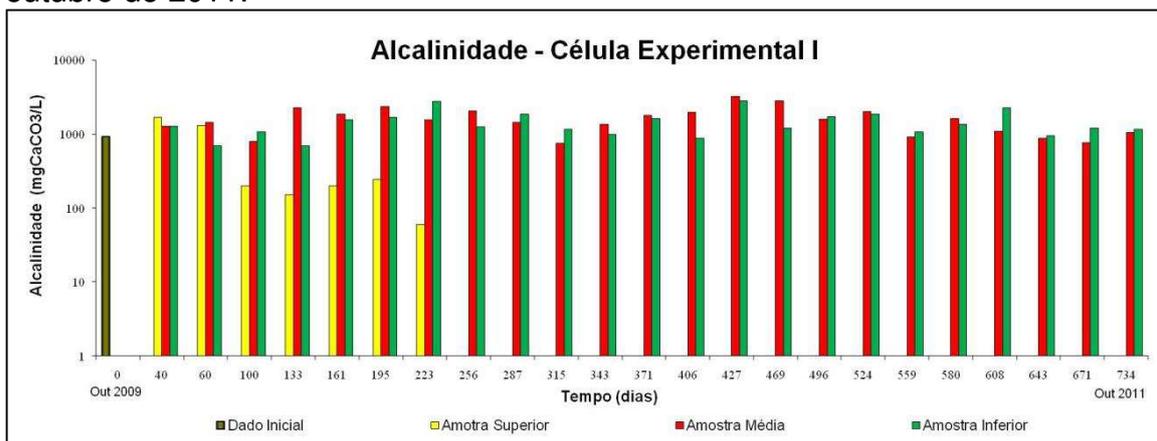
Segundo Chernicharo (1997), o efeito do pH pode se manifestar de forma direta sobre a atividade enzimática ou, ainda, afetar indiretamente a toxicidade do meio.

Melo (2011) em seus estudos realizados na célula experimental I monitorada na cidade de Campina Grande-PB afirma que as fases de degradação ocorreram de maneira mais rápida se comparadas a aterros em escala real, provavelmente pela área de superfície ser bem maior que o volume dos resíduos depositados em aterros sanitários, o que facilitou as trocas de calor e energia com o ambiente, aumentando desta forma o metabolismo pelos diferentes grupos de microrganismos.

5.7. Alcalinidade nas células experimentais I e II

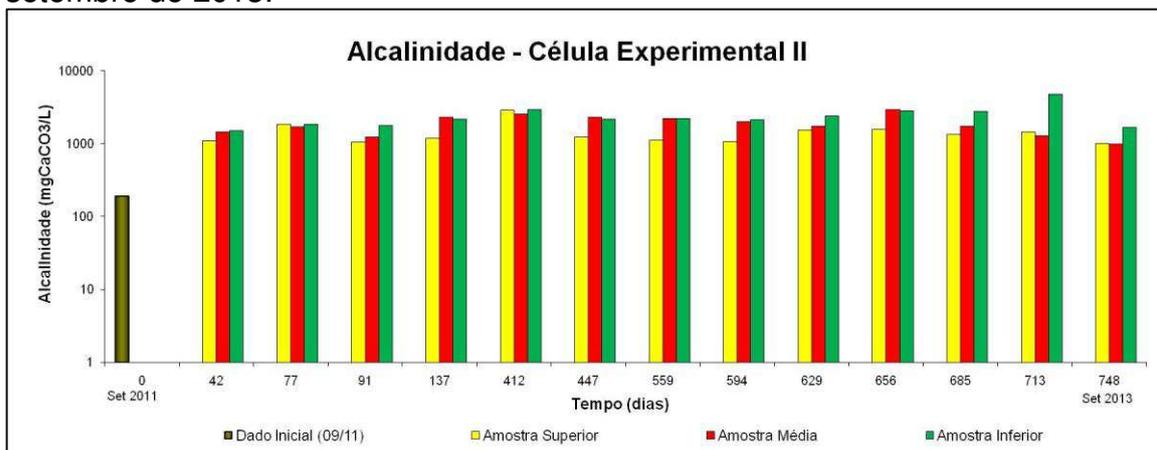
As figuras 26 e 27 ilustram os valores de alcalinidade nas duas células experimentais.

Figura 26: Alcalinidade nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Figura 27: Alcalinidade nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.



Fonte: Dados da pesquisa, 2013.

Conforme mostrado nas Figuras 26 e 27 nas células experimentais I e II, pode-se observar variações bastante significativas nos resultados de alcalinidade obtidos no período inicial ($t=0$) do monitoramento, com 920 mgCaCO_3/L na célula I e 190 mgCaCO_3/L na célula II. Estes resultados podem

ser justificados pela variação encontrada nos dados de pH nas células (célula experimental I teve um pH em torno de 6,0 e célula experimental II com um pH em torno de 4,0). Após os 40 dias de monitoramento nas duas células, percebe-se elevadas variações de alcalinidade atingindo valores superiores a 1000 mgCaCO₃/L. Comparando os dias iniciais de monitoramento nas três camadas das células experimentais com os valores de pH (Figuras 24 e 25), observou-se que houve uma elevação dos valores de alcalinidade, principalmente na célula experimental II que era ácido e chegou à neutralidade. Esses dados de acordo com Leite (2008) podem ser justificados pelo consumo dos ácidos voláteis simples produzidos na fase anterior (acetogênica).

Estudos realizados por Metcalf & Eddy (1991) e Silva (2007) em reatores anaeróbios, referem-se a valores para alcalinidade total entre 1.000 mgCaCO₃/L a 1.500 mgCaCO₃/L como desejáveis, pois esse intervalo é considerado adequado para os diferentes grupos de microrganismos envolvidos no processo de biodegradação. Outros estudos realizados por Barlaz et al (1989) também em reatores anaeróbios, reportam que para o processo de biodegradação em resíduos sólidos urbanos concentrações de alcalinidade variando de 6.900 mgCaCO₃/L a 8.000 mgCaCO₃/L não provocaram inibição nesse sistema.

Pode-se observar que na camada superior da célula experimental I os valores de alcalinidade decaíram significativamente com o tempo de monitoramento devido a quantidade de solo e plásticos retirados nesse ponto, o que inviabilizou a coleta de amostras após os 223 dias. Nas camadas intermediárias e inferiores nas células experimentais I e II, a alcalinidade apresentou valores acima de 1.000 mgCaCO₃/L e que segundo Garcez (2009) reporta que no processo de digestão anaeróbia os elementos alcalinos e alcalinos-terrosos controlam a acidez particularmente na fase metanogênica, atuando como estimuladores do processo e nessa fase há uma tendência de alcalinização do meio onde os valores podem atingir até 14.000 mgCaCO₃/L.

Após os 100 dias de monitoramento nas células experimentais I e II, observou-se que a alcalinidade aumentou em todas as camadas, e que segundo Chernicharo (2007) está tendência de aumento da alcalinidade ocorre devido à degradação de certos compostos orgânicos como a conversão de

ácidos graxos voláteis, proteínas e aminoácidos que resultam no incremento de alcalinidade na massa de resíduos.

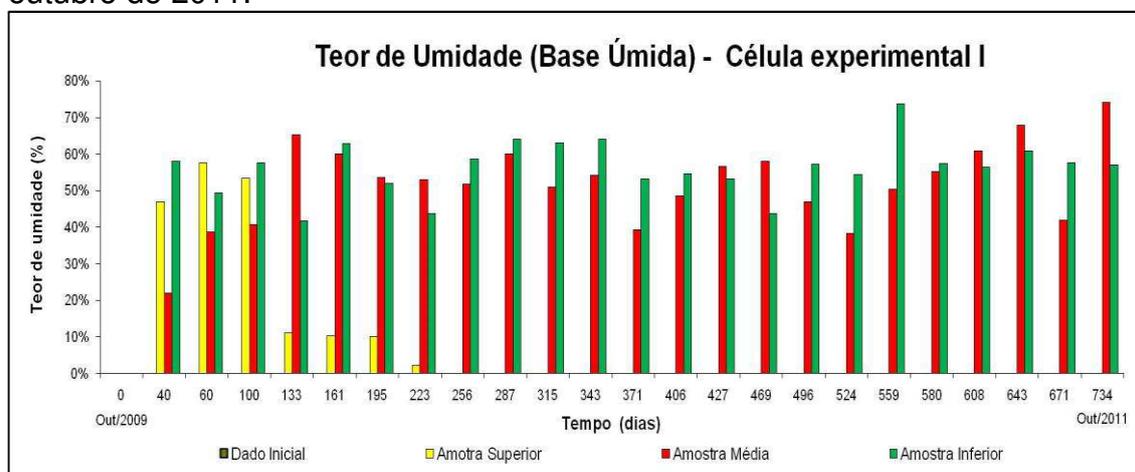
A faixa média de variação para alcalinidade em aterros de até dois anos de monitoramento pode variar de 1.000 mgCaCO₃/L a 10.000 mgCaCO₃/L. Segundo Hamada (2008), sendo mais típicos valores próximos a 3.000 mgCaCO₃/L. Pode-se verificar que os valores de alcalinidade encontrados nas células experimentais estão dentro da faixa de variação de acordo com vários resultados citados na literatura em relação a estudos em aterros sanitários.

Comparando os dados obtidos nas células experimentais I e II com os teores de umidade (Figuras 28 e 29), pode-se verificar que o decaimento dos valores de alcalinidade ocorreu no período de elevados valores nos teores de umidade durante o período de monitoramento das células. Essa diminuição nos valores de alcalinidade nesse período pode ter ocorrido devido à interferência do teor de umidade e das condições climáticas, uma vez que com incidência de chuvas, provocou o processo de lixiviação, aumentando a concentração de ácidos nos resíduos e conseqüentemente promoveu a redução na concentração da alcalinidade.

5.8. Teor de umidade nas células experimentais I e II

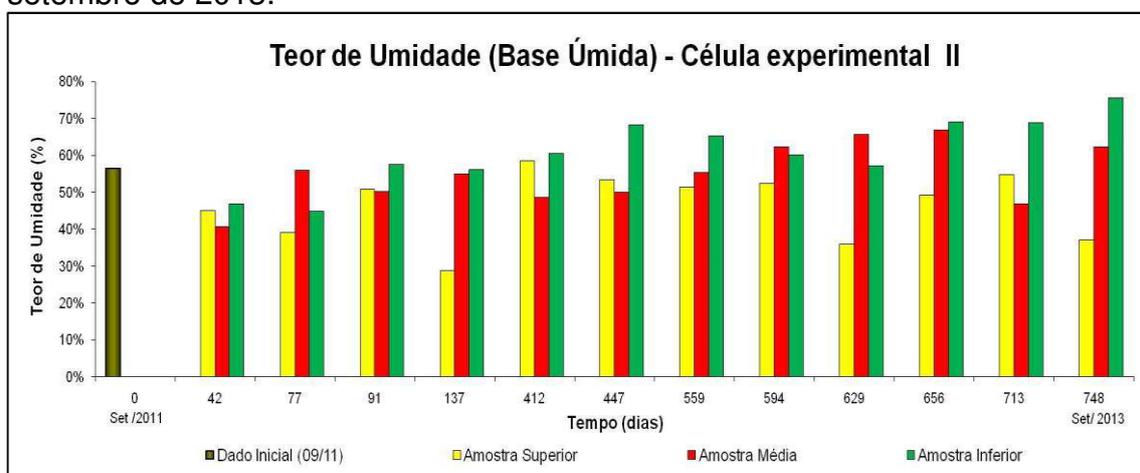
As figuras 28 e 29 ilustram os teores de umidade nas células experimentais I e II.

Figura 28: Teor de umidade nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Figura 29: Teor de umidade nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.



Fonte: Dados da pesquisa, 2013.

Os teores de umidade encontrados nas células experimentais I e II (Figuras 28 e 29) nas diferentes camadas e no decorrer do tempo, praticamente, não variaram, com exceção da camada superior na célula experimental I que devido ao contato direto com o ar atmosférico houve a troca de umidade, calor e energia com o meio externo, além do recalque sofrido e da quantidade elevada de solo e de plásticos que foram retirados dessa camada. Na célula experimental II também se observou que as camadas superiores sofreram mais oscilações que as demais camadas, por estar em contato direto com a camada de cobertura, provavelmente ocorrendo troca de umidade, calor e energia com ar atmosférico, o que pode favorecer a redução do teor de umidade. Outro fator que pode contribuir para essas oscilações é que existe uma tendência dos líquidos lixiviados se acumularem na parte inferior da célula de RSU e por isso pode-se esperar maiores valores dos teores de umidade nessas camadas (RIBEIRO, 2012).

Quanto as camadas intermediárias e inferiores observadas nas células experimentais I e II apresentaram pequenas oscilações ao longo do tempo de monitoramento, o que pode ser explicado em função das variações nas proporções que os materiais podem apresentar-se com maior ou menor capacidade de retenção de líquidos, principalmente a matéria orgânica que apesar de apresentar elevada capacidade de retenção de umidade esta não

absorve, mas provavelmente a transmite àqueles resíduos que têm maior capacidade de retenção de umidade quando dispostos conjuntamente em um aterro sanitário (CATAPRETA, 2008).

A umidade inicial na célula experimental I não foi calculada por problemas operacionais e ajustes de metodologias durante a fase de caracterização dos resíduos. Nas camadas superiores e intermediárias este teor esteve acima de 40% nas células experimentais I e II. Estes dados segundo Quezado (2010) influenciam principalmente nos processos de tratamento e destinação dos resíduos. O teor de umidade pode variar em função das estações do ano e da incidência de chuvas como também pelas diferentes condições climáticas que variam de um lugar para outro, além da heterogeneidade dos resíduos.

As Figuras 28 e 29 apresentam os teores de umidade encontrados na célula experimental ao longo dos 734 dias de monitoramento na célula experimental I e 748 na célula II. Em geral, pode-se observar que os maiores teores de umidade estão relacionados aos altos teores de sólidos voláteis (Figuras 29 e 30). Observou-se que não houve oscilações significativas deste parâmetro, onde seus teores variaram entre 40 a aproximadamente 80% nas duas células monitoradas.

Valores elevados de umidade, nas células experimentais, podem estar relacionados ao elevado teor de matéria orgânica encontrado nas composições gravimétricas dos resíduos. Segundo Monteiro (2003), a matéria orgânica contém uma quantidade de água que fornece nutrientes requeridos pelos microrganismos, além de possibilitar sua rápida propagação no meio sólido, como também possibilitar o transporte de enzimas e de outros metabólitos importantes no processo de decomposição dos resíduos.

A presença de água na célula além de estar associada ao elevado teor de matéria orgânica, também pode ser ocasionada pelos subprodutos da biodegradação dos resíduos, bem como a entrada de águas de chuva por caminhos preferenciais na célula experimental, segundo Melo (2011).

Os valores de umidade encontrados nas células experimentais I e II são propícios ao desenvolvimento de microrganismos biodegradadores da matéria orgânica já que estes se encontram na faixa entre 40 e 70%, que segundo Lima (2004) indica que o valor médio do teor de umidade dos resíduos

domiciliar no Brasil é da ordem de 60%. A camada superior foi uma exceção a estes resultados devido à inviabilização deste ponto de coleta após os 223 dias, por apresentar grande quantidade de solo o que dificultou o procedimento. O alto valor de umidade inicial encontrado nesta camada pode estar associado à intensa troca de calor com o meio externo.

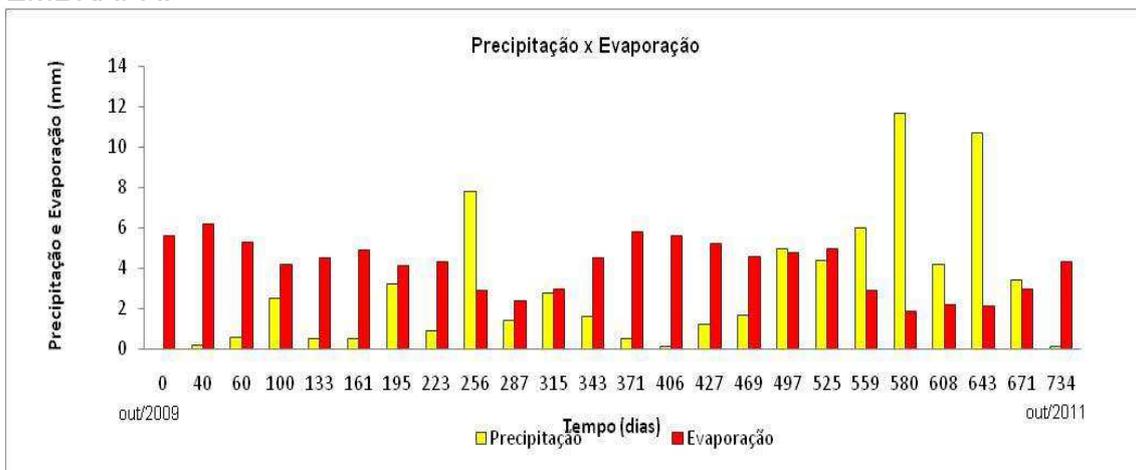
Os altos valores de teor de umidade podem ser observados através das composições gravimétricas (Figuras 14 e 15) em que apresentaram quantidades significativas de matéria orgânica (66% na célula experimental I e 47% na célula experimental II), o que favoreceu provavelmente a um elevado teor de umidade dos resíduos. A matéria orgânica contém uma quantidade de água que solubiliza nutrientes requeridos pelos microrganismos em suas atividades além de possibilitar o transporte de enzimas e de outros metabolitos importantes no processo de decomposição.

Embora a presença de água na célula experimental tenha sido associada aos subprodutos da biodegradação, não foi possível detectar a presença de lixiviado nas células experimentais I e II, podendo estar relacionado a problemas operacionais como infiltração e retenção de líquidos nas camadas superiores pela formação de espaços vazios (bolsões) e principalmente porque existe um déficit hídrico e altas taxas de evaporação na cidade de Campina Grande-PB na maior parte dos meses do ano (MELO, 2011).

5.9. Precipitação e Evaporação da cidade de Campina Grande/PB

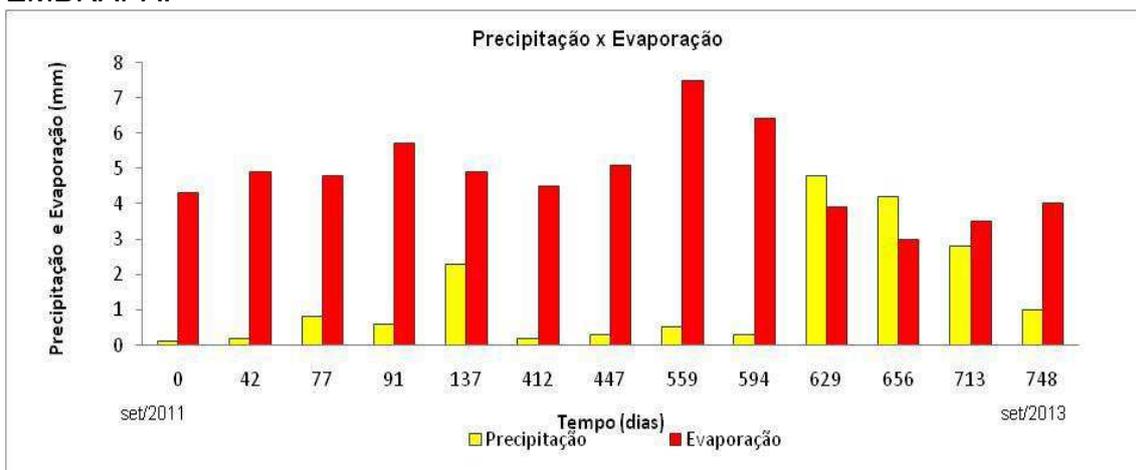
As figuras 30 e 31 ilustram os índices de precipitação e de evaporação na cidade de Campina Grande-PB nos períodos de 2009 a 2013.

Figura 30: Precipitação x Evaporação em Campina Grande-PB, no período de outubro 2009 a outubro de 2011, cujos dados foram fornecidos pela EMBRAPA.



Fonte: EMBRAPA, 2011.

Figura 31: Precipitação x Evaporação em Campina Grande-PB, no período de setembro 2011 a setembro de 2013, cujos dados foram fornecidos pela EMBRAPA.



Fonte: EMBRAPA, 2013.

Pode-se observar nos gráficos 30 e 31 que boa parte dos meses do ano em Campina Grande apresentou índices de evaporação bem maiores que os índices de precipitação, demonstrando que ocorre um déficit hídrico na cidade, pois quanto menor a capacidade de água disponível maior a deficiência hídrica da região. A cidade de Campina Grande apresenta um clima semiárido, definida pelo Ministério da Integração Nacional em 2005. Esta delimitação tem como um dos critérios o índice pluviométrico dessa região. Estes dados corroboram com os apresentados por Tavares (2003) e Rodriguez (2002) que relatam que o baixo índice de chuvas na região e uma maior taxa de

evaporação de água durante quase todo o ano, formam o chamado déficit hídrico e designa uma situação na qual as precipitações exibem valores inferiores aos da evapotranspiração das plantas. A baixa precipitação foi um dos motivos pelo qual a produção de lixiviado não foi suficiente para ser coletado pelos sistemas de drenagens das células experimentais I e II, mesmo que o teor de matéria orgânica seja alto e que a umidade do ar influencie os resíduos na fonte.

No período de monitoramento das células experimentais I e II, observaram-se baixos valores de precipitações no início do monitoramento até os 223 dias (mês de maio) e logo após esse período, as maiores tendências de elevação são registradas até o mês de junho (256 dias) na célula experimental I e altos valores de precipitação entre os dias 629 a 656 (meses de junho e julho) na célula experimental II, sendo estes dados já esperados, pois os períodos de chuvas na cidade de Campina Grande são previstos para esta época do ano. A região onde está localizada a cidade de Campina Grande apresenta baixo índice de precipitação no estado da Paraíba, com valores médios anuais de 760 mm (GALVÍNCIO & RIBEIRO, 2005).

Os enchimentos das células experimentais I e II ocorreram em épocas de primavera/verão (setembro/outubro), onde o baixo índice de precipitação (700 mm/ano) e elevado índice de evaporação na cidade de Campina Grande, contribuíram para não formar líquidos lixiviados dos quais não foram coletados através dos piezômetros instalados nas células experimentais. Sendo assim, nenhuma variação na medição do nível de líquidos foi verificada durante o período de monitoramento destas células.

Os dados obtidos corroboram com os resultados apresentados por Meira (2009) que relatou que embora, ocorra em aterros/lixões à formação de líquidos através do metabolismo microbiano, as condições climáticas são fatores que contribuem para a geração de lixiviados e, visto que na cidade de Campina Grande existe um déficit hídrico, provavelmente, o índice de evapotranspiração seja maior que o índice de precipitação anual, o que contribuiu para a ausência de lixiviado no interior da célula experimental monitorada.

Os dados de precipitação são importantes, pois podem influenciar diretamente na biodegradação nas células experimentais, uma vez que pode

ocorrer infiltração nas camadas de coberturas das células experimentais favorecendo desta forma a entrada de água pluvial por caminhos preferenciais e o desenvolvimento microbiano. A presença de oxigênio dissolvido (água) pelas precipitações ou pela umidade do ar devido às fissuras nas camadas de coberturas ou nos pontos de coletas nas células experimentais, também pode favorecer ao desenvolvimento microbiano, bem como a uma redução da matéria orgânica.

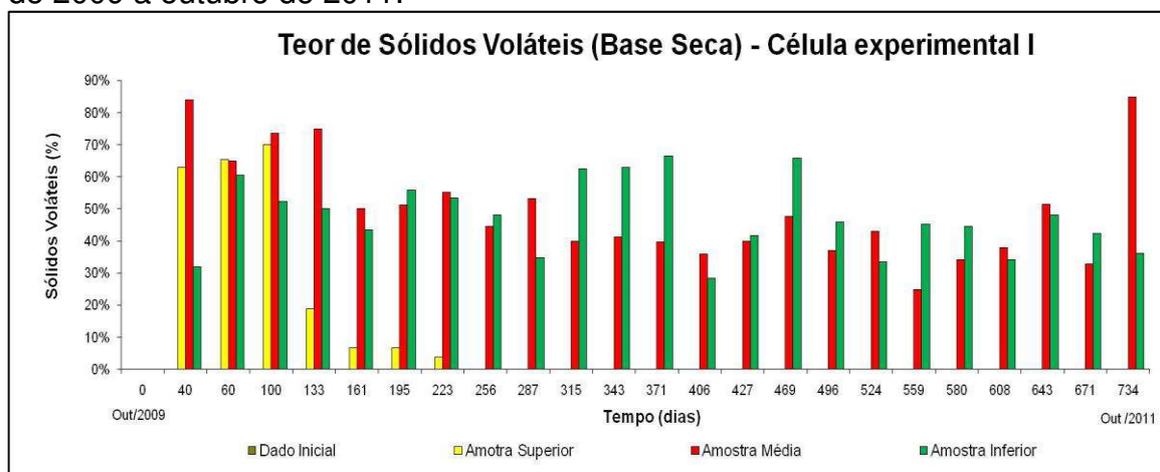
Embora nos períodos de seca a incidência de águas pluviais seja menor em Campina Grande, as concentrações nos parâmetros analisados como teor de umidade, sólidos voláteis, desenvolvimento microbiano permaneceram relativamente elevadas se comparadas nos períodos chuvosos. Este fato pode estar relacionado, principalmente, ao carreamento vertical dos contaminantes.

5.10. Teor de sólidos voláteis

O teor de sólidos voláteis determina de forma indireta a quantidade de matéria orgânica a ser degradado nos resíduos sólidos, o que indica que quanto maior for o teor de sólidos voláteis maior é a quantidade de matéria orgânica a ser degradada.

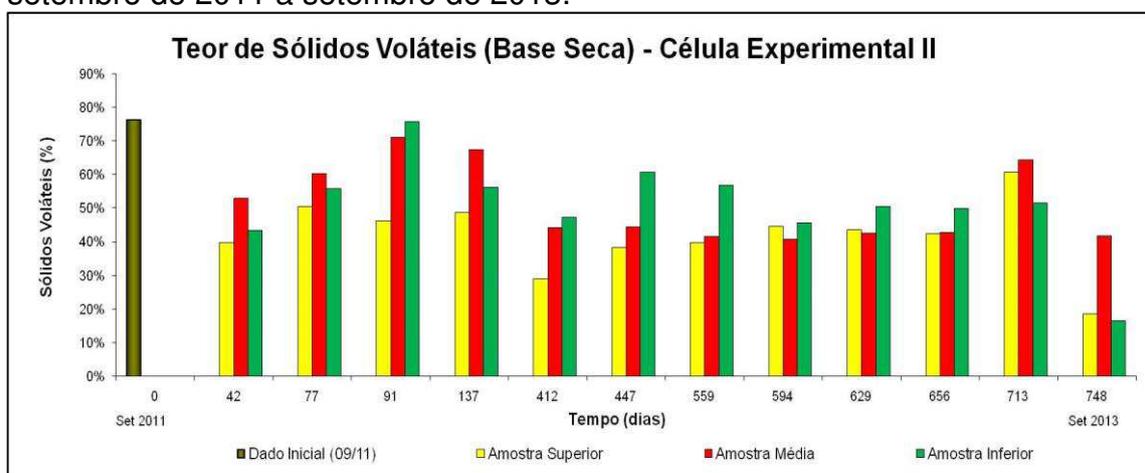
As figuras 32 e 33 ilustram os teores de sólidos voláteis nas duas células monitoradas.

Figura 32: Teor de sólidos voláteis nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Figura 33: Teor de sólidos voláteis nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.



Fonte: Dados da pesquisa, 2013.

As Figuras 32 e 33 das células experimentais I e II ilustram que os valores de sólidos voláteis decaíram significativamente ao longo do tempo principalmente na camada superior da célula experimental I que correspondeu a parcelas maiores de 95%. Este alto valor pode estar relacionado com a presença de grande quantidade de solo e pouca matéria orgânica coletada principalmente nos últimos dias de monitoramento desta camada. Enquanto que nas camadas intermediária e inferior houve uma diminuição de cerca de 60%.

O dado inicial ($t=0$) para este parâmetro na célula experimental I não pode ser calculado, em decorrência de problemas operacionais e ajustes de metodologias.

Observou-se elevados índices de sólidos voláteis na fase inicial de monitoramento das células, o que pode estar associado a grande quantidade de matéria orgânica disponível. O elevado teor de sólidos voláteis confirma a fase inicial de decomposição dos resíduos e aponta para uma grande quantidade de matéria orgânica a ser degradada e que ao longo do tempo o teor destes sólidos tende a reduzir (ALCÂNTARA, 2007).

Pode-se observar nas Figuras 32 e 33 que existem uma variabilidade no teor de sólidos voláteis, que pode ter ocorrido em função da grande heterogeneidade dos resíduos, fato que dificulta a obtenção de uma amostra mais representativa, principalmente, no caso das células experimentais, em

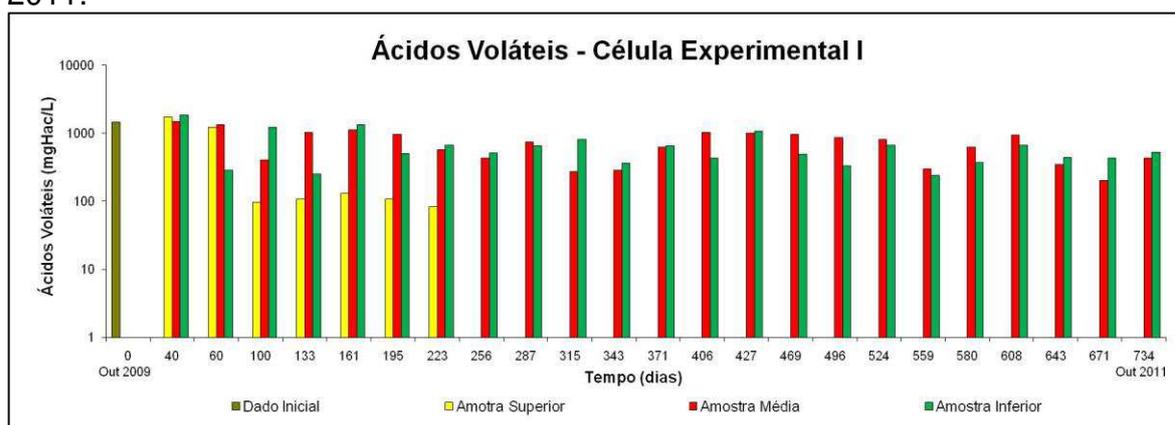
que as amostras coletadas eram relativamente pequenas. Segundo Alcântara (2007) em seu trabalho com células experimentais diz que mesmo que o teor de sólidos voláteis tenha diminuído ao longo do tempo de monitoramento, estes sólidos apresentam grande variabilidade.

De acordo com Garcez (2009) os teores de sólidos voláteis e de matéria orgânica podem indicar a degradabilidade dos resíduos sólidos urbanos ao longo do tempo, pois um alto percentual de matéria orgânica indica a presença de matéria a ser degradada e baixos valores indicam que o resíduo já passou por um processo de degradação. Pode-se observar nas células experimentais I e II que houve um decréscimo nos valores percentuais dos teores de sólidos voláteis durante o período de monitoramento, o que pode indicar que a degradação dos RSU está ocorrendo de maneira satisfatória.

5.11. Ácidos voláteis nas células experimentais I e II

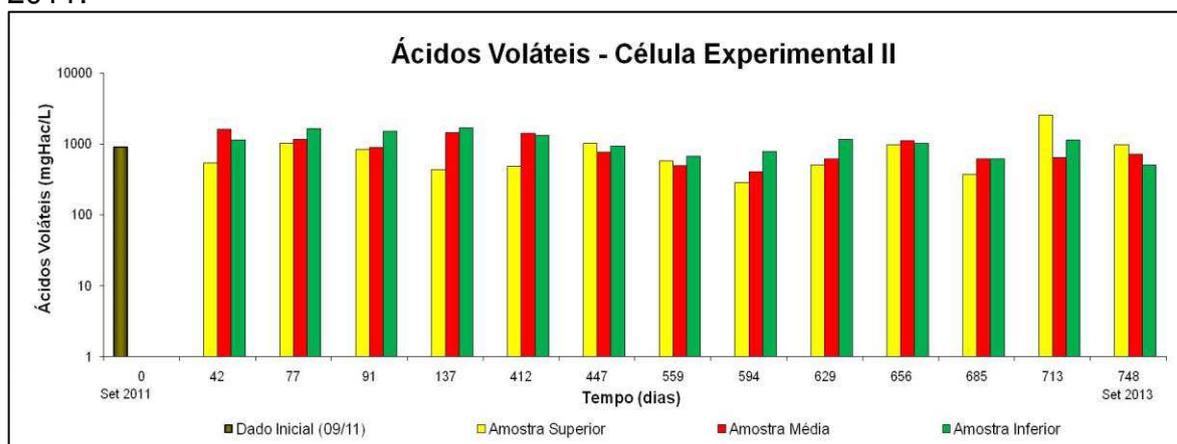
As figuras 34 e 35 mostram os ácidos voláteis nas células experimentais I e II, no decorrer do tempo de monitoramento.

Figura 34: Evolução temporal dos ácidos voláteis nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior), no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Figura 35: Evolução temporal dos ácidos voláteis nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior), no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.



Fonte: Dados da pesquisa, 2013.

Analisando as Figuras 34 e 35 das células experimentais I e II, pode-se observar que nas fases iniciais de degradação dos resíduos a concentração de ácidos voláteis foi elevada (1440 mgHac/L na célula experimental I e 900 mgHac/L na célula experimental II). Estes dados corroboram com os valores de pH encontrados nas células experimentais I e II que apresentaram valores 5,34 e 4,18 respectivamente, nos períodos iniciais de monitoramento, indicando que os resíduos sólidos urbanos apresentam características ácidas. Libânio (2002) relata que variações nas concentrações de ácidos voláteis podem interferir no processo de degradação dos resíduos ao longo do tempo, uma vez que a instabilidade do processo de digestão anaeróbia, que ocorre quando há predominância da fermentação ácida sobre a metanogênica, provoca variações de parâmetros como pH, concentrações de ácidos voláteis e alcalinidade.

Ao longo do tempo de monitoramento, os valores dos ácidos voláteis diminuíram nas diferentes camadas, porém, em alguns períodos estes valores variaram devido à heterogeneidade dos resíduos. Esta análise é de suma importância, pois acompanha a degradação dos resíduos, bem como, o grupo de bactérias participantes na digestão anaeróbia. O monitoramento desta variável serve também para avaliar o bom desempenho das bactérias mesmo ocorrendo variações em seus valores.

Na camada superior da célula experimental I houve um decréscimo mais acentuado dos valores de ácidos voláteis (1740 mgHac/L para 84 mgHac/L) ao

longo do tempo monitorado em decorrência das quantidades significativas de solo e plásticos retirados o que pode ter comprometido a biodegradação pelos microrganismos.

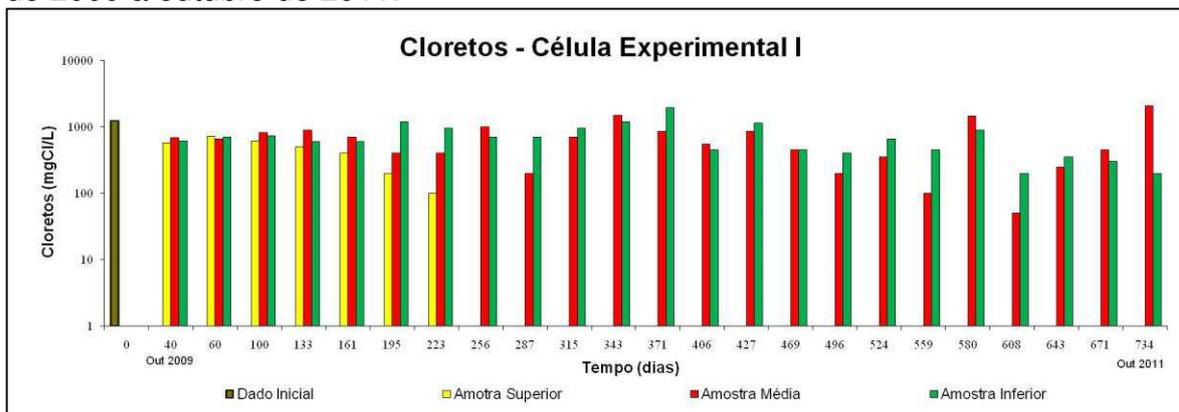
Nas camadas intermediárias e inferiores das células experimentais I e II observou-se uma diminuição na concentração dos ácidos voláteis. Segundo Leite (2008) os ácidos voláteis advêm da solubilização da matéria orgânica e passam a ser substratos tóxicos para determinados grupos de bactérias responsáveis pela bioestabilização da matéria orgânica. Valores em torno de 2000 mgHac/L são tóxicos para bactérias metanogênicas.

Após os 160 dias na célula experimental I e 137 dias na célula experimental II de monitoramento pode-se observar que houve uma redução da concentração de ácidos voláteis em quase todas as camadas e conseqüentemente elevação do pH, o que pode indicar que está ocorrendo a digestão anaeróbia, reduzindo desta forma os ácidos no meio. As oscilações nas concentrações de ácidos voláteis nas células experimentais I e II após os 200 dias de monitoramento podem está associados a heterogeneidade dos resíduos e aos processos de lixiviação, o que pode acarretar em elevadas concentrações desses ácidos, principalmente nas camadas mais inferiores das células.

5.12. Cloretos nas células experimentais I e II

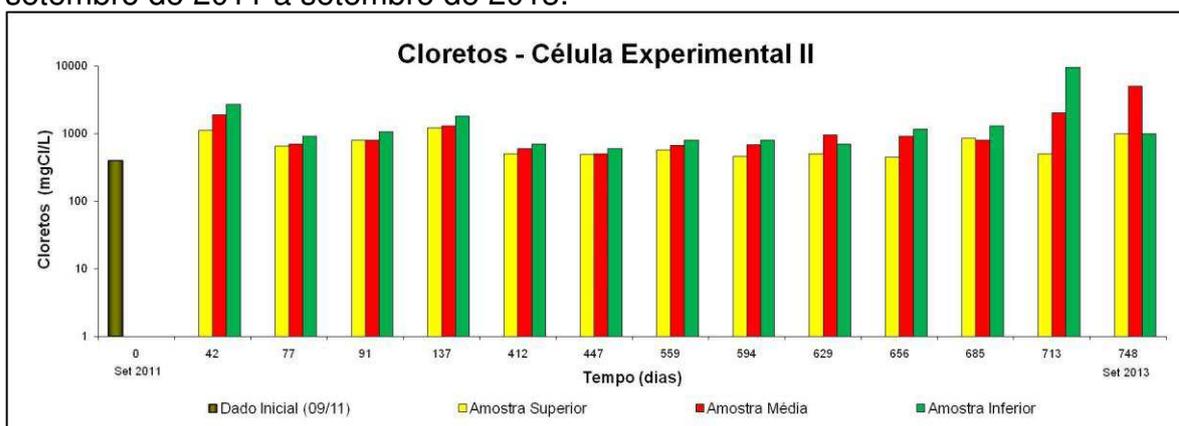
As figuras 36 e 37 ilustram a evolução no decorrer do tempo nas concentrações de cloretos nas duas células experimentais monitoradas.

Figura 36: Evolução temporal dos cloretos nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de outubro de 2009 a outubro de 2011.



Fonte: Dados da pesquisa, 2011.

Figura 37: Evolução temporal dos cloretos nas diferentes camadas (superior, intermediária e inferior) em relação ao tempo decorrido, no período de setembro de 2011 a setembro de 2013.



Fonte: Dados da pesquisa, 2013.

Ao se observar os gráficos das Figuras 36 e 37 das células experimentais, constata-se que as concentrações no tempo inicial ($t=0$) de cloretos (Cl^-) foram de 1211 mgCl/L na célula experimental I e aproximadamente 400 mgCl/L na célula experimental II. Segundo o PROSAB (2009) os cloretos resultam da dissolução dos sais e geralmente não constituem um problema de toxicidade para os microrganismos responsáveis pela degradação biológica, porque a toxicidade por sais está normalmente associada ao cátion e não ao ânion do sal. A combinação de íons cloreto, com cátions metálicos, pode provocar um efeito antagônico, levando à formação de complexos estáveis, reduzindo as concentrações de metais solúveis e os riscos

de toxicidade. Catapreta (2008) reporta que os cloretos são indicadores da evolução da degradação biológica e dos processos físicos e físico-químicos que ocorrem em aterros e indicam a presença de sais minerais nos resíduos depositados, tanto de origem doméstica como de outras atividades.

Na célula experimental I observou-se que no tempo inicial a concentração de cloretos foi de 1211 mgCl/L e que segundo APHA/AWWA/WEF (2012) a concentração de cloretos para lixiviados podem está situados em até 2.000 mgCl/L e de acordo com Coelho (2005), a faixa da concentração de cloretos em aterros pode variar entre 30 a 5.000 mgCl/L, o que demonstra que o valor obtido está na faixa descrita.

Os valores iniciais de cloretos observados na célula experimental I e na célula experimental II oscilaram após os 40 dias de monitoramento, com variações entre 500 mgCl/L e 5000 mgCl/L nas diferentes camadas. Em relação a camada superior da célula experimental I, os valores de cloretos decaíram no decorrer do tempo devido ao recalque sofrido pela massa de resíduos e as quantidades de solo e plásticos retirados desse ponto, o que inviabilizou a coleta para essa camada. Esses dados corroboram com estudos realizados por Batstone (1989) e Pfefferet al.(1986) dos quais reportam que os valores de cloretos comumente encontrados em lixiviados para aterros com menos de dois anos são em média de 1.315 mgCl/L e para aterros com menos de um ano a faixa de variação é entre 600 mgCl/L e 800 mgCl/L. Estudos realizados em células experimentais por Junqueira (2000) registrou valores acima de 4.000 mgCl/L nos primeiros meses e valores abaixo de 1.000 mgCl/L após um ano de monitoramento.

Para alguns autores, esse parâmetro não sofre diferenças na concentração entre as fases acidogênica e metanogênica em aterros sanitários, mas é esperado que a sua concentração diminua lentamente ao longo da vida útil do aterro (BILGILI et al., 2006). Tchobanoglous et al. (1993) e EPA (1995) reportam que as concentrações médias deste composto nos lixiviados de um aterro na fase ácida e metanogênica são de 2100 e 400 mgCl/L, respectivamente, e de um aterro novo é em média de 500 mgCl/L.

Após os 100 dias de monitoramento na célula experimental II observou-se que na camada superior não ocorreu grandes oscilações de cloretos quando

comparada com as camadas intermediárias e inferiores, que tiveram elevados valores de cloretos no decorrer do tempo monitorado, o que pode ser justificado devido os íons de cloretos terem facilidade de lixiviação e alta solubilidade, o que promove sua elevação nas camadas mais profundas da célula (GARCEZ, 2009).

Junqueira (2000) relata que a concentração de cloretos não é tóxica, mas indica o aumento ou a diminuição de contaminantes, desta forma, as camadas mais inferiores das células experimentais tendem a apresentar elevadas concentrações de contaminantes quando comparadas as camadas mais superiores.

Estudos realizados por Souto & Povinelli (2007) com diferentes aterros sanitários registraram valores para as concentrações de cloretos entre 500 mgCl/L e 3.000 mgCl/L. Silva et al.(2007) registraram valores entre 1.900 mgCl/L e 2.900 mgCl/L nas amostras de lixiviado em sua pesquisa com aterro sanitário, indicando que os resíduos estavam em uma fase de transição da fase ácida para a fase metanogênica de biodegradação.

6. CONCLUSÕES

De acordo com a pesquisa desenvolvida nas células experimentais I e II chegou-se as seguintes conclusões:

- O elevado percentual de matéria orgânica encontrada nas células experimentais I e II sugere viabilidade técnica para tratamento dos resíduos sólidos, por meio de tecnologias de compostagem e aproveitamento energético do biogás.
- As composições gravimétricas dos RSU da cidade de Campina Grande/PB, realizadas em diferentes períodos de tempo, apresentaram variabilidade, mostrando redução nos teores de matéria orgânica, indicando que a cidade encontra-se em pleno estágio de desenvolvimento econômico e cultural.
- Os percentuais encontrados das composições gravimétricas e volumétricas nas células experimentais I e II são típicos de países em desenvolvimento, sendo a maior parcela dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB composta por matéria orgânica e plásticos.
- Os teores de plásticos, no estudo da composição volumétrica dos resíduos, apresentaram percentual elevado quando comparado com a composição gravimétrica, dificultando os processos de degradação dos resíduos e reduzindo a vida útil de seus locais de disposição.
- A execução das camadas de solo de base e cobertura nas células experimentais I e II mostrou conformidade entre os dados obtidos, de maneira eficiente, concordando com as normas técnicas disponíveis.
- As bactérias aeróbias totais apresentaram comportamentos semelhantes ao longo do monitoramento nas diferentes células experimentais.
- Os fungos totais apresentaram crescimento satisfatório em todas as camadas nas diferentes células experimentais durante o período de monitoramento.
- A evolução do pH, ao longo do tempo, nas diferentes células experimentais, contribuiu para o estabelecimento das fases de

biodegradação indicando que possivelmente ambas, as células, encontram-se na fase metanogênica.

- A concentração da alcalinidade nas duas células experimentais propiciou de forma positiva a degradação dos resíduos sólidos pelos diferentes grupos de microrganismos.
- Os valores de teor de umidade, encontrados nas diferentes células experimentais, apresentaram-se satisfatórios ao desenvolvimento das bactérias aeróbias e fungos totais biodegradadores da matéria orgânica em quase todas as camadas analisadas das células experimentais.
- Os índices de precipitação e evaporação favoreceram de maneira positiva na biodegradação dos resíduos sólidos nas células experimentais I e II.
- A redução nos teores de sólidos voláteis, em todas as camadas monitoradas, indicou que a matéria orgânica foi degradada de maneira satisfatória ao longo do tempo de monitoramento nas células experimentais I e II.
- As concentrações de ácidos voláteis oscilaram nas duas células experimentais ao longo do tempo de monitoramento e foram importantes para acompanhar o processo de degradação dos resíduos, bem como, o grupo de bactérias presentes na digestão anaeróbia.
- A concentração de cloretos nas células experimentais foi maior nas camadas mais inferiores das células, indicando que os níveis de contaminantes são carregados para essas camadas pela lixiviação.
- As fases de degradação nas células experimentais I e II ocorreram de maneira mais rápida quando comparadas a aterros sanitários em decorrência da área/superfície ser maior que o volume dos resíduos, o que facilitou a interação do meio ambiente com atividade enzimática dos diferentes grupos de bactérias e fungos.
- Os dados obtidos nas células experimentais I e II mostraram que os resíduos sólidos urbanos apresentaram uma boa degradabilidade no decorrer do tempo de monitoramento nas condições de clima e aterramento locais.

6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar comparações estatísticas com os diferentes parâmetros físico-químicos e microbiológicos monitorados.
- Estudar os parâmetros que mais influenciam na degradação dos resíduos sólidos urbanos.
- Desenvolver novas metodologias para construção e adequação das células experimentais de RSU.
- Identificar as espécies de bactérias aeróbias e anaeróbias responsáveis pela biodegradação dos RSU.
- Identificar as fases degradativas nos RUS e verificar quais fases apresentam maior velocidade de degradação da matéria orgânica.

7. REFERÊNCIAS

_____ **NBR 10.004:** Resíduos Sólidos – classificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 2004 74p.

_____ **NBR 10.007:** Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Rio de Janeiro, 2004. 21p.

_____ **NBR 10.007:** Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro, 2004c. 21p.

_____ **NBR 13.292:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

_____ **NBR 14.545:** Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000. 12p.

_____ **NBR 6.457:** Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986a. 9p.

_____ **NBR 6.459:** Solo - determinação do limite de liquidez – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984a. 6p.

_____ **NBR 6.508:** Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm - determinação da massa específica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984b. 8p.

_____ **NBR 7.181:** Solo - análise granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984d. 13p.

_____ **NBR 7.182:** Solo - ensaio de compactação – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986b. 10p.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** Disponível em: <http://www.abrelpe.com.br>. Acesso em: 20/10/2012.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Disponível em: <http://www.abrelpe.com.br>. Acesso em: 20/11/2011.

AESA. Disponível em: http://www.lmrs-semarh.ufcg.edu.br/meteoro/chuvas_ano200609_dados.shtml. Acesso em: 12/11/2012.

AIRES, K. E. **Monitoramento das concentrações de gases em uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos na cidade de Campina Grande-PB**. 118p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

ALCÂNTARA, P.B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. 366p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

AL-SALEM, S. M., LETTIERI, P., BAEYENS, J., “Recycling and Recovery Routes of Plastic Solid Waste (PSW): A Review”, **Waste Management**, n. 29, pp. 2625-2643, 2009.

ALVES, F. S. **Influência das condições meteorológicas na biodegradação dos resíduos sólidos urbanos em Campina Grande-PB**. 146p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 th edition. Washington: APHA, 2012. 1203p.

ARAÚJO, E. P. **Estudo do Comportamento de Bactérias Aeróbias e Anaeróbias Totais na Biodegradabilidade de Resíduos Sólidos Urbanos**

da Cidade de Campina Grande-PB. 116p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

ARAÚJO, E. P.; RIBEIRO, L. S.; PEREIRA, F. T. G.; ALVES, F. S.; SILVA, A. S. **Influência da presença de plásticos na composição volumétrica de resíduos sólidos urbanos em um biorreator na de campina grande – PB.** In: XXXIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2012, Salvador. Anais: AIDIS 2012.

BALDOCHI, V.; VARESCHE, M.; POVINELLI, J.; VAZOLLER, R. **Anaerobic Biomass Evaluation During Biodigestion of Solid Wastes Amended with Organic Substrates and Using Leachate as a Seed.** Anais do XXV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. México, 1996.

BARLAZ, M. A.; SCHAEFER, D. M.; HAM, R. K. Bacterial Population Development and Chemical Characteristics of Refuse Decomposition in a Simulated Sanitary Landfill. **Applied and Environmental Microbiology**, London, v. 55, n.1, p.55-65, 1989.

BILGILI, M.; DEMIR, A.; ÖZKAYA, B. Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes. **Journal of Hazardous Materials**, Vol. 143, p. 177-183, 2006.

BÖRJESSON, G.; SUNDH, I.; SVENSSON, B. **Microbial oxidation of CH₄ at different temperatures in landfill cover soils.** FEMS Microbiology Ecology, p. 1-8, 2004.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo.** Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 29-51.

CARVALHO, M. N. **Estudo da biorremediação *in situ* para tratamento de solos e aquíferos contaminados com percolato de chorume.** 169p.

Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília, 1997.

CASTILHOS JR. A. B. (Coordenador), 2003. **Resíduos sólidos urbanos: Aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Projeto PROSAB - RIMA, ABES. Rio de Janeiro. 2003.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. **Caracterização volumétrica dos resíduos sólidos urbanos dispostos em um aterro sanitário experimental**. XXXI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental - AIDIS. 2008.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. **Evaluation of the Relation Between Precipitation and Leachate Flow in an Experimental Sanitary Landfill**. XXXI Congreso Interamericano Aidis, Santiago – CHILE. Centro de Eventos Casa Piedra, 12 – 15 Octubre de 2008.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **“Resíduos Sólidos urbanos e limpeza pública”**. São Paulo, 1990.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, v.5, 379p. 2007

CHIELLINI, E.; SOLARO, R. **Environmentally Degradable Polymers and Plastics. An Overview**. Proceedings of International Workshop on Environmentally Degradable and Recyclable Polymers in Latin American. Disponível em: <http://www.scielo.br> Acesso em: 05/11/2013.

CIRNE, L. E. M. R. **A Coleta Seletiva como Subsídio à Criação de um Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS) em Campina Grande-PB: Implicações Ambientais, Econômicas e Sociais**. 212p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

CITIZENDIUM. *Pseudomonas Putida*. Citizendium - **The Citizens Compendium**. Disponível em http://en.Citizendium.org/wiki/Pseudomonas_putida. Acesso em 20 de março de 2012.

COELHO, T. C. **Estimativa da produção teórica do Metano gerado no Aterro Sanitário de Palmas-TO**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Tocantins, 2010.

COELHO, G. D. **Purificação parcial do sistema enzimático produzido por *Psilocybe castanella* CCB444 durante crescimento em solo**. 101p. Tese (Doutorado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente), Instituto de Botânica, IBT, 2007.

COELHO, H.M.G.; LANGE, L.C.; SIMÕES, G. F.; FERREIRA, C.F.A; VIANA, D.F. Avaliação do desempenho de camadas de cobertura intermediárias e finais em células experimentais de disposição de resíduos sólidos urbanos. **In:** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23, 2005, Campo Grande. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

CONCEIÇÃO, D. M.; ANGELIS, D. A.; BIDOIA, E. D.; ANGELIS, D. F. Fungos filamentosos isolados do Rio Atibaia, SP e refinaria de petróleo biodegradadores de compostos fenólicos. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 72, n. 1, p.99-106, 2005.

CONTRERA, R. C.; ZAIAT, SCHALCH, V. **Tratamento biológico de lixiviados de aterros sanitários utilizando reator anaeróbio horizontal de leito fixo (rahlf)**. Disponível em: www.periodicosapes.com.br. Acesso em: 20 de novembro de 2014.

CONTRERA, R. C. **Estudo da tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários em sistema de reatores anaeróbio e aeróbio operados em**

bateladas sequenciais e em um filtro biológico anaeróbio contínuo de fluxo ascendente. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

CUNHA, J. E. B. L.; RUFINO, I. A. A.; IDEIÃO, S. M. A. Determinação da Temperatura de Superfície na cidade de Campina Grande-PB a partir de imagens do Satélite Landsat 5-TM. **In: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal. 2009.p. 5717-5724.

EPA - Environmental Protection Agency. “Decision Maker’s Guide to Solid Waste Management”. Vol.II, Cap.9 – Land Disposal, 1995.

FABBRINI, M.; GALLI, C.; GANTILI, P. Comparing the catalytic efficiency of some mediators of lacase. **Journal of Molecular Catalysis B. Enzymatic**, v. 16, p. 231-240, 2002.

FUCALE, S. P. **Resistência em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos.** I Seminário de Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, (2002).

GALVÍNCIO, J. D. & RIBEIRO, J. G. **Precipitação média anual e a captação de água de chuva no Estado da Paraíba.** 5º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água da Chuva. Teresina – PI. 2005.

GARCEZ, L, R. **Estudo dos Componentes Tóxicos em um Biorreator de Resíduos Sólidos Urbanos da cidade de Campina Grande – PB.** 114p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

GENOME. Pseudomonas Fluorescens. Genome Projects. Disponível em <http://genome.jgi-psf.org/psefl/psefl.home.html>. Acesso em 10 Maio de 2012.

GIMENES, L. J. **Fungos Basidiomicetos** - Técnicas de coleta, isolamento e subsídios para processos biotecnológicos. 20p. Curso de Capacitação de Educadores e Monitores (Instituto de Botânica), 2010.

GONÇALVES, C. C. M.; PAIVA, P. C. A.; DIAS, E. S.; SIQUEIRA, F.; HENRIQUE, F. Avaliação do cultivo de *Pleurotus sajor-caju* (Fries) Sing. sobre o resíduo de algodão da indústria têxtil para a produção de cogumelos e para alimentação animal. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 1, p. 220-225, 2010.

GUPTA, R.K.; RUDRA, R.P.; DICKINSON, W.T.; PATINI, N.K.; WALL, G.J. **Comparison of saturated hydraulic conductivity measured by various field methods**. Transaction of the ASAE, St. Joseph, v.28, n.5, p. 1901-1908, Sept/Oct. 1985.

HAANDEL, A. C. V.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos**. Um manual para regiões de clima quente. Fotolitos e Impressão Gráfica-EPGRAF: Campina Grande, 1994. p. 1-30.

HEGBERG, B. A.; HALLENBECK, W. H.; BRENNIMAN, G. R. Plastics Recycling Rates. **Resour.Conserv. Recycl.**, v.9, n.1-2, p.89-107.

HOFRICHTER, M. Review: Lignin conversion by manganese peroxidases (MnP). **Enzyme and Microbial Technology** 30, 2002. p. 454-466.

HOORNWEG D., THOMAS L., OTTEN L. **Urban System Management. Composting and Its Applicability in Developing Countries**. Published for the Urban Development Division. The World Bank, Urban and Local Government, Washington DC, March 2000.

HOPEWELL, J., DVORAK, R., KOSIOR, E., "Plastics recycling: challenges and opportunities". **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, n. 364, pp. 2115-2126, 2009.

<http://g1.globo.com/pb/paraiba/rainha-da-borborema/consumo-capita-de-campina-cresce>. Acesso em: 20/09/2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem Populacional**. 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contagem Populacional**. 2010.

ISOLDI, L.A.; KOETZ, P.R.; FARIA, O.L.V.; ISOLDI, L.A. Parâmetros e operação do reator UASB em um sistema combinado reator UASB – reator aeróbio. **Revista eletrônica do mestrado em educação ambiental**. Fundação Universidade Federal do Rio Grande. 2001.

JARA, A. M. A. T. **Biofilmes e enzimas sintetizados no processo de degradação do tereftalato de polietileno (PET) por *Bacillus subtilis* e *Phanerochaete chrysosporium***. 100p. Dissertação (Dissertação de mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2007.

JOHN, C. E. **Implantação de um biorreator para estudos de resíduos sólidos urbanos: problemas, ajustes e soluções de laboratório**. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-graduação em engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. 2004.

JÚNIOR, A.B.C. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários**. Rio de Janeiro-RJ: ABES, 2006.

JUNQUEIRA, F. F. **Análise do Comportamento de Resíduos Urbanos e Sistemas Dreno Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência ao Aterro do Jôquei Clube – DF**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília. 2000.

LARSEN, Rachel. **The genus Bacillus licheniformis**. Disponível em <http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/MicrobeWiki>. Kenyon College. Acesso em 5 de setembro de 2012.

LEITE, H. E. A. S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em escala experimental na cidade de Campina Grande-PB**. 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

LIBÂNIO, P. A. C. **Avaliação da Eficiência e Aplicabilidade de um Sistema Integrado de Tratamento de resíduos Sólidos Urbanos e de Chorume**. 175p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2002.

LIMA, L. M. Q. **Tratamento e Biorremediação**. 3 ed. São Paulo: Hemus Livraria, 265p. 2004.

LIPOR. Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto. **Caderno Técnico**. 2000.

LIVESCIENCE. **Why Today's cockroaches are the biggest ever**. Disponível em: <<http://livescience.com>>. Acesso em: 29/06/2012.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J. **Brock Biology of Microorganism**. ed. 10. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. 1088p.

MANASSERO, M.; VAN IMPE, W.F.; BOUAZZA, A. **Waste disposal and containment**. pp. 1425–1474. Proc. 2nd International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japão. Balkema, v. 3. 1996.

MARIANO, M.O.H.; MACIEL, F.J.; FUCALE, S.P.; JUCÁ, J.F.T.; BRITO, A.R.de. **Composição gravimétrica e volumétrica dos rsu da célula piloto do aterro de resíduos sólidos da Muribeca.** 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2007.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M. Avaliação de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. **Revista Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32-41, 2002.

MATEUS, S. F. **Determinação de componentes inorgânicos em plásticos pelo método de análise por ativação neutrônica.** 1999. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

MATTEI, G.& ECOSTEGUY, P.A.V. **Composição gravimétrica de resíduos sólidos aterrados.** Nota Técnica. Revista ABES. Vol. 12. Nº 3. 2007.

MEIRA, R. C. **Estudo biodegradativo dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande – PB em escala experimental.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 113p. 2009.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada à biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca.** 141p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MELO, M. C. **Influência da Matéria Orgânica nos Recalques de Resíduos Sólidos Urbanos Aterrados.** 148p. Tese (Tese de doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais), Centro de Ciências e Tecnologia. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

MENDES, P. M. R. **Recalque do Maciço dos resíduos Sólidos no Aterro do município de Foz do Iguaçu – PR.** 74p. Monografia (Graduação em

Engenharia Ambiental), Faculdade Dinâmica das Cataratas. União Dinâmica de Faculdade Cataratas, 2009.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, maio/jun. 2004.

METCALF, L.; EDDY, Inc. **Wastewater Engineering – Treatment and Reuse**. 4ª edição. McGraw-Hill. 1819 p. 2003.

MONTEGGIA, L. O.; BEAL, L.L;DE LUCA, S. J. **Requerimento de Alcalinidade em Processos Biológicos Anaeróbios**. Anais do XXV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. México, 1996.

MONTEIRO, V. E. D.; MELO, M. C.; ALCÂNTARA, P. B.; ARAÚJO, J. M.; ALVES, I. R. F. S.; JUCÁ, J. F. T. **Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos**. Engenharia Sanitária e Ambiental. v.11,n.3, p. 223-230, 2006.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do Aterro da Muribeca**. p.15-20. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MOR, S.; RAVINDRA, K.; DE VISSCHER, A.; DAHIYA, R.P.; CHANDRA, A. **Municipal solid waste characterization and its assessment for potential methane generation**: A case study. Science of the Total Environment, 2006.

MUCELIM, C.; BELLINI, M. **Garbage and perceptible environmental impacts in urban ecosystem**. Disponível em: www.scielo.br/scielo. Acesso em: 30 de outubro de 2012.

MUÑOZ, S. I. S. **Impacto Ambiental na Área do Aterro Sanitário e Incinerador de Resíduos Sólidos de Ribeirão Preto, SP: Avaliação dos níveis de Metais Pesados**. 158p. Tese (Doutorado em Enfermagem em Saúde pública), Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto. Universidade de São Paulo, 2002.

NARAYANA, T, “Municipal solid waste management in India: From waste disposal to recovery of resources?”, **Waste Management**, v. 29, n.3, 2009, pp. 1163-1166.

OLIVEIRA, S. Caracterização física dos resíduos sólidos domésticos (RSD) da cidade de Botucatu/SP. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental da ABES**. São Paulo, v. 4, n. 4, p. 7,1999.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Potencial de geração de energia elétrica e iluminação a gás por meio do aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário**. Disponível em: www.periodicosapes.com.br. Acesso em: 10 de março de 2010.

PELCZAR JR, M. J.; CHAN, E. C. S.; KRIEG, N. R. **Microbiologia**. 2 ed. São Paulo: Makron Books, 1997. p. 166-183.

PEREIRA, F. T. G.; LEITE, H. E. A.; GARCEZ, L.R.; ARAÚJO, E. P.; MELO, M. C.; MONTEIRO, V. E. D. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade de Campina Grande-PB**. In: SINRES-2º Simpósio Nordeste de Resíduos Sólidos. Campina Grande – PB. 2010.

PALMISANO, A. C.; BARLAZ, M.A, Microbiology of Solid Waste. pp.1-224. In: Anna C. Palmisano, Morton A. Barlaz (eds), 1996.

PINTO, D. M. L. **Avaliação da Biodegradabilidade da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Domésticos**. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP. 2000.

POHLAND, F.G. **Landfill Bioreactors: Fundaments and Practice**. Water Quality International, pp. 18-22, Sep-Oct 1996.

POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS). Disponível em: www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/.../112305.htm. Acesso em: 10/12/2010.

PROSAB. Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições Brasileiras. Edital 5, 1^o Edição, editora ABES. Rio de Janeiro. ISBN: 978-85-7022-163-6, 2009.

QUEZADO, L. H. N. **Avaliação de Tecnologias para Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 48p. Monografia (Curso de Engenharia Química), Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α parameter using the Guelph permeameter. **Soil Science**, Baltimore, v.140, n.4, p.292-302, Oct. 1985.

RIBEIRO, L. S. **Estudo da degradação dos resíduos sólidos urbanos através dos parâmetros físicos e físico-químicos em um biorreator de escala experimental**. 136p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

ROCHA, L.; NISHIYAMA, L. Qualidade das águas superficiais e subterrâneas em voçoroca ocupada por resíduos sólidos urbanos – Uberlândia (MG). **Revista Eletrônica de Geografia**, v.4, n.12, p. 107-127, dez. 2012.

RODRIGUEZ, J. L. **Paraíba: Desenvolvimento econômico e a questão ambiental**. João Pessoa/PB: Editora Grafset, 164p. 2004.

ROSA, D. S.; CALIL, M. R.; GUEDES, C. G. F.; SANTOS, C. E. O. The effect of UV-B irradiation on the biodegradability of Poly- β -Hydroxybutyrate (PHB) and Poly- ϵ -Caprolactone (PCL). **Jornal of Polymers and the Environment**, v. 9, n.3, p. 109-112, 2001.

ROCHA, G. H. T.; LANG, L. C. Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares - ênfase nos resíduos domésticos potencialmente perigosos. **In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Joinville – SC. 2003.

ROSA, D. S.; FILHO, R. P. **Biodegradação: um ensaio com polímeros**. Itatiba, Bragança Paulista/São Paulo: Moara Editora, Univ. São Francisco Editora, 2003.

SANTOLERI, J. J., **Pollution Issues, Incineration**. Disponível em <<http://www.pollutionissues.com/Ho-Li/Incineration.html>>. Acesso em 20 de outubro de 2011.

SALES-CAMPO, C.; ANDRADE, M. C. N. Temperatura e meio de cultura mais favorável ao crescimento micelial de uma linhagem de *Lentinus strigosus* de ocorrência na Amazônia. **Arquivos do Instituto Biológico**. v.77, n.3, p-539-543, 2010.

SANTOS, V. C. **Projeto, Construção e Instrumentação de um Lisímetro em Escala de Laboratório para Estudos em Resíduos Sólidos**. 106p. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental). Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010.

SAWYER, C. N.; MCCARTY, P. L.; PARKIN, G. F. **Chemistry for environmental engineering**. 4 ed. New York: McGraw-Hill Inc., p. 168-174, 1994.

SHAH, V.; NERUD, F. Lignin degrading system of white-rot fungi and its exploitation for dye decolorization. **Canadian Journal of Microbiology**. V. 48, P. 857-870, 2002.

SILVA, A. S. **Avaliação da Toxicidade dos Resíduos Sólidos Urbanos da cidade de Campina Grande-PB**. 139p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SILVA, F. B. **Tratamento Combinado de lixiviados de Aterros Sanitários**. 118p. Dissertação (Mestrado em Ciências), Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, F. M. S.; ALCÂNTARA, P. B.; LIMA, M. A. G. A.; PALHA, M. L. A. P. **Monitoramento microbiológico do lixo em lisímetro no Aterro Sanitário da Muribeca**. Disponível em: < <http://www.periodicosdacapes.gov.br>>. Acesso em 10 de março de 2010.

SILVA, A. S. **Avaliação do potencial tóxico dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande – PB**. 139p. Dissertação (Dissertação de mestrado), Centro de Tecnologias e recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SILVA, S. A. OLIVEIRA, R. **Manual de análises físico-químicas de águas de abastecimento e residuárias**. Campina Grande-PB: O Autor, 2001. 265p.

SIMÕES, G. F. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2000.

SOUSA, J. T.; SILVA, S. A.; PRASSAD, S.; LEITE, V. D.; LOPES, W. S. **Análise quali-quantitativa dos resíduos sólidos urbanos produzidos pela**

população da cidade de Campina Grande, PB. In: 24^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES, 2007.

SRINIVASAN, S. V.; JAYANTHI, S.; SUNDARAJAN, R. Synergistic effect of Kichen refuse anda Domestic sewage in Biogas production. **In:** National Seminar On Anaerobic Technologies For Waste Treatment, Madras. India, 1997 p.87-91.

SRIVASTAVA, S.K, SRIVASTAVA R.K, “Managing product returns for reverse logistics”, **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 36, n. 7, 2006. pp. 524-546.

TAVARES, A. S. **Paraíba: Desenvolvimento econômico e a questão ambiental.** João Pessoa/PB: Editora Grafset, 164p. 2004.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H VIGIL, S. A. **Integrated Solid Waste: Management – Engineering Principles and Management Issues.** Mcgraw-Hill International Editions. ISBN 0-07-063237-5. 978.1993.

TODAR, Kenneth. **The Genus Bacillus.** TODAR'S, Online Textbook of Bacteriology. Disponível em <http://www.textbookofbacteriology.net/Bacillus.html>. Acesso em 25 de abril de 2013.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia.** 6 ed. Porto Alegre: Editora ARTMED, p. 170-171. 2000.

VAZOLLER, R, F.; GOMES, L. P.; BALDOCHI, V. M. Z.; VILLAS-BÔAS, D. F.; BADRA, R. J.; POVINELLI, J. Biodegradability Potential of Two Experimental Landfills in Brazil. **Brazilian Journal of Microbiology.** v. 32, p 87-92, 2001.

WHO. International Reference Center for Wastes Disposal. **Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost.** Switzerland. 1979.

WRAP, Waste and Resources Action Programme: Environmental Benefits of Recycling, **Bio Intelligence Service and Copenhagen Resource Institute**- Final Report. Disponível em: http://www.wrap.org.uk/downloads/Environmental_benefits_of_recycling_2010_update.86102586.8816.pdf. Acesso em 20 de outubro de 2011.