



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



**ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA NOS RECALQUES DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ATERRADOS**

MÁRCIO CAMARGO DE MELO

Campina Grande, PB

Maio de 2011

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

**ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA NOS RECALQUES DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ATERRADOS**

MÁRCIO CAMARGO DE MELO

Tese Apresentada ao programas de pós graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade
Federal de Campina Grande (UFCG) em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de doutor em Ciência e
Engenharia de Materiais.

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

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcus Vinícius Lia Fook

Campina Grande, PB

Maio de 2011

M528e Melo, Marcio Camargo de
 Estudo da materia organica nos recalques de residuos
 solidos urbanos aterrados / Marcio Camargo de Melo. -
 Campina Grande, 2011.
 154 f. : il.

 Tese (Doutorado em Ciencia e Engenharia de Materiais) -
 Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciencias
 e Tecnologia.

 1. Residuos Solidos Urbanos - 2. Material Organico 3.
 Recalque - 4. Microbiologia - 5. Tese I. Monteiro,
 Veruschka Escario Dessoles, Dra. II. Fook, Marcus Vinicius
 Lia, Dr. III. Universidade Federal de Campina Grande -
 Campina Grande (PB)

CDU 628.312.1(043)

**ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA NOS RECALQUES DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS ATERRADOS
MÁRCIO CAMARGO DE MELO**

Tese Aprovada por:24/05/2011 pela banca examinadora constituída dos seguintes
membros:

Dr^a: Veruscha Escarião Dessoles Monteiro
Orientadora
UAEQ-UFCG

Dr: Marcus Vinicius Lia Fook, D.Sc.
Co-Orientador
UAEMa-UFCG

Dr^a: Crislene Rodrigues da Silva Morais
Examinadora Interna
UAEQ-UFCG

Prof.: André Luiz Fiquene de Brito
Examinador Externo
UAEQ-UFCG

Dr: William de Paiva
Examinador Externo
UEPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Veruschka, pessoa maravilhosa que não mediu esforços no sentido de colaborar com este trabalho. Sem dúvida, acima tudo acreditou no desenvolvimento deste estudo e, principalmente nos momentos difíceis apoiou, dando-me entusiasmo e ânimo para prosseguir. Por tudo isso será sempre guardada na minha memória e coração. À minha filha Bruna que, embora, com apenas 3 anos de idade, incentivou-me a buscar e alcançar mais este degrau de conquista. Dedico também este trabalho ao meu pai (*in memoriam*) e à minha mãe pelo grande exemplo de vida que sempre me passaram e com a certeza que buscar o crescimento pessoal, intelectual e moral dever ser um dos esforços nobres dos homens. Também a razão deste trabalho foi o apoio de meu sogro Dessoles e , principalmente a minha sogra Yara que sempre quis o meu crescimento pessoal.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Jeová Deus por permitir o desenvolvimento desse trabalho e na expectativa de que com mais um patamar alcançado posso ajudar ao próximo.

Ao meu pai, Manoel (**in memorian**) e à minha mãe, Hermínia, pela dedicação que sempre tiveram por mim, mesmo estando distantes, pelo exemplo de vida e pela forma que me educaram.

Aos meus irmãos, especialmente meu irmão gêmeo Marcos, pela amizade e cumplicidade que sempre tivemos.

À minha orientadora Profa. Veruschka Escrião Dessoles Monteiro e ao Prof. Marcus Vinícius Lia Fook que confiaram num biólogo para fazer uma tese no campo da ciências e engenharia de materiais e no desafio lançado numa área incomum para biólogos, pois em todo o momento acreditaram em meu potencial, além das sugestões, sempre oportunas e valiosas, que me repassaram.

A Veruschka pela colaboração incansável no decorrer de todo o trabalho e pela apresentação desta área tão fascinante, dos resíduos sólidos e da engenharia.

Aos professores do curso de doutorado, especialmente a professora Crislene, pelo esforço empreendido e na busca de formar profissionais habilitados ao mercado de trabalho, sobretudo acadêmico.

Aos Professores William de Paiva, André Fiquene de Brito e Valderi Duarte Leite, pela confiança depositada em mim e pelas inúmeras colaborações durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) que sempre tiveram consideração e participaram dos resultados obtidos neste trabalho, pois sem esta ajuda este estudo não seria possível e não teria o mesmo significado e importância.

A Prof Janete Magali de Araújo por permitir que o laboratório de Antibióticos fosse utilizados para realização dos ensaios biológicos e pelo apoio técnico, pela amizade e sobretudo pelo companheirismo e profissionalismo.

Aos colegas de turma de Ciência e Engenharia de Materiais, pelo apoio incentivo e amizade.

À Secretária da Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Márcia, que foi muito prestativa em seu trabalho e pelas soluções rápidas e eficientes quando surgiam problemas e desafios e, sempre espontânea ajudando na confecção desta tese.

A família Dessoles pelo incentivo e pela amizade durante todo o tempo que estive em Recife e pelo apoio no decorrer deste trabalho.

Quero deixar um agradecimento especial a Jamile, prima de minha esposa, pela sua amizade e docilidade e, que por varias vezes deu conselhos sábios sobre assuntos

diversos, nos acompanhou em momentos difíceis, como hospitais e clínicas médicas e ajudou de uma certa forma na educação de nossa filha Bruna.

Uma pessoa que não posso deixar de falar é de Ubiratan, tio de minha esposa, uma pessoa fantástica e dedicado a família que sempre deu palavras e demonstrou através de atitudes que o caminho que eu segui estava correto e precisava ser alcançada esta etapa de doutoramento.

Ao convênio CAPES pelo apoio financeiro que, sem dúvida, foi determinante para o desenvolvimento desta tese de doutorado e ao CNPq pelo financiamento do projeto de pesquisa onde este trabalho está inserido.

RESUMO

Em aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) os recalques ou redução da altura e volume da massa de resíduos são frutos da perda de massa sólida dos seus constituintes orgânicos ou devido a rearranjos, distorções e outros fatores que façam com que os resíduos diminuam em volume e massa. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento do matéria orgânica presente no interior de uma célula experimental (biorreator) de resíduos sólidos urbanos no que se refere a sua biodegradabilidade e como estes materiais orgânicos degradáveis influenciam nos recalques. Para o desenvolvimento da pesquisa foi construída uma célula experimental com a capacidade de 9m³ de resíduos compactados. A pesquisa foi desenvolvida nas dependências da Universidade Federal de Campina Grande-PB para se estudar a influência da matéria orgânica nos recalques e para esta finalidade foram realizados ensaios físicos, físico-químicos, microbiológicos e mecânicos dos resíduos depositados na célula experimental. Os resíduos sólidos foram coletados na cidade de Campina Grande em três bairros de classes sociais distintas. O biorreator foi instrumentado para que houvesse o monitoramento dos parâmetros pesquisados. Durante o estudo foram medidos recalques no tempo e profundidade através de placas superficiais e profundas. De acordo com os resultados analisados foi possível afirmar que os recalques em resíduos sólidos urbanos são fortemente influenciados pela matéria orgânica presente e, em menor escala, pelo peso dos próprios resíduos e este último contribui, quase que exclusivamente nos primeiros 30 dias de aterramento enquanto aquele após os 30 dias de confinamento. Através dos estudos verificou-se que a quantidade de matéria orgânica diminuiu acentuadamente em todos os níveis pesquisados e, que os recalques devido a estes compostos e a fatores mecânicos (carga imposta dos próprios resíduos) foram variáveis de acordo com a profundidade. Os recalques observados através dos medidores de deformação na camada superior mostraram uma diminuição da altura de resíduos devido ao consumo de material orgânico biodegradável de 93% e, na camada intermediária e inferior em torno de 40%. Estes dados sugerem que durante o monitoramento da célula experimental a degradação dos resíduos foi bastante rápida se comparado a aterros em escala real. Além do mais, verificou-se que os recalques acentuados devido a degradação do material orgânico degradável ocorrem porque no interior do sistema estudado há 66% de produtos orgânicos, o que se traduz em grandes recalques. Pode-se dizer que a camada superior de resíduos teve rapidamente o seu conteúdo de matéria orgânica degradada e recalques mais acentuados pelo fato desta camada ser mais influenciada pelo meio ambiente externo, fato este comprovado pelos resultados estatísticos. Além do mais, os recalques que ocorrem tanto devido ao próprio peso dos resíduos quanto à degradação da matéria orgânica, são maiores nesta camada por serem influenciados pelo deslocamento das demais camadas. Também foi observado que o valor da constante de bioestabilização, K, que mostra a rapidez de bioestabilização dos resíduos, foi variável nas três camadas estudadas e no tempo e, que nos dias iniciais das medições das deformações verticais não houve correlação desta constante com os recalques, pois inicialmente, os deslocamentos verticais ocorreram devido mais a fatores mecânicos que biodegradativos.

Palavras Chaves: Matéria Orgânica, Recalques e Resíduos Sólidos Urbanos

ABSTRACT

In landfills of municipal solid waste (MSW) the settlements, or reduction of height and volume of the solid waste mass, are a result of the solid mass loss of its organic components or due to rearrangements, distortions and other factors responsible for the solid waste mass and volume reduction. The objective of this work was to study the behavior of the organic matter found in the interior of a municipal solid waste experimental cell (bioreactor) regarding its biodegradability and how this organic matter influences the settlements. For the development of this research, an experimental cell with 9 m³ of capacity of compacted solid waste was built. The investigation was developed in the rooms of the Federal University of Campina Grande, Paraiba state, in order to study the influence of the organic matter in the settlements and for this goal to be reached physical, physicochemical, microbiological and mechanical experiments of the solid waste deposited in the experimental cell were carried out. The solid waste was collected in Campina Grande city in three districts of different social classes. The bioreactor was instrumented in order to monitor the parameters that were being researched. While the study was being conducted, settlements were measured in time and depth through superficial and deep plates. Based on the analyzed results, it was possible to assert that the settlements in municipal solid waste are largely influenced by the present organic matter and by the solid waste self-weight to a lesser extent and the latter contributes almost exclusively in the first 30 days of landfilling while the former after the 30 days of confinement. By means of this study, it was noticed that the quantity of organic matter was largely reduced in all the researched levels, and that the settlements, due to this organic matter and mechanical factors (solid waste self-weight), varied according to the depth. The settlements observed by means of the settlement plates in the upper layer showed a solid waste height reduction due to 93% of organic matter consume and about 40% in the intermediate and lower layers. These data suggest that while the experimental cell was being monitored the solid waste degradation was fast enough if compared to real landfills. Besides, it was noticed that the settlements which are pronounced due to organic matter degradation happen because in the interior of the studied system there are 66% of organic products, what can be understood as large settlements. It can be said that the solid waste upper layer had its content of organic matter degraded quickly and settlements more pronounced because this layer is more influenced by external conditions and this fact can be proved by statistical results. Besides, the settlements that are a result of both the solid waste self-weight and the organic matter degradation are larger in this layer by being influenced by the displacements of the other layers. It was also observed that the value of the biostabilization constant, K, that shows the solid waste biostabilization rate, varied in the three studied layers and in time, and that in the first days of measurements of the vertical settlements, correlation of this constant with the settlements was not found because, initially, the vertical displacements were more influenced by mechanical than biodegradative factors.

Key words organic: matter, settlements and landfills of municipal solid waste

Sumário

1. Introdução.....	15
1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
2. Revisão Bibliográfica	18
2.1. Antecedentes e Estado Atual do Conhecimento.....	18
2.2. Resíduos Sólidos Urbanos	20
2.2.1. Matérias Dispostos em Aterros e sua Interações com Microrganismos Presentes na Massa de Resíduos.....	21
2.2.2. Resíduos Sólidos Urbanos no Contexto da Durabilidade, Reciclagem de Materiais e Aproveitamento Energético	24
2.3. Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos	26
2.4. Células Experimentais de Resíduos Sólidos Urbanos ou Biorreatores	27
2.5. Biodegradação em Aterros	30
2.6. Propriedades Mecânicas dos Aterros de RSU e Células Experimentais	33
2.7. Recalques.....	34
2.7.1. Evolução dos Recalques em Aterros de Resíduos Sólidos.....	36
2.7.1.1. Mecanismos dos Recalques	37
2.8. Modelo de Bioestabilização da Matéria Orgânica e Cinética Microbiana	39
2.9. <i>Composição</i> Gravimétrica e Volumétrica de Resíduos Sólidos Urbanos	41
3. Materiais e Métodos	43
3.1. Locais de Desenvolvimento da Pesquisa.....	43
3.2. Etapas da Pesquisa.....	43
3.2.1. Construção do Lisímetro	44
3.2.2. Instrumentação da Célula Experimental (Biorreator) de Resíduos Sólidos Urbanos	45
3.2.3. Coleta e Amostragem de Resíduos Antes do Enchimento da Célula Experimental	49
3.2.4. Caracterização Física.....	49
3.2.4.1. <i>Composição</i> Gravimétrica dos Resíduos (%).....	49
3.2.4.2. <i>Composição</i> Volumétrica dos Resíduos	51
3.2.4.3. Massa Específica Solta e Compactada	52
3.2.4.4. Determinação de Volume e Massa no Interior da Célula Experimental	53
3.2.5. Enchimento da Célula Experimental	53
3.2.6. Monitoramento das Medições em Campo e Realização de Ensaios de Laboratório	54
3.2.6.1. Recalques.....	54
3.2.6.2. Temperatura.....	56
3.2.6.3. Análises Microbiológicas	57
3.2.6.3.1. Determinação de Coliformes Totais e Termotolerantes	60
3.2.6.3.2. Anaeróbios e Aeróbios Totais	61
3.2.6.3.2.1. Semeadura de Anaeróbios Totais	61
3.2.6.3.2.2. Semeadura de Aeróbios Totais	63
3.2.6.3.3. Fungos	63
3.2.6.4. Análises Físico-químicas.....	64
3.3. Análise Estatística	65
4. Resultados e Discussões	67
4.1. Caracterização dos Resíduos Sólidos Depositados na Célula Experimental.....	68
4.1.1. Caracterização Física.....	68
4.1.1.1. Teor de Umidade	73

4.1.1.2. Temperatura.....	77
4.1.1.2.1. Temperatura em Função do Tempo.....	77
4.1.1.2.2. Temperatura em Função da Profundidade.....	80
4.1.1.2.3. Temperatura Externa à Célula Experimental	82
4.1.2. Caracterização Físico-Química	83
4.1.2.1. Potencial Hidrogeniônico (pH).....	83
4.1.2.2. Alcalinidade Total	84
4.1.2.3. Ácidos Graxos Voláteis	85
4.1.2.4. Cloretos.....	87
4.1.2.5. Demanda Química de Oxigênio (DBO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	89
4.1.2.6. Sólidos Totais Voláteis.....	92
4.2. Recalques.....	94
4.2.1. Recalques por Placas	94
4.2.2. Velocidade da Degradação da Matéria Orgânica – Constante de Bioestabilização K.....	100
4.2.3. Recalques versus Matéria Orgânica	104
4.2.4. Dados Microbiológicos e sua Relação com os Recalques.....	112
4.2.4.1. Microbiologia	112
4.2.4.2. Recalques em Função dos Microrganismos Anaeróbios.....	115
4.3. Estatística Aplicada aos Dados Coletados.....	119
4.3.1. Estatística Descritiva	119
4.3.2. Teste de Normalidade.....	121
4.3.3. Análise de Variância (ANOVA).....	121
4.3.4. Análise de Componentes Principais (ACP).....	123
5. Conclusões e Sugestões para Futuras Pesquisas	131
5. 1. Conclusões	131
5. 2. Sugestões para Futuras Pesquisas.....	132
Fundamentação Teórica.....	134

Listas de Figuras

Figura 1: Interações físicas, químicas e biológicas em aterros de RSU (Monteiro <i>et. al.</i> ,2006).....	19
Figura 2: Representação esquemática do ecossistema aterro sanitário (SENIOR & BALBA, 1987)26	
Figura 3:Diagrama Esquemático do Fluxo de Carbono no Processo de Digestão Anaeróbia adaptado de METCALF & EDDY, 2003.	31
Figura 4: Desenho esquemático de uma Célula de RSU sofrendo recalque (linha pontilhada).....	34
Figura 5: Célula Experimental localizada em um terreno cedido pela UFCG.	44
Figura 6: Croqui da célula experimental construída em local cedido pela UFCG.	45
Figura 7: Piezômetro para o monitoramento do nível de líquidos	46
Figura 8: Quatro termopares do tipo K e termômetro elétrico	47
Figura 9: Medidores de recalques superficiais e em profundidade.....	47
Figura 10: Tubo para drenagem de gases	48
Figura 11: Procedimentos para determinação da composição gravimétrica dos RSU.....	50
Figura 12: Determinação da composição volumétrica.	51
Figura 13: Determinação da massa específica solta dos resíduos.....	52
Figura 14: Descarregamento, homogeneização do material e divisão das pilhas	54
Figura 15: Placas de recalque seperfciais e dispostas sobre a camada de cobertura da célula experimental	55
Figura 16: Placa de recalque magnética em profundidade (detalhe) no interior do biorreator sobre a camada de base e sendo coberta por RSU	55
Figura 17: Ohmímetro analógico, modelo FT-1000A.....	56
Figura 18: Orifícios laterais (detalhes) para coleta de amostras em diferentes profundidades	58
Figura 19: Amostrador(Trado helicoidal) para retirada de amostras dos resíduos nos orifícios laterais.....	58
Figura 20: Esquema das diluições sucessivas e inoculações	59
Figura 21: Procedimento experimental após as diluições e a leitura estatística (NMP) para combinações de 3 tubos para os microrganismos das diversas espécies pesquisadas.	59
Figura 22: Tubos do ensaio confirmativo de coliformes totais	61
Figura 23: Ensaio para Anaeróbios Totais.....	62
Figura 24: Croqui da célula experimental mostrando em detalhes a posição das camadas de resíduos	67
Figura 25: Composição Gravimétrica dos Resíduos	68
Figura 26: Composição volumétrica dos resíduos sólidos urbanos soltos.	69
Figura 27: Composição volumétrica dos resíduos sólidos urbanos compactados.....	70
Figura 28: Teor de Umidade em Função do Tempo e da Profundidade	74
Figura 29: Evaporação <i>versus</i> Precipitação em Função do Tempo.....	75
Figura 30: Temperatura em Diferentes Profundidades em Função do Tempo	78
Figura 31: Temperatura em Função do Tempo e da Profundidade	80
Figura 32: Potencial Hidrogeniônico (pH) em Diferentes Profundidades e ao Longo do Tempo	83
Figura 33: Alcalinidade Total em Diferentes Profundidades e ao Longo do Tempo.....	84
Figura 34: Ácidos Graxos Voláteis em Função do Tempo e da Profundidade.....	85
Figura 35: Relação Ácidos Voláteis/Alcalinidade em Diferentes Profundidades e no Tempo	86
Figura 36: Cloretos em diferentes profundidades e ao longo do tempo	87
Figura 37: Demanda Química de Oxigênio (DQO) em Função do Tempo e da Profundidade	89
Figura 38: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em Função do Tempo e da Profundidade	90
Figura 39: Relação de DBO/DQO no tempo e em diferentes profundidades.	91
Figura 40: Análise de Sólidos Voláteis em Diferentes Profundidades e no Tempo.....	92
Figura 41: Recalques Superficiais e em Diferentes Profundidades e ao Longo do Tempo	95
Figura 42: Deformação Específica Superficial em Diferentes Profundidades ao Longo do Tempo .97	
Figura 43: Velocidade dos Recalques Superficiais e em Diferentes Profundidades ao Longo do Tempo	99
Figura 44: Constante de Bioestabilização da matéria orgânica- camada superior.....	100
Figura 45: Constante de Bioestabilização da matéria orgânica- camada intermediária	102
Figura 46: Constante de Bioestabilização da matéria orgânica- camada inferior.....	103
Figura 47: Recalques versus Sólidos Voláteis (Camada Superior)	106
Figura 48: Recalques versus Sólidos voláteis (Camada Intermediária)	107
Figura 49: Recalques versus Sólidos voláteis – Camada Inferior	108
Figura 50: Aeróbios Totais (UFC.g ⁻¹)	112
Figura 51: Anaeróbios Totais (NMP.1000.mL ⁻¹) em diferentes profundidades	113

Figura 52: Fungos (UFCg⁻¹) em diferentes profundidades e no tempo.....	114
Figura 53: Recalques versus Anaeróbios Totais no Nível Superior	116
Figura 54: Recalques versus Anaeróbios Totais no Nível Intermediário	117
Figura 55: Recalques versus Anaeróbios Totais no Nível Inferior.....	118
Figura 56: Análise das componentes principais-camada superior	124
Figura 57: Dendograma mostrando as distâncias Euclidianas entre as variáveis da camada superior	126
Figura 58: Análise das componentes principais-camada intermediária	127
Figura 59: Dendograma mostrando as distâncias Euclidianas entre as variáveis da camada intermediária	128
Figura 60: Análise das componentes principais da Camada Inferior	129
Figura 61: Dendograma mostrando as distâncias Euclidianas entre as variáveis da camada inferior	130
Figura 62: Coliformes Totai em diferentes profundidades e no tempo	154
Figura 63: Coliformes Termotolerantes em diferentes profundidades e no tempo	154

Lista de Quadros

Quadro 1: Parâmetros físico-químicos monitorados ao longo do tempo de monitoramento da célula experimental estudada.....	64
Quadro 2: Valores obtidos por meio da caracterização física dos RSU.....	72
Quadro 3: Variações de matéria orgânica e água durante o monitoramento da célula experimental	76
Quadro 4: Posição das placas de recalques no interior da célula experimental.....	94
Quadro 5: Recalques observados nas placas durante o tempo de monitoramento da célula experimental.....	96
Quadro 6: Percentagens de recalques devido ao peso próprio de rsu e a degradação da matéria orgânica	98
Quadro 7: Quantidade de matéria orgânica por extrato de RSU	106
Quadro 8: Quantidade da matéria orgânica inicial e transformada em outros constituintes.	110
Quadro 9: Variação da altura e de quantidade de rsu no tempo e na profundidade.	111
Quadro 10: Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques –camada superior	119
Quadro 11: Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques –camada intermediária	120
Quadro 12: Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques –camada inferior	120
Quadro 13: Valores Scree Plot para as análises em componentes principais	123
Quadro 14: Matriz de correlação dos parâmetros analisados na camada superior	155
Quadro 15: Matriz de correlação dos parâmetros analisados na camada Intermediária.....	156
Quadro 16: Matriz de correlação dos parâmetros analisados na camada inferior	157

Lista de Tabelas

Tabela 1: Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnof.	121
Tabela 2: Análise de variância para o teor de umidade	122
Tabela 3: Análise de variância para o teor de sólidos voláteis	122
Tabela 4: Análise de variância para Demanda Química de Oxigênio	123

Lista de Símbolos, Nomeclatura e Abreviações

ΔH	Variação de Altura
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACP	Análise de Componentes Principais
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
APHA	American Public Health Association
AWWA	American Water Works Association
C	Carbono
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono/gás carbônico
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DLU	Departamento de Limpeza Urbana
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EC	Coliformes Termotolerantes
Eh	Potencial Redox (Eh)
EXTRABES	Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários
Fe	Ferro
gl	Grau de Liberdade
H ₂	Gás Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio/Gás Sulfídrico
K	Coefficiente de Bioestabilização da matéria orgânica
Mn	Mangânes
MQ	Quadrado Médio
N ₂	Gás Nitrogênio
NH ₄	Amônia
NMP	Número Mais Provável
NO ₂	Nitrito
NO ₃	Nitrato
NTK	Nitrogênio Total Kjeldah
p_c	Massa Específica Compactada
PCA	<i>Plate Count Agar</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
p_s	Massa Específica Solta
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SQ	Soma dos Quadrados
SV	Sólidos Voláteis
t	Tempo
TF	Tanpão Fosfato
TRD	Tampão Redutor
UFC	Unidade Formadora de Colônias
UFCEG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
V	Volume
WEF	Water Environmental Federation
H	Altura

1. Introdução

Em aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU) os recalques ou redução da altura e volume da massa de resíduos são frutos da perda de massa sólida dos seus constituintes orgânicos ou então devido a rearranjos, distorções e outros fatores que façam com que os resíduos diminuam em volume e massa.

Os recalques em aterros de resíduos são tão importante que podem auxiliar na previsão da vida útil destes locais de disposição de resíduos e até o seu aproveitamento futuro.

O maior contribuinte para que os recalques ocorram é a matéria orgânica presente no interior da massa de resíduos e quanto maior a sua concentração, maior será o recalque. Os recalques em aterros são frutos de complexos processos de degradação biológica com inúmeras vias metabólicas e dependentes de fatores ambientais do interior da massa de resíduos e portanto a sua velocidade e magnitude podem variar de acordo com as flutuações físico-químicas e biológicas impostas.

De acordo com Wall & Zeiss (1995) os recalques em aterros sanitários de RSU podem variar de 25 % a 50 % em relação à altura inicial dos resíduos, e destes recalques pouco se sabe quanto de fato o teor de material orgânico degradável contribui para sua ocorrência.

Se em aterro de RSU, principalmente em países em desenvolvimento, a maior quantidade de seus constituintes se traduzem em matéria orgânica é importante definir quanto de fato à quantidade de matéria orgânica contribui para o recalque em termos percentuais? Qual é a velocidade da degradação da matéria orgânica e, portanto a velocidade dos recalques devido a estes fatores? Estas questões precisam ser respondidas para entender melhor o comportamento mecânico de uma maneira geral em aterros de resíduos sólidos urbanos.

Estas questões podem ser mais bem compreendidas se estudadas em células experimentais, especialmente, construídas para acondicionar RSU devido às condições conhecidas e/ou controladas. Em diversos locais do mundo e do Brasil há pesquisas sendo desenvolvido em células experimentais para se estudar o comportamento dos resíduos depositados, porém levando em consideração que cada localidade tem a suas peculiaridades. A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) é um exemplo de estudos bem sucedidos em células experimentais (ALCÂNTARA, 2007, ALVES, 2008,

MONTEIRO *et.al.*, 2006). No cidade de Campina Grande-PB pesquisas também estão sendo feitas em células experimentais a fim de melhorar o tratamento de RSU e até disponibilizar dados para construção de futuros aterros, já que a cidade não dispõe desta tecnologia e os resíduos são depositado a céu aberto (PEREIRA *et. al.*, (2010), MEIRA, (2009), LEITE (2008) e GARCEZ (2009).

Desta maneira o estudo desenvolvido neste trabalho se concentrou em estudar a matéria orgânica no comportamento dos recalques em uma célula experimental (biorreator) preenchida com resíduos sólidos urbanos que simulasse um aterro de RSU. E conforme Barlaz *et. al.*, (1989) uma célula experimental nada mais é que um modelo de aterros em escala laboratorial, cuja finalidade é simular e acelerar a decomposição aeróbia e anaeróbia dos resíduos, proporcionando o maior conhecimento dos processos microbiológicos.

Um dos motivos que proporcionou o estudo num biorreator foram os custos operacionais e construtivos do experimento bem como a eficiência do processo degradativo. Neste sentido o trabalho proporcionou resultados rápidos, inclusive para parâmetros de projeto, dimensionamento, construção e operação de aterros.

1.1. Objetivo Geral

Estudar o comportamento da matéria orgânica presente no interior de um biorreator de resíduos sólidos urbanos no que se refere a sua biodegradação e como estes influenciam os recalques ao longo do tempo e profundidade.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar os resíduos sólidos depositados na células experimental em função de parâmetros físico-químicos e biológicos;
- Estudar a variação do material orgânico biodegradável no tempo e em profundidade e correlacioná-la aos recalques ocorridos;
- Determinar a variação de volume dos RSU no tempo de monitoramento;
- Avaliar a constante de bioestabilização (K) da matéria orgânica nas diferentes profundidades em que os resíduos foram depositados na célula experimental;
- Determinar a velocidade dos recalques ao longo do tempo e profundidade;
- Verificar a influência do meio externo no interior da massa de resíduos;

- Correlacionar os dados estatisticamente para se determinar a significância do estudo.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Antecedentes e Estado Atual do Conhecimento

O monitoramento de recalques em aterros RSU, tem por objetivo avaliar, indiretamente, a velocidade de decomposição da matéria orgânica, bem como medir o abatimento ocorrido na massa sólida, de forma a se prever execuções de sobre-altura, ou mesmo, se fazer estimativas de tempo de vida útil do aterro (MELO, 2003). Entretanto, a efetiva participação da matéria orgânica em termos percentuais para se quantificar os recalques é ainda desconhecida.

No interior de aterro de RSU ocorrem processos aeróbios e anaeróbios de digestão da matéria orgânica (ALVES, 2008, ALCÂNTARA, 2007 e ARAÚJO *et.al.*, 2009). O processo anaeróbio é mais significativo na degradação da matéria orgânica, já que o oxigênio é rapidamente depletado após o aterramento dos RSU (MOREDA, 2000).

A digestão anaeróbia é um processo biológico que tem lugar na ausência de oxigênio e através do qual se verifica a degradação da matéria orgânica por ação de microrganismos, para produzir biogás e um produto digerido (FRANÇA JUNIOR, 2008). Esta definição traduz o conceito base comum a todos os tipos de processos de digestão anaeróbia, sejam eles, em aterros, estação de tratamento de esgoto ou células experimentais.

Conforme Leite *et. al.*(1997) é bastante complexo o processo de bioestabilização anaeróbia da fração orgânica putrescível aos resíduos sólidos urbanos. Pela própria constituição físico-química dos resíduos sólidos, e, em especial pela presença significativa de material celulolítico, são necessários longos tempos de operação para a bioestabilização completa da fração orgânica putrescível destes resíduos.

O processo de tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos acontece em várias etapas e sequenciais até ocorrer a bioestabilização da matéria orgânica com a formação de produtos finais tais como: CH₄, CO₂, NH₃, quantidades traços de outros gases e ácidos orgânicos de baixo peso molecular, entre outros (POLPRASERT, 1989).

Conforme Modesto *et.al.*, (2002) nos processos anaeróbios a taxa de decomposição é lenta e exige, portanto, um período de tempo bem maior para a bioestabilização da matéria orgânica. Isto se justifica porque nestes processos a maior parte do material orgânico biodegradável é convertida em biogás. Apenas uma pequena parcela dessa material orgânico é convertida em massa microbiana. Em princípio, todo o

resíduo, quer sejam de origem animal ou vegetal, são bioestabilizáveis anaerobiamente. No caso de resíduos de origem vegetal, somente os componentes contendo lignocelulose não sofrem bioconversão, ou se bioconvertem muito lentamente. Entretanto, conforme Melo (2003) e Monteiro (2006) a digestão anaeróbia de RSU acontece pela sucessão de diferentes espécies de microrganismos, incluindo, fungos que poderiam acelerar o processo de conversão de compostos como lignocelulose e celulose e materiais menos complexos.

A solução para se entender de fato qual é a influências em termos percentuais da matéria orgânica em recalques passa necessariamente em entender o que é um aterro de RSU.

O aterro de RSU é um sistema dinâmico, pois os resíduos são diferentes uns dos outros devido a sua composição e durante o processo de degradação são estabelecidas relações físicas, químicas, físico-químicas, biológicas e mecânicas que acontecem ao longo do tempo. Além da composição dos resíduos interferirem na biodegradação, existem também os fatores ambientais que estabelecem relações entre o ambiente externo, interno e a massa de resíduo, conforme a Figura 1.

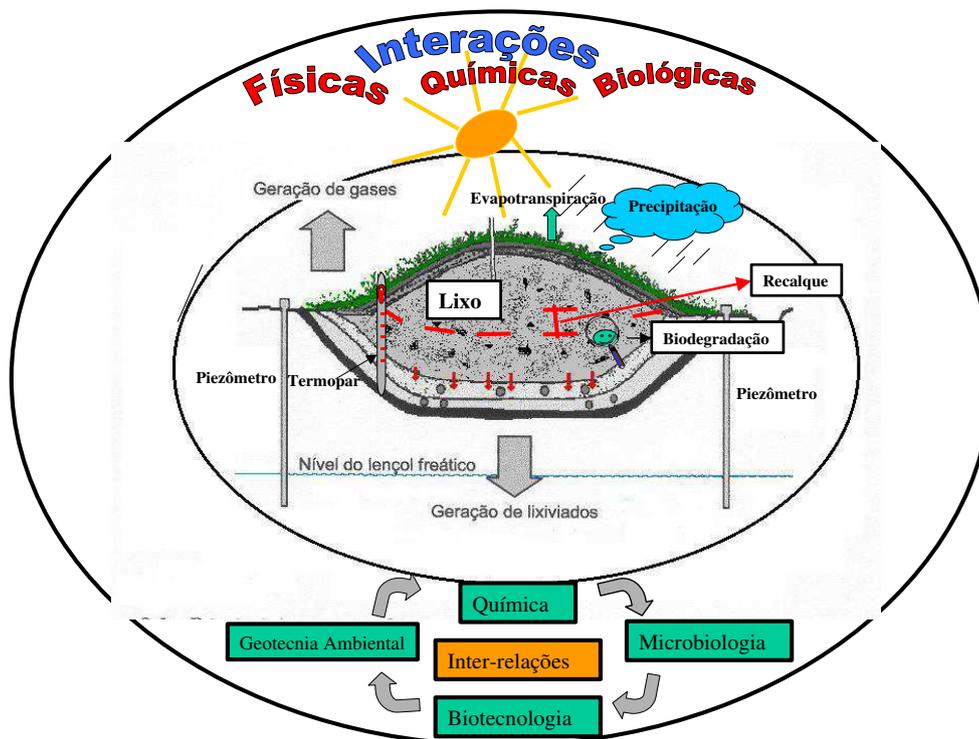


Figura 1: Interações físicas, químicas e biológicas em aterros de RSU (Monteiro *et. al.*, 2006).

Na Figura 1, nota-se que um aterro de RSU funciona como um ser vivo que está em constante interação com o meio ambiente. Na verdade uma célula de resíduos sólidos troca gases com o meio ambiente, “ingere” e produz líquidos, e os expulsa

através da camada de base e, ainda, pode ser influenciado e influencia o meio pela transferência de calor e umidade, energia e matéria. Portanto, uma célula de RSU é um sistema termodinâmico que obedecem a 1º e 2º Leis da termodinâmica.

Devido à abrangência dos diversos parâmetros que norteiam as interações físicas, químicas e biológicas que se estabelecem durante o processo degradativo em um aterro de resíduos sólidos urbanos, são abordados aqui alguns aspectos que são necessários para se entender os recalques ao longo do tempo e profundidade em função da degradação da matéria orgânica.

2.2. Resíduos Sólidos Urbanos

Existem várias definições para RSU e é conveniente abordá-las para um embasamento maior do trabalho que será aqui estudado.

Segundo a ABNT NBR 10.004 (2004) resíduos sólidos ou semi-sólidos são aqueles que “resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também resíduo sólido os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível.

Interessante definição de resíduos sólidos é a dada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305, 2010), que diz que são: “material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólidos ou semi-sólidos, 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 técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível”.

A mesma lei diz que 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”.

Talvez esta não seja a melhor definição para rejeitos, já que em um aterro de RSU a matéria orgânica pode ser convertida em biogás, por exemplo, o que pode ser

transformado em benefícios econômicos para quem o explora, inclusive, para o poder público.

A definição de RSU pode ser muito importante porque pode até limitar a sua exploração em face da lei. Portanto, seria melhor na elaboração da lei PNRS uma definição mais técnica e menos burocrática para até mesmo definir o uso potencial de aterros de RSU.

A norma ABNT NBR 10.004 (2004) –classifica os Resíduos em:

Resíduos de Classe I – perigosos, são estes os resíduos que requerem a maior atenção por parte do administrador, uma vez que os acidentes mais graves e de maior impacto ambiental são causados por esta classe de resíduos. Estes resíduos podem ser condicionados, armazenados temporariamente, incinerados, ou dispostos em aterros sanitários especialmente desenhados para receber resíduos perigosos.

Resíduos de Classe II-A – não inertes tais como os resíduos de **Classe II-B**. Os resíduos de **Classe II-A** podem ser dispostos em aterros sanitários ou reciclados, entretanto, deve ser observado os componentes destes resíduos (matéria orgânica, papéis, vidros e metais) a fim de que seja avaliado o potencial de reciclagem.

Resíduos de Classe II-B – inertes, podem ser dispostos em aterros sanitários ou reciclados.

Interessante que em todas as definições não se leva em conta o potencial econômico dos RSU uma vez dispostos em aterros. Atualmente, devido às constantes crises energéticas poderia se pensar em melhor utilizar a matéria orgânica destes resíduos para fins econômicos. Num país como o Brasil que a concentração de matéria orgânica varia de 50 a 70% nos RSU o potencial geração de biogás é enorme o que, sem dúvida, desafogaria o setor energético brasileiro .

2.2.1. Matérias Dispostos em Aterros e sua Interações com Microrganismos Presentes na Massa de Resíduos

Antes de ser adentrado na biodegradação dos materiais é preciso determinar o que é ciências e engenharia de matérias e sua relação com a sociedade e meio ambiente.

A ciência em engenharia de materiais está sempre inovando e buscando aprimorar os mais diversos tipos de materiais usados nas diversas áreas do conhecimento.

Segundo Cohen (1979) Os materiais têm estado tão intimamente relacionados com a emergência e ascensão do homem, que acabaram por dar nome a Idades da Civilização, como a Idade da Pedra, a Idade do Bronze e a Idade do Ferro. Ocorrendo naturalmente ou elaborados pelo homem, os materiais têm se tornado parte integrante do cotidiano. Eles são, sem dúvida, a substância de trabalho da sociedade; desempenham uma função crucial não somente no desenvolvimento natural de vida, mas, também, no bem-estar e na segurança de nações.

Os Materiais são, obviamente, uma parte da matéria do universo; de forma mais específica, são as substâncias cujas propriedades as tornam utilizáveis em estruturas, máquinas, dispositivos, ou produtos consumíveis. Nelas se incluem os metais, as cerâmicas, os polímeros (plásticos), os semicondutores, os supercondutores, os vidros, os dielétricos, as fibras, a madeira, a areia, a pedra e vários conjugados (compósitos). Sua produção e seu processamento visando à obtenção de produtos acabados absorvem alta percentagem dos empregos e contribuem com grande parcela do produto interno bruto de um país (COHEN,1979, CALLISTER JR e WILLIAM, 2002).

Os materiais podem ser visualizados como que fluindo num vasto ciclo dos próprios materiais - um sistema global de transformação regenerativa. Materiais no estado bruto são extraídos da terra e convertidos em matérias-primas básicas, como lingotes metálicos, cimento, papel, produtos petroquímicos etc. Como brutos intermediários são então transformados em materiais de engenharia, como um fio eletrocondutor, um perfil estrutural de aço, concreto, componentes plásticos e compensados de madeira, atingindo-se assim o produto final que a sociedade requer. Após o seu desempenho a serviço do homem, estes materiais, já como sucata, percorrem um caminho de volta à terra, ou, preferivelmente, se possível e viável, repenetraram no ciclo de processamento para uso ulterior (CALLISTER JR E WILLIAM, 2002).

Um aspecto importante implicitamente revelado pelo ciclo dos materiais é a forte interação dos materiais com energia e meio ambiente, mostrando que estes segmentos têm um entrosamento, principalmente agora quando os habitantes deste planeta manifestam o mais profundo interesse pela questão da qualidade de seu espaço vital. Não se pode mais pensar em se confeccionar materiais especiais e avançados que tenham uma relação negativa com o meio ambiente. Callister Jr e William (2002) relatam que a qualidade do meio ambiente depende da habilidade de controlar a poluição do ar e da água e as técnicas de controle empregam diversos materiais. Pode-se

dizer que o ciclo de materiais é um sistema que entrelaça recursos naturais e necessidades humanas.

A disposição de diversos tipos de materiais deve ou deveriam levar em conta o micromundo dos átomos e dos elétrons até o gigantesco macromundo destes materiais a fim de permitir a sua degradação e até posterior regeneração a natureza. Sabe-se que os microrganismos atacam com seus poderosos arsenais enzimáticos os diversos tipos de materiais devido às interações de superfície. Alguns materiais, embora, parecidos quimicamente, não são degradados ou, até são, devidos a pequenas mudanças estruturais em seus arranjos atômicos. Esses arranjos podem permitir a aproximação ou não de certos microrganismos. Cabe salientar que os microrganismos possuem revestimentos (polissacarídeos, lipídios e proteínas) quimicamente carregados em sua estrutura externa que podem ser atraídos ou repelidos pelas cargas do ambiente.

Segundo Ubbink *et. al.*, (2007) a adesão de microrganismos a superfícies é um fenômeno que ocorre naturalmente e depende das propriedades superficiais (tensão superficiais, entalpia superficial por unidade de área, composição da superfície etc.) das interfaces dos suporte de adesão (aço, polímeros, mármore etc.) e das membranas do microrganismos. Além disso, as propriedades microbiológicas, as características do meio circundante, tais como temperatura, pH, força iônica e disponibilidade de nutrientes, determinam, em muitos sistemas, o processo de adsorção.

As características de duas superfícies interagentes, tais como hidrofobicidade, carga elétrica e condições ambientais, influenciam o processo de adesão. O entendimento da termodinâmica da adesão microbiana é importante, uma vez que possibilita prever se a adesão de uma determinada bactéria é favorável ou não em diferentes superfícies.

De acordo com Abbasnezhad *et al.*, (2008) as interações dos microrganismos com a interface do substrato no processo de adesão, podem ser específicas ou não específicas. Interações específicas envolvem o reconhecimento de um determinado sítio, de uma molécula receptora que se encontra na interface do microrganismo, enquanto a interação não específica é dirigida por propriedades físico-químicas das duas interfaces interagentes - microrganismo e superfície na adesão.

Logicamente, na confecção de um material que depois será descartado modificações em sua estrutura poderão acontecer. Até mesmo devido ao ambiente interno de um aterro de RSU outras modificações poderão ocorrer o que poderão torná-lo mais facilmente degradável ou não. Estudos prevendo estas modificações estruturais

na superfície dos átomos sejam antes de serem descartados ou, posteriormente como, por exemplo, num ambiente agressivo de aterros de RSU, devem ser continuamente realizados a fim de melhorar a eficiências de processos degradativos sem geração de subprodutos mais tóxicos que os originalmente formados.

Com o conhecimento dos parâmetros físico-químicos da superfície é possível desenvolver novas estratégias, que tornem a superfície mais atrativa para os microrganismos.

Os engenheiros de materiais se enquadram no processo de geração e confecção de produtos para consumo e, ainda mais hoje, no descarte final desses compostos. A formação de um novo artefato deve, também, ser analisada quanto a sua desintegração quando não mais utilizado pela sociedade para que não haja toxidez para o homem e meio ambiente.

2.2.2. Resíduos Sólidos Urbanos no Contexto da Durabilidade, Reciclagem de Materiais e Aproveitamento Energético

Resíduos sólidos são materiais heterogêneos (inertes, minerais e orgânicos), resultantes das atividades humanas e da natureza, os quais podem ser parcialmente utilizados, gerando, entre outros aspectos, proteção à saúde pública e economia de recursos naturais. Os resíduos sólidos podem constituir problemas sanitários, ambientais, econômicos e estéticos. Entretanto, pode ocorrer o aproveitamento de resíduos poliméricos, cerâmicos, metálicos e orgânicos para os mais diversos fins, inclusive, produção de energias mais limpas.

O aproveitamento energético dos resíduos pode acontecer através da utilização do seu poder calorífico por meio da incineração; da gaseificação; do aproveitamento calorífico do biogás produzido a partir desses resíduos; ou da produção de combustível sólido a partir de restos de alimentos.

No caso de biogás que é formado a partir da degradação da matéria orgânica, este é composto por uma mistura de gases, sendo os principais componentes o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), que é um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global cerca de 21 vezes maior se comparado ao CO_2 (LINS *et.al.*, 2005).

O mecanismo de formação de gases em aterros de resíduos urbanos é muito complexo devido à diversidade de materiais e compostos presentes e por suas possíveis interações físico-químicas e biológicas ao longo do tempo. Durante o período de decomposição dos resíduos, os processos microbiológicos são predominantes na

formação dos gases. No entanto, existem outros mecanismos envolvidos que atuam ora isoladamente, ora associados com a microbiologia, na transformação das substâncias em gases (MACIEL, 2003).

Os aterros podem gerar cerca de até 125 m³ de gás metano por tonelada de lixo em um período de 10 a 40 anos. Segundo a CETESB (2002) geração de gás no Brasil é de 677 Gg/ano, podendo representar cerca de 945 milhões de m³/ano. Assim os resíduos sólidos urbanos podem se tornar uma fonte quase que inesgotável de produção de biogás.

Outra fonte bastante grande de lucros poderia ser a reciclagem dos resíduos que chegam aos aterros ou a transformação destes compostos. O Instituto de Pesquisas do meio ambiente e Higiene de Beijing desenvolveu um processo para misturar lixo em argila para produzir tijolos. Em apenas alguns meses, uma olaria fabricou cerca de 54 milhões de tijolos, consumindo 46.884 toneladas de lixo (RECYCLE). Em se tratando de Brasil, poderia-se diminuir o déficit de moradias com esta técnica de fabricação de tijolos.

No Brasil, nas grandes cidades, segundo Valério Filho (2004), o lixo doméstico produzido já está em torno de 0,8kg per capita. Isto indica a crescente necessidade, no país, de programas que tratem os resíduos gerados de forma adequada, e que possam, além de combater a poluição, gerar riquezas e empregos.

No que se refere a durabilidade dos resíduos esta pode ser variável, mas o que menos se quer em se tratando de resíduos sólidos é que eles durem para sempre. Na verdade o que se quer é que eles sejam degradáveis com pequenos impactos ambientais e proporcionem recalques. Neste sentido os engenheiros de materiais podem estudar, aprimorar e propor materiais que após um determinado uso possam ser degradáveis quando dispostos em aterros de RSU. No caso da célula experimental foram encontrados inumeros materiais que tem uma durabilidade bastante variável, mas sem dúvida os que mais preocupam são os plásticos. Não só pelo seu impacto ambiental, mas também por criarem condições de degradabilidade dos demais resíduos até certo ponto desconhecidas e desfavoráveis ao processo. O plástico é um material que pode ser degradável se a superfície de contato com os microrganismos for modificada. Neste caso teria-se os plásticos biodegradáveis que podem ser transformados em água, dióxido de carbono (CO₂) e algum material biológico. É importante reconhecer que o plástico biodegradável não é necessariamente produzido por material biológico, ou seja, por

plantas. Vários plásticos biodegradáveis são igualmente produzidos a partir do petróleo como os convencionais (ABAM, 2006).

2.3. Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com Alcântara (2007) aterros de resíduos sólidos são ambientes dinâmicos onde acontecem reações metabólicas num ambiente formado pela massa de resíduos com suas características físico-químicas e suas inter-relações formando um sistema complexo conforme apresentado pela Figura 2.

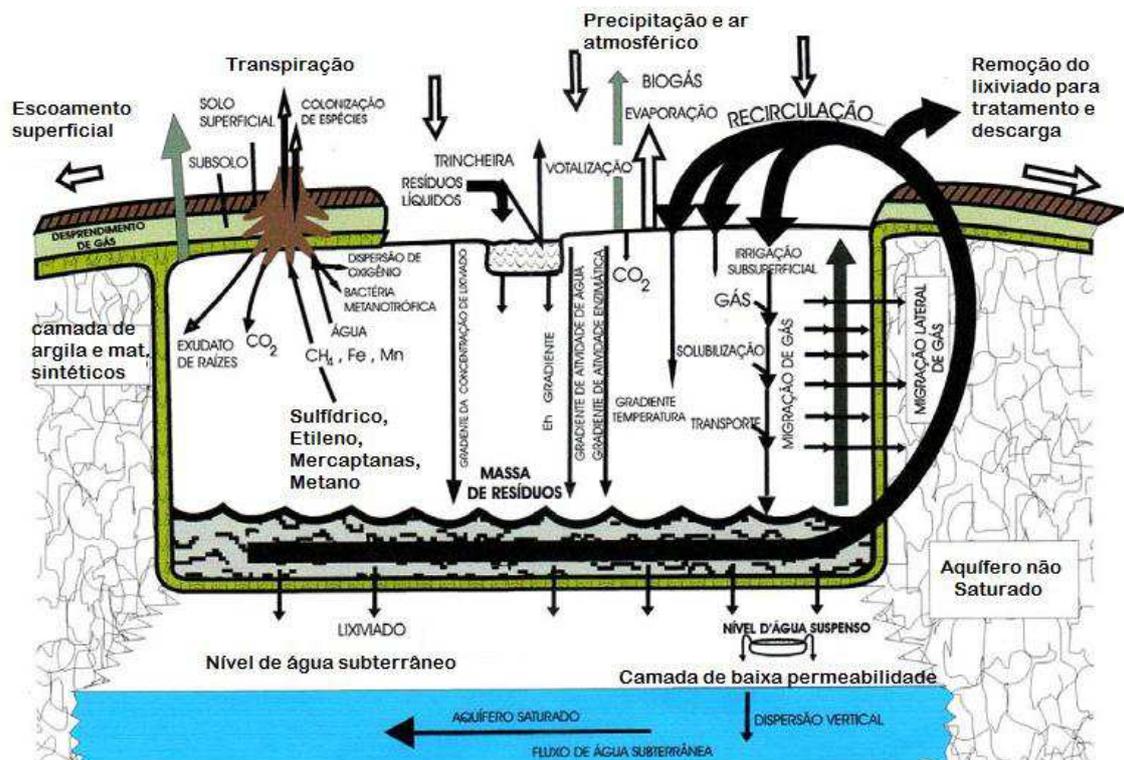


Figura 2: Representação esquemática do ecossistema aterro sanitário (SENIOR & BALBA, 1987)

Ainda segundo Alcântara (2007) um aterro de RSU é um sistema que possui características próprias, mas mutável de acordo com o local de instalação. Por exemplo, ambientes com mais precipitações podem afetar a umidade interna dos resíduos e por consequência influenciar na biota microbiana, biodegradação, toxicidade e parâmetros físicos e químicos. Assim, quando se estuda um aterro de RSU, tem-se que levar em consideração o local de instalação.

É evidente a necessidade de se promover uma gestão adequada das áreas de disposição de resíduos, no intuito de prevenir ou reduzir os possíveis efeitos negativos ao meio ambiente ou à saúde pública. A busca de soluções tem envolvido, sobretudo, a recuperação técnica, social e ambiental de áreas de disposição de RSU inadequadas. Metodologias de recuperação de lixões e aterros são desenvolvidas devido à

necessidade de implantação de mecanismos de inertização da massa de lixo objetivando o fechamento do lixão e/ou aterro ou o prolongamento da vida útil destes locais. Neste sentido viabilizar uma degradação rápida da matéria orgânica se faz necessário, pois quanto maior a sua degradação mais rápida será a utilização destes locais.

2.4. Células Experimentais de Resíduos Sólidos Urbanos ou Biorreatores

No intuito de conhecer melhor o funcionamento de aterros de RSU e entender como eles sofrem perda de massa e recalque devido à decomposição dos resíduos, esforços mecânicos e processos químicos, as células experimentais representam uma técnica bastante interessante. Estas células experimentais auxiliam na obtenção de parâmetros para projetos, dimensionamento, construção e monitoramento de aterros.

Uma célula experimental é um sistema que permite uma aceleração induzida do processo de decomposição dos resíduos de maneira controlada. Isto está de acordo com Barlaz *et al.*, (1989) que diz que o estudo do comportamento de aterros tem sido facilitado através de modelos de aterros em escala experimental que simulam e, aceleram a decomposição aeróbia e anaeróbia dos resíduos.

E Segundo Melo (2003) as células experimentais executadas e controladas corretamente, reduzem os impactos ambientais, pois controlam a produção de lixiviados e as emissões de biogás, reduzindo assim a contaminação do solo e as emissões de gás ao ambiente.

As células experimentais podem aperfeiçoar as condições para decomposição microbiológica e acelerar a estabilização da massa de resíduos permitindo a disposição adicional de RSU ou reuso mais rápido do aterro. São projetadas geralmente para que a água de infiltração da chuva nos resíduos seja feita sob condições controladas. O gerenciamento adequado destes parâmetros pode levar a estabilização muito rápida dos resíduos e a ritmos de alta produção de metano (BORGLIN *et al.*, 2004).

Estudos em células experimentais foram desenvolvidos por Leite (2008), Garcez (2009), Meira (2009) e Pereira *et al.*, (2010) na cidade de Campina Grande para avaliar alguns parâmetros do comportamento da massa de resíduos. Estas células experimentais foram dotadas de sistemas de drenagem de líquidos e gases, medição de nível dos líquidos, medidores de recalque, temperatura, concentração e fluxo de gases da massa de resíduos proporcionando o conhecimento de diversos parâmetros sob condições controladas. Nos estudos destes pesquisadores, os resultados obtidos podem ser

aplicados em aterros de escala real. Seus estudos entre outros aspectos analisaram o comportamento de aterros de RSU e seus diagnósticos podem ser aplicados a locais que tem condições meteorológicas semelhantes ao de Campina Grande, ou seja, com poucas precipitações anuais e altas evaporações de líquidos. Deve-se destacar, que até então, não havia estudos em Células experimentais na região para o melhor entendimento dos parâmetros físico, químicos e biológicos dos resíduos.

Outros trabalhos abordam o comportamento de RSU a partir de experimentos em escala reduzida. Mannapperuma & Basnayake (2004) analisaram o monitoramento de três células experimentais de campo com secção transversal circular com 1,3m de diâmetro e 2,32m de altura, construídos com tubos de concreto pré-moldados. Duas das células experimentais foram preenchidas com resíduos frescos, sendo que uma simulava um lixão a céu aberto (sem camada de cobertura), e a outra, um aterro sanitário. A terceira também simulando um aterro foi preenchida com resíduos antigos provenientes de aterros.

Swati *et al.* (2005) apresentaram os resultados preliminares do comportamento de resíduos sólidos urbanos aterrados em duas células experimentais, construídos com anéis de concreto, com altura total de 3m e diâmetro de 1,3m. Nos experimentos, monitorados durante 4 meses, utilizaram-se resíduos frescos, simulando as condições de um vazadouro a céu aberto e de um aterro como biorreator. Analisaram-se os recalques e as características dos lixiviados gerados, como volume, pH, DBO, DQO, sólidos totais, nitrogênio total e concentração de alguns metais dentre outros.

Alcântara (2007) abordou em sua pesquisa o comportamento geral de Células experimentais e o processo evolutivo de degradação dos resíduos aterrados, considerando-se as condições meteorológicas locais e a composição dos resíduos. Para isso, foram construídas duas células experimentais de formato cilíndrico, com um volume interno de, aproximadamente, 10m^3 na área do Aterro de Resíduos Sólidos de Muribeca, localizado no Município de Jaboatão dos Guararapes (PE), que faz parte da Região Metropolitana do Recife (RMR). Um das células experimentais foi construída em agosto de 2004, no final do período chuvoso, e o outro, em julho de 2005, em pleno período de chuvas. Em cada célula experimental, foi confinado um volume de, aproximadamente, 8m^3 de RSU, provenientes de três bairros da cidade do Recife-PE. Na primeira célula experimental, utilizaram-se resíduos com 45% de matéria orgânica e, no outro, com 59%. Foram analisados os dados da caracterização dos elementos que compõem os aterros simulados e os resultados do monitoramento de sólidos, líquidos e

gases, que envolveu medições de campo (temperatura, recalques da massa de RSU e concentrações de CH₄, CO₂ e H₂S) e coleta periódica de amostras para análises laboratoriais de vários parâmetros, como: teor de umidade, concentrações de microrganismos aeróbios e anaeróbios, sólidos voláteis, Eh, pH, DBO, DQO, nitrato, amônia, metais, carbono, hidrogênio e nitrogênio.

Os resultados obtidos por Alcântara (2007) são importantes para locais de condições meteorológicas tropicais e com características daqueles resíduos estudados. Deve-se levar em conta que as características dos resíduos são de fundamental importância para entender o comportamento mecânico de um aterro ou células experimentais.

Outros estudos merecem destaques porque reatores em escala reduzida passaram a ser empregados em escalas maiores. Segundo Reddy (2006) Aterros/Biorreator (Células experimentais em escalas maiores) preenchidos por RSU estão recebendo uma grande atenção por parte dos profissionais da área ambiental em vários locais do mundo, pois oferecem uma forma sustentável para a degradação de resíduos. Eles também oferecem reduções significativas no pós-encerramento de gestão, como resultado de um prazo reduzido para lixiviados de aterro e geração de gás para reutilização de áreas. Entretanto projetos de aterros/biorreator requerem uma cuidadosa avaliação das questões tão diversas como a engenharia de lixiviados/distribuição de umidade, a degradação de resíduos, geração de gás e estabilidade de taludes.

Um aterro/biorreator, localizado a Noroeste de San Jose, Califórnia - Estados Unidos da América está sendo estudado (células com dimensões de 30mx30m e 15m de profundidade – 13500m³) com a finalidade de otimizar a energia, acelerar a estabilização e controlar o gás migratório bem como explosão nas proximidades de aterros (REDDY, 2006).

Na verdade um “aterro/biorreator” de resíduos sólidos urbanos (RSU) usa métodos avançados de processos bioquímicos para transformar e estabilizar a decomposição dos resíduos orgânicos em pouco tempo (normalmente 5 a 10 anos) em relação tempo (tipicamente 30-100 anos) para os aterros de RSU convencionais.

Estes estudos evidenciam a utilidade e importância de Células experimentais e como a sua empregabilidade está sendo cada vez mais atuante, já que há um número sempre crescente de resíduos sendo gerados.

2.5. Biodegradação em Aterros

As possíveis soluções para os resíduos lançados no meio ambiente podem abrigar diferentes processos biológicos, cujo objetivo é a biodegradação de compostos poluentes em compostos mais simples, em outras palavras, a mineralização completa de moléculas orgânicas. Alguns processos podem gerar ainda, produtos finais de valor energético.

De acordo com Hirsch (2002) a biodegradação em aterros sanitários pode-se dividir em duas fases: a primeira, denominada aeróbia, que começa, inclusive, antes de depositados os resíduos no aterro sanitário, e se deve a presença de microrganismos nos resíduos sólidos e nos solos de cobertura. A segunda fase, denominada anaeróbia, começa quando o oxigênio residente nas porosidades se esgota por consumo dos microrganismos ou foi expulso dos vazios por processo de compressão. Durante o resto do processo a biodegradação não cessará até que o substrato esteja completamente degradado pelas bactérias que dele se alimentam, ou as condições ambientes impeçam a atividade destes microrganismos.

McBean *et al.* (1995), descrevem os princípios da decomposição em aterros sanitários, comparando-os a reatores bioquímicos anaeróbios.

A digestão anaeróbia pode ser considerada como um sistema onde diversos grupos trabalham interativamente e sucessivamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, água, gás sulfídrico e amônia além de novas células bacterianas (CHERNICHARO, 1997).

Embora seja um processo natural, a decomposição dos RSU em um aterro sanitário é um processo complexo e para que ocorra um crescimento bacteriano satisfatório, todos os microrganismos necessitam de condições mínimas para sobrevivência e posterior reprodução. Portanto, as fontes de nutrientes, oxigênio, pH, umidade e temperatura ideais são fatores essenciais para o seu desenvolvimento (MELO 2003).

O Diagrama Esquemático do Fluxo de Carbono no Processo de Digestão Anaeróbia adaptado de Metcalf & Eddy (2003), apresentado na Figura 3, indica as etapas básicas do processo biológico que podem ser observadas segundo duas fases, acidogênica e metanogênica, contudo diversas rotas metabólicas podem ocorrer com diversos grupos microbianos agindo (CHERNICHARO, C. A. de L., 2008).

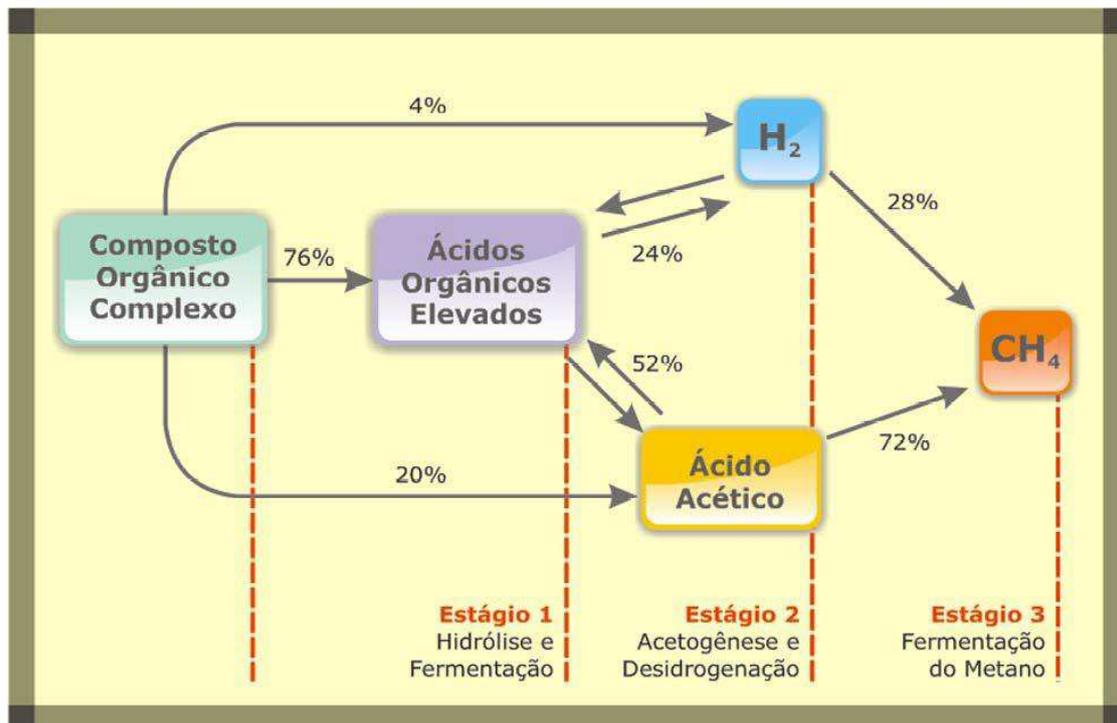


Figura 3: Diagrama Esquemático do Fluxo de Carbono no Processo de Digestão Anaeróbia adaptado de METCALF & EDDY, 2003.

Conforme Chernicharo (2007) basicamente existem três tipos de grupos de bactérias que participam do processo de decomposição anaeróbia:

- As **fermentativas** que, por hidrólise, transformam os compostos orgânicos complexos (polímeros) em compostos mais simples (monômeros), sendo que estes últimos são transformados em acetato, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e outros produtos como glicose;
- As **acetogênicas**, ou produtoras de hidrogênio, que convertem os produtos gerados pelo primeiro grupo em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- As **metanogênicas** que utilizam os substratos produzidos pelas bactérias do segundo grupo, transformando-os em CH₄ e CO₂. As bactérias metanogênicas são muito importantes para o processo, pois elas produzem gás insolúvel (CH₄), 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 se dá em quatro fases segundo Campos (1999). A primeira fase é a hidrólise, durante a qual a matéria orgânica particulada é convertida em compostos dissolvidos de menor peso molecular. As bactérias nesta fase lançam mão de seus arsenais enzimáticos degradando estes compostos complexos em outros mais simples. Uma vez transformados em compostos mais simples, estes podem atravessar a parede das bactérias fermentativas. Nesta fase, vários são os fatores que interferem na velocidade que ocorre a hidrólise, tais como temperatura operacional, tempo de residência, composição do substrato, tamanho das partículas e pH do meio. Logo após tem-se a fase de acidogênese, em que os compostos dissolvidos na fase de hidrólise são absorvidos e metabolizados pelas células fermentativas, sendo convertidos em compostos mais simples, incluindo, ácidos graxos voláteis, alcoóis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas.

Na terceira fase, denominada acetogênica, tem-se a conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam o substrato apropriado para as bactérias metanogênicas a fim de produzir metano tais como: acetato, hidrogênio e dióxido de carbono.

A quarta fase é a metanogênese. Nesta fase o metano é produzido por bactérias acetotróficas, a partir da redução do ácido acético, ou pelas bactérias hidrogenotróficas, reduzindo dióxido de carbono.

Ainda, segundo os autores, caso os despejos contenham compostos de enxofre, pode ocorrer ainda a sulfatogênese na qual ocorre a redução de sulfato e formação de sulfetos.

É importante ressaltar o papel dos microrganismos no consumo e produção de gases em aterros de RSU, gases estes que afetam, tanto a biota microbiana, como, também, o comportamento desses aterros.

Junqueira (2000) classifica a geração de gases em um aterro em cinco fases:

Fase 1- Aeróbia. Nesta fase o oxigênio está presente e favorece o desenvolvimento de fungos e bactérias e acontece logo após o aterramento dos resíduos. É um período de adaptação dos microrganismos, pela aclimatação às condições ambientais (umidade, temperatura etc.).

Fase 2- Anaeróbia ácida. Ocorre até 2 meses após o aterramento. É caracterizada pela queda brusca do pH em função da pressão parcial do CO₂ e da presença acentuada de ácidos orgânicos. Nesta fase ocorre a presença de hidrogênio,

sendo este muito importante para a metanogênese. O hidrogênio tem como fonte os ácidos orgânicos de cadeia longa, onde as bactérias homoacetogênicas (que podem fermentar amplo espectro de compostos de um carbono a ácido acético) precursoras, portanto, das metanogênicas, encontram sua energia para a produção de acetato, hidrogênio e dióxido de carbono.

Fase 3- Metanogênica instável. Até dois anos após o aterramento, sendo caracterizada pela produção de metano, contudo, de maneira descontínua.

Fase 4- Metanogênica estável. Até 10 anos após o aterramento. É caracterizada pela produção intensa de metano e dióxido de carbono em proporção de 1:1.

Fase 5- Fase de maturação final. Nesta fase ocorre a bioestabilização da matéria orgânica e decréscimo da produção de metano.

Embora a biodegradação do RSU seja colocada em diversas fases ou etapas separadas, deve-se levar em conta que a biodegradação dos resíduos dá-se em consórcio de diversos grupos bacterianos e que as fases ou etapas do processo se realizam muitas vezes e simultaneamente (Monteiro, *et al.*, 2006). Também é necessário compreender que as fases ocorrem em função de agentes precursores. Condições favoráveis devem existir para que ocorra determinada fase. E muitas vezes esta condição favorável é determinada por grupos microbianos antecessores

É importante ressaltar que a degradação da matéria orgânica é um objetivo dos aterros de RSU, mas esta deve ser monitorada para evitar problemas mecânicos funcionais. A disposição dos materiais componentes da massa de resíduos pode formar bolsões de biogás que eventualmente podem estar sujeitos a explosões quando comprimidos pelo próprio peso, além de proporcionar recalques diferenciais que podem comprometer a funcionalidade de aterros e a instabilidade de taludes.

2.6. Propriedades Mecânicas dos Aterros de RSU e Células Experimentais

Nascimento (2007) relata que as principais propriedades mecânicas de RSU (resistência ao cisalhamento e a compressibilidade) são influenciadas pela composição e estado de alteração dos resíduos, bem como pelo comportamento mecânico individual de cada componente. Ele ainda diz que a informação sobre estas propriedades é escassa e em alguns casos contraditórias.

Os ensaios convencionais de mecânica dos solos são empregados para se avaliar estas propriedades mecânicas. Entretanto, em algumas situações adaptações podem ser usadas com bastante sucesso.

No que se refere à estabilidade de um aterro de RSU, pouco ou nada, se sabe sobre a participação da matéria orgânica neste aspecto. A matéria orgânica putrescível com o tempo sofre a biodegradação e isto ocasiona perturbações internas em um aterro de RSU. Se por um lado é importante que haja a sua degradação por outro isto pode fazer com que a estabilidade de um aterro seja comprometida. Um dimensionamento correto de aterros deve, obrigatoriamente, passar por aspectos como:

- A matéria orgânica contribui quanto em termos percentuais na redução de volume de um aterro?
- Qual é cinética (ou velocidade) de degradação da matéria orgânica putrescível nas condições impostas no local da edificação;

Estas perguntas precisam ser respondidas para a viabilidade econômica, técnica e ambiental.

2.7. Recalques

Uma propriedade muito importante que está relacionada ao comportamento de aterros de RSU é a deformabilidade dos resíduos ali depositados. Conforme Nascimento (2007) os estudos de recalques são de grande importância para a avaliação dos seus componentes, tais como camadas de cobertura final, sistemas de drenagem de líquidos e gases, entre outros aspectos. A ainda para usos futuros da área. Kudrna (2009) e SHARMA (2007) mostram em seus trabalhos a importância de se avaliar recalques para prever o uso da área para outras atividades com um mínimo de segurança possível.

Os mecanismos de recalques permitem a redução do volume ao longo do tempo da massa de resíduos. Essa diminuição no volume (Figura 4) é devida, principalmente, ao próprio peso dos resíduos e biodegradação da matéria orgânica com expulsão de gases e líquidos dos vazios formados (MONTEIRO *et al.*, 2006).

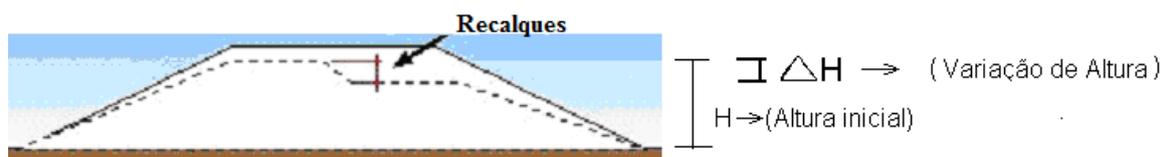


Figura 4: Desenho esquemático de uma Célula de RSU sofrendo recalque (linha pontilhada)

Conforme Wall & Zeiss, (1995) os recalques em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos variam de 25 % a 50 % em relação à altura inicial dos resíduos. Os resíduos dentro de um aterro sanitário, principalmente no Brasil, são compostos em sua grande maioria de material degradável biologicamente, resultando em contínua “movimentação” do local, já que com a degradação, transformações de matéria ocorrem e volumes se transformam rapidamente, resultando em espaços vazios que em um próximo momento serão ocupados por outros materiais, conseqüentemente variando a geometria das células de lixo.

Além de se compreender e mensurar os recalques em uma célula de RSU é interessante prever o tempo de ocorrência deste fenômeno após o fechamento das células de resíduos (NASCIMENTO, 2007).

A importância de se prever recalques e sua velocidade em aterros sanitários podem-se resumir em: determinar com maior precisão a capacidade volumétrica do aterro, prever recalques diferenciais que podem provocar rupturas nos sistemas de coberturas e prever o momento nos quais estes deslocamentos cessarão. Isto facilita a estimativa da vida útil do aterro com maior precisão, estimativa do momento adequado de realizar as obras de cobertura com menor risco de falhas devido a recalques diferenciais, e condicionar o uso futuro do local (PEREIRA *et al.*, 2010)

De acordo com Ouvry *et. al.*, (2005) os principais mecanismos envolvidos no processo de recalques são:

- Compressão física devido à distorção mecânica, dobras, trituração e reorientação;
- Ravinamento interno devido à migração de pequenas partículas nos vazios entre as partículas de grandes dimensões;
- Comportamento viscoso e consolidação envolvendo tanto o esqueleto sólido e as partículas individuais;
- Modificações químicas, físicas, tais como a corrosão e oxidação;
- Biodegradação de compostos orgânicos

A engenharia geotécnica convencional define recalque como a deformação vertical positiva do terreno proveniente da aplicação de cargas externas ou do seu peso próprio. No caso de aterros de RSU estes recalques podem ser definidos como deslocamentos verticais descendentes da superfície do aterro, provocados por cargas externas, peso próprio dos resíduos ou camada de cobertura e principalmente devido aos complexos processos de degradação biológicas dos resíduos depositados.

2.7.1. Evolução dos Recalques em Aterros de Resíduos Sólidos

Melo (2003) relata que os recalques que ocorrem na massa de lixo constituem um aspecto de especial relevância prática e têm sido citados como um dos principais problemas operativos. Ainda, segundo este autor, deve-se levar em consideração que os recalques não só repercutem nos aspectos estruturais da obra, mas também no que diz respeito ao aproveitamento do volume. Entender a evolução dos recalques diferenciais, também é de suma importância. Este último pode causar danos a uma cobertura corretamente projetada e construída, conforme Nascimento (2007), bem como, ao sistema de drenagem de líquidos e gases. Além do mais, tais recalques podem gerar instabilidades na massa de lixo e/ou deslizamentos de taludes.

Além de se entender o comportamento dos recalques superficiais é importante também conhecer as deformações que se dão ao longo da profundidade da massa de lixo, pois, como cada camada de resíduos pode apresentar diferentes velocidades de degradação, é possível verificar a magnitude e velocidade de deformação dessas camadas ao longo do tempo e, portanto, estimar o grau de sua compressão, além de se avaliar como a biodegradação ocorre (condições aeróbias, anaeróbias etc.).

Em aterros de RSU acontecem três tipos de recalques: imediatos ou elásticos, primários e secundários. Tais recalques são devido a processos físicos, químicos e biológicos. Segundo Wall e Zeiss (1995), os recalques em aterros ocorrem devido à compressão inicial, à compressão primária e à secundária. A compressão imediata ou inicial é o resultado de pressões externas impostas por máquinas compactadoras no instante inicial da disposição. Dependendo da maquinaria utilizada e da densidade que se deseja, o recalque imediato será mais expressivo ou não, uma vez que os recalques provenientes de carregamentos feitos na superfície do terreno podem ser estimados pela teoria da elasticidade ou pela analogia edométrica. Se por um lado, conforme Marques *et al.*, (2002), a densificação dos resíduos sólidos permite a ampliação da vida útil do aterro, por outro lado, segundo Moreda (2000), uma compactação quando excessiva nesta fase pode dificultar o fluxo de umidade no interior da massa resíduos e, por sua vez, a biodegradação. Este autor ainda comenta que o recalque imediato não apresenta relação alguma com a biodegradação, pois ele é instantâneo.

O recalque primário ocorre devido à expulsão de líquidos e gases do interior da massa de lixo, ou seja, dos espaços preenchidos por estes fluidos. Isto tem sido considerado como um processo de consolidação, porém com um baixo valor de saturação do lixo e alta condutividade dos fluidos intersticiais (lixiviados e gases). A

compressão primária é mais bem considerada como um tipo de *creep* plástico (Landva, Valsangkar & Pelkey, 2000) como resultado de um amolecimento físico ou deslizamento de certos componentes tais como: papel ou papelão, possivelmente quando estes materiais entram em contato com o líquido (POWRIE, RICHARDS & BEAVEN, 1998). Sob condições não saturadas, como pode ser esperada em locais com resíduos recentes, a compressão primária é pequena em comparação à compressão inicial (Bjarngard & Edgers, 1990), e é difícil distinguir da compressão secundária.

Já o recalque secundário ocorre principalmente devido a biodegradação conforme Melo (2003). Este tipo de recalque se prolonga com o tempo e está relacionado com o decaimento biológico e o progressivo reacomodamento do esqueleto (Moreda, 2000). Alguns pesquisadores afirmam que a compressão secundária é geralmente devido à *creep* e, decomposição do esqueleto e pode continuar por muitos anos, acima de um século.

Melo (2003) ainda relata que os recalques secundários e primários podem acontecer simultaneamente e que estes assentamentos da massa de resíduos se dão a sucessivas rupturas de vazios conforme será explicado nos próximos itens.

2.7.1.1. Mecanismos dos Recalques

Olivier & Gourc (2007) relatam que as ações mecânicas, reorientações de partículas, transformações por reações físico-químicas e decomposição bioquímica com perda de massa na forma de gás ou líquida drenados, condicionam os mecanismos de recalques na massa de resíduos. E segundo Alcântara (2007) os processos físico-químicos e bioquímicos estão associados às deformações que ocorrem na massa de resíduos no interior de um aterro. Mendes (2009) também relata que os recalques dependem da compactação imposta à massa de resíduos.

O recalque que ocorre na massa de lixo, inicialmente é devido à própria operacionalidade, ou seja, contínuas passagens de veículos pesados sobre estes resíduos, e pelo ajuste inicial da massa, porém, a continuidade deste recalque é dada pela degradação biológica.

De acordo com Espinace *et al.*, (1999a), a compressibilidade e, em geral, o comportamento mecânico de um aterro controlado é afetado por múltiplos fatores relacionados com a velocidade da degradação orgânica dos resíduos sólidos, sendo os principais:

- Composição, características do resíduo e espessura das células no aterro;

- Teor de umidade dos resíduos que, por sua vez, é influenciado pela capacidade de campo dos próprios resíduos e umidade de saturação da cobertura;
- Tipo de material de cobertura e sua espessura, o que condicionará a evolução da temperatura e da umidade entre outros fatores e como estes fatores influem no processo de decomposição anaeróbia;
- As condições meteorológicas, tanto de pluviometria, como das temperaturas ambientais.
- Idade do aterro, condição fundamental na estabilidade deste.

Além dos fatores citados, é necessário ter presente as condições de evaporação, transpiração e até de congelamento em países de clima temperado, elementos estes que influem juntamente com os demais fatores de decomposição físico-química e bioquímica dos resíduos no funcionamento mecânico de um aterro de RSU.

Conforme Espinace *et al.*, (1999a), em aterros de resíduos sólidos urbanos os recalques imediatos e primários são semelhantes aos dos solos e dependem de igual modo das cargas que são impostas a estes resíduos, mas os recalques secundários são devidos principalmente a complexos processos de decomposição do resíduo orgânico biodegradável contido nos resíduos sólidos. Portanto, estes últimos em resíduos sólidos merecem atenção especial, não somente por serem diferentes a recalques secundários em solos, mas principalmente porque são extremamente longos e o principal fenômeno que ocorre nos resíduos, ou seja, a degradação da matéria orgânica com formação de líquidos e gases que posteriormente serão expulsos pelo sistema de drenagem. Contudo, McDougall *et al.*, (2004), relata que as cargas impostas associadas aos fenômenos biodegradativos e meteorológicos são de fundamental importância para que ocorram os recalques secundários.

Moreda (2000) sugere três fatores que influenciam nos recalques: a composição física dos resíduos, o projeto do aterro e a sua operação. A composição dos resíduos determina em grande parte a possibilidade da degradação biológica, além do mais, impondo suas características estruturais ao aterro.

Melo (2003) e McDougall *et al.*, (2004) apresentam uma nova visão para recalques. Segundo este pesquisador os recalques iniciais em uma célula de resíduos são mais acentuados pelo fato de a Célula de RSU apresentar maior quantidade de matéria orgânica e, portanto, maior carga. Segundo estes autores o que acontece é a degradação

da matéria orgânica acompanhada do aumento dos vazios nas partículas de resíduos. Esses vazios se expandem até um determinado limite, ou seja, até suportarem a carga imposta pelo próprio lixo. Com a degradação da matéria orgânica as partículas sólidas são convertidas em líquidos e gases, portanto os espaços preenchidos pela fase sólida são agora, ocupados pela fase líquida e gasosa, devido a mudanças de fase. Este autor relata que inicialmente ocorrem alargamentos dos vazios sucessivos devido à degradação seguidos de colapsos. Após esse período de recalques intensos, tem-se um período de recalques zero. Explica-se este período por uma degradação da matéria orgânica com um aumento dos vazios. Entretanto as tensões impostas pela massa de lixo são menores, por conseguinte, com menor suscetibilidade a adensamentos. Assim que o peso da massa de resíduos for suficientemente grande para colapsar os vazios da massa de resíduos ocorrem novos recalques. Ainda o autor diz que à medida que os recalques vão ocorrendo, menor será o peso da massa de resíduos e, portanto menor será também o adensamento com aumento de vazios cada vez maiores.

Vale salientar que para Melo (2003) os recalques nos resíduos sólidos são difíceis de caracterizá-los quanto ao tempo de sua ocorrência - recalques primários (primeiros 30 dias) e secundários posteriormente. Este autor acha melhor dizer que, segundo os seus estudos, ambos podem ocorrer simultaneamente, pois assim que os resíduos são descartados ocorre à colonização de microrganismos, ocasionando a perda de massa.

2.8. Modelo de Bioestabilização da Matéria Orgânica e Cinética Microbiana

Brito *et.al.*,(2002) diz que o objetivo principal de qualquer estudo cinético é a obtenção de um modelo matemático que represente o processo, sendo que as reações de primeira ordem são de fundamental importância dentro da Engenharia Ambiental, já que várias reações são modeladas segundo esta cinética. A maioria dos pesquisadores tem mostrado que a bioestabilização da matéria orgânica é caracterizada por uma fase rápida, seguida por uma fase lenta, podendo ser escrita por modelos exponenciais. Desta forma, a relação entre a quantidade de matéria orgânica remanescente, após um período de tempo, e a matéria orgânica inicial, pode ser apresentado como na Equação 1.

$$L=L_0.e^{-Kt} \quad \text{Eq (1)}$$

onde, o valor da constante de bioestabilização, K , mostra a rapidez de bioestabilização do resíduo orgânico (IGUE,1984; PAUL & CLARK, 1989).

Matos *et al.*, (1998) em trabalho realizado com resíduos sólidos orgânicos constituídos basicamente de palhas de café, constatou que o processo de bioestabilização aeróbio reduziu a relação C/N de 36:1 no substrato “in natura” para 12:1 no composto parcialmente bioestabilizado para um período de monitoração de 90 a 100 dias. O autor determinou a constante de bioestabilização para a massa de carbono orgânico total igual a $3,67 \times 10^{-3} \text{dia}^{-1}$, enquanto para a massa de nitrogênio total Kjeldahl a constante de bioestabilização foi de $6,01 \times 10^{-3} \text{dia}^{-1}$, considerando-se o mesmo tempo de monitoramento. No mesmo trabalho, o autor encontrou constante igual a $6,02 \times 10^{-3} \text{dia}^{-1}$ para o acúmulo de nitrogênio nas leiras de compostagem, devido, primordialmente, da liberação de gases e do vapor d'água com a decomposição do material por microrganismos, provavelmente, pela retenção do nitrato presente na água precipitada e à fixação biológica do nitrogênio atmosférico.

Aplicando o conceito da variação de matéria orgânica na avaliação de processos de tratamento biológicos, é possível dizer que a variação da massa da Demanda Química de Oxigênio (DQO), Concentrações de Carbono Orgânico Total (COT) e Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) em função do tempo expressa, de forma indireta o rendimento das atividades microbianas envolvidas no processo. Logo, segundo Brito *et al.*,(2002) e Alves *et al.*,(2008) pode-se representar o comportamento da massa de nutrientes em leiras de codisposição e até mesmo em aterros de RSU como uma função exponencial do tempo (Equação 2), resultando num modelo do tipo:

$$\frac{dM}{dt} = K_1 M \quad \text{Eq (2)}$$

Da Equação 2 resulta a Equação 3.

$$M_{TRANSF} = M_{APLIC} \cdot e^{-Kt} \quad \text{Eq.(3)}$$

Em que: dM/dt = Taxa de utilização da massa do substrato (dia^{-1});

M_{TRANSF} = Massa transformada do substrato em um tempo qualquer (g);

M_{APLIC} = Massa aplicada do substrato em $t=0$ (g);

t = Tempo do processo de codisposição (dias)/aterramento de RSU;

K = Constante de bioestabilização de primeira ordem (dia^{-1}).

Brito *et. al.*, (2002) e ainda diz que a massa transformada e aplicadas podem ser determinadas segundo Leite (1999) onde:

$$\text{Massa (aplicada)} = \text{Massa (acumulada)} + \text{Massa (transformada)}$$

Desta maneira é possível medir a conversão da matéria orgânica no tempo e determinar o quanto a degradação da matéria orgânica pode ser diretamente ligada aos recalques em termos percentuais.

2.9. Composição Gravimétrica e Volumétrica de Resíduos Sólidos Urbanos

A caracterização gravimétrica e volumétrica dos RSU é uma ferramenta importante dentro da estrutura de gestão destes resíduos e serve como um indicador da quantidade que cada tipo de resíduos ocupa em volume nas células do aterro, indicando que a falta de programas de reciclagem e reutilização pode reduzir a vida útil desses resíduos (PEREIRA, *et. al.*, 2010).

É importante salientar que também a gravimetria e volumetria dos materiais pode melhorar o seu acesso aos microrganismos degradadores e, portanto, acelerar a decomposição dos RSU.

Segundo Pereira *et al.*, (2010) a caracterização gravimétrica e volumétrica dos RSU é uma ferramenta importante dentro de uma estrutura de gestão desses resíduos. Quando dispostos nos aterros sanitários a caracterização dos resíduos passa há ter uma maior 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 líquidos lixiviados, além de avaliar o potencial de geração de biogás.

A caracterização e o monitoramento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) envolvem parâmetros físicos que podem ser mais ou menos relevantes em função dos objetivos desejados e dentre os parâmetros mais importantes destacam-se as composições desses resíduos (ALCÂNTARA, 2007).

A composição gravimétrica permite identificar o resíduo gerado, sendo a etapa inicial de qualquer definição posterior de gerenciamento e constitui uma informação importante na compreensão do comportamento da massa de lixo, aterrados ou não, e expressa, em percentual, a presença de cada componente, em relação ao peso total da amostra dos resíduos (MELO & JUCÁ, 2000).

Além da composição gravimétrica, também é utilizada a caracterização volumétrica dos resíduos sólidos que é ferramenta importante para o dimensionamento do potencial de geração de biogás, pois permite classificar individualmente cada constituinte dos resíduos em volume.

Entretanto, a composição dos resíduos de um local varia em função de diferentes fatores, como o número de habitantes da cidade, o nível educacional da população, o poder aquisitivo e o nível de renda familiar, os hábitos e os costumes da população, as condições meteorológicas e sazonais e a industrialização de alimentos. Os estudos de caracterização física dos resíduos contribuem, ainda, para o monitoramento ambiental, na compreensão do processo de decomposição da massa de lixo e na estimativa da vida útil da área (MELO & JUCÁ, 2000).

Van Meerten *et al.*, (1995) cita, entre outros fatores, a composição gravimétrica como um dos principais agentes da degradação da matéria que compõem os resíduos. Pode-se dizer que tanto a composição gravimétrica como volumétrica estão diretamente ligadas aos níveis de recalques e, portanto também podem afetar o comportamento mecânico dos resíduos.

3. Materiais e Métodos

3.1. Locais de Desenvolvimento da Pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida na Universidade Federal de Campina Grande na Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais em conjunto com as Unidades Acadêmicas de Engenharia Civil, Engenharia Química, e Universidade Estadual da Paraíba (EXTRABES: Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários e, ainda em parceria da Universidade Federal de Pernambuco, especificamente, com o Departamento de Antibióticos.

3.2. Etapas da Pesquisa

As etapas realizadas para a execução dos trabalhos estão de acordo com a seqüência a seguir:

- Construção do lisímetro em uma área cedida pela UFCG;
- Instrumentação do lisímetro: drenos de líquidos e gases, piezômetros, medidores de temperatura, instalação de placas de recalque superficiais e em profundidade;
- Realização de coleta e amostragem dos resíduos antes do preenchimento do lisímetro usando o procedimento recomendado pela ABNT NBR 10.004/10.007 (2004);
- Caracterização os resíduos através de determinação da composição gravimétrica e volumétrica conforme Rocha & Lang (2003) e recomendações da CETESB (1990);
- Enchimento do lisímetro;
- Realização de ensaios físico-químicos, microbiológicos e mecânicos para determinação das características iniciais dos resíduos que irão ser depositados no lisímetro e ao longo do tempo e profundidade;
- Monitoramento de sólidos e líquidos através de medições “*in situ*” e realização de ensaios laboratoriais com amostras coletadas na célula experimental e obtenção de dados das condições meteorológicas locais.

3.2.1. Construção do Lisímetro

A parte experimental do projeto de pesquisa compreendeu a construção de uma célula experimental de resíduos (lisímetro ou biorreator) para a obtenção de parâmetros sob condições conhecidas e/ou controladas (Figura 5).



Figura 5: Célula Experimental localizada em um terreno cedido pela UFCG.

Nesta pesquisa a célula experimental foi construída em alvenaria de tijolos manuais, com diâmetro de 2,0m e altura de 3,0m com volume aproximado de 9m^3 e com formato de uma estrutura cilíndrica rígida com seção transversal circular visando facilitar a distribuição e a compactação dos resíduos em seu interior. Esse formato busca ainda uniformizar a distribuição das pressões laterais na parede interna do lisímetro, evitando caminhos preferenciais de percolação do lixiviado e redução da área de superfície lateral interna diminuindo o contato entre os resíduos e a parede interna.

A Figura 6 mostra um croqui da célula experimental toda instrumentada para obtenção de dados de monitoramento.

O lisímetro foi dotado de sistema de drenagem de líquidos e gases, medidores de nível dos líquidos (piezômetros), medidores de recalques superficiais e profundos (placas de recalque) além de medidores de temperatura (termopares) ao longo da profundidade.

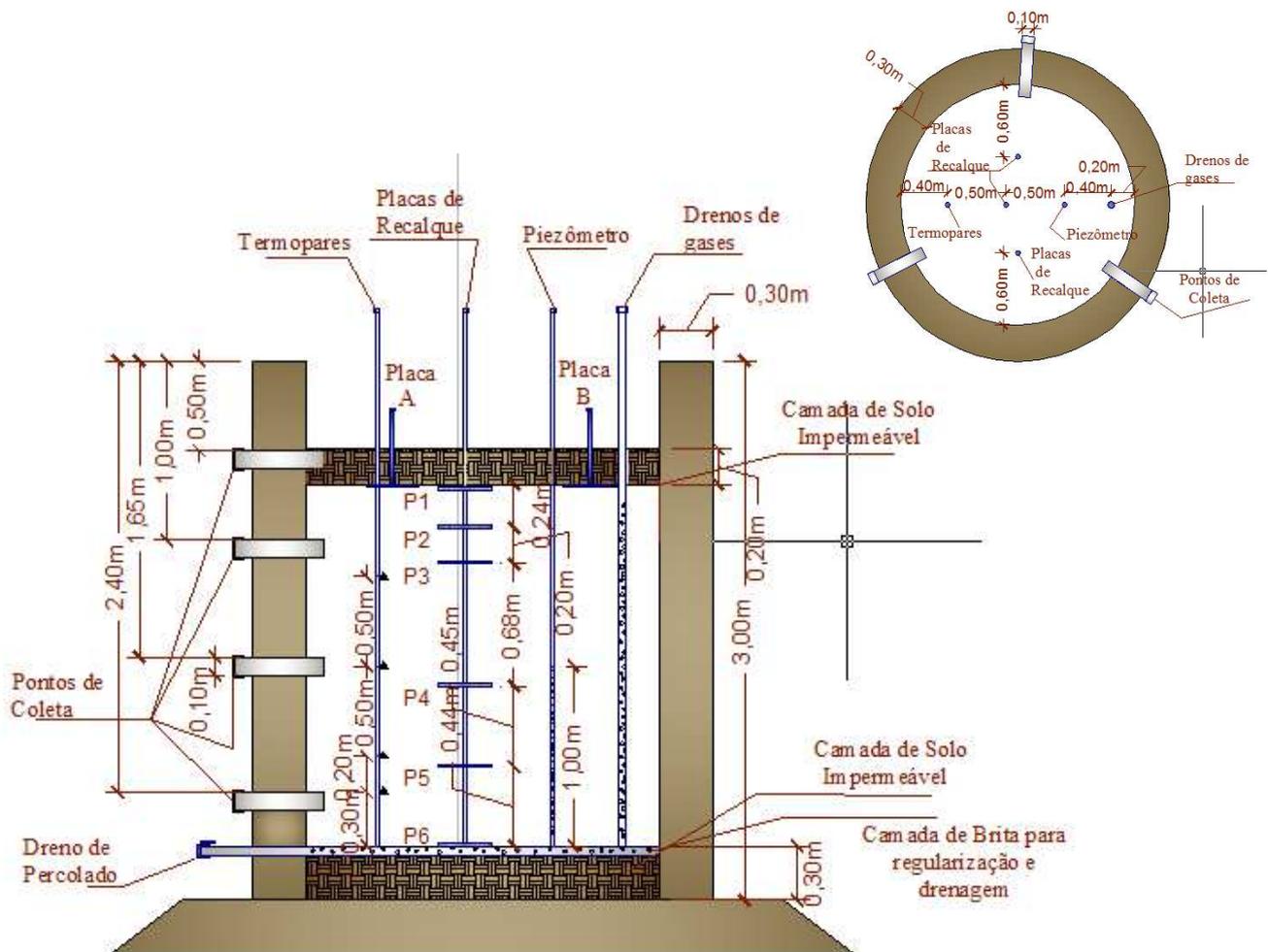


Figura 6: Croqui da célula experimental construída em local cedido pela UFCG.

O sistema de drenagem de lixiviado é constituído de um tubo de PVC de 25mm perfurado apoiado diretamente sobre o solo compactado e, por uma camada de pedra britada que promoverá a drenagem de toda área do fundo da célula experimental, além de permitir a coleta do lixiviado. Para as camadas de base e cobertura do lisímetro foi escolhido um solo com características de baixa permeabilidade (velocidade: 10^{-6}cm.s^{-1}).

3.2.2. Instrumentação da Célula Experimental (Biorreator) de Resíduos Sólidos Urbanos

A célula experimental foi instrumentada da seguinte forma:

Piezômetro: para o monitoramento do nível de líquidos e confeccionado em tubo de PVC de 25 mm (Figura 7), com furos nas paredes do tubo e coberto com tela de nylon. As variações do nível de lixiviado foram medidas com um sensor de nível de

água. Este sensor foi confeccionado pelo Professor Dr. Willian Paiva da Universidade Estadual da Paraíba.



Figura 7: Piezômetro para o monitoramento do nível de líquidos

Termopares: para o monitoramento das temperaturas no interior da célula experimental, quatro termopares do tipo K foram instalados a cada 0,5m de profundidade, sendo o último termopar instalado a 0,3m acima da camada de base (Figura 8). Os termopares consistem em um par de metais de cobre e cromo unidos em uma ponta, que são sensíveis à temperatura, gerando desta forma uma corrente elétrica proporcional à temperatura. Esta corrente é medida na superfície por um termômetro elétrico.



Figura 8: Quatro termopares do tipo K e termômetro elétrico

Medidores de recalques superficiais e em profundidade: Para o monitoramento dos recalques foram utilizadas placas de recalques circulares com diâmetros aproximados de 150 mm (Figura 9), confeccionadas em aço e revestidas com uma película anti-corrosiva.



Figura 9: Medidores de recalques superficiais e em profundidade

Tubo para drenagem de gases: um dreno de gás (Figura 10) foi instalado no centro geométrico da célula, sendo este confeccionado em PVC perfurado, diâmetro de 40 mm e envolvido por uma tela de nylon para evitar a obstrução dos furos.



Figura 10: Tubo para drenagem de gases

Pontos de coleta das amostras dos resíduos sólidos: inicialmente haviam nove aberturas na parede do lisímetro, sendo três a cada 0,8 m de altura distribuída em três pontos diferentes. Entretanto, devido a problemas operacionais que impediram o enchimento do lisímetro até a cota pré-estabelecida, houve a necessidade da construção de mais 3 furos laterais, totalizando 12 aberturas. Cada abertura lateral para coleta de amostras têm um diâmetro de 50 mm.

3.2.3. Coleta e Amostragem de Resíduos Antes do Enchimento da Célula Experimental

Para a realização da coleta e amostragem utilizou-se o procedimento recomendado pela ABNT NBR 10.007 (2004). A coleta das amostras foi realizada através de um caminhão compactador com capacidade aproximada de 9ton, com rotas definidas pelo Departamento de Limpeza Urbana (DLU) da Prefeitura Municipal de Campina Grande-PB. Visando obter amostras representativas dos RSU da cidade verificou-se a necessidade de se estabelecer um plano de amostragem que foi delimitado pela escolha de três bairros baseados no critério de condição social de modo a se obter uma amostra representativa destes resíduos. Os bairros selecionados foram Mirante, Catolé e Argemiro Figueiredo, respectivamente bairros de classe alta, média e baixa. A unidade amostral foi definida a partir dos resíduos coletados nesses 3 bairros. A coleta foi realizada no período noturno. Terminada a coleta, já pela manhã, o caminhão compactador foi direcionado para a área de amostragem, localizada próxima à célula experimental na Universidade Federal de Campina Grande para triagem do material coletado.

3.2.4. Caracterização Física

Os parâmetros físicos determinados nesse estudo constaram de massa específica solta, específica compactada, teor de umidade e composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos.

3.2.4.1. Composição Gravimétrica dos Resíduos (%)

Diversas entidades, principalmente internacionais, vêm mostrando empenho em realizar procedimentos para que seja possível obter dados confiáveis e realistas, úteis na melhoria da gestão de processos e operações com RSU, especialmente em relação a composição gravimétrica. O estudo de gravimetria neste trabalho foi baseado na metodologia de Lipor (2000) e adaptado por Leite (2008) e Pereira *et.al.*, (2010). Como o caminhão compactador dirigiu-se para a área de amostragem, houve a obtenção de uma amostra significativa para a composição dos resíduos e em seguida foram realizadas as seguintes etapas:

1– Descarregamento dos resíduos do caminhão compactador (Figura 11a), homogeneização dos resíduos com auxílio de uma enchedeira (Figura 11b) e quarteamento (Figura 11c). Das quatro pilhas formadas duas foram descartadas e as outras duas homogeneizadas novamente, formando uma única pilha (Figura 11d). Após esse processo, foram retirados da pilha resultante amostras para a caracterização física dos RSU.

2– Usando recipientes de aproximadamente 65 Litros, foram retiradas amostras da pilha resultante, sendo 4 amostras das laterais da base, 3 do centro e 2 do topo da pilha, resultando aproximadamente 160 kg de resíduo ou 585 Litros.

3– O material retirado da pilha resultante foi pesado e em seguida disposto em local previamente preparado com lona plástica para o processo de triagem (Figura 11e/11f). A classificação dos resíduos foi realizada segundo Lipor (2000), de acordo com as seguintes categorias: plásticos, metal, vidro, compósitos, têxteis sanitários, papel e papelão, matéria orgânica e outros.

4 – Em recipientes tarados e etiquetados, foram realizadas as devidas medições do peso dos RSU separados por categorias e anotados os dados em planilhas.



Figura 11: Procedimentos para determinação da composição gravimétrica dos RSU

3.2.4.2. Composição Volumétrica dos Resíduos

O procedimento de composição volumétrica dos resíduos foi baseado na metodologia realizada por Catapreta & Simões (2008) e Mariano *et al.* (2007). Esse procedimento foi realizado imediatamente após a caracterização gravimétrica, no qual, após a pesagem mediu-se o volume desses resíduos. Os recipientes utilizados foram em forma de cone (Figura 12), cujo diâmetro varia 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 régua e trena métrica, e, por meio da Equação 4 obteve-se o volume dos resíduos soltos.

$$V = \frac{\pi h (R^2 + Rr + r^2)}{3} \quad \text{Eq. (4).}$$

Onde:

V: volume dos resíduos soltos

h: altura;

R: raio maior;

r: raio menor.

Posteriormente, compactaram-se os resíduos com um soquete confeccionado em concreto no molde dos recipientes utilizados. O soquete possuía uma área aproximadamente de 0,503m², volume 0,075m³ e peso 26,00Kg. Os resíduos foram compactados estaticamente e em seguida mediu-se a altura e o diâmetro e obtendo-se o volume dos resíduos compactados (Figura 12).



Figura 12: Determinação da composição volumétrica.

3.2.4.3. Massa Específica Solta e Compactada

A massa específica solta foi determinada a partir da pesagem de recipientes de 65L que foram enchidos com os resíduos para realizar a caracterização física, ou seja, as composições gravimétricas e volumétricas. Os recipientes foram preenchidos com o auxílio de uma pá manual, sem compactação dos resíduos, até a borda. Na pesagem foi utilizada uma balança manual (Marca Welmy / Modelo R-100) com capacidade máxima de 150kg e sensibilidade de 0,1kg. O ensaio seguiu recomendações de IPT/CEMPRE (2000) e CETESB (1990) e Leite, (2008).



Figura 13: Determinação da massa específica solta dos resíduos

A massa específica solta da amostra foi calculada pela relação entre a massa e o seu volume de acordo com a Equação 5.

$$\rho_s = \frac{M - M_r}{V} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

ρ_s : massa específica solta (kg/m^3);

M: massa de resíduos (kg);

M_r : massa do recipiente (kg);

V: volume do recipiente (m^3).

A Equação 6 mostra como foi calculada a massa específica compactada.

$$\rho_c = \frac{M - M_r}{V} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

ρ_c : massa específica compactada ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

M: massa de resíduos (kg);

M_r : massa do recipiente (kg);

V: volume do recipiente (m^3).

3.2.4.4. Determinação de Volume e Massa no Interior da Célula Experimental

Com a posse dos dados de gravimetria e volumetria procedeu-se os cálculos de volume, massa e quantidade de água no interior da célula experimental.

A equação 7 mostra como foi obtido o volume de resíduos na célula experimental:

$$V = \frac{\pi d^2 \cdot h}{4} \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

V: Volume atingido pelos resíduos (m^3);

d: diâmetro do cilindro;

h: altura atingida pela massa de resíduos.

A equação 8 mostra como foi obtido a densidade dos resíduos depositados no interior da massa de resíduos e conseqüentemente a massa destes resíduos:

$$d = \frac{m}{V} \quad \text{Eq. (8)}$$

3.2.5. Enchimento da Célula Experimental

Após o processo de homogeneização e quarteamento dos RSU provenientes da rota selecionada para a pesquisa, foi obtida a amostra final de onde foram retiradas as

parcelas para preenchimento da célula experimental e caracterização inicial que envolveu a composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos como já comentado. Para o preenchimento do lisímetro os resíduos foram dispostos como pilhas que foram homogeneizadas para a obtenção de amostras. Após pesagem os resíduos foram compactados manualmente em camadas até a cota final pré-estabelecida.



Figura 14: Descarregamento, homogeneização do material e divisão das pilhas

3.2.6. Monitoramento das Medições em Campo e Realização de Ensaios de Laboratório

Concluída a etapa inicial, foram realizadas as fases de monitoramento com o objetivo de analisar aspectos mecânicos, geotécnicos e a evolução do processo degradativos da matéria orgânica já depositada na célula experimental. Os dados foram obtidos através da instrumentação instalada e da coleta de amostras para análises em laboratório. Foram coletadas amostras sólidas para determinação de parâmetros mecânicos, físico-químicos e microbiológicos.

3.2.6.1. Recalques

Foram instalados previamente na célula experimental medidores de recalque superficial e em profundidade. Para o monitoramento de recalques superficiais foram utilizadas duas placas circulares com diâmetros aproximados de 150mm (Figura 15), confeccionadas em aço e revestidas com uma película anti-corrosiva. Durante o enchimento da célula, ao atingir a altura pré-estabelecida de resíduos fez-se um nivelamento da camada superficial onde foram instaladas as duas placas de recalques superficiais, em seguida colocou-se um tubo de PVC de 20mm para evitar o atrito entre

o solo e a haste da placa e para impedir a entrada de umidade no sistema. Em seguida depositou-se uma camada de cobertura de solo compactado de 200mm.



Figura 15: Placas de recalque seperficiais e dispostas sobre a camada de cobertura da célula experimental

Para se medir os recalques em profundidades foram instalados previamente as placas de recalques em profundidade (Figura 16) que possuem em seu centro um imã no qual passará um torpedo que acionará um dispositivo eletrônico e então se medirá o deslocamento vertical da placa.

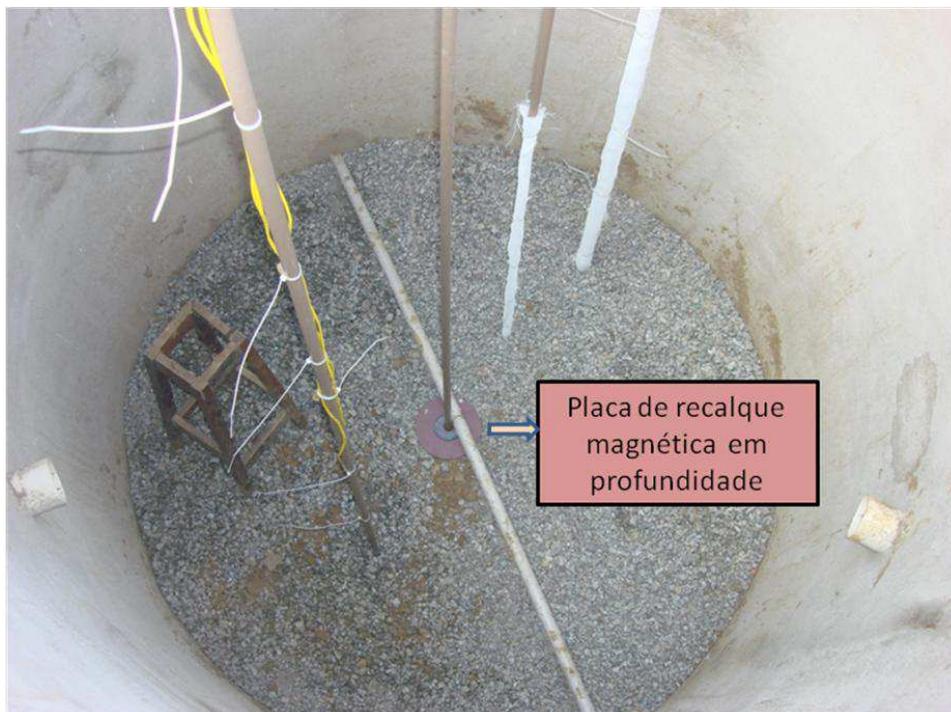


Figura 16: Placa de recalque magnética em profundidade (detalhe) no interior do biorreator sobre a camada de base e sendo coberta por RSU

As leituras dos recalques superficiais e em profundidade seguiram o procedimento descrito abaixo:

- **Placas superficiais:** estendeu-se um fio auxiliar horizontalmente de um lado a outro da abertura da célula experimental, mantendo-o nivelado sobre as duas placas superficiais. Mediu-se então a distância vertical do fio até o indicador da posição das placas.
- **Placas em profundidade:** foram utilizadas 6 placas magnéticas em diferentes profundidades. As placas magnéticas são providas de um anel com imã permanente, com orifício central destinado à passagem de tubo guia de PVC. A leitura foi realizada introduzindo-se um sensor de campo magnético dentro do tubo guia, que identifica a localização da placa magnética e aciona o ohmímetro analógico, modelo FT-1000A (Figura 17), que exibe um sinal por meio de um ponteiro móvel, possibilitando a leitura de recalques..

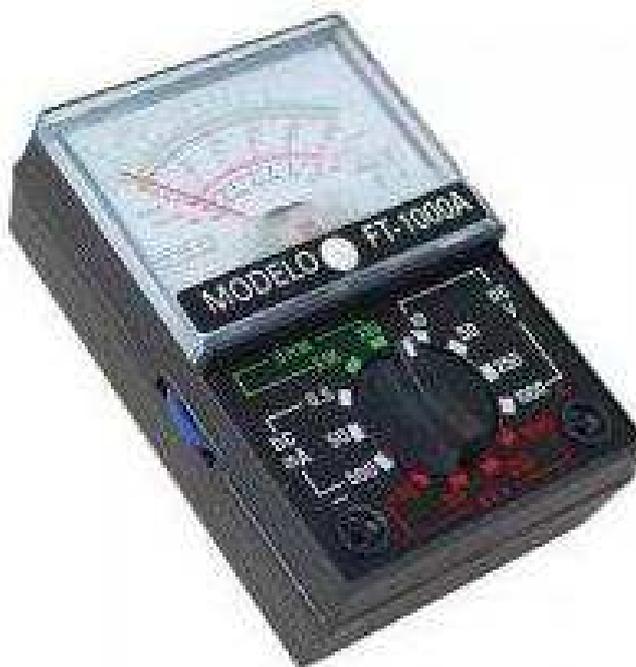


Figura 17: Ohmímetro analógico, modelo FT-1000A

3.2.6.2. Temperatura

O monitoramento das temperaturas no interior do biorreator foi feito a partir de 4 termopares com conectores do tipo K, numerados de 1 a 4, e o auxílio de um

termômetro. O termômetro portátil utilizado é do tipo digital com dois canais (T1 e T2), com capacidade de medir temperaturas na faixa de (-100°C a 1300°C) e apresenta resolução de 0,5°C e precisão de $\pm(0,1\%$ da leitura $\pm 0,7^\circ\text{C}$) para a faixa de leitura utilizada.

Os termopares consistem em um par de metais de cobre e cromo unidos em uma ponta, que são sensíveis à temperatura, gerando desta forma uma corrente elétrica proporcional à temperatura. Esta corrente é medida na superfície por um termômetro elétrico. Sua calibração procedeu-se com o uso de um termômetro de mercúrio como referência. Mergulhou-se ambos em um recipiente a uma temperatura próxima de 0°, e forneceu-se calor ao conjunto e a cada 5°C de acréscimo verificado no termômetro de mercúrio, anotou-se o valor do termômetro elétrico. Por fim foi feita a curva de calibração e os valores medidos em campo foram corrigidos.

3.2.6.3. Análises Microbiológicas

Antes de se realizar os ensaios microbiológicos e físico-químicos procedeu-se a coleta e preservação de amostras de acordo com a ABNT NBR 10.0007 (2004).

Os ensaios microbiológicos foram realizadas para determinar os microrganismos pertencentes ao grupo coliforme (totais e termotolerantes), quantificar e identificar microrganismos aeróbios e anaeróbios, quantificar as colônias fúngicas para relacioná-los ao decaimento da matéria orgânica e recalques.

A metodologia dos ensaios microbiológicos foi desenvolvida segundo Sanches (1999), de acordo com o Manual de Atualização em Técnicas para o Controle Microbiológico de Águas Minerais da Universidade Mackenzie-SP e conforme Pelczar Jr *et. al.*, (1997) e Trablusi (2005).

As amostras foram coletadas em uma célula experimental em orifícios laterais (Figura 18) em diferentes profundidades (2,40m, 1,65m, 1,0m e 0,5m) através de um amostrador (Trado helicoidal) especialmente confeccionado (Figura 19). Sendo que a profundidade de 0,5m foi desativada logo na primeira coleta de amostras devido ao recalque imediato ocasionado pelo peso da camada de cobertura a qual foi bastante elevado.



Figura 18: Orifícios laterais (detalhes) para coleta de amostras em diferentes profundidades



Figura 19: Amostrador(Trado helicoidal) para retirada de amostras dos resíduos nos orifícios laterais

As amostras de sólidos foram submetidas a diluições sucessivas. As diferentes diluições foram inoculadas em meios de culturas diversos para quantificação dos microrganismos patogênicos. Para determinação de Coliformes totais e termotolerantes o método utilizado foi o de Número Mais Provável (NMP) (Figuras 20 e 21).

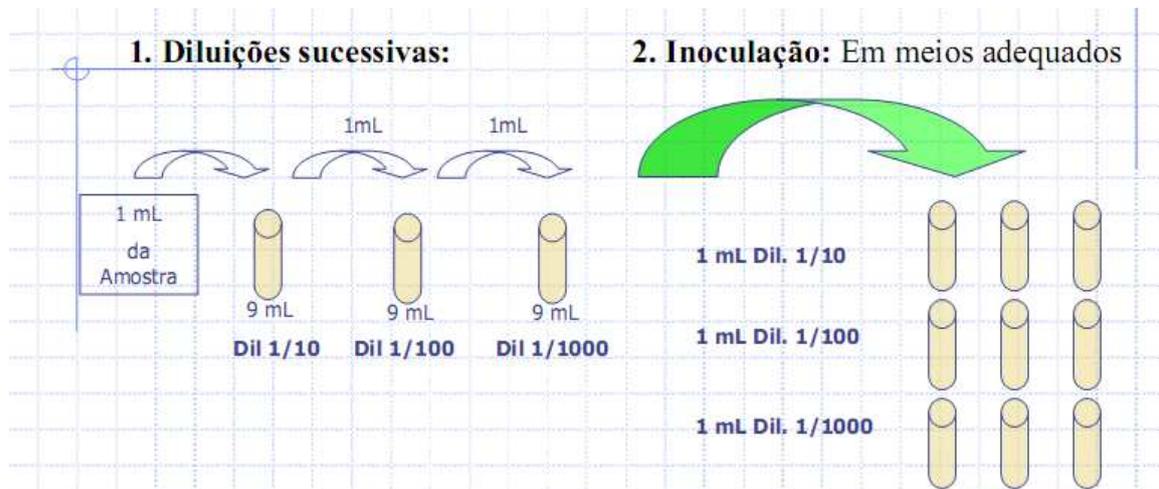


Figura 20: Esquema das diluições sucessivas e inoculações

Número de tubos cujo crescimento é visível para cada quantidade do produto sob exame			Número Mais Provável de microrganismos / mL	Limite NMP	
0,1 mL /tubo	0,01 mL /tubo	0,001 mL /tubo		Inferior	Superior
0	0	0	<3	-	-
0	0	1	3	<0,5	9
0	1	0	3	<0,5	13
1	0	0	4	0,5	20
1	0	1	7	1	21
1	1	0	7	1	23
1	1	1	11	3	36
1	2	0	11	3	36
2	0	0	9	1	36
2	0	1	14	3	37
2	1	0	15	3	44
2	1	1	20	7	89
3	2	2	210	35	470
3	3	0	240	36	1300
3	3	1	460	71	2400
3	3	2	1100	50	4800
3	3	3	>2.400	-	-

Figura 21: Procedimento experimental após as diluições e a leitura estatística (NMP) para combinações de 3 tubos para os microrganismos das diversas espécies pesquisadas.

O método utiliza tubos múltiplos, (série de 3 tubos), sendo expressa a densidade (turbidez), ou seja, o Número Mais Provável (NMP) de microrganismos em 100ml de meio. Esta técnica baseia-se no princípio de que as bactérias presentes numa amostra podem ser separadas umas das outras por agitação, resultando em suspensão de

células bacterianas individuais, uniformemente distribuídas na amostra original. A técnica consiste na inoculação de volumes decrescentes da amostra, em meio de cultura adequado ao crescimento dos microrganismos pesquisados, sendo cada volume inoculado numa série de tubos. Através de diluições sucessivas da amostra são obtidos inóculos cuja semeadura fornece resultados negativos em pelo menos um tubo da série em que estes foram inoculados, e a combinação de resultados negativos e positivos permite uma estimativa da densidade original das bactérias pesquisadas (SANCHEZ, 1999). Este método permite fornecer somente uma estimativa de 95% de probabilidade (Tortora, 2000).

3.2.6.3.1. Determinação de Coliformes Totais e Termotolerantes

O ensaio se processa em duas etapas (ensaio presuntivo e confirmativo), de realização obrigatória para todos os tipos de amostras.

Ensaio presuntivo:

Consistiu na semeadura de volumes determinados da amostra em séries de tubos de caldo lactosado ou caldo lauril triptose, ambos com púrpura de bromocresol, que, são incubados a 35°C, durante 24 a 48 horas, ocorrendo o enriquecimento de microrganismos fermentadores de lactose. A acidificação, com ou sem produção de gás, decorrente da fermentação da lactose contida no meio de cultura empregado neste ensaio, é prova presuntiva para a presença de bactérias do grupo coliforme.

Ensaio confirmativo:

Consiste na transferência de cada cultura com resultado presuntivo positivo para caldo lactosado com verde brilhante e bile a 2%, sendo a incubação efetuada também a 35°C, durante 48 horas. A produção de gás, a partir da fermentação da lactose neste meio, é prova confirmativa positiva para a presença de bactérias do grupo coliforme. A Figura 22 mostra o ensaio confirmativo para coliformes totais após o período de incubação.



Figura 22: Tubos do ensaio confirmativo de coliformes totais

Diferenciação para Coliformes Termotolerantes

A diferenciação para coliformes termotolerantes foi realizada a partir dos positivos presuntivos (coliformes totais) de caldo lactosado ou caldo lauril triptose com púrpura de bromocresol. Os resultados positivos foram transferidos com alça de platina para tubos, meio de cultura específico para Coliformes termotolerantes (EC) previamente aquecidos a 44°C durante 30 minutos. Em seguida, os inóculos foram levados a estufa a 44°C durante 24 horas ou 48 horas. Ocorrendo a produção de gás o resultado é positivo para coliformes termotolerantes.

3.2.6.3.2. Anaeróbios e Aeróbios Totais

3.2.6.3.2.1. Semeadura de Anaeróbios Totais

As amostras de resíduos sólidos foram coletadas e armazenadas em uma jarra de anaerobiose. Foi colocada uma placa denominada *anaerobac* com o objetivo de diminuir a quantidade de oxigênio presente no meio e aumentar o gás carbônico no interior da jarra.

Preparação do Tampão Redutor (TRD)

Para a determinação de anaeróbios totais, primeiro utilizou-se de tubos de penicilina contendo tampão redutor (TRD). A cada tubo de penicilina foi adicionado 4,5ml de tampão redutor. Em seguida estes tubos foram purgados com N₂ (inserção de N₂ líquido permite a eliminação de O₂) durante 25 minutos e após foram autoclavados por 15 minutos a 121°C.

Preparação do Meio Tioglicolato

Também foram preparados tubos do tipo penicilina com 9ml de meio tioglicolato para posterior inóculo da amostra.

Inóculo:

Com uma seringa de 5 mL foi retirado dos frascos que continham as amostras de resíduos sólidos 1 ml da amostra em condições anaeróbias, sendo este adicionado em um frasco de TRD. Do frasco ao qual foi adicionado 1mL de amostra foi retirado 1mL para um próximo frasco de TRD e assim, sucessivamente, até serem selecionadas as diluições que favoreceriam o crescimento, as quais foram 10⁻¹ a 10⁻¹⁴. Destas diluições selecionadas foram retiradas 1ml, já contendo o inóculo das amostras, utilizando também seringa e adicionado nos tubos contendo 9 ml de meio tioglicolato em triplicata. Em seguida, os tubos contendo meio tioglicolato, já inoculados com a amostra, foram acondicionados em estufa a 37°C, durante 96 horas. Os frascos que apresentaram turvação foram considerados positivos para anaeróbios totais (Figura 23).



Figura 23: Ensaio para Anaeróbios Totais

Contagem de anaeróbios totais:

Após o período de 48 horas, fez-se o cálculos de NMP. Adotou-se como resultado a série em que houve crescimento na maior diluição em triplicatas (apenas a ordem de grandeza). Com este resultado calculou-se o NMP através do programa MPN calculator.

3.2.6.3.2.2. Semeadura de Aeróbios Totais

Preparação do Tampão Fosfato (T.F):

Para a determinação de aeróbios totais, utilizou-se tubos grandes 18 x 180 mm com 9ml de T.F, quais foram autoclavados por 15min a 121°C.

Inoculo:

A amostra de resíduos foi diluída em tampão fosfato até 10^{-6} . Das diluições 10^{-3} a 10^{-6} foi retirado 0,1ml da amostra e com o auxílio de uma alça de Drigalski espalhado em toda a superfícies das placas (3 repetições para cada tubo selecionado) com meio “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 colônia.

3.2.6.3.3.Fungos

A amostra de resíduos sólidos destinada às análises microbiológicas (10 g) foi diluída em um béquer estéril de capacidade de 200 mL, dotado de 90 mL de água destilada. Esta amostra foi agitada manualmente com um auxílio de um bastão, durante alguns minutos; a porção líquida da solução foi separada da sólida através de uma peneira; e diluída em tubos de ensaio sucessivamente, obtendo-se as diluições de 10^{-3} até 10^{-6} . Para a análise de fungos, em cada tubo de ensaio era utilizado 9 mL de água destilada para 1 mL da amostra diluída.

Preparação do meio cultivo

Em um béquer, com o auxílio de um bastão foi diluído ágar-sabouraud (65 g) e cloranfenicol (0,5 g) em água destilada (1000 mL). Em seguida a solução foi levada à fogo médio por cerca de 30 minutos. Posteriormente o conteúdo foi adicionado em

placas de Petri (10mL) as quais foram autoclavadas e por fim armazenadas na geladeira (APHA, 1998).

Inoculação da amostra

As amostras foram semeadas (0,1 mL) e espelhadas diretamente sobre placas de Petri contendo o meio de cultivo (APHA, 1998).

Em seguida as placas contendo a amostra foram incubadas a 35°C, durante um período de 5 a 7 dias, onde, passado esse período, foi realizada a contagem e cálculo das UFC fúngicas (PELCZAR JR et al., 1997).

O crescimento fúngico foi determinado segundo metodologia do Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater (APHA, 1998).

3.2.6.4. Análises Físico-químicas

Foram coletadas amostras de resíduos para determinação de parâmetros físico-químicos que indicam a evolução do processo degradativo do interior da massa de resíduos. Neste trabalho serão abordados os seguintes parâmetros: Teor de sólidos voláteis, teor de umidade, ácidos graxos voláteis, potencial hidrogeniônico (pH), alcalinidade, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e cloretos.

O quadro 1 mostra os parâmetros físico-químicos monitorados ao longo do tempo da célula experimental estudada.

Quadro 1: Parâmetros físico-químicos monitorados ao longo do tempo de monitoramento da célula experimental estudada

Parâmetros	Método	Laboratório
Sólidos Voláteis	Who (1979)	EXTRABES
Teor de Umidade	NBR 6457 (ABNT, 1986a); Manassero et al. (1996)	EXTRABES
Alcalinidade total	Standard Methods (AWWA/APHA/WEF, 1998)	EXTRABES
pH		
Ácidos Graxos voláteis		
Cloretos		
DQO		
DBO		

3.3. Análise Estatística

Durante a confecção deste trabalho fez-se uma análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques ocorridos na célula experimental. Foram analisados a média, desvio padrão e o coeficiente de variação das variáveis pesquisadas. Os parâmetros analisados foram o teor de umidade, teor de sólidos voláteis, DBO e DQO.

Posteriormente foi aplicado para a verificação da normalidade dos dados o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Este teste observa a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados, no caso Normal, e a função de distribuição empírica dos dados.

Para verificação das diferenças estatísticas por camada da mesma variável utilizou-se a análise de variância (ANOVA) com um fator, ou seja, a influência do meio ambiente na variável. A Análise de variância trata-se de um estudo estatístico, que através de testes de igualdade de médias, verifica-se se fatores produzem mudanças sistemáticas em alguma variável de interesse (PAIVA, 2009).

Finalmente aplicou-se a análise em componentes principais (ACP) que consistiu em reescrever as coordenadas das amostras em outro sistema de eixos mais conveniente para a análise de dados. Esta técnica possui os seguintes propósitos: a) examinar as correlações entre as variáveis estudadas; b) avaliar a importância de cada variável e promover a eliminação das que contribuem pouco, em termos de variação no grupo de indivíduos avaliados; c) construir índices das variáveis avaliadas.

Para a seleção das variáveis que fizeram parte da ACP, utilizou-se o seguinte critério:

- 1) foi confeccionado a matriz de correlação por camada (Anexos);
- 2) adotou-se como critério de correlação o valor em módulo de 0,7. Segundo Paiva (2009) valores em módulo iguais ou maiores de 0,7 apontam para uma correlação muito forte entre as variáveis;
- 3) a seleção se deu ainda, da seguinte maneira, cada variável para ser escolhida deveria apresentar uma correlação em módulo de 0,7 com pelo menos duas outras variáveis.

Com os resultados obtidos na ACP construiu-se dendrogramas que possibilitam visualizar graficamente as distâncias euclidianas entre as variáveis. A distância euclidiana corresponde a distância geométrica entre dois objetos no plano

multidimensional e, portanto, é útil para se determinar quais as variáveis estão mais próximas neste plano.

Durante a confecção dos gráficos das análises dos componentes principais optou-se por fazer grupos das variáveis mais próximas para que didaticamente fosse mais fácil compreendê-los. Assim, por exemplo, o grupo 1 da Figura 56 corresponde a dias e recalques, os quais estão mais próximos, enquanto que na Figura 58 o grupo 1 correspondeu a dias e pH. Desta forma, ficou mais compreensível a descrição dos dados.

Durante a análise dos dados em relação ao estudo estatístico nem todos os fatores são aproveitáveis numa análise fatorial e há controvérsia sobre os critérios que determinam quando um fator é estatisticamente importante. Assim, a determinação do número de fatores pode ser facilitada por meio da análise do gráfico de *scree plot*. O número de fatores se refere ao número de variáveis estudadas.

Esta técnica (*scree plot*) mostra o número de componentes fatoriais extraídos em relação aos autovalores associados a um determinado fator. Para entender melhor o *scree plot* e o conceito de autovalor, é necessário conhecer o conceito de autovetor. Os autovetores de uma matriz de correlações consistem em representações lineares que são identificáveis no gráfico de *scatterplot* pelos maiores e menores diâmetros da elipse visualizável a partir dos pontos formados neste gráfico.

Os autovalores são, por sua vez, medidas do comprimento dos autovetores na elipse, ou da figura tridimensional elipsóide – se forem consideradas correlações multivariadas. Portanto, ao analisar os autovalores de um conjunto de dados, consegue-se conhecer de que forma as variâncias da matriz de correlações estão distribuídas. Em outras palavras, é possível visualizar as grandezas da figura elipsóide formada na distribuição espacial das variáveis. O autovalor é calculado pela soma dos quadrados dos carregamentos de cada variável para a variável latente representada pelo fator obtido.

Portanto, quando se analisa os autovalores de um conjunto de dados, consegue-se conhecer de que forma as variâncias da matriz de correlações estão distribuídas. Em outras palavras, os autovalores representam o quanto da variância é explicada pelo fator.

4. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão discutidos os resultados seguindo os objetivos apresentados na introdução da tese. Inicialmente serão focados os aspectos físico-químicos dos resíduos para, então, serem abordados a influência da matéria orgânica e da microbiologia nos recalques obtidos na célula experimental. Finalmente será feita uma análise estatística para interpretação dos dados.

No estudo direcionado ao comportamento de recalques optou-se pela divisão dos extratos de resíduos da célula experimental em 3 camadas que vão desde as placas superficiais (posicionadas imediatamente abaixo da camada de cobertura de solo compactado) até a profundidade onde está posicionada a placa inferior (apoiada sobre a camada de base de solo compactado). A camada superior corresponde ao extrato que coincide com a posição das placas superficiais até a placa 3. A camada intermediária fica situada entre a placa 3 e 4 e a camada inferior entre as placas 4 a 6. Assim a camada superior possui uma espessura de 430mm, a camada intermediária tem 680mm e a inferior possui 890mm, perfazendo um total de 2000mm de altura de resíduos sólidos urbanos (Figura 24).

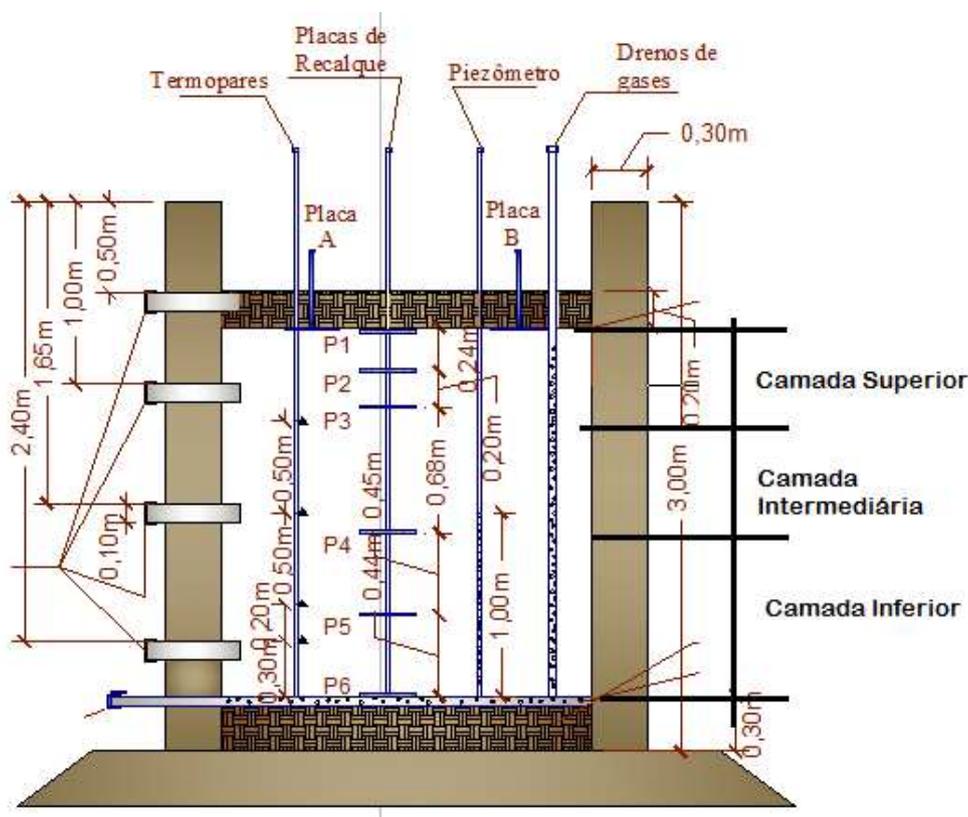


Figura 24: Croqui da célula experimental mostrando em detalhes a posição das camadas de resíduos

É importante ressaltar que sobre a camada superior de resíduos há a camada de cobertura que possui 200mm de espessura e, sob a placa 6 (0mm) também há uma camada de base de solo compactado 300mm de espessura

4.1. Caracterização dos Resíduos Sólidos Depositados na Célula Experimental

Antes do enchimento da célula experimental teve-se o cuidado de caracterizar os resíduos depositados quanto a aspectos físicos, físicos-químicos e microbiológicos. Estes parâmetros são de extrema importância para compreender o comportamento dos resíduos ao longo do tempo e profundidade de disposição na célula experimental.

4.1.1. Caracterização Física

A caracterização física envolveu a composição gravimétrica e volumétrica dos resíduos soltos e compactados, além da determinação da massa específica solta e compactada desses resíduos.

No que se refere à composição gravimétrica a Figura 25 mostra que a matéria orgânica está presente no interior da célula experimental em 66%. Esse alto percentual de matéria orgânica nos resíduos depositados pode indicar elevado percentual de deformação da massa de resíduos resultando em grandes recalques.

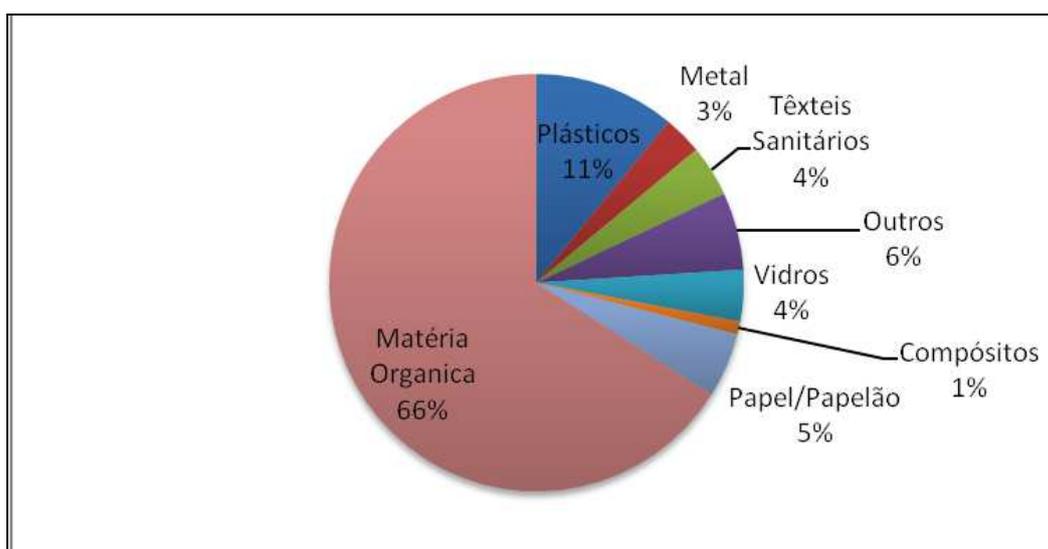


Figura 25: Composição Gravimétrica dos Resíduos

A Figura 25 ainda mostra que os plásticos atingiram um valor aproximado de 11% (percentagem em peso) do total dos resíduos. Este baixo percentual de plásticos

em relação ao teor de matéria orgânica, em termos de composição gravimétrica, reflete suas baixas massas específicas que contribuem para um menor valor em seu peso.

No caso da composição volumétrica (Figuras 26 e 27) observa-se que o teor de plástico é muito superior quando comparado a composição gravimétrica, que obteve cerca de 40% em volume na cidade de Campina Grande, pois é um material bastante leve, mas que em grande quantidade apresenta volumes excessivos.

Os resultados demonstram que a quantidade de plásticos, papéis e matéria orgânica variam bastante quando o percentual em massa é convertido para volume, indicando que estes compostos podem exercer grande influência no comportamento de um aterro.

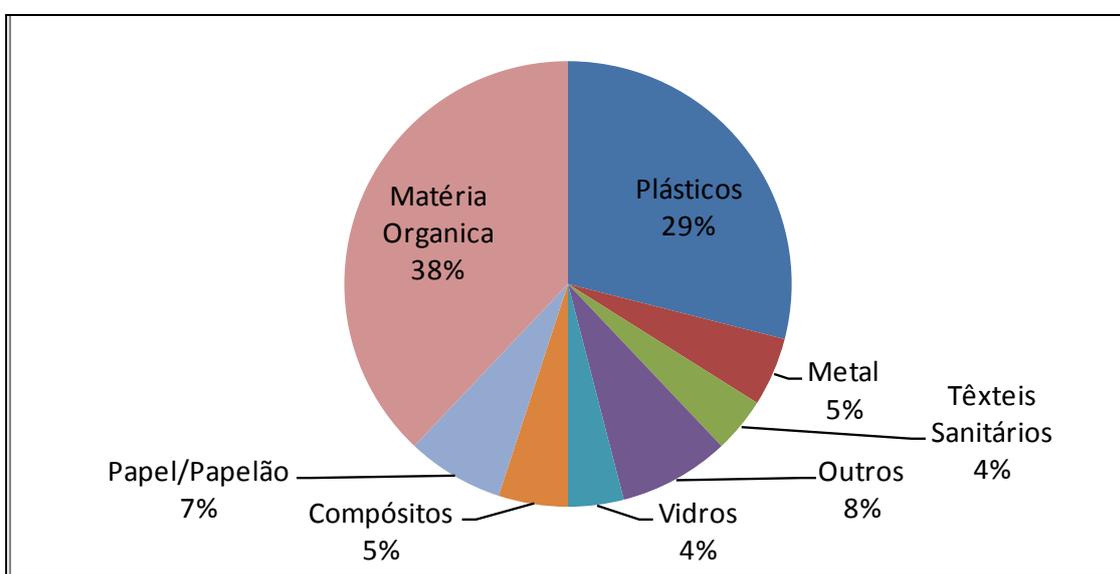


Figura 26: Composição volumétrica dos resíduos sólidos urbanos soltos.

Os componentes plásticos, quando em grande quantidades, podem segundo Fucale (2002) e Garcez (2009) ao serem depositados em aterros dificultar a compactação dos resíduos e prejudicar a decomposição dos materiais putrescíveis, pois criam camadas impermeáveis que afetam as trocas de líquidos e gases gerados no processo de biodegradação da matéria orgânica. Além do mais, bolsões de materiais parcialmente degradados podem ser criados no interior de filmes plásticos dificultando a saída de gases e líquidos pelo sistema de drenagem e, desestruturando o funcionamento mecânico de aterros. O aprisionamento de líquidos e gases no interior de aterros pode ainda ser tóxicos para microrganismo degradadores da matéria orgânica. Portanto, conforme Leite (2008) a triagem dos plásticos é de extrema importância e deve ser valorizada, para que as condições de aterro sejam melhoradas.

Os resultados obtidos para a composição volumétrica (Figura 26) dos resíduos soltos sem compactação inferem que as maiores porcentagens dos RSU da cidade de Campina Grande são compostos por matéria orgânica putrescível e plásticos, com valores aproximados de 38% e 29%, respectivamente.

Segundo Pereira *et.al.*,(2010) os valores acentuado de matéria orgânica é característico de países subdesenvolvidos e o alto teor de plásticos pode ser justificado, principalmente, pela presença de grande quantidade de invólucros de supermercados nos resíduos, indicando que a triagem desse material não vem ocorrendo nos domicílios através de programas de coleta seletiva.

Pereira *et.al.*, (2010) relata que no município de Campina Grande, local deste estudo, não ocorre de forma satisfatória a gestão de RSU pelos valores apresentados na volumetria e gravimetria dos resíduos em seus trabalhos.

O resultado para a composição volumétrica dos resíduos sólidos compactados foi semelhante ao obtido para os resíduos sólidos soltos, alcançando valores aproximados para matéria orgânica putrescível e plásticos de 36% e 28%, respectivamente (Figura 27).

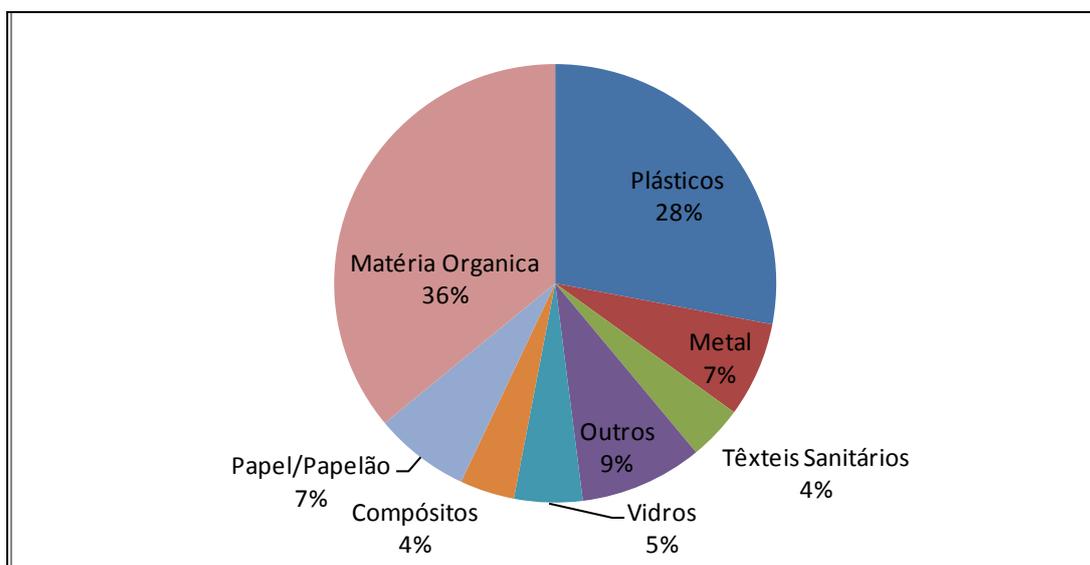


Figura 27: Composição volumétrica dos resíduos sólidos urbanos compactados.

No caso específico de plásticos, Fucale (2002) relata que estes podem atuar em aterros de RSU como matriz de reforço, sendo a composição dos resíduos semelhante a solos reforçados. Se por um lado os plásticos dificultam a degradação da matéria orgânica por criarem bolsões impermeáveis, por outro lado podem dar maior estabilidade a aterros de resíduos sólidos. Embora, na célula experimental estudada não foram realizados ensaios para determinar o quanto os plásticos representavam em

resistência à compressão e tração, pode-se observar que os plásticos dificultavam a retirada de amostras de resíduos mostrando o seu papel de coesão e agregação dos demais compostos no interior da célula experimental. Isto é uma informação muito importante, pois, aterros que são construídos com taludes muito elevados podem tê-los reforçados pela função que os plásticos exercem. Melo (2003) relata que os plásticos presentes em uma célula de aterros de RSU por ele estudada em Recife, PE dificultaram a drenagem de líquidos e gases por colmatarem os drenos, dificultando, inclusive os recalques, pois ocorreu acúmulos de líquidos no interior da massa de lixo.

No caso dos resíduos soltos e compactados mostrados na composição volumétrica, os resultados obtidos para papéis e papelões, compósitos, têxteis sanitários, vidros, metais e outros totalizaram menos de 40% do volume dos resíduos indicando menor representatividade na caracterização física, porém não menos importante. Mesmo assim, estes materiais, ainda, apresentam valores muito elevados, conforme estudos realizados por Catapreta & Simões (2008), Alves (2008) e Nascimento (2007). Na verdade não se deveriam encontrar esses materiais em aterros, pois a sua reciclagem é possível, desde que haja programas de gestão que contemple esta atividade associada a incentivos para o setor.

Catapreta & Simões (2008) determinaram a composição volumétrica dos resíduos dispostos em um Aterro Sanitário Experimental em Belo Horizonte- MG e os resultados encontrados mostram que a matéria orgânica ficou em torno de 24%, o que é muito menor ao encontrado na célula experimental estuda. Para as frações de papel e plástico referente à composição volumétrica, o resultado encontrado pelos autores foi de 66,5% sendo considerado um percentual elevado, inclusive bem maior ao encontrado em células experimentais estudadas por outros pesquisadores em Campina Grande (PEREIRA *et al.*,2010, MEIRA, 2009, GARCEZ, 2009 e LEITE, 2008). Os resultados obtidos por estes últimos pesquisadores demonstram que a cidade já está num nível de desenvolvimento econômico maior, já que quantidades menores de matéria orgânica em volume (36%) são demonstrativos desta condição.

Um ponto muito importante, mas pouco detalhado é justamente em relação ao volume da matéria orgânica ocupada no interior de um aterro de RSU. No caso da célula experimental a composição volumétrica da matéria orgânica tanto solta como compactada ocupou 38 e 38% respectivamente (Figuras 26 e 27). Este dado poderia, inicialmente, levar a conclusão que o recalque devido à degradação da matéria orgânica seria também em torno deste valor.

McDougal *et al.*, (2004) e Firmo *et.al.*, (2010) sugerem que nem toda a matéria orgânica é biodegradável e Melo (2003) diz que produtos de inibição inerentes à própria degradação da matéria orgânica ou presentes na massa de lixo disposta em aterros podem inibir ou diminuir a atividade metabólica dos microrganismos e, por consequência, a decomposição dos resíduos. Ainda em relação ao recalque outros componentes dispostos no interior da massa de resíduos contribuem com este fenômeno. Pode-se citar que, ainda, contribuem para os recalques o peso da camada de cobertura e o peso dos próprios resíduos (WALL & ZEISS, 1995).

O Quadro 2 mostra, de forma resumida os valores obtidos por meio da caracterização física dos RSU. Através Quadro 2 verifica-se que a massa específica solta e compactada para a matéria orgânica foi de $0,27\text{ton.m}^{-3}$ e $0,4\text{ton.m}^{-3}$, respectivamente. Os valores de têxteis sanitários, papéis e papelões são maiores para a massa específica compactada, pois após a sua compactação o volume é reduzido, aumentando o valor da massa específica, o que não acontece para os vidros, pois esse material não possui diferença quantitativa ao se comparar o seu volume solto e compactado.

Quadro 2: Valores obtidos por meio da caracterização física dos RSU.

RESÍDUOS	COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA (%)	COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA – SOLTO (%)	COMPOSIÇÃO VOLUMÉTRICA – COMPACTADO (%)	MASSA ESPECÍFICA – SOLTA (t/m^3)	MASSA ESPECÍFICA – COMPACTADA (t/m^3)
Plásticos	11	29	27	0,058	0,087
Metal	3	5	7	0,097	0,103
Têxteis Sanitários	4	4	4	0,146	0,209
Outros	6	8	9	0,107	0,138
Vidro	4	4	5	0,157	0,164
Compósitos	1	5	4	0,044	0,08
Papel e Papelão	5	7	7	0,122	0,169
Matéria Orgânica	66	38	37	0,268	0,4

Em relação à massa específica solta e compactada total os valores foram de $0,4\text{ton.m}^{-3}$ e $0,7\text{ton.m}^{-3}$, respectivamente. A massa específica solta total e compactada total está de acordo com a literatura técnica (LEITE, 2008, GARCEZ, 2009, LANDVA & CLARK 1990, KAIMOTO & CEPOLLINA, 1996). Estes autores relatam ainda que a massa específica compactada de $0,7\text{ton.m}^{-3}$ são valores excelentes até mesmo para um bom funcionamento mecânico de um aterro. Junqueira (2000) diz que para valores em torno de $0,3\text{ton.m}^{-3}$ são considerados lixo solto, em torno de $0,5\text{ton.m}^{-3}$ lixo no caminhão compactador e mais de 1ton.m^{-3} lixo muito compactado no aterro. Os valores

dependem de uma série de fatores tais como equipamentos utilizados, teor de umidade, composição do lixo etc.

Ao longo do tempo de operação de um aterro sanitário, por exemplo, a constante deposição de camadas sobrepostas de resíduos e o processo de decomposição da matéria orgânica acabam por promover uma redução volumétrica do aterro e alterar o seu comportamento geotécnico, principalmente em relação a sua estabilidade (CATAPRETA *et.al.*, 2006). Portanto, uma boa compactação dos resíduos associados aos processos de decomposição da matéria orgânica permite identificar melhor as mudanças geotécnicas que podem ocorrer em um aterro sanitário, principalmente em relação a sua estabilidade e aos processos de recalques.

De uma forma geral, pode-se dizer, baseado nestes pesquisadores, que a célula experimental estudada está com uma boa compactação o que implica num bom funcionamento mecânico e biodegradativo. A compactação mecânica em torno de $0,7\text{ton.m}^{-3}$ associado com uma boa umidade segundo Bidone e Povinelle (1999) favorece, sobretudo, a metanogênese. Vale salientar que a umidade dentro da célula experimental estudada variou de 40 a 55% durante o período de coletas o que é propício ao microrganismos degradadores da matéria orgânica (ALCÂNTARA, 2007, MEIRA, 2009 e LEITE, 2009). Dados bem semelhantes ao encontrado na célula experimental estudada aqui em Campina Grande foram encontrado por Alcântara (2007) em resíduos da Região Metropolitana de Recife e segundo este pesquisador a umidade (60% a 40%) e, o grau de compactação em torno de $0,7\text{ton.m}^{-3}$ beneficiou a degradação da matéria orgânica.

4.1.1.1. Teor de Umidade

O teor de umidade encontrado na célula experimental (Figura 28) em diferentes profundidades e no tempo, praticamente não variou, ocorrendo pequenas oscilações, com exceção da camada superior. Nesta camada por acontecer à lixiviação e o contato direto com o ar atmosférico a troca de umidade, calor e energia é intensa. Entretanto os valores de umidade encontrados no interior da célula experimental são propício ao desenvolvimento de organismos degradadores da matéria orgânica.

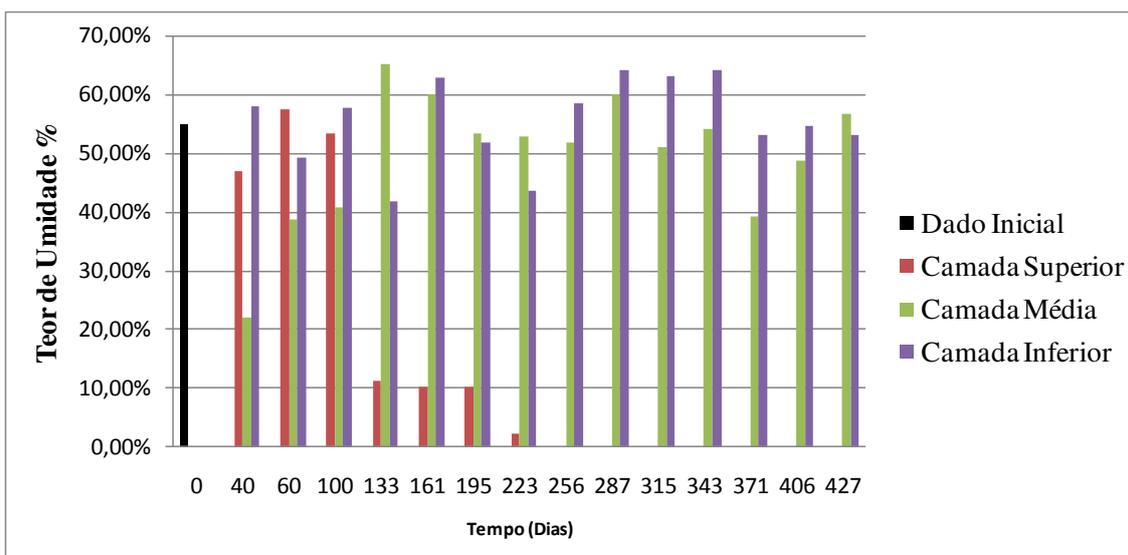


Figura 28: Teor de Umidade em Função do Tempo e da Profundidade

Através da coleta de dados observou-se que a umidade inicial dos RSU depositados no aterro ficou em 55% o que também foi encontrado por outros pesquisadores como Leite (2008) e Garcez (2009) estudando células experimentais com resíduos recentes da cidade de Campina Grande. Para fungos o teor de umidade ótimo é bastante variável e, para Palmisano & Barlaz, (1996) este valor fica na faixa de 20 a 40%. Já Bidone & Povinelli, (1999) apontam a faixa ideal para a degradação entre 40 e 60%. Isso condiz de uma maneira geral com a quantificação de microrganismos encontrados no interior da célula experimental estudada em diferentes profundidades conforme apresentado no estudo microbiológico.

Alcântara (2007), Meira (2009) e Kiehl (1985) indicaram a faixa de umidade mais adequada ao processo de degradação nos aterros simulados entre 45% a 65% semelhante ao caso da célula experimental monitorada. Importante ressaltar que o teor de umidade, conforme Firmo *et.al.*,(2010), é um parâmetro que pode ser utilizado para se estudar a capacidade de biodegradação dos resíduo, pois a disponibilidade de água no meio é um dos fatores que influencia diretamente a atividade microbiana.

No caso da célula experimental nas camadas intermediária e inferior não ocorreram flutuações significativas de microrganismos como será melhor discutido no estudo microbiológico. Assim, provavelmente, o conteúdo de umidade influenciou positivamente ou não influenciou o desenvolvimento de microrganismos. Na Camada superior o teor de umidade ficou na faixa de (47 a 57%) até o mês de janeiro 2010 (133 dias de análises), contudo após esse mês os teores caíram para valores de até 2% em 223 dias de monitoramento. Assim, no extrato superior não foi mais possível fazer coletas

de material depois de decorridos 223 dias, pois as amostras colhidas já estavam na forma torrões secos. Além do mais após alguns períodos de coleta, verificou-se que na camada superior não havia mais matéria orgânica a ser degradada, mas somente solo, o que explica a pouca umidade encontrada.

Vale salientar que em Campina Grande a precipitação anual é em torno de 700mm e a evaporação em torno de 1500ml o que faz com que haja maior evaporação do meio e isso, provavelmente, afetou não só a umidade como outros parâmetros estudados neste extrato de resíduos. As precipitações mensais ficaram no meses de chuva em torno de 220mm e nos meses de estiagem houve uma variação de 0 a 80mm de precipitações e, especificamente, quando se começou a monitorar a célula experimental não choveu.

No que se refere a evaporação mensal esta ficou em torno de 180ml nos meses de estiagem e próximo de 80ml nos meses de chuvas (Figura 29). Os dados de precipitação e evaporação da cidade de Campina Grande comprovam que há um deficit hídrico o que pode ser um dos principais fatores por não ocorrer a presença de lixiviados no sistema de drenagem da célula experimental pesquisada. Os dados de precipitação *versus* evaporação mensal foram fornecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA/Algodão de Campina Grande-PB e são referentes aos meses de outubro de 2009 a agosto de 2010. Infelizmente, não foi possível adquirir dados a partir de 2010.

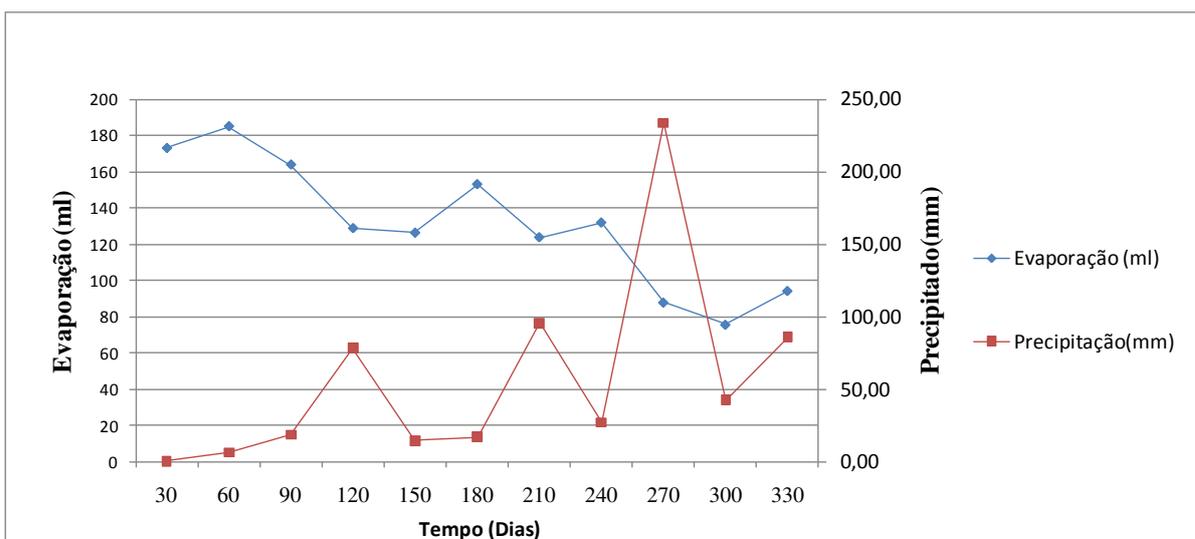


Figura 29: Evaporação *versus* Precipitação em Função do Tempo

Leite *et al.*,(2008) relatam em seus estudos que a umidade é fundamental para que organismos se desenvolvam, pois a água presente no interior da massa de resíduos permitem um deslocamento facilitado dos nutrientes, microrganismos e suas enzimas e durante a confecção deste trabalho a quantidade de microrganismos, sempre, foi alta indicando condições favoráveis de temperatura, umidade e nutrientes.

Como já explicado na cidade de Campina Grande a precipitação anual é bastante baixa o ano inteiro (média de 700mm), entretanto no interior da célula experimental a umidade sempre esteve acima de 40%, com exceção da camada superior, por motivos já citados. Porém, estes valores elevados de umidade se devem a presença de matéria orgânica que em sua composição possui até metade ou mais de seu peso em água.

Importante frisar que a composição gravimétrica existente no interior da célula experimental é de 66% de matéria orgânica, o que representa uma grande quantidade de água. Os cálculos sugerem que no interior da célula estudada (Quadro 3) a quantidade de água caiu entre 45 e 36% na camada intermediária e inferior, respectivamente. Pode-se dizer que a camada inferior tem maior quantidade de líquidos armazenados em seus vãos (63%) devido, possivelmente a liviação. Na camada superior esta queda de umidade com o tempo foi acima de 95% o que justifica a presença de torrões na camada de cobertura de solo compactado. Atualmente, a célula experimental pode ter um total de 0,77m³ água no seu interior. Essa condição pode favorecer o desenvolvimento de diversos tipos de microrganismos.

Quadro 3: Variações de matéria orgânica e água durante o monitoramento da célula experimental

Camada de RSU	Quantidade de Mat. Org. Total (ton)	Quantidade de Mat. Org. Final (ton)	Quantidade de Água Inicial (m³)	Quantidade de Água Final (m³)
Camada superior	0,64	0,04	0,35	0,02
Camada intermediária	1	0,6	0,55	0,30
Camada inferior	1,3	0,8	0,71	0,45

Pode-se dizer que a camada inferior tem maior quantidade de líquidos armazenados em seus vãos (63%) devido, possivelmente a liviação (ZANONI, 1972, WALLS, 1975 e LIMA *et. al.*, 2003). Mesmo, possivelmente, tendo uma elevada quantidade de água nos resíduos durante o monitoramento da célula estudada, sobretudo na camada inferior e exceção da camada superior, não houve a ocorrência de lixiviados. Durante os estudos verificou-se que o índice de vazios é elevado (1,0) e, muito maior que alguns tipos de solos e, portanto, a capacidade de absorção de líquidos é alta (LINS

et. al., 2003). Aliado a baixa precipitação, alta evaporação e o elevado índice de vazios é possível sugerir estes fatores como responsável pela não ocorrência de lixiviados. Mesmo assim, estudos mais aprofundados devem ser elaborados para se determinar se realmente é esta a causa de não ocorrer à presença de lixiviados.

4.1.1.2. Temperatura

A temperatura é um parâmetro físico de grande importância, que interfere nos processos biológicos, reações químicas e bioquímicas que ocorrem no interior da célula experimental. Segundo Junqueira (2000) as temperaturas no interior da massa de resíduos influenciam na atividade microbiológica e de maneira bastante específica para cada tipo de grupo microbiano. Vale salientar que conforme Tortora (2000) ocorrem faixas ótimas de degradação para cada grupo de microrganismo o que pode selecionar espécies microbianas.

4.1.1.2.1. Temperatura em Função do Tempo

A Figura 30 apresenta a temperatura externa à célula estudada e a variação da temperatura nas diferentes profundidades em função do tempo de acordo com a posição de sensores de temperaturas (TI, TII, TIII, TIV). Nota-se, através da Figura 30, que as temperaturas inicialmente no interior da célula experimental estão mais elevadas, de um modo geral (primeiros 100 dias) e, posteriormente vão decrescendo com o tempo. Também é verificado que a temperatura nos diferentes extratos, com exceção da camada intermediária, esteve maior que a temperatura ambiente (externa).

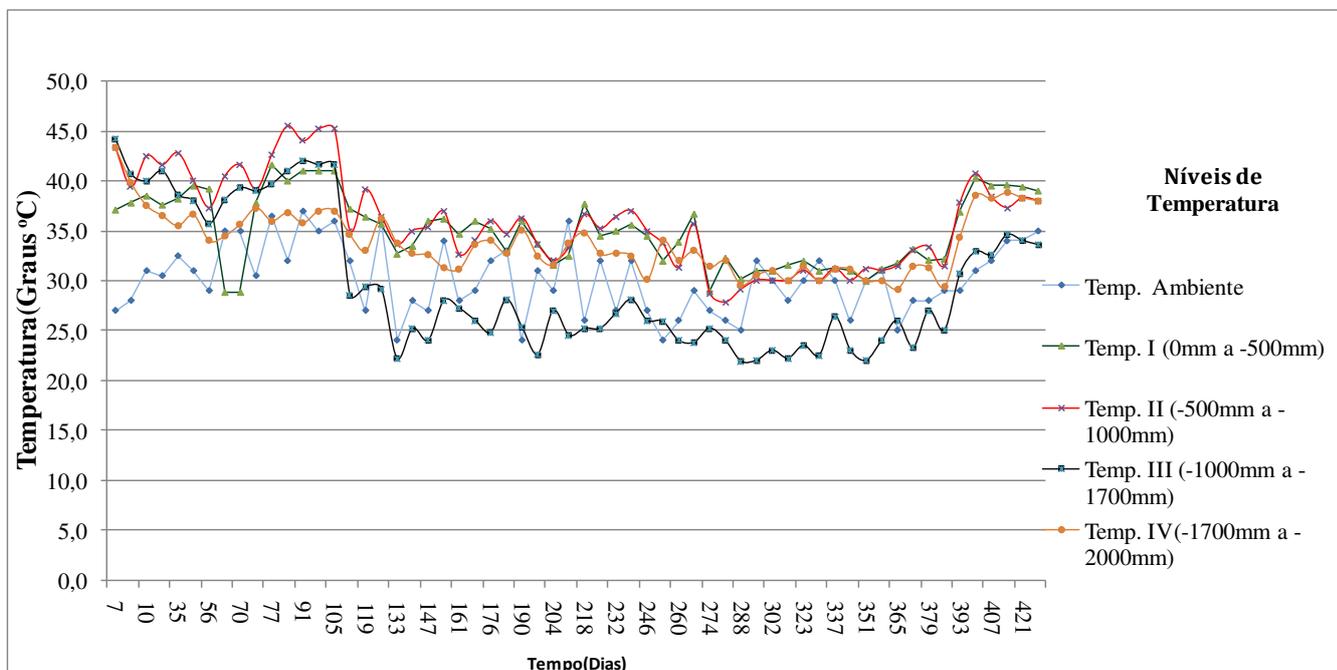


Figura 30: Temperatura em Diferentes Profundidades em Função do Tempo

Nos 100 primeiros dias de monitoramento da célula experimental a temperatura em todas as profundidades esteve mais elevada que a temperatura externa (ambiente) à célula o que pode sugerir um ambiente aeróbio. Num metabolismo aeróbio há um sistema exotérmico, portanto, as temperaturas do ambiente interno são maiores. Isto será explicado em detalhes no item posterior.

A temperatura externa à célula oscilou de 24 a 37°C durante o tempo de coleta de dados. As temperaturas mais elevadas foram durante os meses de dezembro de 2009 a janeiro de 2010 (77 dias a 126 dias) e as mais baixas foram nos meses de chuva que corresponde de maio a agosto de 2010 (274 a 337 dias). Com o passar do tempo a temperatura externa teve oscilações de até 7 °C dentro da mesma semana de coleta, estas variações ocorreram tanto nos meses de chuva como nos meses de estiagem.

Esta temperatura externa, moderadamente elevada se comparada a outros locais, é benéfica a aterros de RSU como Melo (2003) relata. Se as temperaturas externas forem muito menores que o meio interno da célula, principalmente, em períodos chuvosos a desestabilização da atividade biológica seria muito maior, o que ocasionaria distúrbios de metabolismo. Isto é mais freqüente em países de climas temperados a frios. Nestes casos quando ocorrem às precipitações estas tem temperaturas mais baixas e, ao penetrarem na massa de resíduos desestabilizariam o meio interno microbiano.

Verifica-se que as temperaturas nos sensores TI, TII, e TIV apresentam valores muito próximos e com o mesmo padrão durante o passar do tempo. As temperaturas nos

sensores TI e TII, como esperado, estão muito próximas uma vez que a profundidade entre estes sensores de temperaturas é de apenas 0,5m. Estes dois medidores, ainda, apresentaram temperaturas muito próximas as das temperaturas externa à célula experimental indicando que são, provavelmente, influenciadas pelo ambiente externo.

O sensor de temperatura TIII que fica aproximadamente a 1m de profundidade (faixa de -1000mm a -1700mm) e teve temperaturas mais baixa, principalmente, após os 90 dias iniciais. Isto contrária o esperado, uma vez que está camada apresentou atividade microbiana e maiores consumo de matéria orgânica com o tempo. Possivelmente, nesta profundidade, houve um dano do sensor de temperatura e isto ocasionou falhas nas leituras, já que próximo a este sensor de temperatura há um orifício de coleta de amostras. Verifica-se, inclusive, que até 95 dias de monitoramento a temperatura apresentada pelo sensor TIV é muito próxima aos demais sensores, sugerindo algum dano.

No que se refere ao sensor TIV, que se situa a 300mm da camada de base, a temperatura ficou semelhante ao comportamento dos sensores de temperaturas TI e TII. Na camada mais profunda era esperada uma temperatura elevada devido à maior atividade metabólica, no entanto, esta camada sofre devido aos lixiviados das camadas superiores o que pode ocasionar distúrbios no meio interno. Segundo Melo (2003) e Monteiro *et. al.*,2006 em camadas mais profundas ocorrem acúmulo de líquidos e substância toxicas como metais, amônia e outros constituintes que pode afetar a atividade metabólica, e conseqüentemente, diminuir a temperatura do meio. Entretanto, não foi possível observar a ocorrência de lixiviados pelo sistema de drenagem da célula monitorada. Contudo, nesta camada houve alguns parâmetros que destoaram dos demais, indicando, uma perturbação devida, provavelmente, aos lixiviados e, talvez, a compactação maior nesta profundidade ocasionada pelo peso dos próprios resíduos.

Como já fora destacado, o alto índice de vazios poderá ter contribuído pela falta de lixiviados. Durante o monitoramento não foi possível verificar a presença de lixiviados apesar de ocorrerem precipitações durante o ano e a própria matéria orgânica apresentar água, além é claro que a própria biodegradação gera como um dos produtos finais a água. Segundo Lins *et. al.*,2003 existem inúmeras variáveis que estão ligadas a geração de percolados, como por exemplo: a umidade dos RSU, decomposição da matéria orgânica, precipitação, umidade do solo, capacidade de campo dentre outras coisas.

De uma maneira geral, as temperaturas externas podem influenciar o meio interno principalmente se a célula tiver uma grande área de superfície em relação ao volume. Embora, no caso de a célula experimental não se terem dados que possa indicar algo conclusivo, a sua área de superfície em relação ao volume é cerca de 3 vezes maior. Mesmo assim, é importante analisar com mais profundidade a relação área de superfície/volume e como os materiais que constituem a parede da célula experimental se relacionam com o ambiente externo e interno.

4.1.1.2.2. Temperatura em Função da Profundidade

A Figura 31 mostra a temperatura em função do tempo e da profundidade e pode-se notar que a temperatura oscilou tanto em profundidade quanto no tempo.

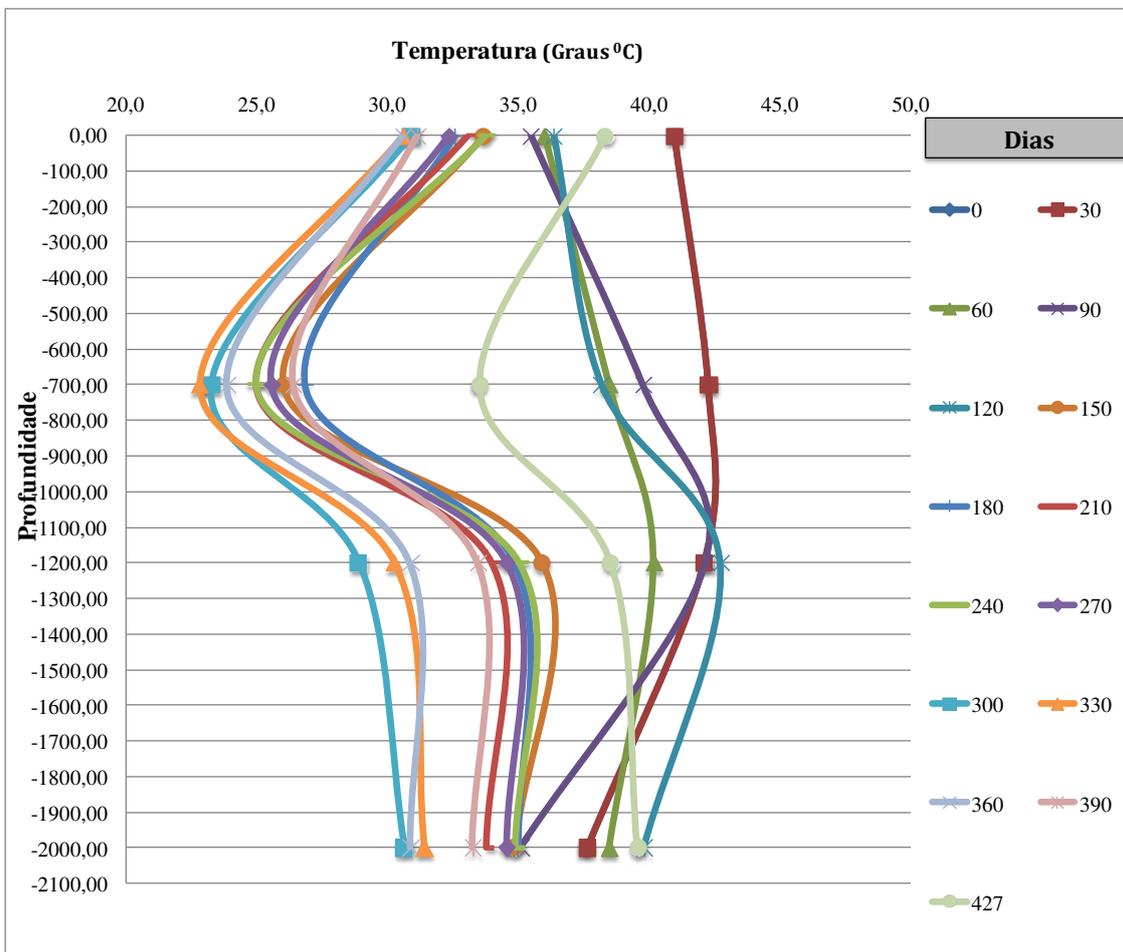


Figura 31: Temperatura em Função do Tempo e da Profundidade

De acordo com os dados coletados até a profundidade de -700mm a temperatura oscilou de 23°C até 42°C durante o espaço de tempo monitorado (Sensor TI e TII), contudo as temperaturas caíram lentamente (1 a 7°C). Nas profundidades entre -700mm

a -2000mm as temperaturas começaram a aumentar (até 9°C). Estas temperaturas, tiveram um comportamento bastante atípico, de um modo geral, com o tempo e profundidade. Importante salientar que nos primeiros 120 dias de monitoramento da célula experimental as temperaturas tiveram um comportamento semelhante a de células experimentais e aterros em escala real, ou seja, temperaturas mais baixas nas superfícies e na base e, temperaturas mais elevadas em camadas intermediárias (MELO, 2003, MONTEIRO *et. al.*, 2006, ALCÂNTARA, 2007, LEITE, 2008 e MEIRA, 2009).

Após 126 dias de monitoramento houve uma mudança brusca no comportamento da temperatura, unicamente, nas profundidades de -700mm a - 1200mm. Esta mudança nas leituras de temperaturas permaneceu até o final de monitoramento (427 dias). O fato de as temperaturas caírem bruscamente nesta profundidade ocorreu, possivelmente, devido a danos causados no sensor TIII durante a coleta de amostras de resíduos. Durante a coleta, um amostrador em forma de trado helicoidal, é inserido nos orifícios de amostragem e este é pressionado bruscamente e rodado para se obter as amostras, o que pode ter deslocado o sensor TIII, que fica perto deste orifício de coleta. Entretanto, estudos mais detalhados devem ser realizados para entender de fato o que aconteceu com a temperatura no interior da célula experimental nesta profundidade.

Em se tratando da célula experimental monitorada, a temperatura não influenciou a presença de microrganismos, já que estes foram constantes em todas as profundidades e, principalmente, os aeróbios. Se a temperatura tivesse influenciado haveria uma troca de grupos microbianos de aeróbios para anaeróbios, o que não ocorreu. Também é importante frisar que a degradação da matéria orgânica foi satisfatória, e principalmente, na profundidade intermediária, onde a temperatura decresceu, o que não é justificável, já que em temperaturas menores ocorre um metabolismo mais lento e, portanto menor degradação da matéria orgânica e conseqüentemente menor recalque, o que mais uma vez corrobora com um possível deslocamento do sensor que mede a temperatura na camada intermediária.

Outro fator a ser relatado é que as temperaturas de um modo geral começaram a diminuir após 150 dias de monitoramento (Figura 31), sugerindo uma menor atividade microbiana. O que aconteceu é que após 60 dias de monitoramento os microrganismos aeróbios tiveram um leve decréscimo de ordem de grandeza (10^8 para 10^7 UFC/mL) como será mostrado no estudo microbiológico e, os microrganismos anaeróbios passaram a ter um incremento significativo após 40 dias de monitoramento. Este aumento foi de 10^3 para até 10^{15} NMP/100mL em 371 dias de análises. Mas isto, por si

só, não permitiria diminuir a temperatura, pois os microrganismos aeróbios permaneceram no meio interno de resíduos e com valores sempre altos.

Sabe-se que a temperatura da célula experimental é função do metabolismo microbiano. Organismos aeróbios têm um metabolismo exotérmico, o que produz um aquecimento da massa (TORTORA, 2000 e MELO, 2003). Num aterro de RSU o aumento da temperatura na fase aeróbia (até 30 dias de monitoramento) é influenciado pela maior disponibilidade de oxigênio no interior da massa de resíduos.

Passado a fase inicial de tratamento de resíduos, ocorre a diminuição gradual da temperatura que pode ser acompanhada pela diminuição da relação Carbono/Nitrogênio. Observou-se, na célula experimental estudada, um aumento inicial da temperatura, mas este só veio a cair de uma maneira geral e em cada extrato após 150 dias, o que contradiz os resultados de microrganismos, pois estes sempre se mantiveram altos e, principalmente, os aeróbios totais.

De uma maneira geral é possível pelos dados coletados de temperatura que a célula experimental já esteja entrando num período de maturação, pois, além do decréscimo da temperatura, outros parâmetros como DBO, DQO, SV, pH, cloretos e alcalinidade mostram este quadro de declínio, com exceção, como já descrito, dos microrganismos. Estes últimos dados serão analisados detalhadamente nos itens posteriores.

4.1.1.2.3. Temperatura Externa à Célula Experimental

Analisando a temperatura ambiente ou externa (Figura 30) à célula experimental, esta oscilou de 24°C nos meses de chuva (junho a agosto/2010) a até 37°C nos meses estiagem (Dezembro/2009 a Março/2010) o que corrobora com os dados de precipitação e evaporação da cidade de Campina Grande como já comentado. Contudo, temperaturas altas e um pouco mais baixas foram encontradas em todos os períodos de análises, independente de ser época de estiagem ou de chuvas. De uma forma geral, a temperatura externa teve maior influência na camada superior. Inclusive, as temperaturas da camada superior monitorada em função do tempo são muito próximas às temperaturas do ambiente e, os resultados obtidos, principalmente, físico-químicos nesta camada mostram esta relação muito forte com o ambiente externo como será visto no item seguinte.

4.1.2. Caracterização Físico-Química

4.1.2.1. Potencial Hidrogeniônico (pH)

A Figura 32 mostra a faixa de variação de pH em função do tempo e profundidade. O pH inicial dos resíduos depositados foi de 5,3 e entre 60 e 100 dias houve um acréscimo no pH em todas as profundidades. Neste período este acréscimo chegou próximo de 8 para o extrato de resíduos na porção inferior. As leituras de pH subsequentes ficaram sempre próximas de 7 ou maiores, chegando a valores próximos de 9 (60 a 427 dias). Estes valores maiores após 60 dias de aterramento dos RSU indicam, possivelmente, que a célula experimental passou da fase de hidrólise para as fases posteriores de degradação da matéria orgânica, sendo que as fases de acidogênese e acetogênese não são claramente perceptíveis e, que a fase metanogênica ocorreu após os 60 dias iniciais de monitoramento.

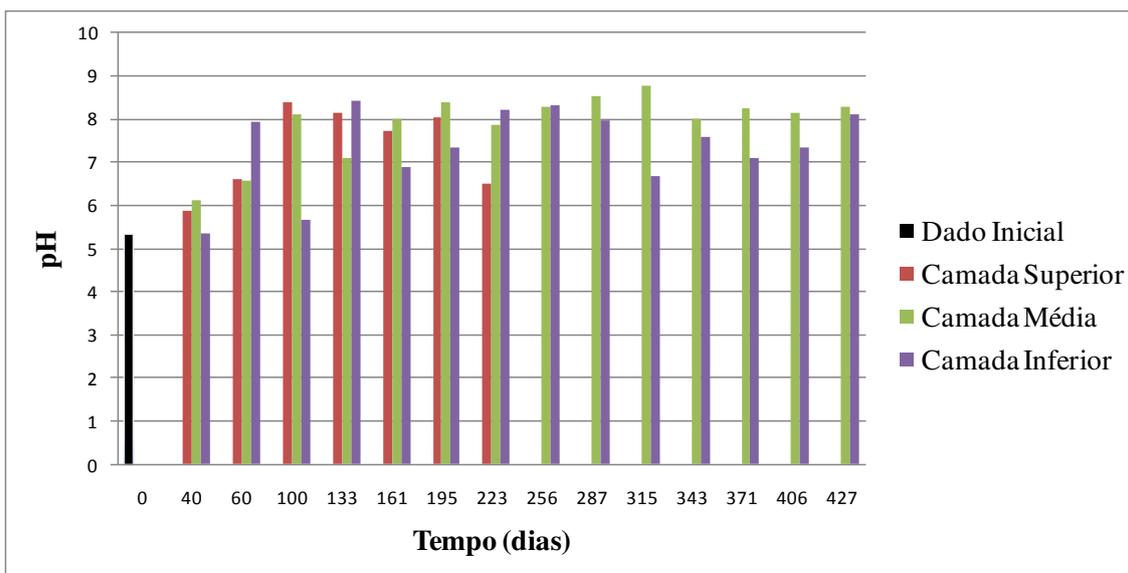


Figura 32: Potencial Hidrogeniônico (pH) em Diferentes Profundidades e ao Longo do Tempo

Estudos em aterros de escala real mostram que resíduos com menos de 2 anos de idade podem variar os valores de pH varia de 4,5 a 7,5, porém o pH típico é 6. Aterros com mais de 10 anos de operação possuem pH em torno de 6,6 a 7,5 (TCHOBANOGLOUS *et.al.*, 1993). No caso da célula experimental o pH inicial ficou em 5,3 e após 60 dias já apresentavam pH típico de resíduos mais velhos (pH maiores que 7). Possivelmente, isto ocorreu mais rapidamente, devido a área de superfície ser bem maior que o volume se comparado há um aterro em escala real. Esta área de

superfície aumentada facilita as trocas de calor e energia com ambiente e conseqüentemente pode aumentar o metabolismo microbológico.

Como será discutido no estudo microbiológico conforme houve variação do pH ocorreu um aumento de microrganismos anaeróbios e, os aeróbios tiveram uma leve redução em seus números quantitativos indicando que, a fase de hidrólise teve duração de mais menos 30 dias e posteriormente uma leve fase acidogênicas e acetogênica de 30 a 100 dias e, em torno de 100 dias, a fase metanogênica. Estes dados estão de acordo com os parâmetros de alcalinidade que será discutida adiante. Dados semelhantes com Leite (2008) Garcez (2009) foram encontrados em seus trabalhos com uma célula experimental, na cidade de Campina Grande, de dimensões um pouco menores que o estudado neste trabalho com relação ao pH.

4.1.2.2. Alcalinidade Total

A alcalinidade total, embora, esteja oscilando teve um mesmo padrão de aumento com o tempo (Figura 33) em todas as profundidades. Segundo Alves (2008) a alcalinidade proporcionada pelos metais alcalinos e alcalinos terrosos presentes em um aterro podem controla a acidez.

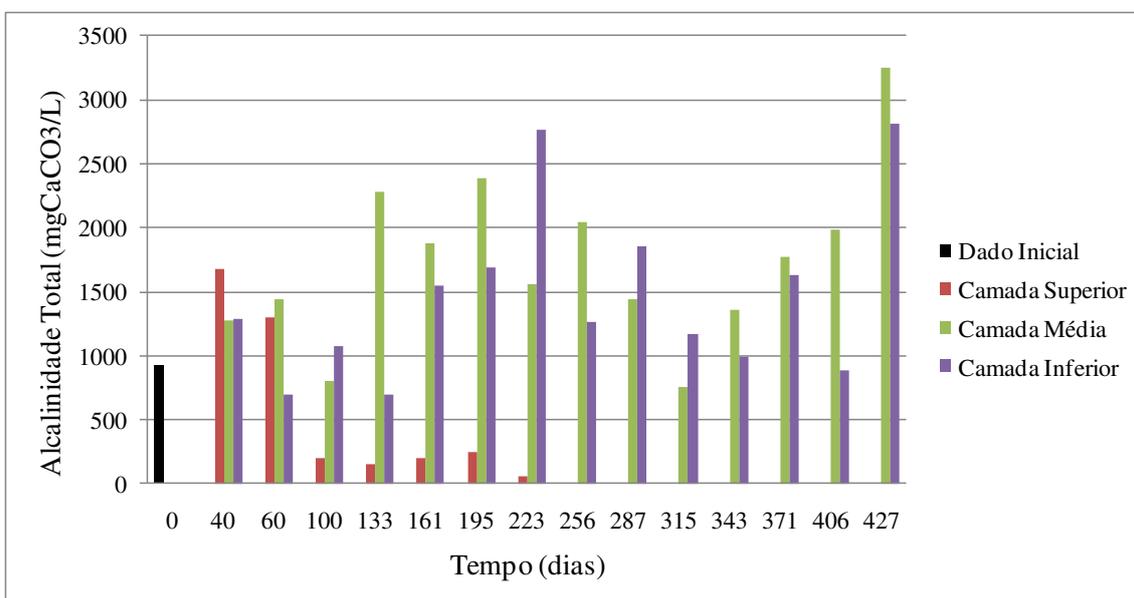


Figura 33: Alcalinidade Total em Diferentes Profundidades e ao Longo do Tempo.

Particularmente na fase metanogênica a alcalinidade mais elevada pode estimular o processo degradativo. Os dados microbiológicos aliados aos dados de decomposição da matéria orgânica apontam para um bom desenvolvimento da biota microbiana com o tempo. Deve-se destacar, no entanto, que alcalinidade não é sinônimo

de pH e sim que o sistema tem elevadas concentrações de espécies alcalinas e, que em função disso tem resistência a queda de pH (CHERNICHARO, 1997)

Observa-se que a alcalinidade na célula experimental ficou entre $500\text{mgCaCO}_3\text{L}^{-1}$ no início do aterramento passando a valores maiores de $1000\text{mgCaCO}_3\text{L}^{-1}$ e alguns casos chegando a $3300\text{mgCaCO}_3\text{L}^{-1}$ indicando que a biodegradação está ocorrendo de forma satisfatória segundo Metcalf & Eddy (1991).

Durante a biodigestão anaeróbia a alcalinidade aumenta pelo fato de ocorrer, também, a remoção de ácidos graxos voláteis e a amonificação, conforme Souza, (1996). No caso da célula experimental, durante o monitoramento houve uma redução de ácidos graxos corroborando com o aumento de alcalinidade e até com o incremento microbiano anaeróbio como já citado.

4.1.2.3. Ácidos Graxos Voláteis

Os ácidos graxos voláteis tiveram uma redução no tempo (Figura 34). No que se referem à profundidade os níveis de ácidos Graxos Voláteis seguem o mesmo padrão de decaimento.

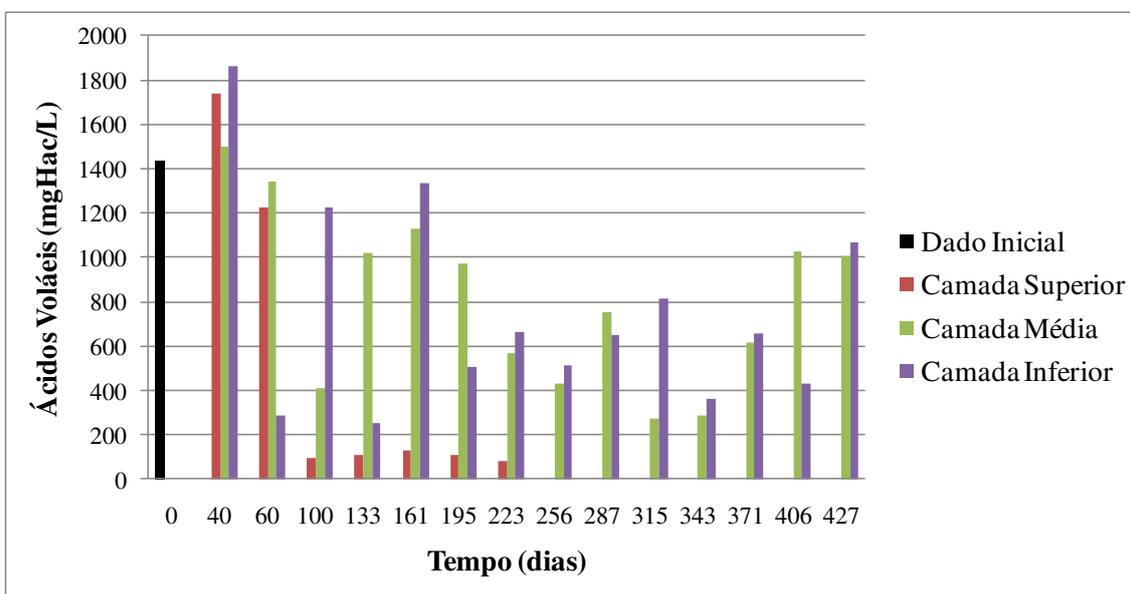


Figura 34: Ácidos Graxos Voláteis em Função do Tempo e da Profundidade

Como já dito a alcalinidade aumenta pela redução dos ácidos graxos voláteis e a amonificação. Estes resultados mostram que está ocorrendo a degradação da matéria orgânica. Isoldi *et. al.*, (2001) dizem que ácidos orgânicos voláteis são importantes para o acompanhamento e controle da digestão anaeróbia. O monitoramento de ácidos graxos

voláteis pode, inclusive, direcionar o modo de operação de biorreatores. Leite *et.al.*,(2007) em seus estudos obtiveram resultados parecidos aos encontrados na célula experimental monitorada neste estudo e no caso destes pesquisadores os dados de ácidos graxos voláteis foram relacionados ao bom desenvolvimento da biota microbiana e o aumento de alcalinidade, embora, também, ocorressem flutuações em seus dados.

No caso da célula experimental estudada neste trabalho os ácidos graxos voláteis variaram em alguns períodos, provavelmente, devido à heterogeneidade dos resíduos depositados. Os ácidos graxos voláteis variaram de $1400\text{mgH}_{\text{ac}}\text{L}^{-1}$ a $1870\text{mgH}_{\text{ac}}\text{L}^{-1}$ o que está um pouco abaixo da literatura. Leite, *et.al.*, (2008) encontraram em seus estudos com biorreatores contendo resíduos sólidos vegetais e lodo de esgoto valores $1920\text{mgH}_{\text{ac}}\text{L}^{-1}$ a $10.350\text{mgH}_{\text{ac}}\text{L}^{-1}$ e obtiveram excelentes resultados na bioestabilização deste material. Em se tratando da célula experimental estudada existe uma enorme gama de outros compostos não orgânicos que justificam os valores mais tímidos encontrados neste trabalho (LEITE, 2008 e MEIRA, 2009).

Neste estudo, fez-se relação entre ácidos graxos voláteis/alcalinidade em diferentes profundidades e no tempo (Figura 35). Inicialmente, verificou-se que a relação ácidos voláteis/alcalinidade teve valores próximos de 1,6 (primeiros 30 dias) e posteriormente esta relação caiu entre 0,5 a 0,3 indicando condições favoráveis de aumento na eficiência da bioestabilização da matéria orgânica conforme (LEITE *et.al.*,2008).

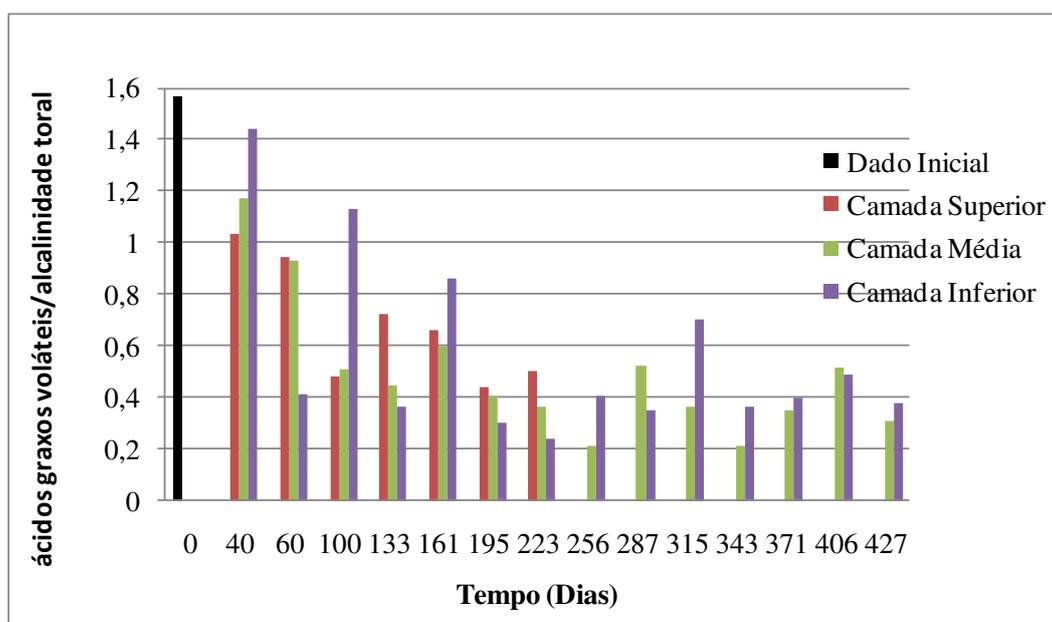


Figura 35: Relação Ácidos Voláteis/Alcalinidade em Diferentes Profundidades e no Tempo

Na Figura 35, vê-se que embora todos os parâmetros diminuam com o tempo os dados corroboram que está ocorrendo à diminuição dos ácidos graxos com um aumento de alcalinidade. As amostras da camada intermediária e inferior seguem um padrão semelhante com o passar do tempo, embora, ocorram algumas pequenas flutuações o que é bastante normal quando se trata de RSU. Nota-se, também, que houve um rápido decréscimo de valores ácidos graxos voláteis/alcalinidade em diferentes profundidades o que ocorre bem mais lentamente em célula de tamanho real (MELO, 2003 e MONTEIRO *et. al.*, 2006). Segundo Meira (2008) e Garcez (2009) em seus trabalhos com célula experimentais houve uma rápida diminuição de ácidos voláteis com um incremento da alcalinidade indicando que, células de resíduos sólidos com dimensões reduzidas podem aumentar a eficiência de degradação de compostos.

4.1.2.4. Cloretos

Os valores de cloretos vistos na Figura 36 são relativamente altos, o que também indica alta carga de matéria orgânica. Segundo, muitos autores (Monteiro *et.al.*,2006 e Melo, 2003) o teores de cloreto é um dos melhores indicadores da contaminação por lixiviado.

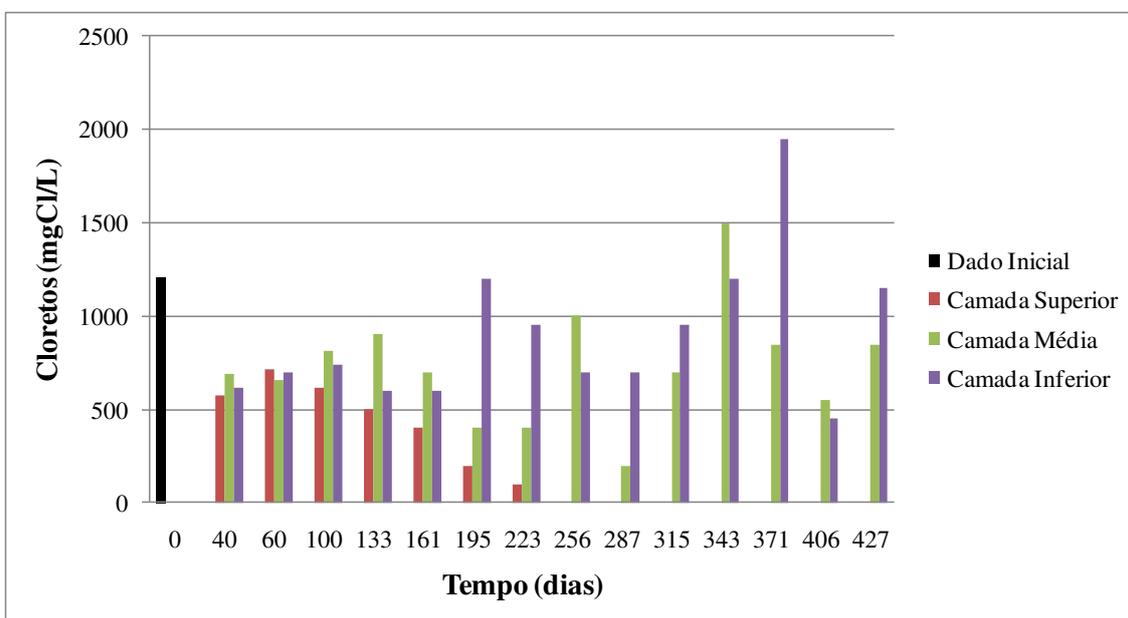


Figura 36: Cloretos em diferentes profundidades e ao longo do tempo

Souto e Povinelli (2007) verificaram que 72% dos aterros de resíduos sólidos urbanos tem cloreto de até 3000 mg/L. Sendo assim as concentrações encontradas no lisímetro estudado são até discretas. Valores semelhantes a estes foram encontrados por

Garcez (2009) e Leite (2008) também estudando resíduos disposto em uma célula experimental na cidade de Campina Grande. Entretanto, pela falta de lixiviados no sistema de drenagem não se sabe qual é a concentrações de cloretos e outros parâmetros nos líquidos interno da célula experimental. O que poderia indicar a periculosidade destes compostos ao meio ambiente.

Observa-se na Figura 36 que a tendência dos cloretos no tempo está aumentando e não diminuindo, sobretudo na camada inferior. Tal fator deve-se, possivelmente, a lixiviação dos componentes. O pH mais elevado com o tempo contribui para esta lixiviação de cloretos. Na camada superior ocorre o oposto, provavelmente, pela lixiviação somada a biodegradação de compostos os cloretos diminuíram acentuadamente (1220 a 100mgCl.L⁻¹). Nesta camada, como já comentado, havia torrões de solo, indicando que a umidade estava muito baixa, possivelmente, devido a trocas com o ambiente e a própria lixiviação de líquidos.

Pesquisadores como Leite (2008), Meira (2009) e Garcez (2009) encontraram em camadas inferiores valores aumentados de cloretos em células experimentais com o tempo de monitoramento, o que contribui muito para uma possível lixiviação devido aos líquidos, embora, também não observaram lixiviados nos sistemas de drenagem com o passar do tempo de pesquisa.

É importante frisar que os valores máximos encontrados em seus experimentos foram de 1500mgCIL⁻¹ na camada inferior de suas células experimentais. Já na camada superior os cloretos caíram de 1100 a 500 mgCIL⁻¹. No caso da célula experimental observou-se que as camadas intermediária e inferior foram as mais influenciadas pela lixiviação, e houve uma elevação dos cloretos com o passar do dias, mas não se dá para tirar conclusões definitivas, já que o tempo de monitoramento ainda é muito curto.

Outro importante fator a ser comentado é que houve um aumento de cloretos após 195 dias, mais evidenciado na camada inferior, justamente, no período de chuvas da região. E neste caso a chuva, possivelmente, contribui por lixiviar os compostos das camadas superiores. Melo (2003) e Monteiro (2003) estudando células em escala real sugeriram que a camada inferior destas células teve um grande aumento de vários constituinte durante o período de chuvas, inclusive, afetando negativamente os recalques nestas profundidades. Contudo, semelhantemente aos demais parâmetros pesquisados, devido às altas taxas de evaporação e baixas de precipitação em Campina Grande são difíceis relacionar períodos de chuvas e estiagem com concentrações de determinados compostos, inclusive, cloretos.

4.1.2.5. Demanda Química de Oxigênio (DBO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

Verifica-se a partir das Figuras 37 e 38 que os valores de DQO e, principalmente, DBO decaíram com o tempo. No caso da DQO houve uma variação no nível intermediário de $35000\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ no início do monitoramento para $19820\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ no final das análises. Em se tratando do nível inferior, a variação do início para o final de monitoramento foi de $35000\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ para $16216\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$ na célula experimental. Estes dados mostram que houve uma diminuição de 43,57% de DQO no nível intermediário e de 53,67% no nível inferior e corroboram com os de sólidos voláteis os quais também decaíram com o tempo e profundidade.

Na camada superior também foi possível perceber esta diminuição e, como será melhor explicado na análise estatística dos dados, esta camada foi influenciada pelo ambiente externo o que possibilitou a sua rápida estabilização no que se refere aos recalques e depreciação da matéria orgânica.

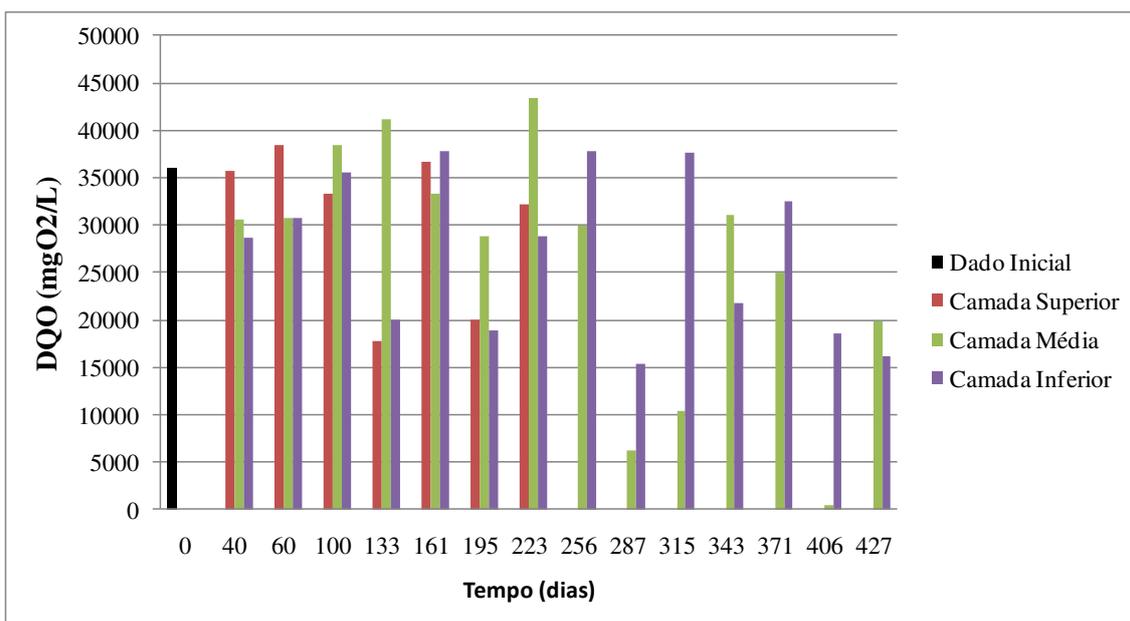


Figura 37: Demanda Química de Oxigênio (DQO) em Função do Tempo e da Profundidade

Em se tratando de DBO (Figura 38) a redução ficou na faixa de 85% para o extrato intermediário e inferior estudado. Exceção foi a extrato superior que a exemplo das demais amostras não foi possível fazer um estudo mais detalhado. Alguns picos foram observados para análises de DBO e DQO, mas provavelmente, foi devido à heterogeneidade do material pesquisado.

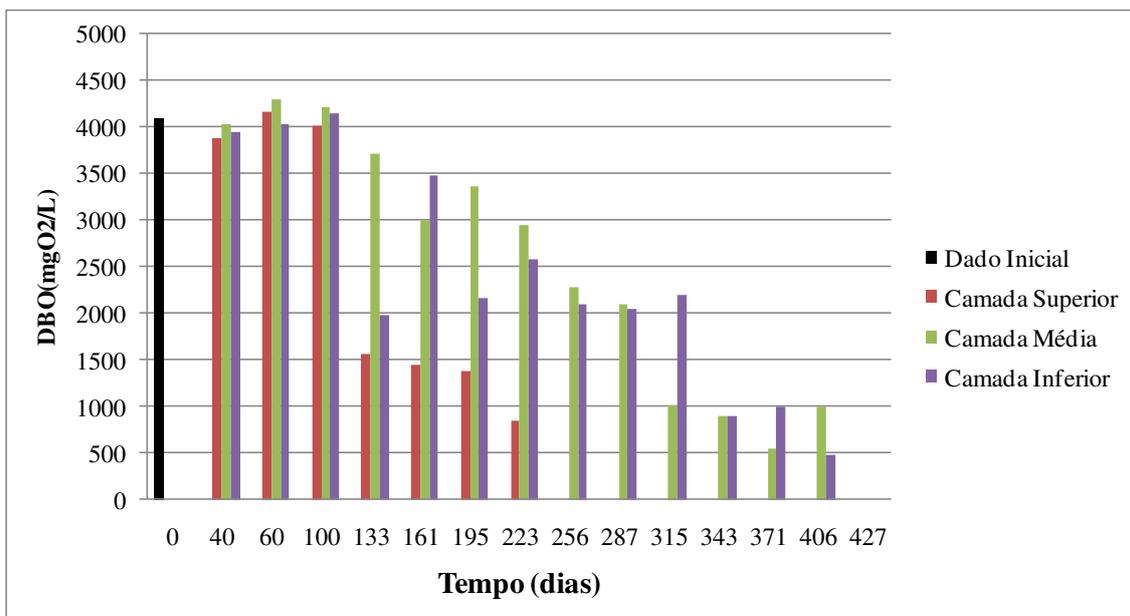


Figura 38: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em Função do Tempo e da Profundidade

Pode-se dizer que a partir de 133 dias a biodegradação já estava na fase metanogênica devido tanto aos valores de pH e valores decrescentes de DBO e DQO. A fermentação metanogênica caracteriza-se por valores de pH mais elevados e DBO menores bem como o decréscimo de ácidos graxos voláteis e acréscimo da alcalinidade, o que já foi comentado. Nessa fase existe a decomposição dos produtos da fermentação ácida, sendo convertidos em metano (CH₄), substâncias húmicas e água. Embora não foi possível medir os gases emanados da célula experimental monitorada este pode ser indiretamente medido pelo decréscimo nos valores de DQO, DBO, ácidos voláteis e o aumento do pH.

A relação de DBO/DQO mostrou valores em decaimento (Figura 40), embora alguns picos sejam observados, isto decorre, provavelmente, devido à heterogeneidade do material depositado. Este padrão também foi observado nos trabalhos de Meira (2009), Alcântara (2007) e Lins (2005) estudando células experimentais e em escala real.

A razão DBO/DQO reflete o grau de degradação em aterro. Os processos de reações bioquímicas da fermentação ácida (fase aeróbia) são caracterizados por valores superiores a 0,4 da razão entre DBO/DQO, indicando que uma grande parte da carga orgânica pode decompor-se bioquimicamente de forma facilitada (LAUERMANN, 2007). Entretanto, os valores máximos encontrados foram de 0,14. Estes valores encontrados na célula experimental são típicos de fermentação metanogênica e indicam

dificuldades para continuar a degradação. Segundo vários autores valores inferiores a 0,1 para razão entre DBO e DQO, indicam baixas concentrações de matéria orgânica. Entretanto os valores observados, no caso da célula experimental monitorada, indicam para uma bioestabilização da matéria orgânica (MEIRA, 2009).

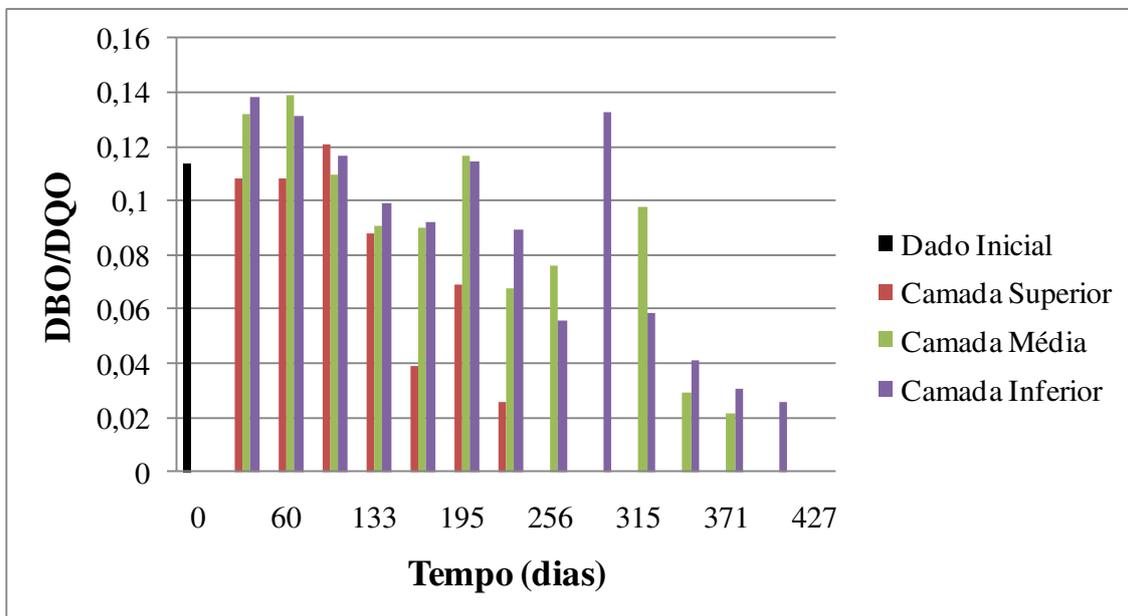


Figura 39: Relação de DBO/DQO no tempo e em diferentes profundidades.

No que se refere aos extratos de resíduos à camada superior teve um decréscimo bastante rápido da relação DBO/DQO (0,1 a 0,022). Já para as amostras dos níveis inferiores e intermediários os resultados observados são ligeiramente maiores variando de 0,14 a 0,025. Os resultados obtidos são até mais baixos que de aterros com mais de 20 anos de operação. Na Alemanha foram encontrados para aterros entre 20 e 30 anos de operação valores de 0,24 (KRUMPELBECK & EHRIG, 1999).

Como já comentado não se pode verificar a fase de acidogênese e acetogênese, mas provavelmente elas ocorreram, pois a metanogênese é um processo que ocorre pelos produtos originados nas fases anteriores.

Os valores da relação DBO/DQO encontrados no caso da célula monitorada talvez indiquem que o pequeno volume de RSU disposto está rapidamente sendo degradado. Estes valores sugerem, inclusive, que aterros/biorreatores pequenos são mais eficazes que grandes aterros.

4.1.2.6. Sólidos Totais Voláteis

Observa-se através da Figura 40 que os Sólidos Voláteis variaram de 66% para 40% no final do monitoramento dos RSU da Célula Experimental. Estes valores tiveram um mesmo padrão de decaimento da DQO e DBO.

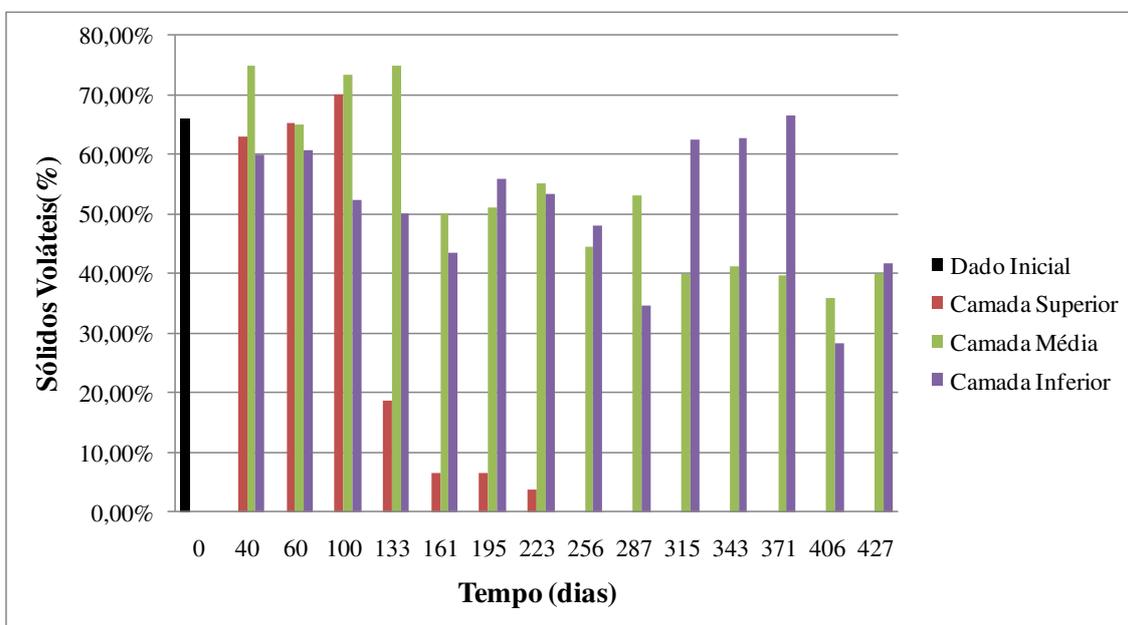


Figura 40: Análise de Sólidos Voláteis em Diferentes Profundidades e no Tempo

Na camada superior os Sólidos Voláteis caíram substancialmente com 223 dias (de 66% para em torno de 3%). Conforme analisado com outros parâmetros isso já era esperado. Os resultados indicam eficiência da utilização da matéria orgânica em todas as camadas de RSU depositadas na Célula Experimental. No caso das camadas intermediária e inferior a diminuição de SV correspondeu a 60%. Na superior esta diminuição de sólidos voláteis foi de 94%.

De acordo com Firmo *et.al.*, (2010) o teor de sólidos voláteis determina de forma indireta a quantidade de material passível de ser degradado nos resíduos. De uma forma geral, quanto maior for o teor de sólidos voláteis nos resíduos, maior a quantidade de material que pode ser degradado. Em resíduos estudado por Maciel (2003) o teor de sólidos voláteis foi de 8% em uma célula em escala real de 8 anos de idade, apontando material já degradado e com pouca atividade microbiana.

Alcântara (2007) estudou o comportamento dos sólidos voláteis (SV) em um lisímetro com 9m³ de RSU no aterro da Muribeca (Região Metropolitana de Recife) e constatou uma diminuição de 70% para 35% de SV em 1 ano de monitoramento. No caso da Célula Experimental estudada em Campina Grande o teor de sólidos voláteis

iniciais, principalmente, na camada intermediária são condizentes aos valores encontrados por Alcântara (2007), porém com 427 dias de monitoramento. Este valores um pouco menor, encontrado por Alcântara (2007) possivelmente, está relacionado à precipitação anual alta (2000mm) em Recife-PE (Melo, 2003) o que, conforme Leite *et al.*,(2008), facilita a degradação da matéria orgânica pelo papel que os líquidos tem em transportar nutrientes, enzimas e até microrganismos no interior da massa de resíduos.

Na camada inferior os resultados variaram levemente com o tempo, provavelmente devido a lixiviação das camadas superiores como já comentado. Estes resultados indicam que na camada superior a diminuição de SV pode ocorrer pela degradação da matéria orgânica e pela própria lixiviação, portanto, uma análise mais aprimorada da variação de SV deveria ser feito para mensurar a contribuição que corresponde efetivamente pela degradação da matéria orgânica e pela lixiviação desta para as camadas inferiores.

Contudo, pode-se até afirmar que a matéria orgânica está sendo degradada, já que ocorre a diminuição dos sólidos voláteis em todas as profundidades e que o número de organismos nas três camadas estudadas é bastante significativo. Outro fator que contribui para esta possibilidade são os valores de recalques que ocorreram ao longo do tempo e da profundidade.

Os sólidos voláteis em aterros de RSU são responsáveis por uma grande parcela de recalques, contudo devem-se levar em conta que muitos compostos possuem altos teores de sólidos, porém são lentamente degradáveis. Assim, seria melhor reciclar ou dispor materiais de difícil degradação em locais diferentes dos facilmente degradáveis. Isto ocasionaria a ocupação de áreas destinadas a aterros em espaço de tempos bem menores.

Os SV são tão importantes para o monitoramento de aterros que a sua determinação indiretamente pode fornecer a quantidade de líquidos no interior de aterros. E pela quantidade de sólidos voláteis e líquidos pode-se, ainda, inferir se ocorrerá uma degradação satisfatória ou não de compostos orgânicos (LEITE *et al.*,(2008), PALMA *et al.*,(2000), MEIRA (2009) e KIEHL (1985).

Os sólidos voláteis também forneceram com o tempo uma boa correlação com os índices de recalques verificados no estudo desta célula experimental, principalmente, no que se refere à camada intermediária e inferior. No próximo item será tratado em detalhes este assunto, entretanto, provavelmente, a diminuição dos SV e a, conseqüente, diminuição dos recalques no tempo sugerem que a célula monitorada teve um rápido

decréscimo da matéria orgânica e está numa fase de maturação bastante semelhante a aterros com idades avançadas.

4.2. Recalques

Os mecanismos responsáveis pelo desenvolvimento de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos é complexo, podendo ser ocasionado por processos físicos, químicos e biológicos, devidos à degradação da matéria orgânica e dissipação das poro-pressões de líquidos e gases, bem como pela adição de novas camadas de lixo ou cobertura de solo e à compressibilidade de suas frações constituintes (SIMÕES, 2000 e JUCÁ *et.al.*, 1999).

Desta forma, os recalques podem indicar quanto de fato cada constituinte colabora para que estes aconteçam, embora poucos estudos abordem este tema. No que se refere a matéria orgânica quantificar o percentual de sua influência para as deformações verticais pode, inclusive, indicar o tempo de vida útil de um aterro mais precisamente. Portanto, neste item serão abordados os recalques enfocados em fatores físico, físico-químicos e biológicos e, principalmente, qual é a parcela percentual dos recalques originados pela degradação da matéria orgânica.

4.2.1. Recalques por Placas

Para a análise dos recalques em profundidade foi definido que as placas que os medem estariam em ordem crescente com a profundidade (Figura 5).

O Quadro 4 mostra a posição das placas de recalques da camada de cobertura para a camada de base.

Quadro 4: Posição das placas de recalques no interior da célula experimental

Placas	Posição das Placas de Recalques (mm)
Placa a - Superficial	0
Placa b - Superficial	0
Placa 1	0
Placa 2	-230
Placa 3	-430
Placa 4	-1110
Placa 5	-1560
Placa 6	-2000

Durante o período de monitoramento dos recalques em profundidade e ao longo do tempo (Figura 41) verificou-se que as maiores deformações ocorreram na placa 1(0mm) que fica situada no centro da célula experimental na camada superior seguida da placa 2 que fica a 230mm distante da placa 1 em profundidade. Na placa 2 foi verificado que ocorreu 370mm de recalques e a placa 1 400mm até o final de monitoramento da célula experimental.

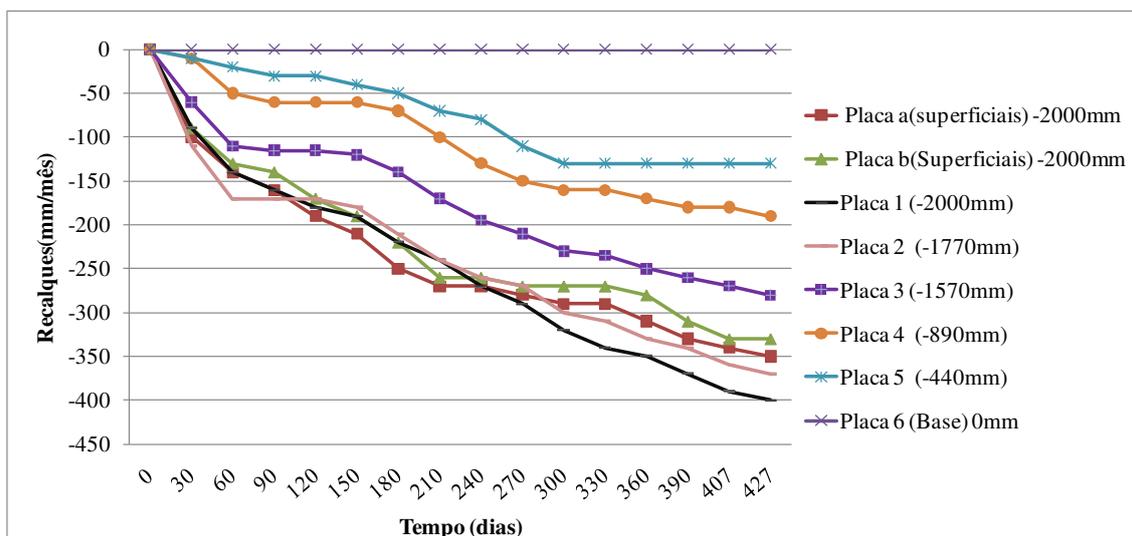


Figura 41: Recalques Superficiais e em Diferentes Profundidades e ao Longo do Tempo

As placas superficiais “a” (situada a esquerda da placa 1) e “b” (situada a direita da placa 1) tiveram respectivamente 350mm e 330mm de recalques. Estes resultados eram previstos já que estas placas estão a 2000mm da camada de base.

Como já observado as placa 1 e 2 tiveram maiores recalques que as placas superficiais que estão situadas ao lado, pois na região central da célula a influência das paredes do lisímetro são menores. As paredes da célula interagem com os resíduos que ficam “presos” a estas, dificultando o seu recalque. Isto foi verificado por diversos pesquisadores estudando células experimentais em tamanho reduzido e em tamanhos reais (MELO, (2003), MACIEL (2003), LINS (2005), ALCANTARA (2007), GARCEZ (2009) e MEIRA (2009). Inclusive, o comportamento mecânico de aterros de RSU pode ser afetado se forem construídas célula com alturas muito elevadas, o que faria com que as paredes destas células viessem a desmoronar sobre o centro do aterro após alguns anos de funcionamento, pois no centro do aterro há maior espessura de resíduos se comparado com as suas extremidades (bernas).

Os recalques observados na célula experimental estudada tiveram um comportamento bastante típico de células em escala real. Os recalques apresentado nas

placas foram diminuindo em altura em função da profundidade (Quadro 5). Assim em profundidades maiores os recalques foram menores. Em células de escala real, Mariano (1999), Melo (2003) e Monteiro (2003) verificaram que os recalques diminuem conforme a profundidade vai aumentando. Este fator ocorre porque os resíduos nas camadas profundas são mais influenciados pela compactação devido ao peso das camadas que estão acima e, a espessura da camada vai diminuindo pela própria posição da placa.

Vale salientar que a compactação excessiva dificulta, inclusive, a biodegradação da matéria orgânica mesmo que os resíduos sejam recentes. No caso de células velhas os recalques, efetivamente medidos, nas camadas mais profundas são menores pelo fato de que a matéria orgânica vai sendo consumida enquanto que o aterro vai crescendo em altura.

O quadro 5 mostra os recalques em cada placa durante o período de monitoramento da célula experimental.

Quadro 5: Recalques observados nas placas durante o tempo de monitoramento da célula experimental

Placas	Recalques Finais (mm)
Placa a -Superficial	350
Placa b -Superficial	330
Placa 1	400
Placa 2	370
Placa 3	280
Placa 4	190
Placa 5	130
Placa 6	0

A placa 6 não apresentou deslocamento com o tempo por estar acima camada de base que é praticamente incompressível.

Observa-se através dos dados analisados que os recalques ao longo da profundidade e do tempo corroboram com os parâmetros de pH, DQO, DBO, SV, alcalinidade e microrganismos aeróbios, anaeróbios e fungos. À medida que os valores de DQO, DBO e Sólidos voláteis foram decrescendo no tempo os recalques também diminuíram. As maiores taxas de recalques aconteceram nos primeiros meses de disposição dos resíduos e como será discutido adiante as maiores velocidades de recalques também ocorreram nestes dias (primeiro 90 dias de aterramento).

Com relação aos microrganismos presentes na massa de resíduos à princípio não parece haver correlação entre este parâmetro e os recalques, porém a biota microbiana permaneceu sempre alta e com a degradação dos constituintes orgânicos ocasionou os

recalques. Necessariamente não há que se falar em diminuição de microrganismos no instante em que haja redução da matéria orgânica. Somente ocorrerá a diminuição da biota microbiana após um período onde a matéria orgânica não é mais suficiente para um determinado número de microrganismos e, mesmo assim, alguns microrganismos irão se desenvolver através do predatismo de outras espécies bacteriana, fungos e protozoários (TORTORA, 2000).

Durante os primeiro 30 dias os recalques (Figura 41) ocorreram quase que exclusivamente associados ao peso da própria massa de resíduos e devido ao peso próprio da camada de cobertura de solo compactado. Isso ocorre porque nos dias iniciais a biota micorbiana, embora presente no interior da massa de resíduos tem que se adaptar a este ambiente interno (Valozer, 1989) e portanto os recalques são quase que na sua totalidade devido a fatores mecânicos. Passado esta adaptação inicial, possivelmente, os recalques ocorridos na célula experimental foram originados pela degradação da matéria orgânica.

No que se referem à deformação específica as placas superficiais (a e b) (Figura 42) apresentaram respectivamente 17,5 e 16,5% em relação à altura inicial de resíduos (2000mm). A placa 1 situada no centro da célula experimental na camada superior obteve uma deformação específica de 20% e placa 2 teve 18,5%. A placa 3 situada na camada intermediária obteve uma deformação específica de 14% e as placas 4 e 5 situadas nas camadas inferiores obtiveram uma deformação de 10% e 7%. A placa 6 por estar na base no sofreu recalques com o passar do tempo.

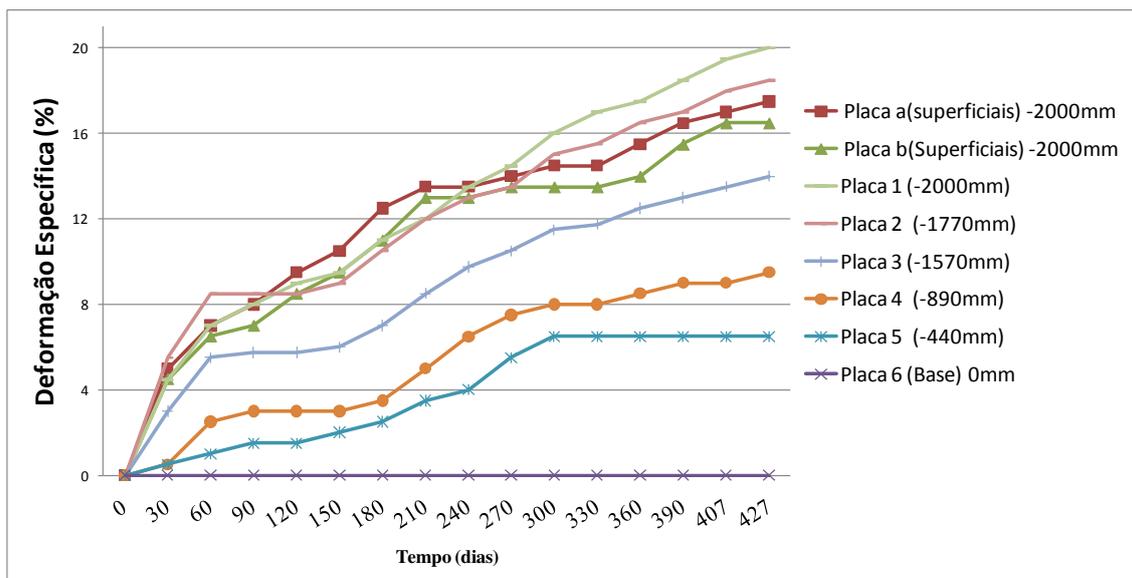


Figura 42: Deformação Específica Superficial em Diferentes Profundidades ao Longo do Tempo

Referindo-se à fração dos recalques relacionados ao teor de matéria orgânica dos resíduos (Quadro 6) as placas superficiais “a” e “b” tiveram respectivamente 71% e 73% de deformação .

Quadro 6: Percentagens de recalques devido ao peso próprio de rsu e a degradação da matéria orgânica

Placas Recalques	Placa-a (superficial)	Placa -b (Superficial)	Placa 1	Placa 2	Placa 3	Placa 4	Placa 5	Placa 6
Recalque Imediato (%)	29	27	23	30	21	5	8	0
Recalque Devido a Biodegradação (%)	71	73	77	70	79	95	92	0

Ainda, conforme o Quadro 6 a placa 1 obteve 77% de recalques originados pela degradação da matéria orgânica e na placa 2 foi verificado 70% devido a biodegradação. As placas 3, 4 e 5 tiveram proporcionalmente os maiores recalques ocasionados pela degradação da matéria orgânica. Observa-se que a placa 4 chegou a 95% de seu recalques obtido pela degradação matéria orgânica.

Recalques biodegradativos maiores proporcionalmente com o aumento da profundidade ocorrem devido a que estas camadas foram preenchidas com resíduos à medida que a célula experimental foi subindo em altura. Quando estas camadas estão sendo preenchidas com resíduos vão ocorrendo automaticamente os recalques imediatos devido à compactação destas camadas pelo peso dos resíduos sobre elas. Como não foram medidos estes recalques ao longo do enchimento da célula experimental e, possivelmente isto também não ocorra em células em escala real, há um resultado falso-positivo, pois não corresponde ao recalque real. Assim, os recalques degradativos sempre serão maiores, proporcionalmente, em camadas mais profundas, pois quando começam as medições de recalques os imediatos praticamente já ocorreram.

Na literatura técnica fala-se de comportamento de recalques em RSU de uma maneira geral, mas não se analisa os recalques devido à fração orgânica desses resíduos que no Brasil corresponde ao maior percentual em peso e volume dos constituintes aterrados. Para se prever o tempo de vida útil de um aterro há de se levar em conta o tempo degradativo por camada considerando, inclusive, os recalques imediatos destas camadas ao longo do enchimento do aterro. McDougall *et.al.*,(2004) em seus modelos matemáticos sobre recalques leva em conta o tempo de enchimento de aterros por RSU para quantificar os adensamentos devido ao peso próprio dos resíduos e aqueles pela fração degradável da matéria orgânica.

A velocidade de recalques conforme visto na Figura 43 mostra como foi significativo os recalques ocorridos nos primeiros 30 dias. A velocidade por placa foi de

até 10 vezes maior em algumas placas nos primeiros trinta dias se comparado com os demais dias em que foram monitorados as deformações verticais.

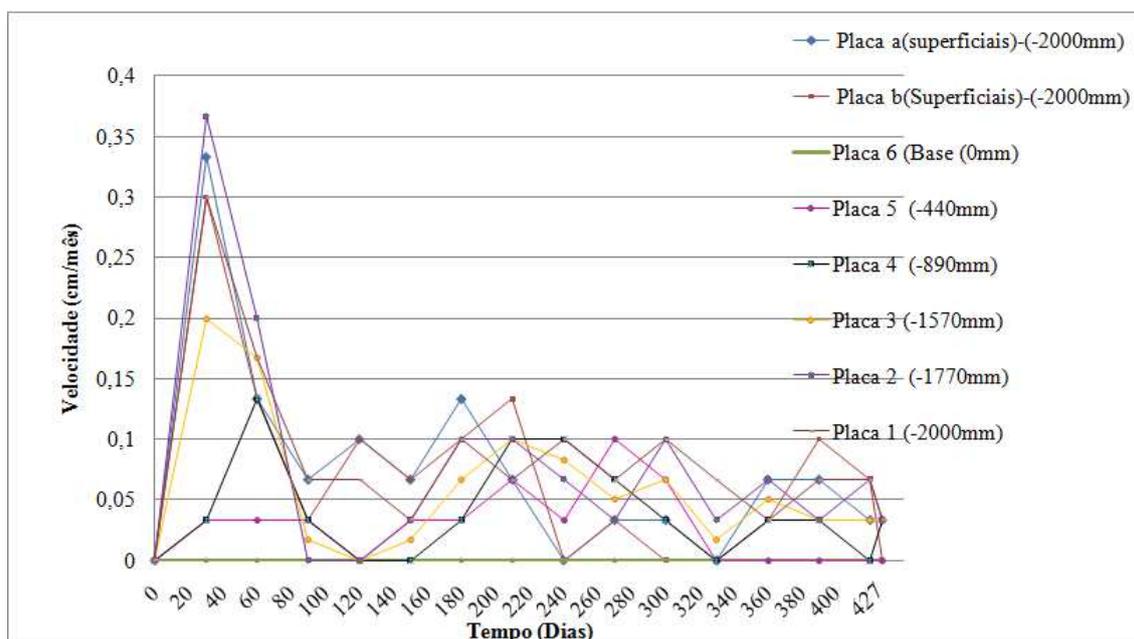


Figura 43: Velocidade dos Recalques Superficiais e em Diferentes Profundidades ao Longo do Tempo

Contudo como mostra a Figura 43, os recalques passaram a ter velocidades mais baixas após 90 dias de monitoramento. As placas 4 e 5 tiveram as menores velocidade de recalques com o tempo se relacionado com as demais placas. A placa 6 como já explicado não apresenta variação de recalques com o tempo por estar situada na base da célula experimental.

No que se refere somente a placa 5 esta apresentou velocidades de recalques zero após 330 dias de monitoramento, indicando que ou a matéria orgânica está inacessível aos microrganismos bacterianos para a sua degradação pela compactação excessiva, ou há um acúmulos de líquidos nesta profundidade o que dificulta os recalques. A compactação excessiva pode dificultar a passagem de líquidos e, por conseqüência, a degradação de compostos orgânicos (LEITE *et.al.*, (2007).

No caso da presença de líquidos em grande quantidades nas camadas inferiores se não houver um sistema de drenagem eficiente ocorrerá a distribuição de poropressões nas partículas de resíduos dificultando os recalques, pois não haverá a expulsão de líquidos. Na célula experimental, como já comentado, não houve a presença de lixiviados durante o seu monitoramento, o que poderia justificar os resultados de recalques encontrados, principalmente, na placa 5, embora ainda se tenha matéria

orgânica a ser degradada, entretanto estudos mais detalhados devem ser realizados para que esta hipótese seja comprovada ou não.

Nas demais placas a velocidade e a ocorrência de recalques está diminuindo, mas ainda irão ocorrer por algum tempo, pois dentro da célula experimental há presença de matéria orgânica a ser degradada.

4.2.2. Velocidade da Degradação da Matéria Orgânica – Constante de Bioestabilização K

Durante os estudos da célula experimental fez-se o estudo de bioestabilização da matéria orgânica ou a velocidade de degradação desta matéria orgânica. A constante de bioestabilização, K, mostra a rapidez de bioestabilização dos resíduos. Para isto utilizo-se o DQO, pois este indica melhor o comportamento de degradação da matéria orgânica.

A Figura 44 mostra o valor do K ao longo do tempo para a camada superior e, verifica-se que inicialmente a velocidade de degradação da matéria orgânica foi baixa ($2,45 \times 10^{-4}$ dias⁻¹) e após 60 dias este aumentou e, com 133 dias houve um acréscimo significativo na bioestabilização da matéria orgânica ($5,33 \times 10^{-3}$) e permanecendo assim até 223 dias e, então, caiu bruscamente após este último período.

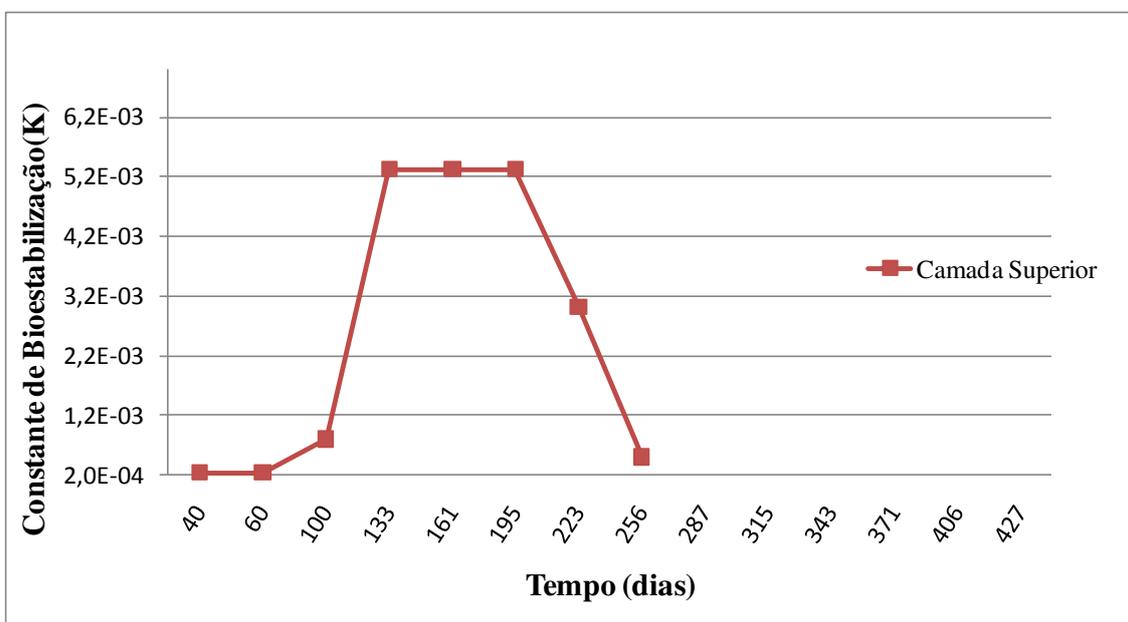


Figura 44: Constante de Bioestabilização da matéria orgânica- camada superior

Os valores de K inicial (até 60 dias) são condizentes com os recalques devido a degradação da matéria orgânica. Os recalques iniciais no biorreator foram significativos, como já fora comentado, mas estas deformações verticais são associadas ao peso do

próprio resíduos, portanto, mesmo que ocorra degradações da matéria orgânica neste período inicial, não se pode dizer que esta redução de massa ocasione recalques elevados. E no período inicial de aterramento os microrganismos sintetizam o seu arsenal enzimático para, só então, degradarem efetivamente a matéria orgânica e, provavelmente, por isso nesta camada o valor de K inicial foi baixo. Após 200 dias a velocidade de bioestabilização caiu rapidamente e, isto condiz com os teores de sólidos voláteis, DBO e DQO que também caíram abruptamente na camada superior.

Os valores de K oscilaram muito em todas as camadas, porém na camada superior houve um acréscimo na atividade de degradação da matéria orgânica de mais de 95% dos primeiros 60 dias para os próximos 73 dias (133 dias). Após este último período ocorreu um decréscimo de mais de 90, e corroborando com os demais dados que mostram que nesta camada já ocorreu a maturação final, ou seja, já está em estágio final de atividade microbiológica.

A Figura 45 mostra o valor do K na camada intermediária e verifica-se que inicialmente a velocidade de degradação da matéria orgânica apresentou valores maiores que a camada superior. Isto sugere que os organismos nesta camada tiveram uma adaptação mais rápida e após 60 dias houve um declínio na velocidade de degradação da matéria orgânica. Entretanto, nesta camada houve oscilações do K durante o período de monitoramento. Isto é aceitável, pois os resíduos são muito heterogêneos e, portanto, as amostras poderão ter conteúdos de matéria orgânica variáveis.

No que se refere a atividade de bioestabilização na camada intermediária, nos primeiro 161 dias houve um decréscimo gradual da atividade microbiana, pois a constante decresceu mais de 85%, indicando que inicialmente os microrganismos poderiam ou estar em processo de adaptação ao ambiente, ou a toxicidade desta camada fosse elevada neste período. Mesmo assim, d'a para se verificar através da Figura 45 que houve um incremento da atividade inicial para a final, pois a constante K de bioestabilização aumentou para mais de 60%. De uma forma geral os dados da constante K nesta camada oscilaram, também, porque os resíduos sólidos são muito heterogêneos. Às vezes o material coletado pode apresentar diferenças significativas, pois as amostras que são retiradas do interior do lisímetro ora apresentam mais de um determinado constituinte ora de outro.

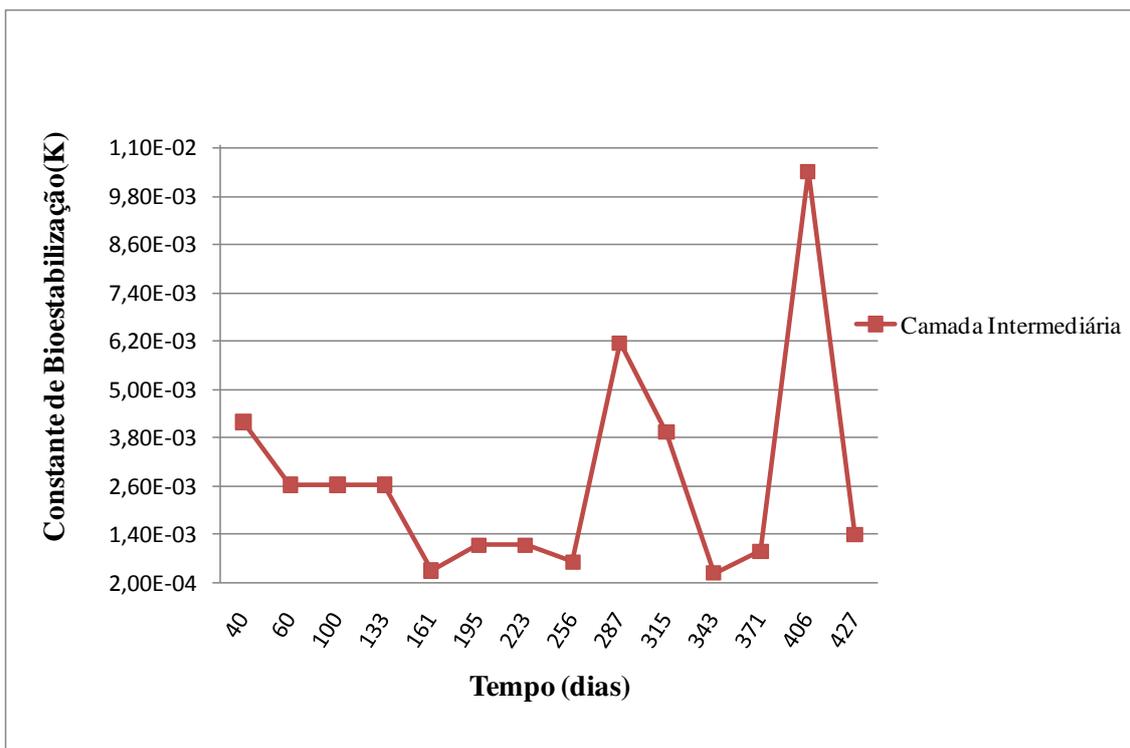


Figura 45: Constante de Bioestabilização da matéria orgânica- camada intermediária

No que se refere a camada inferior a Figura 46 mostra que há uma tendência de diminuição dos valores do coeficiente de bioestabilização. Isto é o esperado já que com o tempo a velocidade de degradação diminui. Esta diminuição é traduzida em menores valores de recalques e isto foi observado na camada inferior, ou seja, com o tempo os valores de recalques caíram, inclusive os devido a degradação da matéria orgânica.

Os valores de K nesta camada foram inicialmente de $6 \times 10^{-3} \text{ dia}^{-1}$ para valores abaixo de $1 \times 10^{-3} \text{ dia}^{-1}$ nos dias finais de monitoramento da célula experimental. Entretanto ocorreram oscilações nos valores de K, como nas demais camadas pesquisadas.

A diminuição da constante K foi maior que 60% e, portanto, a atividade microbiana está sendo diminuída, seja pela carência de matéria orgânica ou pela toxicidade desta camada que é bastante influenciada pelos lixiviados das camadas acima.

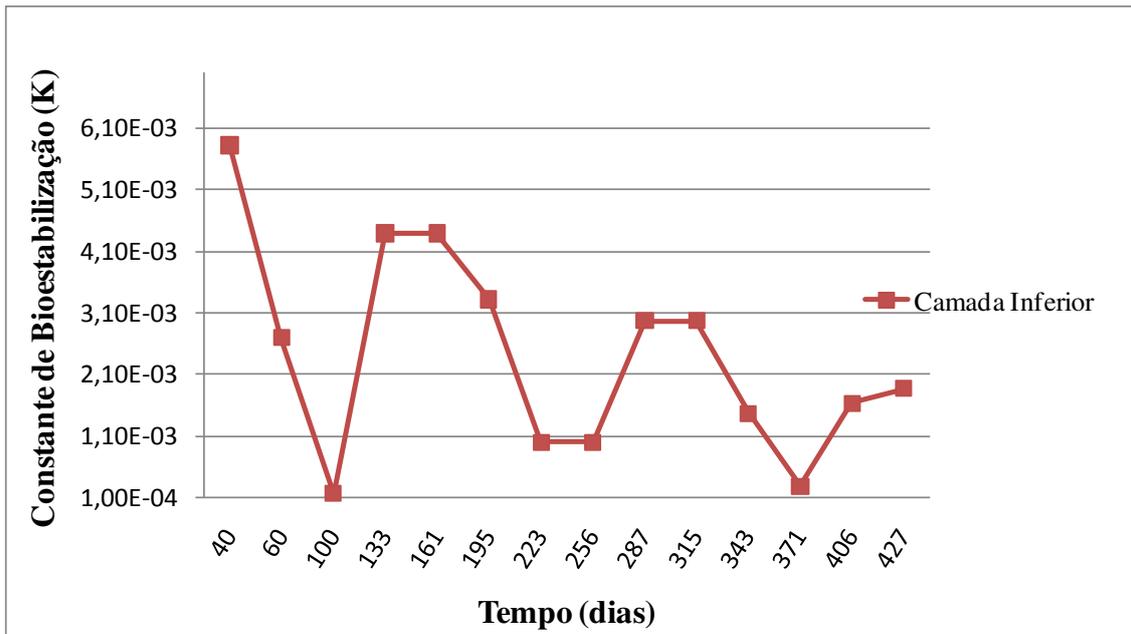


Figura 46: Constante de Bioestabilização da matéria orgânica- camada inferior

Estes valores foram semelhantes aos encontrados por outros pesquisadores estudando codisposição de resíduos sólidos industriais de curtume (BRITTO *et.al.*,2002). Estes resíduos tinham em sua constituição serragem (farelo) couro e pó oriundos do processo fabril de beneficiamento de couro.

Contudo, os resíduos sólidos de aterros podem ter em sua constituição produtos tóxicos que podem inibir a degradação da matéria orgânica. Possivelmente, estas oscilações na constante K em todas as profundidades foram influenciadas por uma grande quantidade de variáveis e, algumas tóxicas ao metabolismo microbiano.

Mas sem dúvida o que pode se destacar é que a constante de bioestabilização nos dias iniciais não pode ser atribuída para se determinar os recalques, uma vez que nos primeiros dias de disposição dos resíduos os adensamento verticais são frutos do peso dos próprios resíduos e de máquinas compactadoras e, a atividade inicial degradativa dos microrganismos não é suficiente para que haja recalques elevados devido a este fator.

Além do mais valores decrescente de K indicam que o consumo da matéria orgânica está diminuindo e conseqüentemente os recalques e isto foi observado no item que relacionou recalques ao consumo de constituintes orgânicos. Portanto, a constante K pode ser utilizada para se predizer o andamento da velocidade de degradação da matéria orgânica após o período inicial de aterramento dos resíduos.

4.2.3. Recalques versus Matéria Orgânica

Na célula experimental estudada o valor de 66% de matéria orgânica inicial no seu interior indica aproximadamente 2,9 toneladas de compostos orgânicos, o que implica em 1330mm de altura considerando a densidade dos resíduos compactado de $0,7\text{ton}\cdot\text{m}^{-1}$, quando do seu enchimento, entretanto, nem toda está matéria orgânica é biodegradável. É importante frisar que a degradação da matéria orgânica resulta em recalques e é importante quantificá-la, pois assim determinar-se-á o tempo de vida útil de um aterro (MELO, 2003 e MONTEIRO, *et.al.*,2006).

O teor de matéria orgânica facilmente degradável no interior da massa de resíduos da célula experimental é de $0,4\text{ton}\cdot\text{m}^{-3}$, o que indica um total de 1,7ton de compostos orgânicos rapidamente degradáveis. Isto é um dado a ser considerado, pois os recalques nos primeiros dias de monitoramento na célula experimental seriam função desta matéria orgânica facilmente ou moderadamente biodegradável e, com o passar dos anos os demais constituintes passariam a contribuir na parcela dos degradáveis, porém muito lentamente.

Os resultados obtidos por vários pesquisadores em todo o mundo mostram que mesmo a parcela rapidamente degradável dos resíduos pode levar um espaço de tempo considerável para ser totalmente consumida, pois como já comentado no interior da massa de lixo há a presença de compostos agressivos aos microrganismos, às vezes pela própria liberação de substâncias tóxicas do metabolismo dos grupos microbianos, heterogeneidade dos resíduos, diferentes temperaturas e faixas de pH entre outros fatores (MCDUGALL, *et.al.*,(2004). Isto explica porque muitos aterros produzem gases após dezenas de anos de seu fechamento e ainda justificam o seu monitoramento contínuo e permanente (MARIANO, 1999).

Além do mais o conteúdo de matéria orgânica deve ser analisado com extremo cuidado para que resultados contraditórios não ocorram, pois conforme Firno *et al.*, (2010) salientam que apesar dos plásticos possuírem 87% de Sólidos voláteis (SV), borracha e couro 64% (SV), têxteis 98% (SV) e papel/papelão 81%(SV) são considerados como moderadamente ou lentamente biodegradáveis, e ainda contem uma elevada fração de substâncias não-biodegradáveis. Um resultado deste pouco compreendido pode levar a erros de projeto e execução de aterros.

No que se refere ao conteúdo total de matéria orgânica na célula experimental estudada, o recalque como já apresentado seria em torno de 1330mm o que corresponde

a 66% da diminuição de altura total dos resíduos, algo que não ocorreu, pois como já descrito nem toda a matéria orgânica e biodegradável e, o tempo de disposição dos resíduos (427dias) ainda é curto se comparado a células de aterros em escala real (20 a 30 anos). Através dos cálculos realizados, observou-se que, os recalques totais nas placas superficiais e placa 1 foram em torno de 20% do total de recalques observados na célula experimental, o que é muito menor ao comparado com os cálculos teóricos considerando somente o teor de matéria orgânica.

Se for considerado os recalques ocorridos devido a compostos facilmente degradáveis ($0,4\text{ton.m}^{-3}$) este seria em torno de 1350mm. Como a célula experimental tem 2000mm de altura de RSU os recalques devido a matéria orgânica facilmente degradável, corresponderiam a 67% da altura inicial de RSU, o que implicaria numa deformação elevada. De acordo com os resultados encontrados na célula experimental monitorada os recalques foram muito menores que os sugeridos pelos cálculos teóricos quando levando em consideração os compostos facilmente degradáveis.

Wall & Zeiss (1995) relatam em seus trabalhos que valores aos encontrados na célula experimental estudada, correspondem à soma de todos os tipos de recalques no tempo. Contudo, os recalques estudados por diversos pesquisadores não levam em conta que as deformações em lixo são constituídos pelos imediatos (até 30 dias de disposição dos RSU), os devido à degradação matéria facilmente biodegradável, os de difícil degradação e passado estes recalques irão ocorrer àqueles originados pelos rearranjos das partículas inertes. Todos estes recalques levam um tempo considerável e podem determinar reduções de grandes volumes de aterros, o que justifica a sua utilização bem posterior.

A matéria orgânica no interior de um aterro ou célula experimental pode permanecer por muito tempo quase que inalterada, porém se condições forem dadas aos microrganismos presentes em um aterro a sua degradação pode ocorrer. Tortora (2000) cita organismos que podem sobreviver por muitos anos na sua forma inativa ou encapsulada devido ao estresse ambiental e, quando as condições ambientais forem mais favoráveis estes organismos podem tornar-se ativos novamente.

O Quadro 7 mostra a quantidade de matéria orgânica inicial em toneladas distribuída na célula experimental de acordo com os extratos de RSU.

Quadro 7: Quantidade de matéria orgânica por extrato de RSU

Camada de RSU	Quantidade de Mat. Org. Total (ton)
Camada superior	0,64
Camada intermediária	1
Camada inferior	1,3

Segundo o Quadro 7, os maiores recalques deveriam ocorrer na camada inferior, mas os resultados contrariam o esperado. Pois como já visto estes recalques foram os menores, embora houvesse maior disponibilidade de matéria orgânica. Talvez estes recalques fossem consideráveis no enchimento da célula experimental, mas devido à falta de monitoramento neste estágio não se pode avaliar estas deformações sucessivas e contínuas.

As Figuras 47 a 49 mostram a relação existente entre recalques e a diminuição de sólidos voláteis no tempo pela ação de microrganismos. Pode-se observar que na camada Superior (0 a -1570mm) as deformações verticais distribuídas e observadas nas placas de recalques que a compões seguem um padrão de deslocamento muito semelhante (Figura 47). E que os maiores recalques ocorreram quando a quantidade de matéria orgânica também era elevada. Entretanto os recalques continuaram acontecendo mesmo que a matéria orgânica nesta camada já esteja quase toda depletada após 210 dias. Isto é perfeitamente possível já que esta camada por estar mais elevada diminui em altura devido aos recalques que ocorrem nas camadas inferiores a ela.

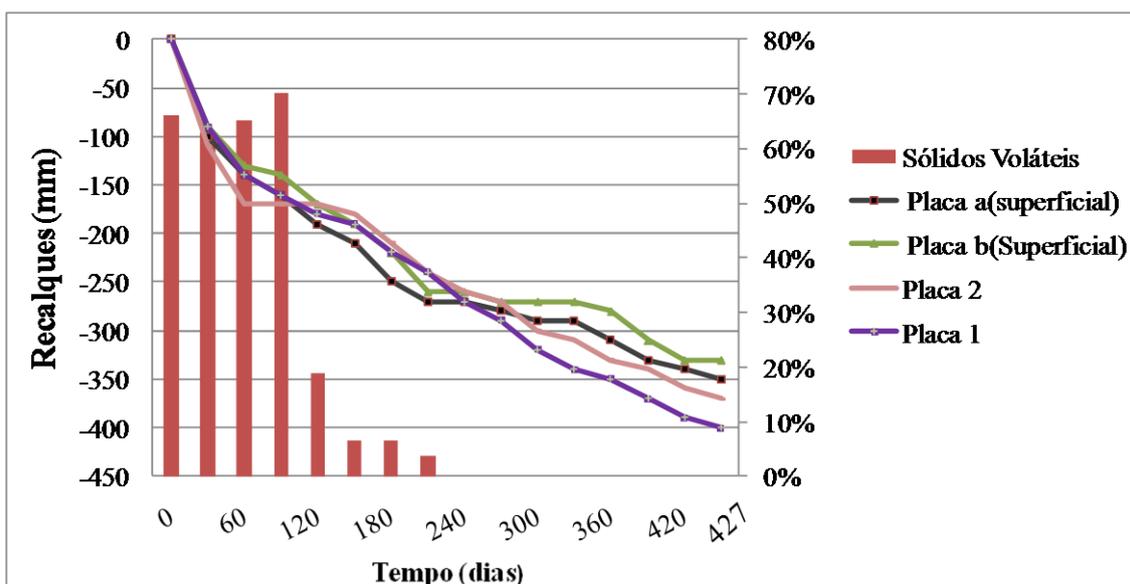


Figura 47: Recalques versus Sólidos Voláteis (Camada Superior)

No que se referem à camada intermediária da célula (-1570mm a -890mm) experimental (Figura 48) os recalques tiveram uma melhor correlação visual com o decréscimo da matéria orgânica (SV) no tempo. Os recalques mostrados na Figura 48 são mais acentuados nos primeiros 60 dias de monitoramento enquanto o teor de sólidos voláteis é de 50 a 70%. Após este período (entre 60 e 120 dias) ocorre a degradação da matéria orgânica com aumento de vazios, porém não o suficiente para ocorrer as deformações verticais significativas. Os vazios dos resíduos só irão colapsar quando não suportarem o peso do próprio lixo, mas para que isso ocorra, os vazios, terão de aumentar em tamanho devido a degradação biológica.

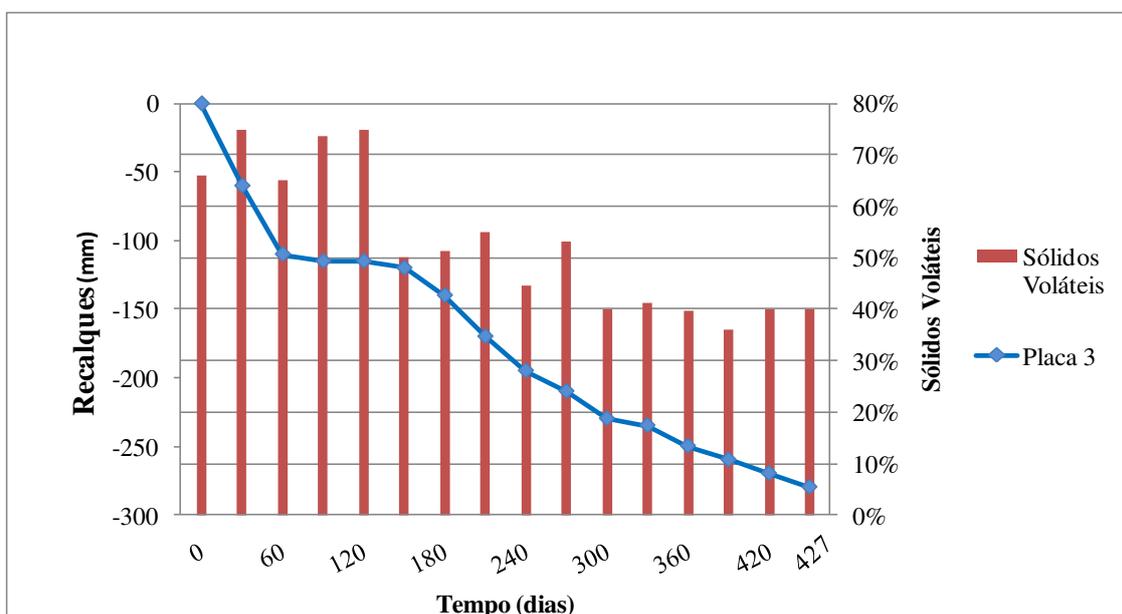


Figura 48: Recalques versus Sólidos voláteis (Camada Intermediária)

Depois de 120 dias os recalques são contínuos, embora sejam levemente menos acentuados. Possivelmente, isto ocorre devido ao consumo também contínuo da matéria orgânica e associado aos recalques da camada inferior. Vê-se que após 120 dias correu uma diminuição gradual da matéria orgânica, esta passou de 50 para 40% no final de monitoramento. Os recalques durante este período foram em torno de 165mm, ou seja, passou 307 dias para que eles ocorressem. Nos primeiros 60 dias ocorreu 115mm de recalques o que é bastante acentuado se comparado aos recalques que ocorreram posteriormente durante os próximos 307 dias (120 a 427 dias) de monitoramento.

Na Figura 49 têm-se os recalques ocorridos na camada inferior (-890mm a 0mm). Esta camada possui as placas 4, 5 e 6. As placas que efetivamente recalçaram foram a 4 e a 5. Também se pode observar que à medida que a matéria orgânica foi sendo consumida os recalques foram ocorrendo. Os recalques iniciais, a exemplo das

placas situadas nas camadas superior, também foram maiores e diminuíram com o tempo.

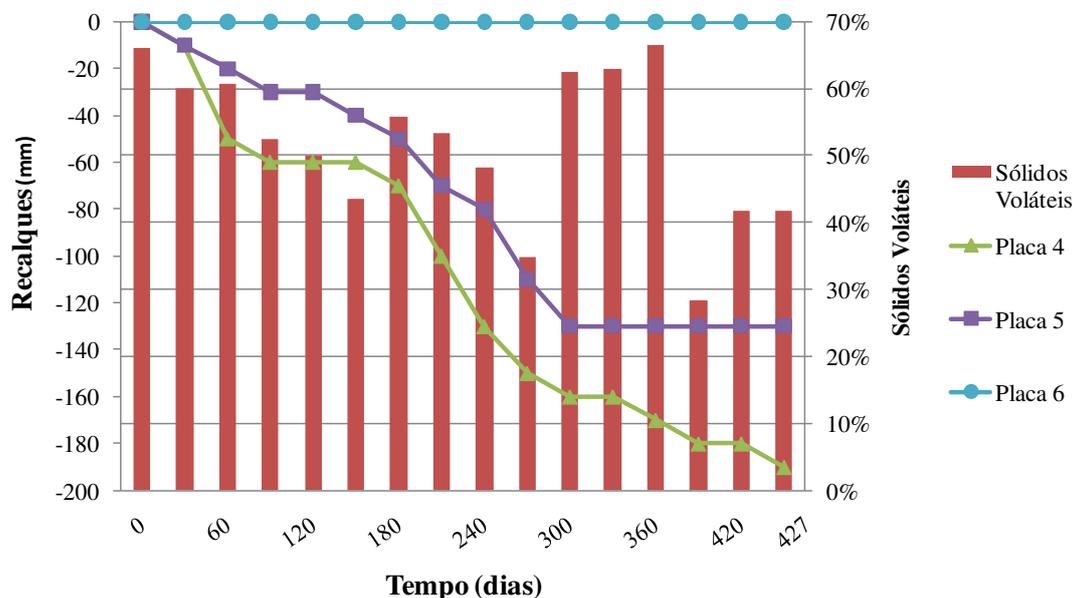


Figura 49: Recalques versus Sólidos voláteis – Camada Inferior

Nota-se que nos primeiros 90 dias houve deformações verticais e após este período ocorreu um período de recalque zero, semelhante ao que foi verificado nas camadas superiores. Após este período de não recalque, ocorreu uma outra fase de recalques que correspondeu do dia 120 ao dia 300 seguido, novamente, de recalques zero. Entretanto, na placa4, este último período foi de apenas 30 dias e na placa 5 não se observou mais recalques de 300 dias até o final de monitoramento da célula experimental. Na placa 4 decorridos mais 30 dias (330 dias) iniciou-se os recalques por mais 60 dias (330 a 390 dias) o qual foi procedido por mais 30 dias sem recalques(390 a 420 dias). Depois desta última análise recommçaram os recalques.

Na camada inferior houve maiores períodos de recalques zeros (Figura 49) e isso era esperado, pois a compactação exercida pelas camadas superiores durante o enchimento da célula experimental implica em recalques anteriores a sua quantificação, assim, não necessariamente nestas camadas há menores recalques, provavelmente as deformações verticais sejam até maiores, mas devido ao não monitoramento deste parâmetro no enchimento da célula não foi possível dados mais precisos.

Durante o monitoramento dos sólidos voláteis verificou-se que na camada inferior eles aumentaram em vez de decaírem, mas isto é perfeitamente possível, pois nesta camada ocorre mais influência dos lixiviados que carregam consigo matéria

orgânica e outros constituintes. Se nesta camada o teor de sólidos voláteis esteve correlacionado com os recalques estes deveriam ocorrer de forma mais acentuada, mas isto não acontece, pois a presença de sólidos voláteis nesta camada não estão agregados intimamente às partículas constituintes dos resíduos. Entretanto, durante os primeiros 150 dias de monitoramento, os sólidos voláteis estão relacionados aos recalques, pois neste período, as deformações ocorrem conforme diminuem os sólidos voláteis.

De uma maneira geral, pode-se dizer que a camada que melhor representa, não só os dados de recalques, mas também os demais parâmetros é a camada intermediária, pois esta camada sofre pouco ou nenhuma interferência do ambiente e das camadas adjacentes. A camada superior é a mais influenciada pelo ambiente e isto é visto nos demais fatores pesquisados.

A camada inferior sofre influencia das camadas superiores, pois esta camada recebe produtos de lixiviação. Monteiro (2003), McDougall *et.al.*, (2004), Melo (2003), Leite (2008) e Meira (2009) em seus estudos mostraram que as camadas inferiores de resíduos, tanto em aterros de RSU como em células experimentais, atingem grande acúmulo de líquidos e estes influenciaram diretamente nos recalques, além de que a compactação dos resíduos em grandes profundidades são maiores segundo os seus achados. Os líquidos no interior da massa de resíduos fazem, inclusive, que os recalques passem por um período de repouso (recalque zero) que pode ser mais acentuado se houver falhas no sistema de drenagem.

Com relação à massa perdida de matéria orgânica no interior da célula experimental, pode-se dizer que esta foi variável em cada camada. Na célula como um todo há um total de 6,3m³ de RSU o que corresponde aproximadamente há 4,4ton de massa de lixo, entretanto, 66% é matéria orgânica (2,9ton). A camada intermediária é o que melhor representa um aterro segundo a literatura, pois, o seu meio ambiente é mais isolado no que se refere a influências das camadas superior e inferior (MELO, 2003). E nesta camada houve uma redução de 60 para 40% de SV. Entretanto, a camada que mais teve degradabilidade de seus constituintes orgânicos foi a superior, indicando que o ambiente interno de uma célula de resíduos, seja em aterros de pequeno ou grande porte não deve ser totalmente isolada, pois caso contrário diminuiria acentuadamente a velocidade de degradação dos compostos orgânicos.

Conforme os cálculos iniciais (Quadro 8) a camada superior teve 0,6ton de matéria orgânica transformada em gás, energia e calor o que corresponde a 93% de redução em altura e volume de resíduos orgânicos. A intermediária apresentou uma

redução de 40% do inicial e, assim, obteve uma quantidade de matéria perdida em torno de 0,4ton.

Na camada inferior a quantidade de massa transformada foi de 0,5ton, o que corresponde a 38% de redução da matéria orgânica. Este último resultado é bastante discutível, pois este extrato de resíduos sofre influência da lixiviação de líquidos constantes e esta percolação traz consigo matéria orgânica, assim estes valores podem estar mascarados. Resultados semelhantes foram encontrados por Melo (2003) estudando uma célula de aterro de 200m² no aterro da Muribeca na Região Metropolitana de Recife – PE.

Quadro 8: Quantidade da matéria orgânica inicial e transformada em outros constituintes.

Camada de RSU	Quantidade de Mat. Org. Total Inicial (ton)	Quantidade de Mat. Org. Total Final (ton)	Quantidade de Mat. Org. Transformada (ton)
Camada superior	0,64	0,04	0,6
Camada intermediária	1	0,6	0,4
Camada inferior	1,3	0,8	0,5

No Quadro 8 vê-se que a quantidade de matéria orgânica inicial total foi em torno de 2,9ton e a quantidade final de matéria orgânica passou para 1,44ton, o que significa uma redução em torno de 49% do valor inicial de matéria orgânica e que coincide com os teores de SV obtidos nas camadas intermediária e inferior. Portanto a redução em altura seria de aproximadamente de 660mm o que perfaz 33% da altura inicial.

Pelos resultados encontrados nos recalques medidos na célula experimental as camadas superficiais apresentaram um recalque em torno de 350mm o que é muito menor do que corresponde ao consumo de matéria orgânica. Se for considerado só o recalque devido ao consumo de matéria orgânica na célula experimental estes ficaram em torno de 230mm. Estes resultados à princípio parecem contraditórios, mas não o são. Pois no interior da massa de resíduos a matéria orgânica a ser degradada e que foi degradada pode estar no interior de embalagens mais resistentes a degradação. Portanto a diminuição da matéria orgânica no interior destas embalagens não se traduz em diminuição de altura da célula experimental.

Fucale (2002) relatou em suas pesquisas, os plásticos, sobretudo, podem tornar os recalques mais difíceis pelo fator coesivo de sua estrutura sobre os demais compostos. Isto indica outro fator a ser considerado num aterramento de resíduos. Quanto realmente de resíduos não degradáveis devem ser aterrados ou, se não devem

ser aterrados? Qual é a percentagem máxima de compostos plásticos que devem ser aterrados caso não há um sistema eficiente de reciclagem? Para um engenheiro este questionamento é muito importante, pois a vida útil de um aterro é dada pela decomposição da matéria orgânica e pelo andamento dos recalques.

No que se refere à célula experimental estudada, de uma forma geral, os resultados encontrados para a decomposição da matéria orgânica são muito superiores á células em aterro de escala real no mesmo tempo de monitoramento (Maciel, 2003, Melo, 2003 e Monteiro *et.al.*,2006) o que indica que células com dimensões menores podem ser mais eficazes na velocidade de decomposição da matéria orgânica.

No Quadro 9 são mostrados os recalques totais levando em consideração o peso do próprio aterro e a degradação da matéria orgânica por camada.

Quadro 9: Variação da altura e de quantidade de rsu no tempo e na profundidade.

Camada de RSU	Altura inicial de RSU (mm)	altura Final de RSU (mm)	Quantidade de RSU Inicial (ton)	Quantidade de RSU Final (ton)	Redução (%)
Camada superior	430mm	400mm	0,95	0,88	7
Camada intermediária	680mm	590mm	1,5	1,29	14
Camada inferior	890mm	830mm	1,96	1,82	7

O Quadro 9 é claro em mostrar que os recalques totais da Célula Experimental são bem menores que os associados apenas a matéria orgânica e os recalques por camadas são, também, menores que os recalques por placas. Na camada podem existir até duas placas e, portanto, os recalques devem ser calculados na camada de acordo com as diferenças de deslocamento de cada placa naquela camada, por isso os valores são menores, contudo bastante precisos. Nos recalques por camada o que de fato está recalçando é a camada como um todo e, portanto, interessa muito a quem projeta e faz a gestão de resíduos sólidos urbanos.

Nota-se através do Quadro 9 que os maiores recalques, como já comentado, são observados na camada intermediária, embora esta camada não tenha a maior espessura. Esta camada teve o dobro de recalques que os demais extratos de resíduos. Os recalques por camadas indicam que a camada intermediária apresentou maiores deformações verticais devido a esta sofrer pelas cargas impostas pela camada superior e, ainda perder líquidos pela lixiviação para a camada inferior e como os recalques são frutos das cargas impostas e expulsão de líquidos e gases oriundos da degradação da matéria orgânica, o somatório destas componentes podem ditar maiores recalques. Entretanto, vale salientar que os maiores recalques pela degradação dos resíduos orgânicos ocorreu na camada superior.

4.2.4. Dados Microbiológicos e sua Relação com os Recalques

4.2.4.1. Microbiologia

Os resultados mostram que com relação aos microrganismos aeróbios há uma diminuição na ordem de grandeza de 10^8 a 10^7 UFC.g⁻¹ (Figura 50) com o tempo e em todas as profundidades. Esta diminuição representa muito pouco. Mas deve-se salientar que os resíduos depositados na célula experimental são recentes, ainda, que tenham 427 dias de aterramento. Embora, ocorreu uma diminuição de SV, DBO, DQO e outros parâmetros físico-químicos não necessariamente ocorreria à diminuição do número de microrganismos.

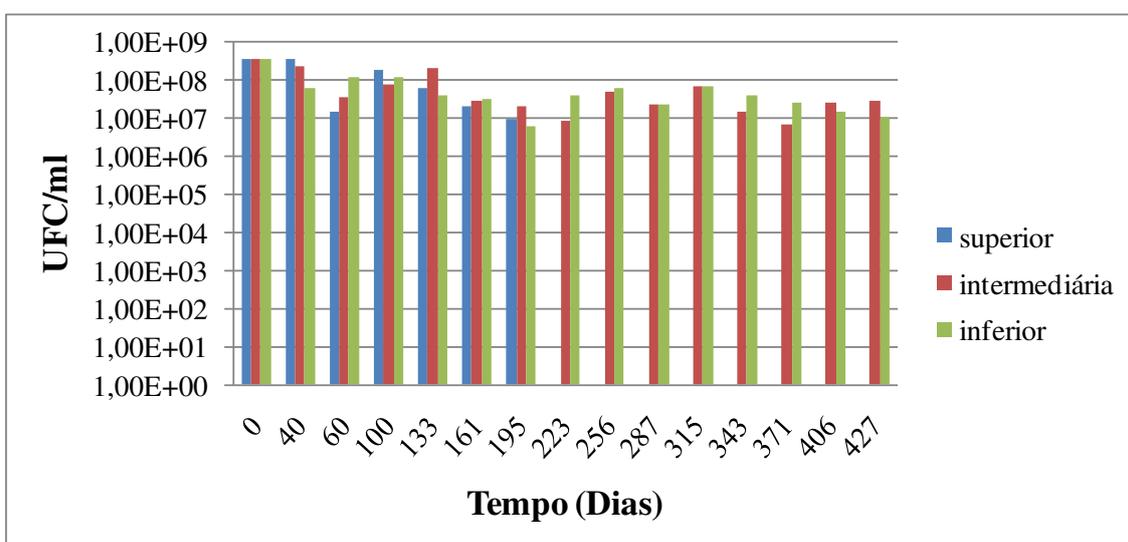


Figura 50: Aeróbios Totais (UFC.g⁻¹)

Dentro de uma célula experimental existem muitos compostos que podem vir a servir como fonte nutricional, inclusive outros microrganismos, já que são fontes de carbono e nitrogênio. Além do mais, como já explicado, ocorre a lixiviação e isto pode fazer com que nutrientes, matéria orgânica, oxigênio dissolvido e outros compostos passam a ser consumidos.

Monteiro (2003), McDougall *et.al.*, (2004), Melo (2003), Leite (2008), Meira (2009) e Garcez(2009) em seus estudos relatam que as camadas inferiores em alguns casos apresentaram maior número de microrganismos aeróbios mesmo que, possivelmente, nestas camadas houvessem menor quantidade de oxigênio dissolvido. Deve-se destacar, ainda, que os microrganismos aeróbios sofrem menor influência do meio em relação aos microrganismos anaeróbios, pois são menos sensíveis a mudanças

ambientais o que permite menores flutuações em seus resultados, semelhante ao que ocorreu na célula experimental pesquisada neste trabalho.

Se por um lado em camadas mais profundas ocorrem menor quantidades de oxigênio dissolvido, por outro lado quando ocorre a lixiviação, sobretudo, de líquidos há um acúmulo de oxigênio nestas camadas, pois o oxigênio se dissolve em água.

Na Figura 51 vê-se que o número mais provável de organismos anaeróbios por 100mL está aumentando com o tempo e em todas as profundidades.

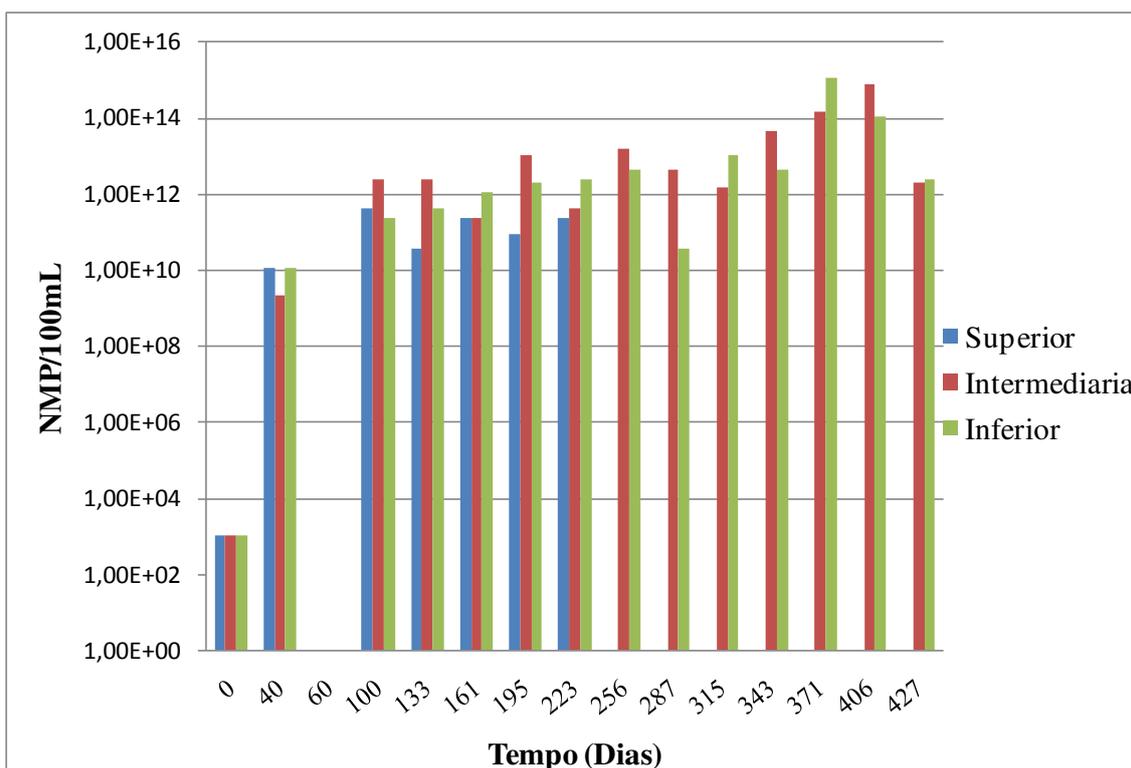


Figura 51: Anaeróbios Totais (NMP.1000.mL⁻¹) em diferentes profundidades

Na camada intermediária e inferior, nas quais prosseguiu-se o monitoramento, há um aumento de 10^3 no dia inicial de coleta para 10^{15} em 406 dias e caindo para 10^{12} em 427 dias de monitoramento. Isto já era esperado, pois, com o aumento das profundidades ocorre a diminuição de oxigênio e conseqüentemente um acréscimo de organismos anaeróbios.

Deve-se destacar que no período de chuvas que foi de 195 dias há 287 dias o NMP diminuiu, embora, suavemente. Isto se deve, provavelmente, ao incremento de oxigênio dissolvido com as águas de chuvas. Além do mais, conforme Melo (2003) quando ocorre a infiltração de águas da chuva há uma desestabilização do meio interno e o organismos anaeróbios são mais sensíveis e, talvez por isso, tenham diminuído.

Interessante que o NMP de organismos anaeróbios só começa a aumentar novamente a partir de 371 dias (começo da estiagem).

Tanto para os organismos aeróbios como para anaeróbios a sua contagem foi interrompida na camada superior por motivos já citados.

A Figura 52 mostra o desenvolvimento dos fungos ao longo do tempo e da profundidade. Observa-se que ao longo do tempo e da profundidade há uma pequena variação nos valores de fungos. Os fungos são organismos que podem se desenvolver em diversos tipos de ambientes e até extremos (ARAÚJO *et.al.*,2010). Outros fatores, além da umidade, como temperatura podem favorecer o crescimento de fungos.

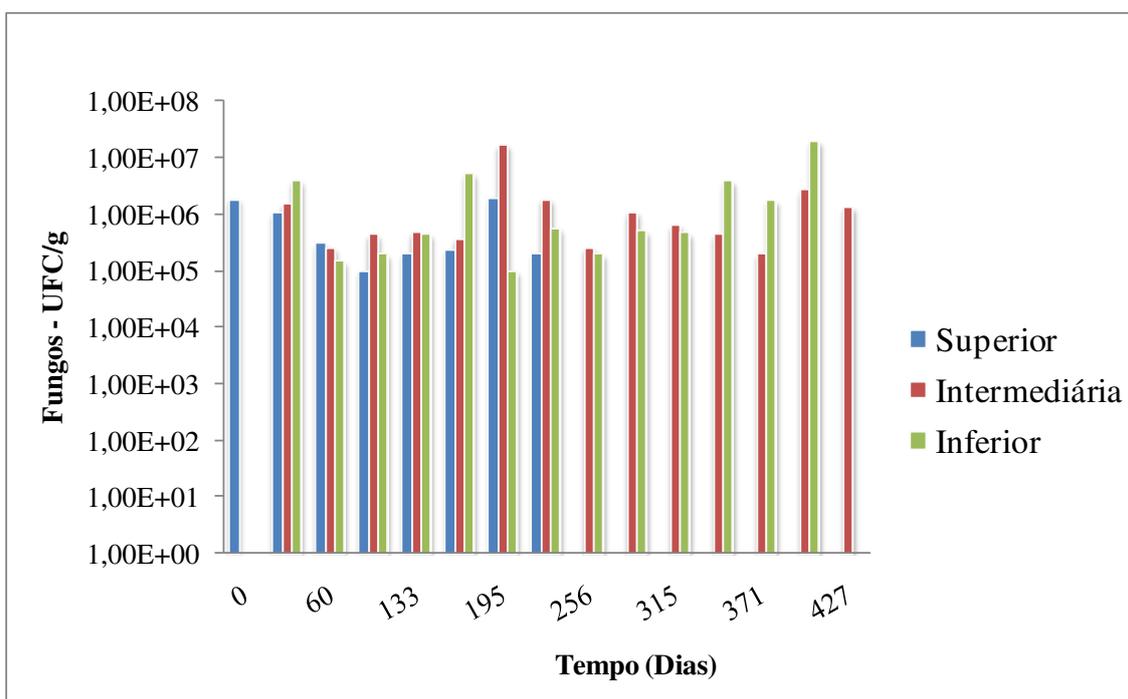


Figura 52: Fungos (UFCg⁻¹) em diferentes profundidades e no tempo.

Segundo Melo (2003) a presença de umidade e temperatura elevadas fez com que uma célula de RSU do Aterro da Muribeca na cidade de Recife apresentasse fungos em todas as profundidades, semelhante ao que aconteceu na célula experimental estudada em Campina Grande. Ainda muitas vezes, os meios com elevadas concentrações de açúcar e alta pressão osmótica, favorecem o desenvolvimento dos fungos nas porções em contato com o ar e isso pode também ser uma causa de presença destes organismos em todas as profundidades, pois como a profundidade da célula experimental é pequena ocorre, possivelmente, a presença de ar, embora não em grandes quantidades, mas o suficiente para que organismos aeróbios e fungos se desenvolvam.

4.2.4.2. Recalques em Função dos Microrganismos Anaeróbios

Os recalques são função entre outros fatores da biodegradação da matéria orgânica. Se o ambiente interno da massa de RSU for favorável ao desenvolvimento de microrganismos, sobretudo, dos anaeróbios haverá níveis de recalques elevados (LINS, 2003).

Neste item será avaliado o recalque em função dos microrganismos anaeróbios no tempo. Os microrganismos anaeróbios por serem indicadores de recalques conforme Monteiro *et.al.*,(2006) foram escolhidos para análise deste assunto.

Vale salientar que os coliformes totais e termotolerantes apresentaram números sempre elevados e na maioria das vezes sem variações significativas (ANEXOS). Estes organismos não tiveram correlação estatística com os demais dados, porém é importante dizer que por estarem elevados contribuíram para que os recalques ocorrem, bem como a degradação da matéria orgânica. Melo (2003) também teve dificuldades em analisar estes organismos com os recalques e degradação da matéria orgânica por terem sempre um comportamento uniforme durante o monitoramento em seus estudos. Estes dados sugerem que a metodologia para sua análise pode estar de algum modo contribuindo para pouca variabilidade numérica destes organismos. Estudos estão sendo realizados pelo grupo de pesquisa de Geotecnia Ambiental GGA desta universidade a fim de testar outras técnicas e métodos para determinação de coliformes totais e termotolerantes.

Na camada superior de resíduos (Figura 53) os recalques ocorreram de maneira bastante semelhantes a células experimentais estudadas por Alcântara (2007), Meira (2009) e Garcez (2009) quando comparada ao número de organismos anaeróbios. Entretanto, após 223 dias não foi mais possível relacioná-los pela falta de dados microbiológicos desta camada.

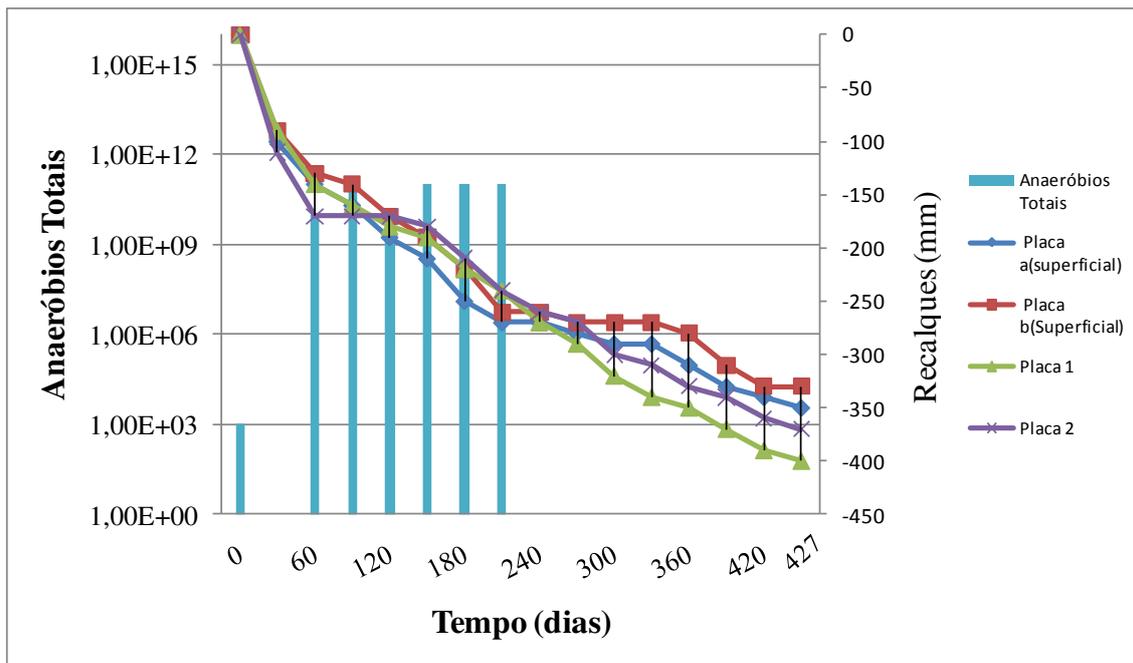


Figura 53: Recalques versus Anaeróbios Totais no Nível Superior

Na camada superior (Figura 53) devido a falta de dados não se pode correlacionar os parâmetros de recalques com os de microrganismos, mas pode se observar que os recalques continuam mesmo no final do monitoramento da célula experimental (427 dias). Entretanto, como já explicado anteriormente a camada superior recalca devido, também, ao deslocamento das camadas inferiores. A falta de dados da camada superior não se refere a falhas operacionais ou técnicas, mas sim possivelmente a influência do meio ambiente externo que aumentou a velocidade de degradação dos compostos orgânicos. Este é um resultado a ser considerado em aterros em escala real, pois o ambiente externo pode influenciar o funcionamento mecânico das camadas mais próximas a ele.

Na camada intermediária de resíduos (Figura 54) os recalques tiveram uma relação bastante próxima, porém inversa, ao número de microrganismos anaeróbios totais.

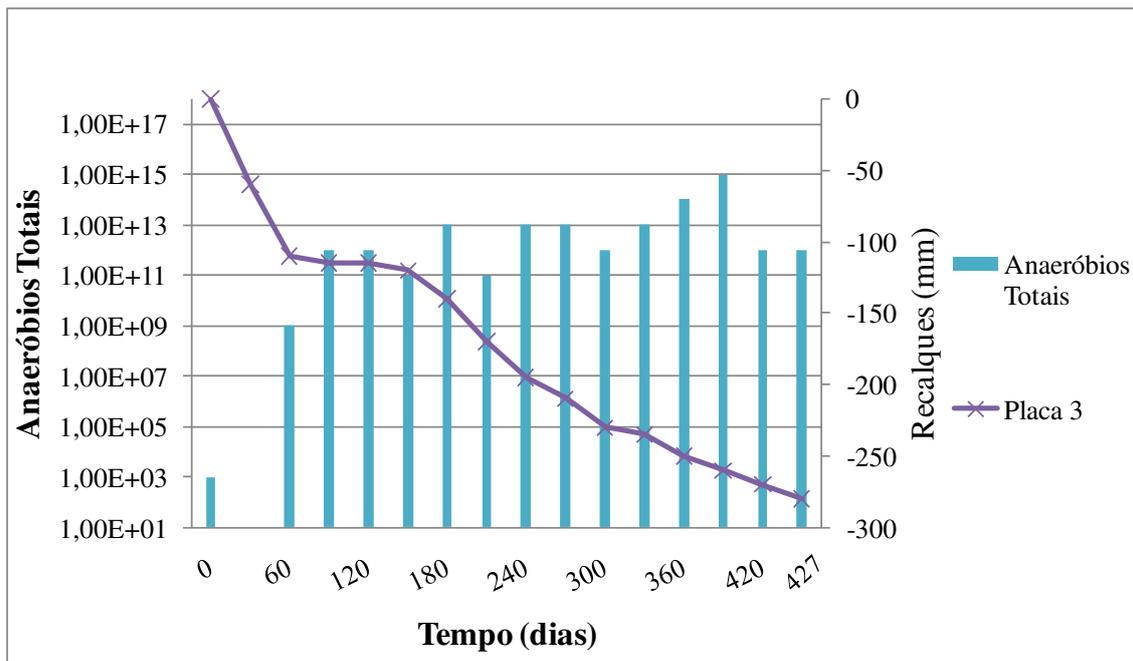


Figura 54: Recalques versus Anaeróbios Totais no Nível Intermediário

Nota-se através da Figura 54 que os recalques foram, quase que contínuos exceção de 90 para 120 dias. Nos primeiros 30 dias de monitoramento os recalques foram acentuados, porém neste período, os organismos anaeróbios, provavelmente, estavam em adaptação ao meio ambiente interno, portanto, este recalque inicial não poderia ser imediatamente associado a este tipo de grupo bacteriano (TORTORA, 2000). Na verdade nos primeiros 30 dias os recalques decorrem do peso do próprio resíduo (MELO, 2003), MONTEIRO, (2003), ALCÂNTARA (2007). A partir de 30 dias ocorrem os recalques relacionados quase que exclusivamente da degradação da matéria orgânica.

Passado 60 dias de recalques contínuos (Figura 54), houve um período de recalque zero, embora, houvesse um desenvolvimento de microrganismos anaeróbios. Após este período (60 a 120 dias) começaram os recalques efetivamente devidos a degradação da matéria orgânica. Como já comentado ocorre um período de adaptação microbiana para só então ocorrer de fato a degradação da matéria orgânica e esta fase está relacionada aos primeiros 30 dias de monitoramento. Mesmo assim, a degradação da matéria orgânica pode não ser acompanhada imediatamente de recalques, além do mais o metabolismo microbiano faz com que aumentem vazios, mas se estes vazios conseguirem suportar o peso a eles impostos não ocorrerá o recalque.

É importante frisar que no período em que não ocorre recalques, não significa que não há degradação da matéria orgânica. Existe, sim, a degradação biológica como

foram mostrados nos resultados de DQO, DBO, SV, microrganismos aeróbios totais, anaeróbios totais e fungos. Neste período pode ocorrer até maiores decomposições da matéria orgânica, com índices de vazios grandes.

Durante os primeiros dias de vida útil de um aterro, as deformações dos resíduos acontecem por outros mecanismos. Neste caso o peso dos próprios resíduos e o grau de compactação pode determinar grandes recalques que podem ocasionar a expulsão de líquidos e gases, mas não oriundo de biodegradação.

Na Figura 55 os recalques relacionados com os anaeróbios totais na camada inferior são mostrados e pode ser verificado que estes tiveram um comportamento semelhante ao da camada intermediária.

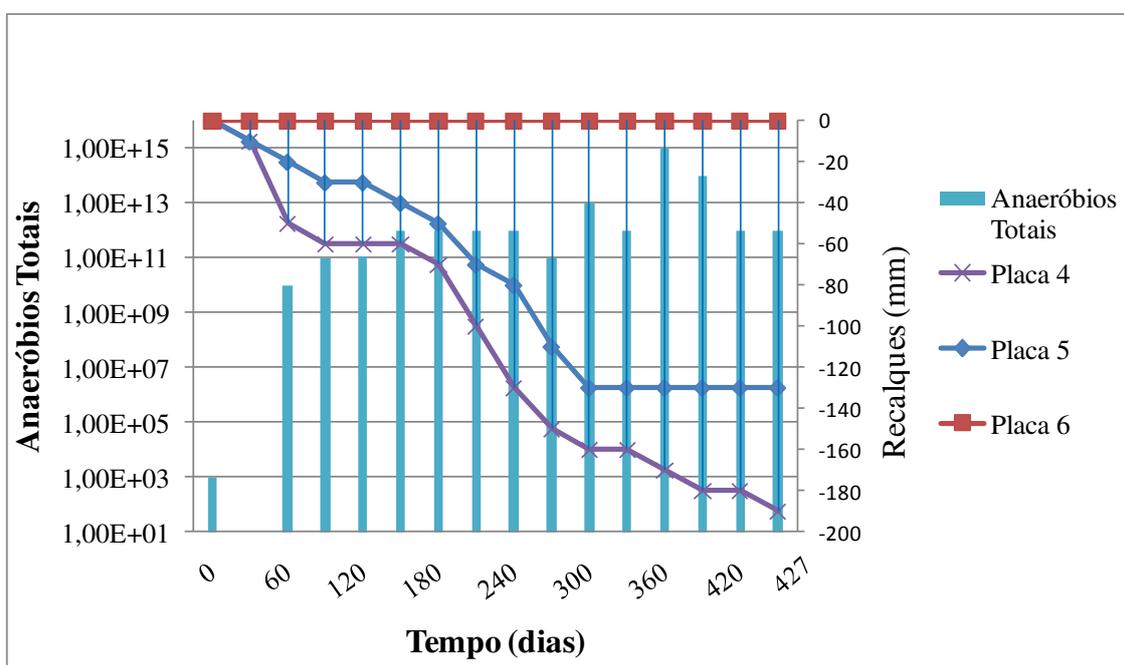


Figura 55: Recalques versus Anaeróbios Totais no Nível Inferior

Exceção faz-se a placa 5, que com o aumento dos microrganismos anaeróbios não foi possível verificar recalques após 300 dias de monitoramento. Isto pode decorrer de 2 fatores. Primeiro, pode ocorrer que mesmo que haja matéria orgânica, as deformações dos resíduos provoca uma diminuição de vazios nesta profundidade dificultando os recalques, pois a compactação pode ser excessiva. Segundo, que em camadas mais profundas os líquidos se acumulariam distribuindo as pressões em todas as direções dificultando os recalques (MELO, 2003). Monteiro 2003 verificou este comportamento em células de aterros de RSU quando do período de chuvas em que líquidos se acumulavam nas porções mais inferiores impedindo o fenômeno de recalques.

Interessante observar que na Figura 55 o número de microrganismos anaeróbios sempre esteve alto e aumentou com o passar dos dias de monitoramento. Isto é perfeitamente possível, pois embora, os SV, DQO, DBO tenham diminuído de uma maneira geral, nesta profundidade a lixiviação de compostos orgânicos permite um incremento na atividade microbiana, sem de fato contribuir para os recalques e a diminuição de sólidos voláteis nesta camada.

4.3. Estatística Aplicada aos Dados Coletados

4.3.1. Estatística Descritiva

No caso da análise descritiva, escolheu-se os parâmetros de Teor Umidade e Sólidos Voláteis, DQO e DBO por estarem diretamente relacionados aos recalques, uma vez que estas variáveis quando retiradas do meio interno da célula experimental se traduzem em recalques.

De acordo com a análise descritiva dos dados na camada superior (Quadro 10) o coeficiente de variação apresentou um valor alto (acima 25%) o que mostra a influência do meio ambiente externo sobre os parâmetros estudados se comparado às camadas inferiores a esta. Segundo Paiva (2009) um coeficiente menor ou igual a 15% tem baixa dispersão. Se o coeficiente de variação for entre 15 e 30% haverá uma média dispersão e, se maior que 30% uma alta dispersão.

Os teores sólidos voláteis e umidade apresentaram coeficiente acima da 78%, o que é bastante elevado se comparado com os mesmos parâmetros nas camadas abaixo. Vale salientar que esta camada está apenas separados do meio externo por uma camada de solo compactado de 200mm de espessura.

Quadro 10: Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques –camada superior

Variáveis	Camada Superior		
	Média	Desvio Padrão	C. Variação
Teor de Umidade	30,90	24,34	78,78
Sólidos Voláteis	37,52	30,93	82,44
DBO	2534,38	1374,12	54,22
DQO	30179,37	7750,37	25,68

O Quadro 11 mostra os resultados de dispersão menores que os apresentados na camada superior, indicando que o meio ambiente externo tem menor influência sobre estes parâmetros estudados. Isto indica que um aterro de RSU não deve ser isolado do

meio ambiente. Mesmo assim devido a grande área de superfícies do lisómetro estudado há uma certa influência de todas as camadas analisada pelo ambiente externo.

Quadro 11: Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques –camada intermediária

	Camada Intermediária		
Variáveis	Média	Desvio Padrão	C. Variação
Teor de Umidade	49,99	10,89	21,79
Sólidos Voláteis	64,97	15,08	23,21
DBO	2733,57	1227,05	44,89
DQO	26448,64	12406,40	46,91

Conforme Moreda (2000) um aterro para ser funcionalmente eficiente precisa estar em contato com o meio ambiente. Este contato não é a exposição livre dos resíduos (lixão), mas sim uma exposição controlada através de camadas de solo compactado que oferecem um mínimo de trocas de energia e matéria com o meio ambiente.

Ainda conforme o Quadro 11 os dados de teor de umidade, sólido voláteis, DBO e DQO são menores que os da camada acima, indicando que a degradação da matéria orgânica foi menor e isto foi verificado através dos recalques mostrados por placas. Nas camadas superiores os recalques e a decomposição da matéria orgânica foram maiores.

No Quadro 12 é observado que ha uma menor dispersão dos dados. O coeficiente de variação desta camada ficou bem menor dos mostrados nas camadas superiores a esta. Isto indica que o isolamento ao meio ambiente foi maior nesta camada. Embora haja um grande influência dos lixiviados das camadas superiores neste extrato de resíduos, isto não é suficiente para ditar maiores degradabilidades da matéria orgânica e, portanto, maiores recalques.

Quadro 12: Análise descritiva dos principais parâmetros associados aos recalques –camada inferior

	Camada Inferior		
Variáveis	Média	Desvio Padrão	C. Variação
Teor de Umidade	52,55	7,01	13,34
Sólidos Voláteis	51,70	12,38	23,94
DBO	2709,86	1155,56	42,64
DQO	27174,50	8155,57	30,01

Nota-se no quadro 12 que os coeficientes de variação para o teor de umidade foi de 13,34% indicando uma baixa dispersão. Assim, nota-se que o teor de umidade foi o

mais afetado pelo ambiente externo nas camadas superiores. Isso era previsto, pois as condições climáticas na Cidade de Campina Grande remetem a um quadro de déficit hídrico, portanto evapora mais do que precipita. Assim a umidade das camadas acima vai diminuindo rapidamente com o tempo. Isto permite dizer que um aterro em escala real nesta cidade teria que ter um sistema que permitisse a utilização de seus lixivados e outras fontes de umidade para acelerar o processo degradativo da matéria orgânica.

4.3.2. Teste de Normalidade

Para a verificação da normalidade dos dados, procedimento esse que se faz necessário para a utilização da estatística clássica, utilizou-se o teste para a normalidade de Kolmogorov-Smirnof.

A Tabela 1 mostra que os dados tendem a uma distribuição normal, pois foi utilizado para o teste um nível de significância de 5%, tendo obtido os p-valores sempre maiores que a significância, resultando assim da aceitação da hipótese nula com 95% de certeza.

Tabela 1: Teste de Normalidade de Kolmogorov-Smirnof.

Variável	P. Valor	Situação
Aeróbios	1,712	Normal
Anaeróbios	2,626	Normal
pH	1,172	Normal
Teor de Umidade	1,255	Normal
Sólidos Voláteis	0,642	Normal
DBO	0,730	Normal
DQO	0,921	Normal
Fungos	1,988	Normal
Placas	1,287	Normal
Coliformes Totais	2,402	Normal
Coliformes Termotolerantes	1,736	Normal
Cloretos	0,944	Normal
Ácidos Voláteis	0,831	Normal
Alcalinidade	0,476	Normal
Temperatura	0,689	Normal
Camadas	1,019	Normal
Precipitação	0,723	Normal
Evaporação	0,480	Normal

4.3.3. Análise de Variância (ANOVA)

Para verificação das diferenças estatísticas por camada da mesma variável utilizo-se a ANOVA com um fator, ou seja, a influência do meio ambiente na variável.

A Tabela 2 mostra a análise de variância para um fator (ANOVA) no que se refere ao parâmetro de Teor de Umidade. Observa-se que existe uma diferença estatística entre as camadas para esta variável, pois o p-valor foi menor que 5% (p-valor de aproximadamente 0,1%) e a análise foi realizada com um nível de significância de 5%. Pode-se afirmar isto com 95% de confiança, ou seja, o teor de umidade da camada superior é menor e apresenta maior dispersão do que as demais camadas inferiores devido ao contato direto com o meio ambiente, os processos de evaporação e precipitação, provavelmente afetaram este parâmetro com maior intensidade.

Tabela 2: Análise de variância para o teor de umidade

Teor de Umidade						
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3238,883888	2	1619,441944	8,725355096	0,00084245	3,267424
Dentro dos grupos	6496,064333	35	185,6018381			
Total	9734,948221	37				

As tabelas 3 e 4 mostram que a análise de variância entre teor de sólidos voláteis e DQO não apresentaram diferenças estatísticas significativas ao nível de 5% nas três camadas, pois o p-valores foram maiores que o nível de significância testado (5%). Os valores de p-valor foram maiores que 3%.

Os resultados indicam que em termos de perda de massa destes dois parâmetros o comportamento é estatisticamente semelhante. Nestas camadas a degradação da matéria orgânica é praticamente igual, pois conforme já comentado os níveis de resíduos sólidos sempre apresentam médias semelhantes de microrganismos e, portanto, a biodegradação ocorreu de maneira bastante homogênea nas três profundidades pesquisadas na célula experimental.

Tabela 3: Análise de variância para o teor de sólidos voláteis

Sólidos Voláteis						
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1508,684	2	754,342	2,195593	0,1263884	3,267423525
Dentro dos grupos	12024,98	35	343,5709			
Total	13533,67	37				

Vale salientar que os resultados de sólidos voláteis e DQO são geralmente interligados, pois conforme varia um fator o outro também deve variar, uma vez que ambos indicam indiretamente o conteúdo de matéria orgânica.

Tabela 4: Análise de variância para Demanda Química de Oxigênio

DQO						
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	75585493	2	37792747	0,377224	0,688517	3,267423525
Dentro dos grupos	3,51E+09	35	1E+08			
Total	3,58E+09	37				

4.3.4. Análise de Componentes Principais (ACP)

O estudo estatístico multivariável em componentes principais foi realizado, inicialmente, com a geração de uma matriz de correlação com todas as variáveis envolvidas no processo e divididas por camadas (ANEXOS) para verificar o nível de relação entre as variáveis.

Utilizou-se o critério de excluir aquela variável que não apresentasse uma correlação de 70% com pelo menos duas outras variáveis. Em seguida, procedeu-se, uma Análise em Componentes Principais (ACP) para verificação da formação dos grupos de variabilidades equivalentes e, posteriormente, foram gerados os dendrogramas para verificação da distancia Euclidiana e, assim, avaliar a dispersão entre esses dados.

O Quadro 13 mostra o percentual da variabilidade do processo explicado pelos seus auto-valores. Observa-se que os primeiros e segundos fatores asseguram um percentual de explicação acima de 80%. Desta forma pode-se utilizar apenas os dois primeiros fatores da análise em componentes principais.

Quadro 13: Valores Scree Plot para as análises em componentes principais

	Fator 1	Fator 2	Total
Camada superior	72	11	83
Camada Intermediária	77	11	88
Camada Inferior	78	18	96

A ACP da camada superior (Figura 56) mostra a formação de 3 grupos correlacionados mais intimamente. Estes são formados com elementos de dispersão semelhante.

Verifica-se que no grupo 1 há uma estreita correlação entre os recalques na camada superior e os dias (Figura 56). Isto era esperado, pois, conforme os dias vão passando os recalques irão acontecendo. O grupo 2 que se refere aos sólidos voláteis, teor de umidade, DBO também mostram uma relação positiva (estão em uma mesma direção plotados nos gráficos dos dois principais fatores), pois à medida que a célula experimental foi se tornando mais madura, estes três parâmetros diminuíram. Vale salientar que os sólidos voláteis indicam indiretamente se há umidade no interior da massa de resíduos, pois a matéria orgânica pode conter até 60% de água. Logicamente, so teor de sólidos voláteis cair, a DBO cai e consequentemente a umidade.

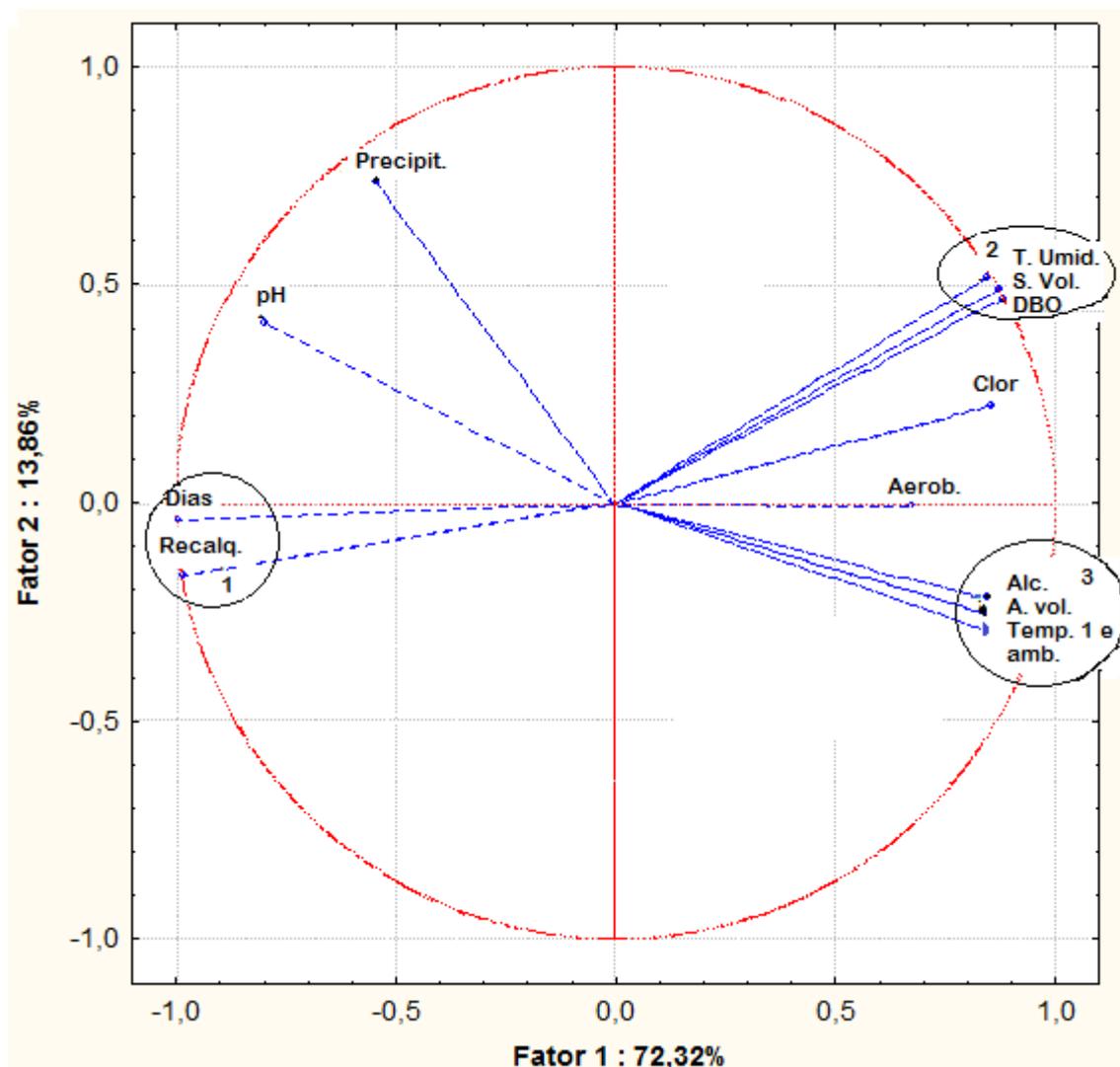


Figura 56: Análise das componentes principais-camada superior

Já o grupo 3 se refere aos ácidos voláteis, alcalinidade, temperatura ambiente (externa) e a temperatura 1 (0mm a 430mm de altura). Por estar mais próxima a superfície, apenas isolada pela camada de cobertura (200mm), as temperaturas externa e a temperatura 1, nesta camada, devem ser bastante semelhantes e isto foi verificado no decorrer do trabalho.

O que destoa do que realmente deveria ser observado nesta camada é que a alcalinidade deveria ter um comportamento oposto aos dos ácidos voláteis. Pois a medida que os ácidos voláteis vão diminuindo a alcalinidade deveria ir aumentando. Quanto aos dados de pH, precipitação, cloretos e aeróbios a correlação foi muito pequena. Houve, entretanto, maior relação com pH e precipitação. Estudos mostram que o pH (Melo, 2003) é diretamente influenciado pela precipitação, pois a água das chuvas pode trazer consigo oxigênio e gás carbônico que tem um caráter ácido e, portanto, modificar o pH.

Correlações negativas também ocorreram na camada superior (Figura 56). O grupo 1 é oposto ao grupo 2 e 3. Isto também era esperado, pois à medida que os recalques na camada superior vão ocorrendo, o teor de sólidos voláteis, DBO, umidade, ácidos voláteis devem decair. Entretanto o grupo 1 é próximo, embora, pouco relacionado ao pH, pois conforme os dias decorrem o pH vai aumentando em função da maturação da célula experimental.

No caso específico de recalques o ideal é que ocorra uma correlação negativa (os parâmetro plotados estão em direção oposta no gráfico) com DBO, DQO e sólidos voláteis, pois à medida que as deformações acontecem os índices físico químicos como os relacionados a variação de matéria orgânica devem diminuir.

Com relação ao Dendrograma (Figura 57) da camada superior os resultados mostram que todas as variáveis envolvidas apresentam distâncias Euclidianas normalizadas entre 0,3 e 2,7. Isto significa que tem variações muito próximas, ou seja, a variabilidade de um deles é muito influenciada pela variação do outro.

Observa-se na Figura 57 que os dados de teor de umidade e DBO estão muito relacionados e estas duas variáveis estão relacionadas com os sólidos voláteis, o que é esperado. A distância euclidiana para estas duas variáveis observadas na Figura 57 foi menor 0,25, ou seja, a menor distância entre os dados analisados. Outra relação muito próxima, porém menor que os dados anteriores (distância Euclidiana > 1), é a que se refere aos recalques e os dias. Como já comentado na Figura 56 estes dados devem ter uma correlação positiva, pois à medida que varia um o outro também deve variar.

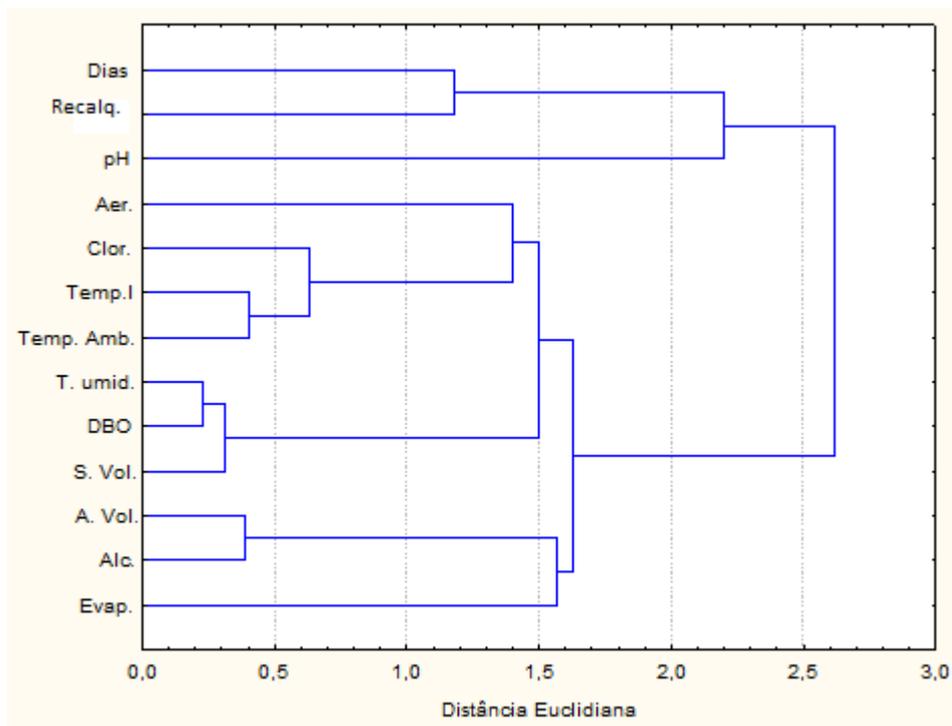


Figura 57: Dendrograma mostrando as distâncias Euclidianas entre as variáveis da camada superior

Na ACP da camada intermediária (Figura 58) também ocorre a formação de 3 grupos correlacionados mais intimamente e uma variável mais isolada. A Figura 58 mostra que há uma correlação positiva mais íntima entre dias e pH do que dias e recalques. Entretanto, o grupo 1 está fracamente, mas mesmo assim correlacionado aos recalques nesta camada. Já no que se refere aos sólidos voláteis e DBO, o grupo 1 está correlacionado negativamente, o que também ocorreu na camada superior.

O grupo 3 mostra a correlação positiva entre os dados de ácidos voláteis e evaporação.

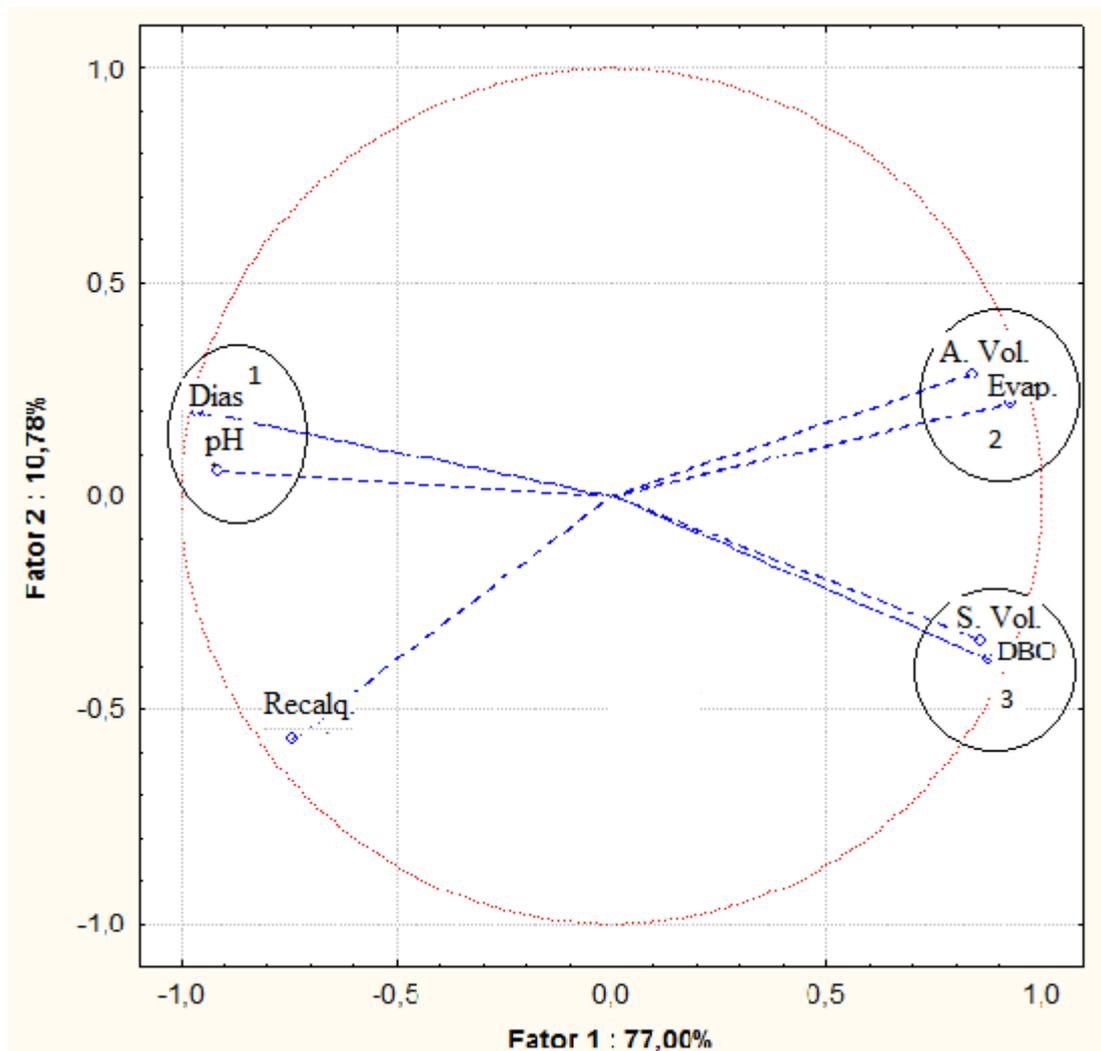


Figura 58: Análise das componentes principais-camada intermediária

Com relação ao Dendrograma (Figura 59) da camada intermediária os resultados mostram que todas as variáveis envolvidas apresentam distâncias Euclidianas normalizadas entre 1,7 e 4,6. Também é observado na Figura 59 a formação de 2 grupos e que eles explicam a variabilidade do processo. Um grupo é formado por dias, pH e recalques e o outro grupo por sólidos voláteis, DBO, evaporação e ácidos voláteis. A ligação entre estes dois grupos segue uma distância euclidiana normalizada de 4,6.

No dendrograma (Figura 57) da camada superior há a formação de 4 grandes grupos e isto ocorre, possivelmente, devido à esta camada ser mais influenciada pelo meio ambiente externo, o que justifica a menor distância euclidiana entre os grupos. Já a camada inferior por ser mais isolada, pouco, é influenciada pelo ambiente externo.

Verifica-se através da Figura 59 que os sólidos voláteis e DBO estão mais relacionados estatisticamente que os demais dados.

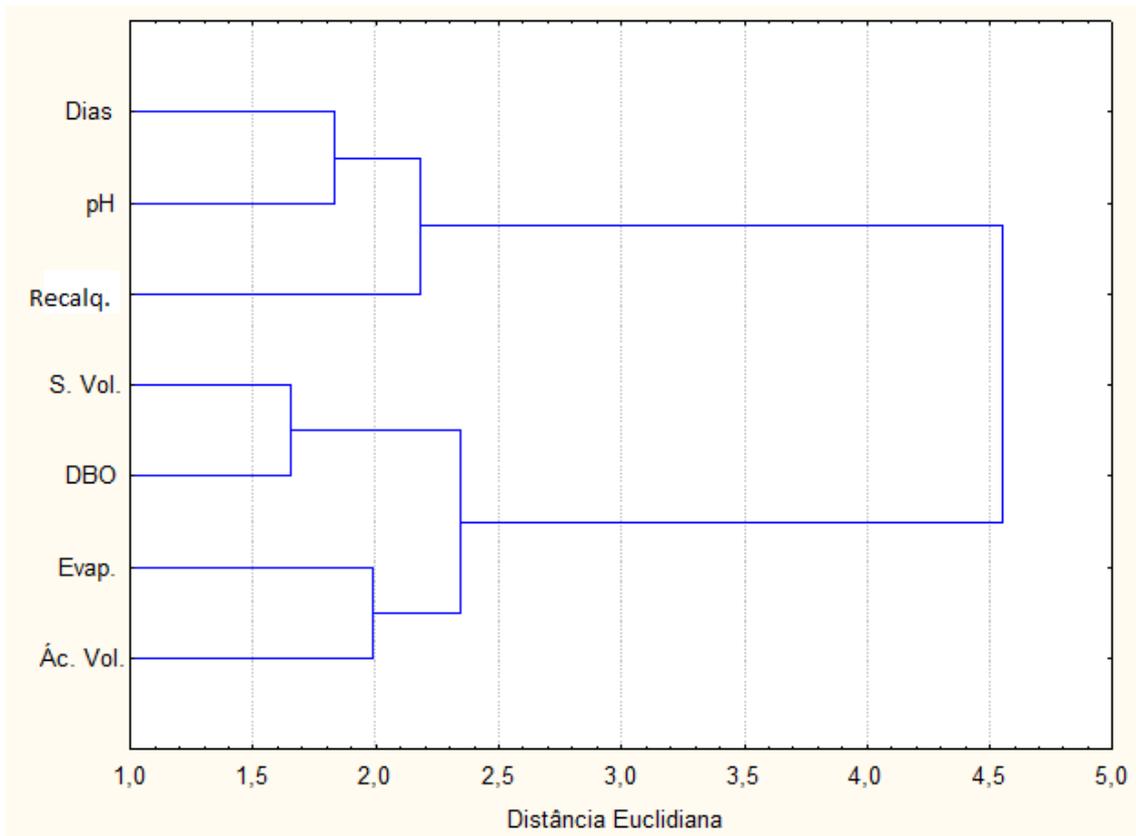


Figura 59: Dendrograma mostrando as distâncias Euclidianas entre as variáveis da camada intermediária

Na ACP da camada inferior (Figura 60) ocorre a formação de 1 grupo e duas variáveis mais isoladas. A camada inferior apresenta dados menos correlacionados estatisticamente que as demais camadas. Deve-se ressaltar que isto ocorre por esta camada ser menos influenciada pelo ambiente externo que as demais camadas, como já comentado. Contudo, é importante frisar que esta camada é influenciada pelos produtos oriundos das camadas acima (lixiviação).

No que se refere aos recalques nesta camada e dias há uma correlação positiva, como nas demais camadas. O grupo 1 está relacionado negativamente com os dados de evaporação, pois em Campina Grande há um déficit hídrico como já foi abordado nos itens anteriores. Mas de certa forma a evaporação pode facilitar os recalques, pois estes ocorrem devido à expulsão de líquidos e gases. Por outro lado a evaporação excessiva pode inibir a biodegradação da matéria orgânica (MELO, 2003 e MCDUGALI *et.al.*, 2004).

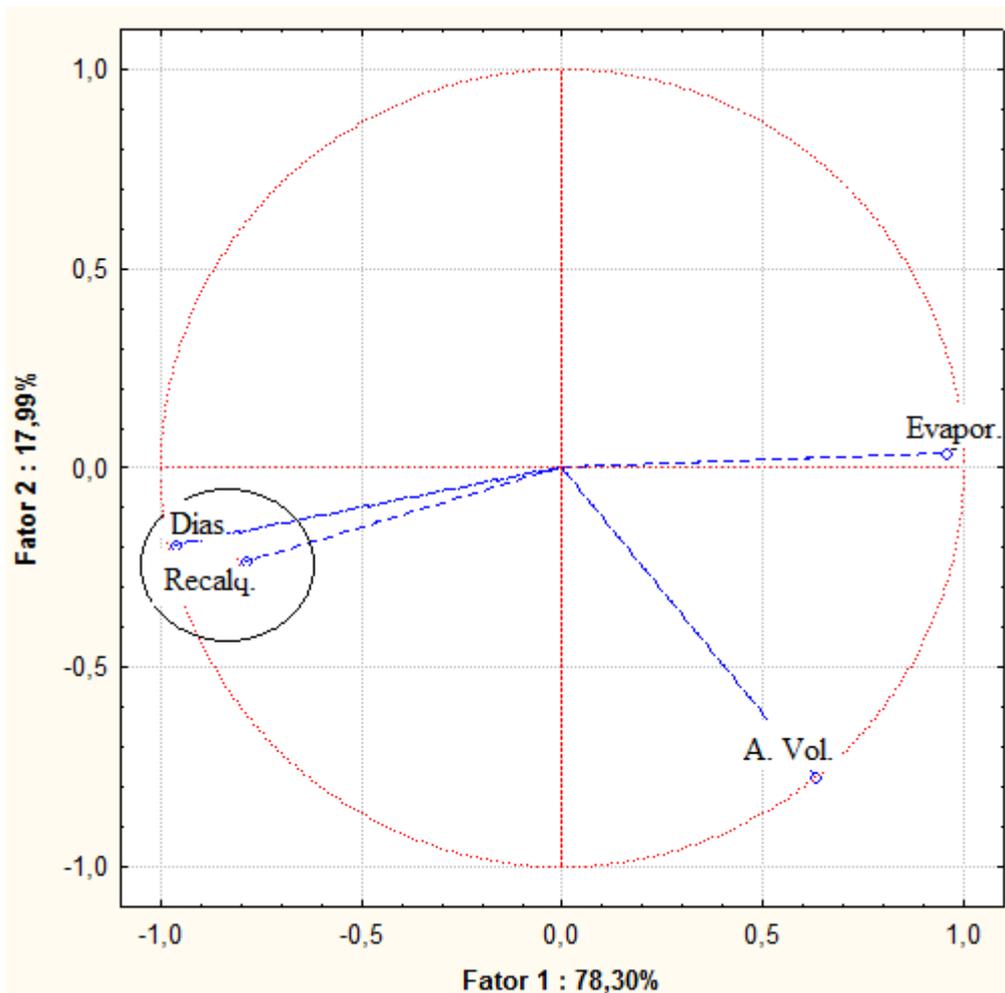


Figura 60: Análise das componentes principais da Camada Inferior

No Dendograma (Figura 61) da camada inferior os resultados mostram que todas as variáveis envolvidas apresentam distâncias euclidianas normalizadas entre 0,8 e 5,2. Pode se observar que há formação de 2 grupos distintos de correlações estatísticas. Como mostra o dendograma (Figura 61) dias e recalques estão bem relacionados e, evaporação e ácidos voláteis formam uma outra correlação. Entretanto, estes dois grupos possuem uma distância euclidiana de 5,2, o que é justificado pela menor influência do meio externo.

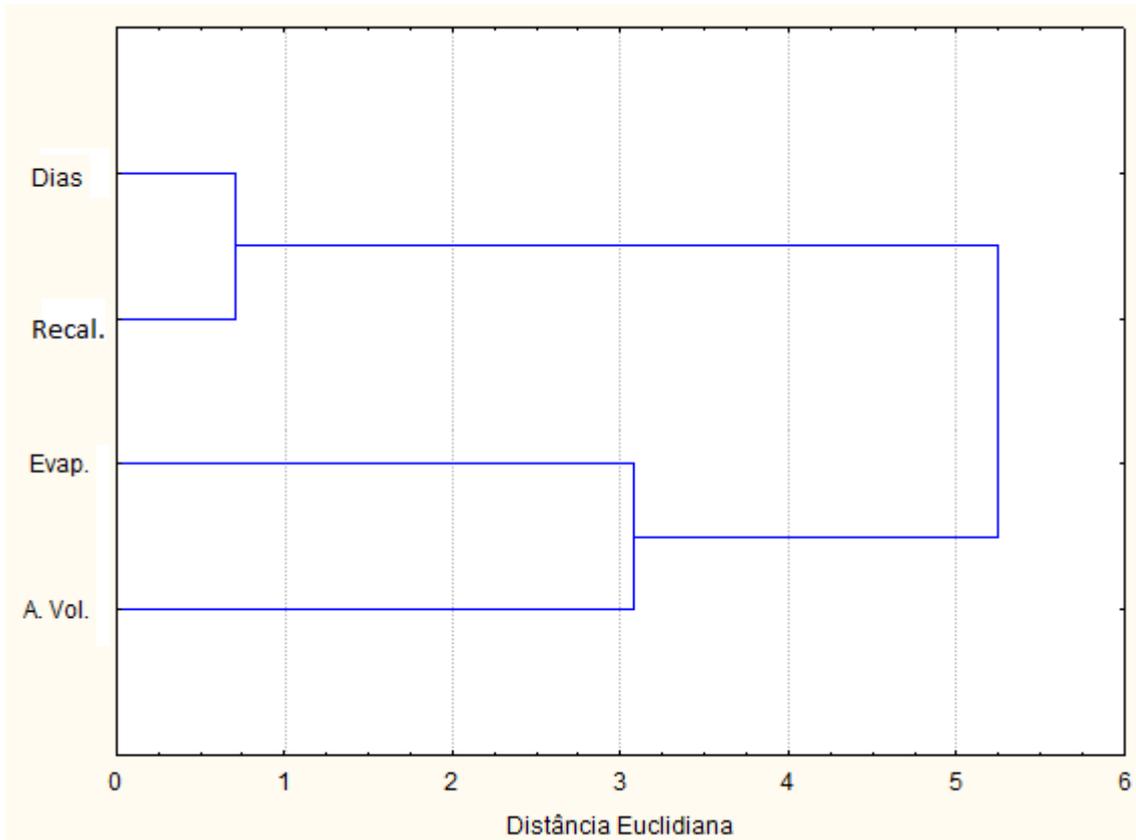


Figura 61: Dendrograma mostrando as distâncias Euclidianas entre as variáveis da camada inferior

De acordo com as correlações estatísticas a camada superior obteve melhores correlações estatísticas, seguidas da camada intermediária e inferior. Estes dados mostram que as camadas mais próximas ao ambiente externo tiveram melhores atividades microbianas, recalques, e degradações da matéria orgânica o que justifica a concepção de aterros não isolados do meio externo (MOREDA, 2000). Neste caso a velocidade da degradação da matéria orgânica e recalques são maiores e, portanto, mais rápido será utilizada uma área que outrora foi aterro.

5. Conclusões e Sugestões para Futuras Pesquisas

5. 1.Conclusões

Os estudos realizados permitiram concluir:

- Os resultados encontrados nesta pesquisa através da caracterização física, química e biológica mostram que a matéria orgânica representa a maior parte dos resíduos (66%) gerados na cidade de Campina Grande-PB;
- Os plásticos apesar de apresentarem um pequeno peso assumem grandes volumes (27%)no interior da massa de resíduos;
- O teor de umidade dos resíduos depositados na célula experimental tanto em profundidade como no tempo, principalmente as camadas intermediária e inferior, foram propícios ao desenvolvimento de microrganismos e degradação da matéria orgânica, embora haja um déficit hídrico anual na região;
- A quantidade de matéria orgânica diminuiu acentuadamente em todos os níveis pesquisados. Na camada superior esta diminuição foi de 93%, na camada intermediária e inferior em torno de 40%;
- Os recalques medidos por placa foram maiores na superfície e decrescendo com a profundidade;
- Os recalques devido a degradação da matéria orgânico medidos por placa foram de 73% na superfície e de 95% nas maiores profundidades;
- No que se refere a variação de altura por camada de resíduos a que apresentou maior recalques foi a intermediária (14%) seguida das demais (7%);

- Os resultados de recalques sugerem que durante o monitoramento da célula experimental a degradação dos resíduos foi bastante rápida se comparado a aterros em escala real.
- A camada superior obteve os melhores resultados no que se refere a recalques e a degradação da matéria orgânica pelo fato de ser mais influenciada pelas condições ambientais locais, fato este comprovado pelo resultados estatísticos e, pelo deslocamento das demais camadas.
- A constante K, de uma maneira geral diminuiu com o tempo, indicando que a quantidade de matéria orgânica está diminuindo e consequentemente a velocidade dos recalques, embora o número de microrganismos sempre estivessem elevados;
- O valor da constante de bioestabilização, K, mostra que inicialmente não se dá para correlacionar esta constante com os recalques, pois inicialmente os recalques ocorrem devido, principalmente, a fatores mecânicos;
- Este estudo foi, especialmente, importante, pois foi possível identificar a importância dos materiais constituintes dos resíduos sólidos na produção de recalques com conseqüente consumo da matéria orgânica.

5. 2. Sugestões para Futuras Pesquisas

- Estudar com maior ênfase os recalques durante a fase de enchimento de resíduos em uma célula experimental;
- Fazer lisímetros ou biorreatores de bancada para o estudo do comportamento degradativo da matéria orgânica para se determinar o coeficiente de biostabilização (K) e verificar quais as fases degradativas de fato apresentam maior velocidades degradabilidade da matéria orgânica;
- Medir a formação de gás em biorreatores de bancada em condições meteorológicas semelhantes a região de Campina Grande;

- Fazer um planejamento para amostragem de resíduos sólidos urbanos por zonas geográficas na cidade de Campina Grande para caracterização física, química e biológica destes resíduos com uma representação estatística;
- Definir nos estudos estatísticos uma gestão e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos eficiente de acordo com as características dos resíduos de cada zona.

Fundamentação Teórica

ABBASNEZHAD, H.; GRAY, M. R.; FOGHT, J. M.; **Colloids Surf.**, B, 62, 36. 2008.

ALBERTE, E. P. V., CARNEIRO, A. P., KAN, L. **Recuperação de Áreas Degradadas por Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos.** Diálogos & Ciência -- Revista Eletrônica da Faculdade de Tecnologia e Ciências de Feira de Santana. Ano III, n. 5, jun. 2005.

ALCÂNTARA, P.B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. UFPE. Recife. 2007.

ALMEIDA M. G.; FERREIRA E. M. **Aproveitamento de Resíduos Sólidos Urbanos e outros Rejeitos para onversão de Energia Elétrica.** XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e. IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba UNIVAP São Paulo, 2009.

ALVES, I. R. F. S. **Análise Experimental do Potencial de Geração de Biogás em Resíduos Sólidos Urbanos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. UFPE. Recife .2008.

American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environmental Federation (WEF). **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 18 ed. Washington. APHA-WEF, 1992. 1193p.

American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environmental Federation (WEF). **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 20a. ed. Washington: American Public Health Association, 1998.

ARAÚJO, M. V.; MELO, M. C. M.; LEITE, H. E. A. S.; ARAÚJO, E. P.; MONTEIRO, V. E. D. **Quantificação de Fungos em um Bioreator de Resíduos**

Sólidos da Cidade de Campina Grande – PB. 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife, PE, setembro de 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE AMIDO DE MANDIOCA ABAM. Paranaíba – Paraná, ANO IV - Revista 14 - Abr.- Jun. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986a. 9p.

NBR 6459: Solo - determinação do limite de liquidez – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984a. 6p.

NBR 6502: Rochas e solos – terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm - determinação da massa específica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984b. 8p.

NBR 7180: Solo - determinação do limite de plasticidade – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984c. 3p.

NBR 7181: Solo - análise granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984d. 13p.

NBR 7182: Solo - ensaio de compactação – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986b. 10p.

NBR 7185: Solo – determinação da massa específica, “in situ” com emprego do frasco de areia – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986c. 7p.

NBR 8149. Apresentação de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. 1992.

NBR 10004: Resíduos Sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004a. 74p.

NBR 10006: Resíduos Sólidos - procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b. 3p.

NBR 10007: Resíduos Sólidos – amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro, 2004c. 21p.

NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

NBR 14545: Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000. 12p.

ASTM. D 2487 – 85: Test methods for classification of soils for engineering purposes. USA: USCS, 1987.

BARLAZ M.A.; SCHAEFER D.M.; HAM R.K. **Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill.** Applied Environmental Microbiology. London, V.55. p.55-65. 1989.

BIDONE, F.R.A., POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos sólidos**, 1ª ed, v.1, São Carlos, EESC-USP, 1999.

BJARNGARD A, EDGERS L. **Liquidação de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos.** 13ª Conferencia Anual Awste Madison, USA. 1990.

BORGLIN, S. E; HAZEN, T. C., OLDENBURG, C. M.; ZAWISLANSKI, P. T. **Comparison of Aerobic and Anaerobic Biotreatment of Municipal Solid Waste.** J. Air & Waste Manage. Assoc. V. 54. 2004

BOUAZZA, A & VANGPAISAL, T. An Apparatus to Measure Gas Permeability of Geosynthetic Clay liners. Geotechnical Testing Journal, ASTM. 2002.

BRITO FILHO L. F. **Estudo de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE. 2005.

BRITO, A. L. F. de; MUNIZ, A. C. S.; LOPES, W. L.; LEITE, V. D. PRASSAD, S. **Processo de Codisposição de Resíduos Sólidos de Curtume**. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol. 7, n. 3 e 4, p.144-150. 2002.

CALLISTER JR, WILLIAM D. Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução. LTC, SP. 2002.

CAMPOS, J. R. (coord.). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, p. 464 1999.

CASTILHOS JR.A.B. (Coordenador). **Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável Para Cidades de pequeno porte**. Projeto PROSAB – RIMA, ABES. Rio de Janeiro. 294 p. 2003.

CATAPRETA, C. A. A., SIMOES, G. F., BARROS, R. T. V. (2005) **Aterro experimental para disposição de resíduos sólidos urbanos: caso de Belo Horizonte, MG**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 24, 2005, Campo Grande, MS. Anais... Rio de Janeiro: ABES.

CATAPRETA, C. A. A., SIMOES, G. F., BARROS, R. T. V. (2005) **Célula experimental de grandes dimensões para disposição de resíduos sólidos domiciliares: Implantação, resultados preliminares e propostas**. Anais dp IWSA 2005 n: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 24, 2005, Campo Grande, MS. Anais... Rio de Janeiro: ABES.

CATAPRETA, C. A. A., SIMOES, G. F., BATISTA, H.P., OLIVEIRA, A.F.G, OLIVEIRA, L.C.M. **Influencia da umidade e fatores operacionais na compactação de resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário de Belo Horizonte, MG**. [CD ROM]. In: 23^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.Campo Grande, MS, 2005b.

CATAPRETA, C. A. A., SIMOES, G. F., BARROS, R. T. V. **Avaliação da densidade de resíduos sólidos urbanos dispostos em um aterro experimental**. In: Congreso de

la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 30, , Punta del Este, Uruguay. Anais. Punta del Este : AIDIS. 2006

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-SP. 1990.

CETESB. **Resíduos Domésticos: tratamento.** São Paulo-SP. 1990.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Emissões de Metano no Tratamento e na disposição dos Resíduos.** São Paulo, 2002.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Inventário Estadual dos Resíduos Sólidos Domiciliares.** Relatório. São Paulo, 2007.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte:** DESA/UFMG, 246p.1997.

CHERNICHARO C. A. L. **Reatores Anaeróbios – princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: DESA/UFMG, v 5 . 2000.

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

CHERNICHARO, C. A. de L.“**Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Reatores Anaeróbios.** Vol. 5. Belo Horizonte: DESA-UFMG. 2008

CINTRA, F.H.; HAMADA, J. & CASTILHO, G.S.F. **Fatores que Afetam a Qualidade do Chorume Gerado em Aterro Controlado de Resíduos Sólidos Urbanos**. VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2002.

COHEN, M. - **Os Materiais em Nosso Cotidiano**. Cambridg, Massachusetts, setembro de 1979.

EL-FADEL, M., BOU ZEID, E., CHAHINE, W & ALAYLI, B. **Temporal Variation Leachate quality from Pre-sorted and baled Municipal slid Waste with High Organic and Moisture content**. Waste management & Pergamon, p. 269-282. 2001.

EL -FADEL, M.; DOUSEID, E.; CHAHINE, W.; ALAYLIC, B. **Factors inluencing solid waste generation and management**. Waste Management, Amsterdam, v. 22, p. 269-276. 2002.

ELAGROUDY SA, MH ABDEL RAZIK, WARITH MA E GHOBRIAL FH. **Waste Settlement in Bioreactor landfill models**. Waste Management , 28, 2366-2374, (2008).

ENSINAS, A.V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. Dissertação de mestrado acadêmico - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas – UNICAMP - São Paulo. 2003

ESPINACE, R. A. **La Geotecnia Ambiental Aplicada a los Vertederos sanitarios**, Curso XX: Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos: Una Perspectiva Internacional. Suances, España. 2000.

ESPINACE, R., PALMA ,J, VALENZUELA P, SZANTO M., SCHIAPPACASSE, M.C., CHAMY, R. **Assentamientos em um Vertedero Controlado a Escala com Recirculacion de Liquidos Lixiviado**. (1999a).

ESPINACE R., PALMA J., SÁNCHEZ-ALCITURRI J.M. **Experiencias de Aplicación de Modelos para la Determinación de los Asentamientos de Rellenos Sanitarios**, XI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Foz de Iguacu, Brasil. (1999b).

ESPINACE, R.A, PALMA J. **Propriedades Mecánicas del Relleno Sanitario de Limache.** IX Congreso panamericano de Mecánica de Suelos e ingeniería de fundaciones, Viña del Mar, Chile. 1991.

FARQUHAR, G. J. **Leachate: Production and characterization.** Disponível em: <http://www.cepis.org.pe>. 1988

FERREIRA, M.A.S.; MAHLER, C.F. **Avaliação do Solo das Camadas de Cobertura Intermediárias e Finais Estudo de Caso.** IZZO, R.L.S.; BORGATTO, A.; MAHLER, C.F. Classificação de resíduos sólidos urbanos da cidade do rio de janeiro utilizando a norma alemã E1-7 GDA. 2006.

FIRMO A. L. B. **Análise Numerica de Aterros de Resíduos Solidos Urbanos: Calibração de Experimentos em Diferentes Escalas.** Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco UFPE-Brasil. 2008.

FIRMO, A. L. B.;MELO, E. S. R. L.; GUIMARÃES, L. J. N.; VALLE, G. A. **Avaliação do Potencial de Geração de Biogás dos Componentes dos Resíduos Sólidos Urbanos do Aterro da Muribeca.** 3º Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Resíduos e 2º Seminário da Região Nordeste sobre Resíduos Sólidos. REDISA – Red de Ingeniería de Saneamiento Ambiental. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.2010.

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

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). Como destinar os resíduos sólidos urbanos. Belo Horizonte: FEAM, 47 p. 1995.

FEIDEN, A., REICHL, J., SCHWAB, J., SCHWAB, V. **Avaliação na Eficiência de um Biodigestor Tubular na Produção de Biogás a partir de Água Residuárias de Suinocultura.** Faculdade de Engenharia Agrícola -Feagri.Universidade de Campinas - Unicamp.SP. 2004

FRANÇA, L. R. C. ; ARAÚJO, E. P. ; ARAÚJO, M. V. ; MELO, M. C. ; MEIRA, R. C. ; MONTEIRO, V. E. D. . **O estudo da fitotoxicidade em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** (Apresentação de Trabalho/Simpósio).2010.

FRANÇA JUNIOR, A.T.; **Análise de Aproveitamento Energético de Biogás Produzido em uma Estação de Aproveitamento de Esgoto.** Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, 2008.

GARCEZ, L. R. **Estudo dos componentes tóxicos em um biorreator de resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande – PB.** Dissertação (Mestrado Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

GARCIA JR. O. **Microrganismos e Metais.** In: Microbiologia Ambiental, Jaguaraúna: EMBRAPA – CNMA, Cap. 1, pp. 11-41. 1997.

GUIMARÃES, L. T. **Utilização do Sistema de Informação Geográfica para identificação de Áreas Potencias para disposição de resíduos na Bacia do Paquequer, Cidade de Teresópolis.** Dissertação de Mestrado. 2000. 172f. – Programa de Engenharia Civil, COPPE Universidade Federal de Rio de Janeiro. 2000.

HIRSCH, A. K.; VERA, R. A.; BRIONES, M. E. **Estudio a escala de laboratorio para la determinación de los parámetros hidrológicos óptimos para la generación de metano en rellenos sanitarios en Chile.** Universidad Católica de Valparaíso. Escuela de Ingeniería en Construcción. 2002.

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

IGUE, K. **Dinâmica da matéria orgânica e seus efeitos nas propriedades do solo.** In: Encontro Nacional Sobre Adubação Verde, 1983, Rio de Janeiro. Anais. Campinas: Fundação Cargill, p.232. 1984.

IPT/CEMPRE. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado.** D'ALMEIDA, M.L.O; VILHENA, A. (Coord.). 2. ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

ISOLDI, L. A.; KOETZ, P. R.; FARIA, O. L. V.; ISOLDI, L. A. **Parâmetros de operação do reator UASB em um sistema combinado reator UASB - reator aeróbio.** Revista Eletrônica do Mestrado em Engenharia Ambiental, v. 6, p. 16-30. 2001.

JESSBERGER, H. L.; SYLLWASSCHY, O. & KOCKEL, R. **Investigation of Waste Body-Behavior and Waste-Structure-Interaction.** Proceedings Sardinia 95, fifth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October, pp. 731-743. 1995.

JUCÁ, J. F. T., MARIANO, M. O. H., MELO, V. L. A. **Recalques e decomposição da matéria orgânica em aterros de resíduos sólidos na região metropolitana do Recife.** [CD ROM]. Em: 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

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, pp. 283, Brasília, DF. (2000).

KAIMOTO, L.S.A.; CEPOLLINA, M. **Considerações sobre alguns condicionantes e critérios geotécnicos de projeto executivo de aterros sanitários.** Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre, 1996.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos.** São Paulo: Ceres, 492p. 1985

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

KRUEMPELBECK & EHRIG, H.-J., **Long-term behavior of municipal solid waste landfills in Germany,** in Sardinia 99, Seventh International Waste Management and

Landfill Symposium, 4-8 October, S. Margherita di Pula, Cagliari, Proceedings vol. I, Christensen, T. H., Cossu, R., and Stegmann, R. Eds., CISA - Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy. 1999.

KUDRNA, Z. **Long-Term Deformations of Municipal Landfill Bodies and Their Effects on Functional Safety of Superficial Sealing.** Charles University in Prague, Faculty of Natural Science, Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics, Albertov 6, 128 43 Prague 2, Czech Republic. Acta Geodyn. Geomater., Vol. 6, No. 4 (156), 465–473, 2009.

LANDVA, A. O.; CLARK, J. I. **Geotechnics of waste fills – Geotechnics of waste fills - Theory and Practice**, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors. p. 86-103. Philadelphia, 1990.

LANDVA, A, O. VALSANGKAR A.J. & PELKEY S.G. **“Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste”**. *Canadian Geotech, J.* Vol 37, No 6, pp. 1157-1165. 2000.

LAUERMAN, A. **Caracterização Química dos Efluentes Gerados pelo Aterro Controlado de Santa Maria e Retenção de Chumbo e Zinco por um Argissolo da Depressão Central do Rio Grande do Sul.** Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo. 2007.

LAWRENCE, A.W. & MCCARTY, P.L. **The Role of Sulfide in Preventing Heavy Metal Toxicity in Anaerobic Treatment.** *J. WPCF*, V. 37, pp 392-409. 1965.

LEI 12.305/2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos- PNRS.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. 2010.

LEITE, H.E.A.S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em um biorreator em escala experimental na cidade de Campina Grande – Paraíba.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande – UFCG. Campina Grande – PB. 2008.

LEITE, H. E.A.S.; MONTEIRO, V. E. D.; SILVA, S. A. **Uma proposta de estudo de recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos em escala experimental associados a biodegradação.** In: VI CONGRESSO CHILENO DE GEOTECNIA. Valparaíso-Chile, 2007.

LEITE, V. D. **Processo de tratamento anaeróbio de resíduos sólidos urbanos inoculadas com lodo de esgoto industrial.** São Carlos. 197p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos: USP. 1997.

LEITE, V.D.; SILVA, S.A.; SOUZA, J.T.; LOPES, W.S.; MESQUITA, E.M.N. **Análise quali-quantitativa dos resíduos sólidos urbanos produzidos pela população da cidade de Campina Grande, PB.** 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Belo Horizonte – MG. (2007a).

LIMA, S. J., RITTER. E. FERREIRA. A. J. ALMEIDA, R. M. R. **Contaminação do Lençol Freático no Lixão do Cidade de São Pedro da Aldeia.** V Congresso Brasileiro de Geotécnica Ambiental, 2003.

LINS E. A. M.; MACIEL F. J.; JUCÁ J. F. T.; BRITO A. R.; ALVES I. R. F. S. **Avaliação da Insalubridade Causada pelo Biogás de um Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos.** 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 18 a 23 de setembro de 2005 - Campo Grande/MS. 2005.

LINS, M.C.M. **Avaliação Microbiológica e Fitotóxica do Chorume da Estação de Tratamento do Aterro da Muribeca – PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005.

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

LOXNACHAR, THOMAS E.; BROWN, KIRK W.; COOPER, TERENCE H.; MILFORD, H. MURRAY Service. **Sustentando os nossos solos e publicação da Sociedade**. Instituto Geológico Americano, Soil Science Society of America, o USDA Conservação de Recursos Naturais (1999).

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos urbanos da Muribeca**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

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.

MANNAPPERUMA, N.R.C.; BASNAYAKE, B.F.A. **Tropical climatic influence on municipal solid waste landfill Dynamics – Lysimeter Studies..** Trop. Agric. Res. V,16. p. 316-326. 2004

MARIANO, M.O.H.; MACIEL, F.J.; FUCALE, S.P.; JUCÁ, J.F.T.; BRITO, A.R. **Composição gravimétrica e volumétrica dos rsu da célula piloto do aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. 240 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2007.

MARIANO, M. O. H. **Estudo dos Recalques no Aterro da Muribeca**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE (1999).

MARQUES, A.C.M., VILAR, O.M., KAIMOTO, L.S. (2002). “Compactação de Resíduos Sólidos Urbanos”, Solos e Rochas – Revista Latino-americana de Geotecnia, ISSN0103-7021, Vol. 25, No 1, pp. 37-50, Janeiro-abril. 2002.

McBEAN, E.A., ROVERS, F.A., FARQUHAR, G.J. **Solid Waste Landfill Engineering and Design**, Prentice Hall PTR, pp. 521.1995.

MCDUGALL, J.R., PYRAH, I.C., YUEN, S.T.S., MONTEIRO, V.E.D., MELO, M.C. & JUCA, J.F.T., **Decomposition and settlement in landfilled waste & other soil-like materials**. Geotechnique 54, Vol 9, 605-610. 2004.

MENDES P. M. R. **Recalque do Maciço dos Resíduos Sólidos no Aterro Sanitário do Cidade de Foz do Iguaçu – PR**. Trabalho de Conclusão de Curso. União Dinâmica de Faculdade Cataratas - Curso de Engenharia Ambiental. Foz do Iguaçu – PR. 2009

MEIRA R. C. **Estudo biodegradativo dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB em escala experimental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. 2009.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.

MELO, M.C., MONTEIRO, V.E.D., NEVES, M.L, ARAÚJO, J.M., JUCÁ, J.F.T, **Estudos de Toxicidade em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. Revista Biotecnologia. Ano V, N° 28, Setembro/Outubro 2002, pp. 48-52. 2002.

MELO, V.L.A., JUCÁ, J.F.T. **Estudos de referência para diagnóstico ambiental em aterros de resíduos sólidos**. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental , 2000, Porto Alegre. 2000.

METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4 ed. USA, McGraw-Hill Book Company, 1771pp.2003.

MODESTO, H. S. **Estudo de escala de reatores anaeróbios de batelada tratando resíduos sólidos orgânicos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPB. Dissertação de mestrado, Campina Grande-PB. 2002.

MODUELO – MT. **Manual Técnico del usuario de la versión 3**. Grupo de ingeniería Ambiental. Departamento de ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria – España. 2006.

MODUELO – MU. **Manual del usuario de la versión 3.1**. Grupo de ingeniería Ambiental. Departamento de ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria – España. 2006.

MONTEIRO, V.E.D. **Estudos Geotécnicos de Cortinas de Argila no Aterro da Muribeca, Pernambuco** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE. 1998.

MONTEIRO, V.E.D. **Análises Físicas, Químicas e Biológicas no Estudo do Comportamento do Aterro da Muribeca**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife PE, pp. 1-232. 2003.

MONTEIRO, V. E. D. ; MELO, M. C. ; JUCÁ, J. F. T. . **Biological Degradation Analisis in Muribeca Solid Waste Landfill Associated with Local Climate Recife, Brazil**. In: Fourth International Congress on Environmental Geotechnics 4ISEG, 2002, Rio de Janeiro. Fourth International Congress on Environmental Geotechnics 4ISEG, 2002.

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**. [S.l.]: Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 2, nº 3. 2006.

MORAIS, J. L. **Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento**

de chorume de aterro sanitário. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

MOREDA, I.L. “**El Asentamiento en un Relleno Sanitario y su Relación con la Biodegradación**”. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería sanitaria y Ambiental. Porto Alegre, RS. (2000).

NASCIMENTO, J.C.F. **Comportamento Mecânico dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil –Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2007.

OLIVEIRA, L. & PASQUAL, A. **Monitoramento de Lixiviados de Aterro Sanitário.** In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27. Porto Alegre, 2000. Anais Porto Alegre: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. CD ROM. 521p.. 2000.

OLIVIER, F. & GOURC, J.P. **(Hydro-mechanics of MSW subject to leachate recirculation in a large-scale compression reactor cell.** Waste Management Journal, Vol. 27, n° 4, p. 44 - 58. 2007.

OUVRY, J.F. PAGE, B. **Settlement of Waste Packaged in Chaffs in a Domestic Waste Disposal.** International Workshop “Hydro-Physico-Mechanics of Landfills”. LIRIGM, Grenoble I University, France, 21-22 March 2005.

PADILLA R. S. **Aplicação de um Modelo Computacional Tridimensional para Estimativa de Balanço Hídrico em Aterros Sanitários.** Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Minas Gerais Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte-MG. 2007.

PAIVA. W. **Aplicação da Estatística Para Descrever um Comportamento de um Solo Expansivo.** Tese de Doutorado pela Universidade Federal de Pernambuco-UFPE Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil em Geociências. Recife PE. 2009.

PAUL, E.A., CLARK, F.E. **Soil Microbiology and biochemistry**. 1 ed. San Diego: Academic Press, p, 273. 1989.

PELCZAR, M.; CHAN, E.C.S.; KRIEG, N.R. **Microbiologia: Conceitos e aplicações**. 2. ed. v. I. Makron do Brasil, São Paulo. 1997.

PEREIRA, F. T. G. ; LEITE, H. E. A.; GARCEZ, L.R. ; ARAUJO, 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 Nordestino de Resíduos Sólidos. 2010.

PEREIRA, F. T. G. ; MELO, A. B. DE ; MEIRA, R. C. ; ARAUJO, E. P. ; FRANÇA, L. R. C. ; ARAUJO, M. V. ; MONTEIRO, V. E. D. . **Análise e Monitoramento dos Coliformes Totais e Termotolerantes de uma Célula Experimental de RSU**. In: SINRES- 2º SIMPÓSIO NORDESTINO DE RESÍDUOS SÓLIDOS. 2010.

POWRIE W. RICHARDS D.J. & BEAVEN R.P. **Compression of waste and implications for practice**. In Geotechnical Engineering of Landfills, eds. Dixon N. Murray EJ. & Jones D.R.V. Thos Telford, London, pp. 3-18. 1998.

Recycle. Trabalho de Informatica dos alunos Wilmar, Alex, Lucas Padua, Rodrigo Santos <http://recyclesa.blogspot.com/2010/11/criacao-de-tijolos-de-lixo.html> acesso em: 12/04/2011.

REDDY. K. R. **Geotechnical Aspects of Bioreactor Landfills** IGC 2006. Chennai, INDIA. 2006.

SANCHEZ, P. S. **Atualização em Técnicas para o Controle Microbiológico de Águas Minerais**. Universidade Mackenzie – Pós Graduação em Ciências Ambientais, SP.1999.

SANTOS, A.F.M.S. **Caracterização, Avaliação da Biodegradabilidade Aeróbia e Anaeróbia e Tratamento em Reator UASB do Chorume do Aterro da Muribeca**”,

Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife PE, pp. 1-168. 2003.

SEGATO, L. M. & SILVA, C. L. **Caracterização do Lixiviado do Aterro sanitário de Bauru**. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27. Porto Alegre, Anais Porto Alegre: Associação brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. CD ROM. 512p. 2000.

SHARMA, H.D., De, A. **Municipal solid waste landfills settlement: Postclosure perspectives**. J. Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE, june, 619–629. 2007.

SILVEIRA, L. R. MORAES, L. R.S. **Redefinindo o Conceito de Lixo**. 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES. Belo Horizonte/MG. 2007.

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.

SIMÕES, G. F., CAMPOS, T.M.P. **Modelos de previsão de recalques em aterros sanitários**. Em: XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, ABMS, v.3, pp.1679-1686.

SIMÕES, G. F., CATAPRETA, C.A.A., BATISTA, H. P., GALVÃO, T.C.B. **Concepção de um programa de monitoramento geotécnico para a central de tratamento de resíduos sólidos urbanos da BR 040 em Belo Horizonte – MG**. [CD ROOM]. Em: 6º Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Vitória: ABES, 2002.

SIMÕES, G. F., CATAPRETA, C.A.A., BATISTA, H. P., GALVÃO, T. C. B. **Monitoramento Geotécnico de Aterros Sanitários – A Experiência da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR 040 em Belo Horizonte**. [CD ROM]. Em: 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO'2003. Porto Alegre/RS: ABMS, 2003.

SOUTO, G.B.; POVINELLI, J. **Características do Lixiviado de Aterros Sanitários no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24. Anais. Belo Horizonte, 10 p. [CD-Rom]. Belo Horizonte, 2007

SOUZA, J. P. **Praia de Enseadinha em Paulista – PE**. Problemática dos Resíduos Sólidos Urbanos. Monografia do Programas de Pós-Graduação da Faculdade Frassinetti do Recife - FAFIRE, 2008.

SWATI, M.; KURIAN, J.; NAGENDRAN, R. **Bioreactor landfill lysimeter studies on indan urban refuse**. In: INTERNATIONAL WASTE MANDAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 20, Cagliari, Italy. Proceedings of the Sardinia. 2005.

TAM, N.F.Y. & TIQUIA, S.M. **Elimination of Phitotoxicity During Co-composting of Spent Pig-manure Sawdust Litter and Pig Sludge**. Bioresource Technology. 1994.

TCHOBANOGLIOUS, G. THEISEN, H & ELIASSEN, R. **Solid Wastes: Engineering and Management Issues**. McGraw-Hill Book Company, N.Y. 1977.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VIGIL, S. A. **Composicion y Características, Generacion, Movimento y Control de los Gases de Vertedoro**. Gestion Integral de Resíduos Sólidos, v. 1, capítulo 11.4, Mc Graw Hill. 1994.

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. 978p. 1993.

TÍQUIA, S.M.; N.F.Y & HODGKISS, I.J. **Effects of Composting on Phytotoxicity of Spent Pig-manure Sawdust Litter**. Hong Kong. 1996.

TORTORA, G.J, FUNKE, B.R. CASE, C.L. **“Microbiologia”**. Editora Artimed, 6° ed. Porto Alegre, RS Cap., 51, pp. 1-827. 2000.

TRABULSI, L. R.. **Microbiologia**. 4 Ed. São Paulo. 2005.

UBBINK, J.; SCHAR-ZAMMARETTI, P.; Curr. Opin. Colloid Interface Sci. 12, 263. 2007.

VALÉRIO FILHO M. Geotecnias Aplicadas no Monitoramento do Crescimento Urbano em Áreas de Risco à Erosão. Anais eletrônicos do Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis. 2004.

VAN MEERTEN, J. J., SELLMEIJER, J. B., & PEREBOOM, D. **Prediction of Landfill Settlement**. Paper presented at the Sardinia 95 - 5th International Landfill Symposium, Cagliari, Italy. 1995.

VAZOLLER, R. F. Estudos sobre isolamento, caracterização e crescimento de culturas puras de bactérias metanogênicas provenientes de biodigestores de lodo de esgoto. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Biomédicas-USP. São Paulo, 1989.

VIANA, J. S., SANTOS, N.T. **Prevenção e Combate a Incêndio**. Manual de Prevenção de Acidentes, Rio de Janeiro, Freitas Bastos S.A. 1976.

ZANONI, A. E. (1972). **Ground water pollution and sanitary landfills—a critical review**. Ground Water, 10,3–13, 1972.

WALL D.K. & ZEISS C., **Municipal Landfill Biodegradation and Settlement**. ASCE J. of Env. Eng., Vol. 121, Nº 3, pp. 214-223. 1995.

WALLS, J. S. **Protecting groundwater from landfill leachate**. Water Sewage Works, 122,68, 1975.

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

YOUCAI, Z., WANG, LUOCHUN W., HUA RENHUA, H., DIMIN, X., GUOWEI, G. **A comparison of refuse attenuation in laboratory and field scale lysimeters** . Waste Management, v. 22, p.29–35, 2002.

Anexos

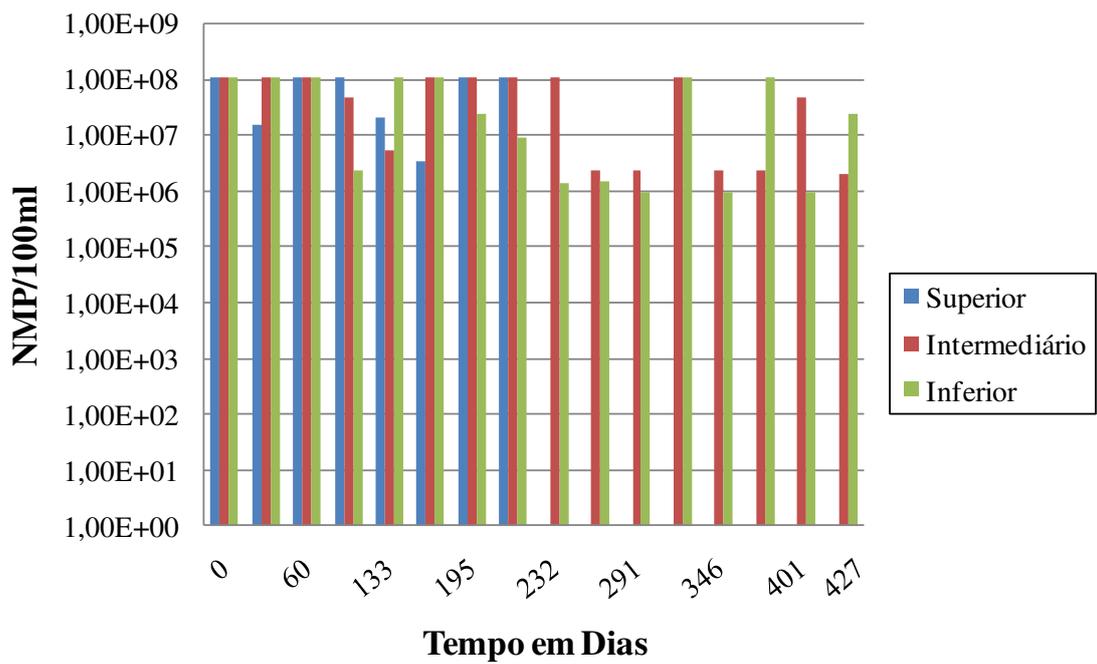


Figura 62: Coliformes Totais em diferentes profundidades e no tempo

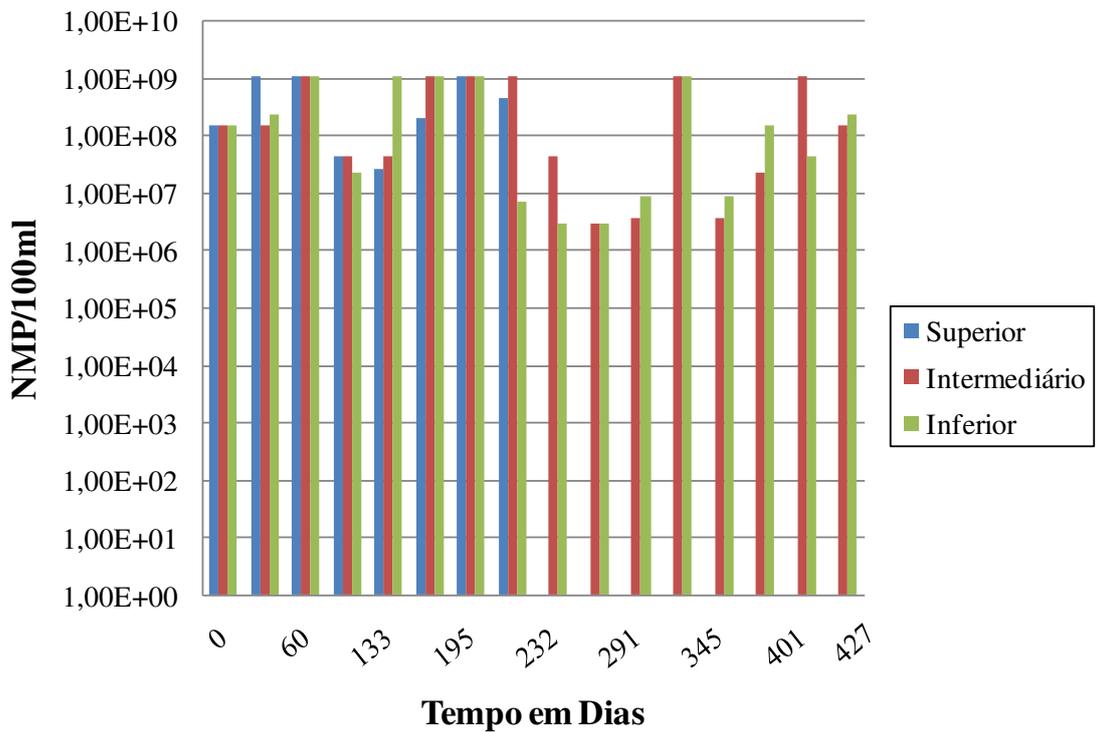


Figura 63: Coliformes Termotolerantes em diferentes profundidades e no tempo

Matriz de coerrelações

Parâmetros: Camada Superior

Quadro 14: Matriz de correlação dos parâmetros analisados na camada superior

Variável	Correlação																	
	Dias	Aerób.	Anaer.	pH	Teor de Um.	Sól. Voláteis	DBO	DQO	Fungos	Col. Term.	Clor.	Ác. Voláteis	Alcal.	Temp. I	Temp. Ambiente	Camada	Precip.	Evap.
Dias	1	-0,97	0,07	0,69	-0,82	-0,86	-0,86	-0,52	0,28	-0,09	-0,85	-0,8	-0,79	-0,89	-0,93	0,99	0,48	-0,7
Aeróbios	-0,97	1	-0,12	-0,76	0,85	0,87	0,89	0,52	-0,04	0,32	0,72	0,88	0,87	0,76	0,82	-0,97	-0,33	0,73
Anaeróbios	0,07	-0,12	1	0,54	0,39	0,32	0,33	0,44	-0,5	-0,56	0,29	-0,49	-0,48	-0,2	-0,17	-0,05	0,45	-0,33
pH	0,69	-0,76	0,54	1	-0,35	-0,36	-0,42	-0,48	-0,27	-0,63	-0,26	-0,97	-0,97	-0,62	-0,69	0,65	0,57	-0,95
Teor de Um.	-0,82	0,85	0,39	-0,35	1	0,99	1	0,57	-0,21	0,04	0,77	0,51	0,52	0,51	0,59	-0,9	0,06	0,39
Sól. Voláteis	-0,86	0,87	0,32	-0,36	0,99	1	0,99	0,49	-0,26	-0,01	0,83	0,53	0,53	0,59	0,65	-0,92	-0,01	0,37
DBO	-0,86	0,89	0,33	-0,42	1	0,99	1	0,57	-0,2	0,07	0,79	0,57	0,58	0,57	0,64	-0,93	-0,01	0,44
DQO	-0,52	0,52	0,44	-0,48	0,57	0,49	0,57	1	-0,33	-0,01	0,48	0,44	0,44	0,43	0,53	-0,59	-0,3	0,7
Fungos	0,28	-0,04	-0,5	-0,27	-0,21	-0,26	-0,2	-0,33	1	0,91	-0,7	0,24	0,28	-0,52	-0,46	0,26	0,44	0,03
Col. Term.	-0,09	0,32	-0,56	-0,63	0,04	-0,01	0,07	-0,01	0,91	1	-0,43	0,61	0,64	-0,17	-0,08	-0,1	0,16	0,43
Cloretos	-0,85	0,72	0,29	-0,26	0,77	0,83	0,79	0,48	-0,7	-0,43	1	0,39	0,36	0,85	0,84	-0,85	-0,43	0,36
Ác. Voláteis	-0,8	0,88	-0,49	-0,97	0,51	0,53	0,57	0,44	0,24	0,61	0,39	1	1	0,67	0,75	-0,77	-0,5	0,9
Alcalinidade	-0,79	0,87	-0,48	-0,97	0,52	0,53	0,58	0,44	0,28	0,64	0,36	1	1	0,63	0,72	-0,76	-0,45	0,89
Temp. I	-0,89	0,76	-0,2	-0,62	0,51	0,59	0,57	0,43	-0,52	-0,17	0,85	0,67	0,63	1	0,99	-0,82	-0,81	0,68
Temp. Ambiente	-0,93	0,82	-0,17	-0,69	0,59	0,65	0,64	0,53	-0,46	-0,08	0,84	0,75	0,72	0,99	1	-0,87	-0,77	0,76
Camada	0,99	-0,97	-0,05	0,65	-0,9	-0,92	-0,93	-0,59	0,26	-0,1	-0,85	-0,77	-0,76	-0,82	-0,87	1	0,36	-0,67
Precipitação	0,48	-0,33	0,45	0,57	0,06	-0,01	-0,01	-0,3	0,44	0,16	-0,43	-0,5	-0,45	-0,81	-0,77	0,36	1	-0,66
Evaporação	-0,7	0,73	-0,33	-0,95	0,39	0,37	0,44	0,7	0,03	0,43	0,36	0,9	0,89	0,68	0,76	-0,67	-0,66	1

Parâmetros: Camada Intermediária

Quadro 15: Matriz de correlação dos parâmetros analisados na camada Intermediária

Variável	Correlação																		
	Dias	Aerob	Anaer.	pH	Teor de Um.	Sól. Voláteis	DBO	DQO	Fungos	Col. Totais	Col. Term.	Clor.	Ác. Voláteis	Alcal.	Temp. I	Temp. Ambiente	Cam.	Precip.	Evap.
Dias	1	-0,69	0,34	0,82	0,56	-0,89	-0,93	-0,63	0,01	-0,27	-0,04	-0,32	-0,67	-0,04	-0,2	-0,03	0,7	0,44	-0,86
Aeróbios	-0,69	1	-0,32	-0,86	-0,5	0,8	0,48	0,23	-0,25	-0,22	-0,48	0,46	0,56	-0,06	0,62	0,47	-0,53	-0,35	0,55
Anaeróbios	0,34	-0,32	1	0,39	0,18	-0,42	-0,18	-0,11	0,44	0,3	-0,05	0,16	-0,26	0,51	-0,59	-0,51	0,53	0,87	-0,51
pH	0,82	-0,86	0,39	1	0,55	-0,85	-0,67	-0,48	0,17	0,02	0,09	-0,26	-0,76	-0,1	-0,3	-0,13	0,68	0,49	-0,8
Teor de Um.	0,56	-0,5	0,18	0,55	1	-0,52	-0,38	-0,08	0,04	0,31	0,21	-0,14	-0,27	0,5	-0,33	-0,32	0,6	0,05	-0,57
Sól. Voláteis	-0,89	0,8	-0,42	-0,85	-0,52	1	0,84	0,48	-0,15	0,03	-0,26	0,21	0,56	-0,09	0,3	0,1	-0,55	-0,51	0,66
DBO	-0,93	0,48	-0,18	-0,67	-0,38	0,84	1	0,73	0,15	0,48	0,15	0,19	0,55	0,2	-0,12	-0,27	-0,51	-0,36	0,71
DQO	-0,63	0,23	-0,11	-0,48	-0,08	0,48	0,73	1	0	0,82	0,39	0,41	0,21	0,34	-0,34	-0,39	-0,2	-0,14	0,58
Fungos	0,01	-0,25	0,44	0,17	0,04	-0,15	0,15	0	1	0,21	0,52	-0,42	0,2	0,47	-0,45	-0,34	-0,25	0,1	0,04
Col. Totais	-0,27	-0,22	0,3	0,02	0,31	0,03	0,48	0,82	0,21	1	0,5	0,35	-0,05	0,57	-0,64	-0,63	0,18	0,21	0,17
Col. Term.	-0,04	-0,48	-0,05	0,09	0,21	-0,26	0,15	0,39	0,52	0,5	1	-0,4	0,26	0,43	-0,55	-0,46	-0,3	-0,23	0,36
Cloretos	-0,32	0,46	0,16	-0,26	-0,14	0,21	0,19	0,41	-0,42	0,35	-0,4	1	-0,1	0,03	0,29	0,26	0,11	0,38	0,16
Ác. Voláteis	-0,67	0,56	-0,26	-0,76	-0,27	0,56	0,55	0,21	0,2	-0,05	0,26	-0,1	1	0,4	0,15	-0,02	-0,76	-0,57	0,74
Alcalinidade	-0,04	-0,06	0,51	-0,1	0,5	-0,09	0,2	0,34	0,47	0,57	0,43	0,03	0,4	1	-0,59	-0,63	0,09	0,14	0,02
Temp. I	-0,2	0,62	-0,59	-0,3	-0,33	0,3	-0,12	-0,34	-0,45	-0,64	-0,55	0,29	0,15	-0,59	1	0,96	-0,4	-0,38	0,23
Temp. Ambiente	-0,03	0,47	-0,51	-0,13	-0,32	0,1	-0,27	-0,39	-0,34	-0,63	-0,46	0,26	-0,02	-0,63	0,96	1	-0,36	-0,26	0,14
Camada	0,7	-0,53	0,53	0,68	0,6	-0,55	-0,51	-0,2	-0,25	0,18	-0,3	0,11	-0,76	0,09	-0,4	-0,36	1	0,65	-0,89
Precipitação	0,44	-0,35	0,87	0,49	0,05	-0,51	-0,36	-0,14	0,1	0,21	-0,23	0,38	-0,57	0,14	-0,38	-0,26	0,65	1	-0,57
Evaporação	-0,86	0,55	-0,51	-0,8	-0,57	0,66	0,71	0,58	0,04	0,17	0,36	0,16	0,74	0,02	0,23	0,14	-0,89	-0,57	1

Parâmetros: Camada Inferior

Quadro 16: Matriz de correlação dos parâmetros analisados na camada inferior

Variável	Correlação																		
	Dias	Aerob.	Anaer.	pH	Teor de Um.	Sól. Voláteis	DBO	DQO	Fungos	Col. Totais	Col. Term.	Cloretos	Ác. Voláteis	Alcal.	Temp. III	Temp. Ambiente	Cam.	Precip.	Evap.
Dias	1	-0,26	0,66	0,12	0,26	0,39	-0,49	0	-0,47	-0,47	-0,33	0,4	-0,6	0,31	0,11	-0,03	0,96	0,44	-0,86
Aeróbios	-0,26	1	0,15	0,36	0,18	0,19	0,67	0,61	-0,15	-0,08	-0,55	-0,26	0,36	-0,41	0,31	0,39	-0,11	0,2	0,05
Anaeróbios	0,66	0,15	1	-0,2	0,25	0,66	0,06	0,47	-0,27	-0,44	-0,3	0,42	-0,21	-0,08	0,57	0,54	0,71	0,41	-0,43
pH	0,12	0,36	-0,2	1	-0,31	0,34	-0,27	-0,04	-0,64	0,36	-0,16	0	-0,52	-0,01	-0,55	-0,48	0,04	0,3	-0,46
Teor de Um.	0,26	0,18	0,25	-0,31	1	-0,29	0,4	0,36	0,33	-0,61	-0,32	-0,18	0,46	-0,15	0,53	0,36	0,38	0,22	-0,22
Sól. Voláteis	0,39	0,19	0,66	0,34	-0,29	1	-0,05	0,29	-0,54	0,29	0,05	0,65	-0,49	-0,04	0,03	0,14	0,33	0,32	-0,31
DBO	-0,49	0,67	0,06	-0,27	0,4	-0,05	1	0,61	0,5	0,05	-0,22	-0,2	0,87	-0,2	0,53	0,59	-0,31	-0,28	0,57
DQO	0	0,61	0,47	-0,04	0,36	0,29	0,61	1	0,3	-0,1	-0,29	-0,18	0,4	-0,16	0,29	0,33	0,04	0,36	0,13
Fungos	-0,47	-0,15	-0,27	-0,64	0,33	-0,54	0,5	0,3	1	0,08	0,33	-0,49	0,75	-0,01	0,22	0,22	-0,44	-0,47	0,71
Col. Totais	-0,47	-0,08	-0,44	0,36	-0,61	0,29	0,05	-0,1	0,08	1	0,61	0,16	-0,08	0,13	-0,55	-0,36	-0,6	-0,4	0,46
Col. Term.	-0,33	-0,55	-0,3	-0,16	-0,32	0,05	-0,22	-0,29	0,33	0,61	1	0,02	-0,15	-0,25	-0,25	-0,13	-0,48	-0,31	0,36
Cloretos	0,4	-0,26	0,42	0	-0,18	0,65	-0,2	-0,18	-0,49	0,16	0,02	1	-0,36	0,43	-0,12	-0,14	0,34	0,21	-0,23
Ác. Voláteis	-0,6	0,36	-0,21	-0,52	0,46	-0,49	0,87	0,4	0,75	-0,08	-0,15	-0,36	1	-0,06	0,41	0,4	-0,44	-0,36	0,71
Alcalinidade	0,31	-0,41	-0,08	-0,01	-0,15	-0,04	-0,2	-0,16	-0,01	0,13	-0,25	0,43	-0,06	1	-0,41	-0,51	0,25	-0,15	-0,03
Temp. III	0,11	0,31	0,57	-0,55	0,53	0,03	0,53	0,29	0,22	-0,55	-0,25	-0,12	0,41	-0,41	1	0,97	0,33	-0,19	0,02
Temp. Ambiente	-0,03	0,39	0,54	-0,48	0,36	0,14	0,59	0,33	0,22	-0,36	-0,13	-0,14	0,4	-0,51	0,97	1	0,17	-0,26	0,14
Camada	0,96	-0,11	0,71	0,04	0,38	0,33	-0,31	0,04	-0,44	-0,6	-0,48	0,34	-0,44	0,25	0,33	0,17	1	0,35	-0,83
Precipitação	0,44	0,2	0,41	0,3	0,22	0,32	-0,28	0,36	-0,47	-0,4	-0,31	0,21	-0,36	-0,15	-0,19	-0,26	0,35	1	-0,57
Evaporação	-0,86	0,05	-0,43	-0,46	-0,22	-0,31	0,57	0,13	0,71	0,46	0,36	-0,23	0,71	-0,03	0,02	0,14	-0,83	-0,57	1