



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISES FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS NO
ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO ATERRO DA
MURIBECA**

AUTORA: VERUSCHKA ESCARIÃO DESSOLES MONTEIRO

ORIENTADOR: JOSÉ FERNANDO THOMÉ JUCÁ

CO-ORIENTADORAS: JANETE MAGALI DE ARAÚJO

MARIA DE LOS ANGELES PEREZ PALHA

RECIFE, DEZEMBRO DE 2003

**ANÁLISES FÍSICAS, QUÍMICAS E BIOLÓGICAS NO ESTUDO DO
COMPORTAMENTO DO ATERRO DA MURIBECA**

Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À
OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA CIVIL

Aprovada por:

Prof. José Fernando Thomé Jucá, D.Sc.

(Presidente)

Prof. Armando Borges de Castilhos Junior, D.Sc.

Prof.. João Alberto Ferreira, D.Sc.

Profª. Maria Alice Gomes de Andrade Lima, D.Sc.

Prof.. Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho, D.Sc.

Recife, PE – Brasil

Dezembro de 2003

M775a Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles.

Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca. / Veruschka Escarião Dessoles Monteiro. - Recife : O Autor, 2003.

xii , 232 folhas : il., fig., tab., gráf. e fotos.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2003.

Inclui bibliografia e anexos.

1. Resíduos sólidos urbanos. 2 . Geotecnia ambiental.
3. Aterros de RSU 4. Biodegradação. I. Título.

624 CDD (21.ed.)

UFPE

BCTG/2004-18

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Dessoles e Yara e aos meus irmãos, Petrov e Ivanoschka, que em todos os momentos, participaram e apoiaram a realização desse sonho que guardo comigo desde a infância.

A Marcio que participou ativamente da elaboração deste trabalho sendo o meu companheiro em todos os momentos, insentivando-me na busca do objetivo maior, o êxito de atingir a meta tão sonhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir-me o desenvolvimento deste trabalho sempre com entusiasmo e confiança, mesmo diante dos maiores obstáculos.

Aos meus pais e irmãos agradeço de coração por este convívio maravilhoso durante o qual, em todos os momentos, transmitiram mensagens de incentivo, apoio e coragem para elaboração deste trabalho. Agradeço, em especial, à minha irmã Ivanoschka pela colaboração na tradução do abstract e a meu pai pela dedicação na revisão ortográfica deste trabalho.

Ao orientador, Prof. José Fernando Thomé Jucá, que sempre me apoiou e me transmitiu segurança, incentivo e compreensão, desde a monitoria da disciplina Mecânica dos Solos 1, passando por pesquisa de aperfeiçoamento, mestrado e doutorado, durante esses 12 anos de orientação. Quero demonstrar o meu agradecimento com muito carinho e admiração.

Agradeço às Professoras e amigas Angeles, Alice e Magali pelas valiosas e sempre construtivas orientações e, sobretudo, pelo convívio maravilhoso.

A Marcio pela colaboração incansável no decorrer de todo este trabalho e pelo fascínio em aprender a biologia como uma ferramenta indispensável no entendimento dos resíduos sólidos.

Aos professores e amigos Amaro Henrique Pessoa Lins, Washington Moura de Amorim Jr., José Maria Justino da Silva e Bernard Genevois pela constante contribuição e transmissão dos seus conhecimentos, desde a minha formação profissional até o atual estágio da minha vida. Obrigada pelo apoio e confiança.

Aos meus queridos amigos, funcionários do Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco, “seu” Severino, João, Antônio, Chico, Everaldo, D. Laudence que tanto me ajudaram, cada um de uma forma especial. Quero demonstrar

o meu carinho e gratidão pela preciosa colaboração, maravilhosa convivência e amizade durante toda a minha formação até o cumprimento desta etapa.

A todos os amigos do Grupo de Resíduos Sólidos (GRS): Edu, Adriana, Antônio, Keila, Stela, Felipe, Andréa, Cecília, Raquel, Rodrigo, Elisângela Pará, Elisângela Paraíba, Perboyre, Beldson e Paulinho pelo convívio divertido e maravilhoso durante todos os momentos.

Aos amigos do Laboratório de Solos pelo tempo de convivência agradável e pela colaboração durante as diversas etapas da construção da minha formação.

Aos companheiros incansáveis do 6º andar: Marcio, Múcio, Ricardinho, Robson, Ivan, Valmir, Marília, Alberto, Henrique, Frank, Wiliam, Rafael, George, Gerson, Elisângela Pará, Elisângela Paraíba e Perboyre pela convivência maravilhosa, inclusive nos finais de semana, quando todos estiveram sempre dispostos a ajudar, a alegrar, a transmitir confiança e amizade em todos os momentos.

Um agradecimento especial a meu amigo Múcio pela enorme colaboração durante o decorrer deste trabalho e pelo excelente convívio e amizade.

À minha amiga Ana Ghislane pela amizade, pelo constante apoio e incentivo em todos os momentos.

A todos os funcionários que trabalham no Aterro da Muribeca pela incansável ajuda que recebi durante os meus trabalhos de campo e pela grande amizade e carinho que eles têm por mim.

Ao CNPq e EMLURB / ATEPE pelo suporte financeiro para desenvolvimento desta pesquisa.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para elaboração deste trabalho.

RESUMO

A disposição do lixo em aterros é bastante comum e é a técnica mais utilizada, devido a sua praticidade e baixo custo. Entretanto, os aterros sanitários não podem ser vistos como simples local de armazenamento de resíduos. Aterros são obras geotécnicas. Avaliar o seu comportamento quanto à sua eficiência na degradação, geração de líquidos e de gases tóxicos, torna-se necessário para entender e aperfeiçoar essa técnica de disposição e reaproveitamento de áreas. Entender o lixo depositado em aterros é estabelecer relações físicas, químicas e biológicas que acontecem durante o processo de degradação dos resíduos ao longo do tempo. Desta forma, é possível otimizar os processos degradativos e operacionais, além de estabelecer correlações entre o ambiente interno e externo e a massa de lixo.

Para a melhor compreensão do comportamento de resíduos sólidos urbanos depositados em aterros, faz-se necessário estabelecer inter-relações entre a geotecnia ambiental, a química, a microbiologia e a biotecnologia, bem como entre as condições climáticas locais. Os estudos destas interações são ferramentas para a análise do comportamento de aterros e seus fatores intervenientes. Estes estudos têm por objetivo a compreensão dos processos de degradação dos resíduos sólidos urbanos para avaliar as tecnologias de tratamento e as condições que permitem a melhor eficiência quanto à bioestabilização dos resíduos no menor espaço de tempo e obter-se um melhor aproveitamento da área de destinação final, menor impacto ao meio ambiente e à saúde pública. Para os estudos relacionados ao comportamento dos resíduos ao longo do tempo foram realizadas ensaios de campo e de laboratório e feitas análises como: geração de percolado e gases, parâmetros físico-químicos do chorume, análises microbiológicas, testes de fitotoxicidade, recalques superficiais e em profundidade medidos no aterro, além de outros parâmetros dos resíduos sólidos como umidade, sólidos voláteis, pH e temperatura.

Estes parâmetros foram confrontados entre si, a fim de se estabelecer interações físicas, químicas e biológicas para entender o comportamento do aterro durante o seu processo evolutivo e sugerir técnicas mais adequadas de disposição dos resíduos em aterros. Com os resultados obtidos pôde-se verificar que, de maneira geral, as condições climáticas da Região Metropolitana do Recife favorecem o processo biodegradativo com o tempo, havendo uma degradação dos resíduos relativamente rápida. Contudo, em muitos casos, houve uma desestabilização do meio interno, prejudicando o processo biodegradativo dos resíduos. A passagem de líquidos excessiva para o interior das Células, bem como a entrada extra de oxigênio através da camada de cobertura por caminhos preferencias; inversão do fluxo de gás, entre outros, são responsáveis pelo retardo no processo degradativo, impedindo principalmente a atividade das bactérias metanogênicas. Verificou-se também que, quando ocorreu grande número de microrganismos no interior da massa de lixo, havia grandes quantidades de matéria orgânica, bem como maiores concentrações de gás metano e maiores recalques. No decorrer do período de monitoramento ocorreu uma diminuição do número de microrganismos, acompanhado de menores valores de DBO, DQO e sólidos voláteis, assim como concentração de gás e menores magnitudes e velocidades de recalques. Um aspecto relevante que é destacado neste trabalho é a necessidade de adotar-se uma sistemática de monitoramento para o controle dos parâmetros e entendimento do comportamento do aterro. Além do mais essa prática é essencial para estabelecerem-se inter-relações que se consolidam durante o processo degradativo dos resíduos.

ABSTRACT

Disposal of waste in landfills is quite common and it is the more used technique, due to its practicability and low cost. However, the sanitary landfill cannot be seen as a simple place of waste storage. Landfills are geotechnics deed and evaluate its behavior according to its efficiency in the degradation, liquids and toxicant gases generation become necessary to understand and to improve that disposition technique and take advantage again of the used areas. To understand the waste deposited in landfills is to establish physical, chemical and biological relations, that happen during the degradation process of waste along the time. Thus, it is possible to optimize the degradation and operational processes, also establishing correlations between the internal and external atmosphere to the waste mass.

In order to have a better understanding of the behavior of urban solid waste deposited in landfills, it becomes necessary to establish interrelations among the environmental geotechnics, chemistry, microbiology and biotechnology, as well as the local climatic conditions. The studies of these interactions are tools to the analysis of landfills behavior and its intervening factors. These studies have as objective the understanding of the urban solid waste degradation processes, evaluating the treatment technologies and the conditions that allow the best efficiency according to the bioestabilization of the waste in the smallest length of time, being obtained a better use of the area of final destination, smaller impact to the environment and the public health. For the studies related to the behavior of the waste along the time laboratory and field rehearsals were accomplished and analyses such as: percolate generation and gases; physical-chemical parameters of the leachate; microbiological analysis; fitotoxicity tests; superficial and in depth settlement measured in the landfill were done, besides other parameters of the solid waste as moisture, volatile solids, pH and temperature.

These parameters were confronted to each other, in order to establish physical, chemical and biological interactions to understand the behavior of the landfill during its evolutionary process and to suggest more appropriate techniques of disposition of the waste in landfills. With the obtained results it could be verified that, in a general way, the climatic conditions of the Metropolitan Area of Recife favor the biodegradation process as time runs, with the waste having a relatively fast degradation. However, in many cases, there was a disestablishment of the internal middle, harming the biodegradation process of the waste.

The excessive passage of liquids through the interior of the Cells, as well as, the extra entrance of oxygen, through the covering layer by preferential ways; the inversion of the flow of gas; among others, are responsible for the retard in the degradation process, inhibiting especially the activity of the metanogenic bacterias. It was also verified, that when a great number of microorganisms inside the garbage mass was found, there were great amounts of organic matter, as well as, larger concentrations of gas methane and larger settlement. As the monitoring period ran there was a decrease in the number of microorganisms, accompanied of smaller values of BOD, COD and volatile solids, as well as concentration of gas and smaller magnitudes and speeds of settlement. An important aspect that is outstanding in this research it is the need to adopt a monitoring systematic for the control of the parameters and understanding of the behavior of the landfill. Besides, this practice is essential to settlement interrelations that are consolidate during the degradation process of the solid waste.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| <i>1.1. Aspectos Gerais dos Resíduos Sólidos Urbanos</i> | <i>1</i> |
| <i>1.2. Dinâmica de Aterros</i> | <i>3</i> |
| <i>1.3. Objetivos da pesquisa</i> | <i>3</i> |
| <i>1.4. Estrutura da Tese</i> | <i>4</i> |
| CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| <i>2.1. Aspectos Gerais</i> | <i>6</i> |
| <i>2.2. Biodegradação dos Resíduos Sólidos</i> | <i>8</i> |
| <i>2.2.1. Microbiologia</i> | <i>13</i> |
| <i>2.2.1.1. Curva de Crescimento Bacteriano</i> | <i>14</i> |
| <i>2.2.1.2. Necessidades Nutricionais para o Crescimento Microbiano</i> | <i>16</i> |
| <i>2.2.1.2.1. Fontes de Carbono e Energia</i> | <i>16</i> |
| <i>2.2.1.2.2. Necessidades Nutricionais</i> | <i>17</i> |
| <i>2.2.1.2.3. Requisitos Ambientais</i> | <i>17</i> |
| <i>2.2.1.3. Microrganismos Presentes em Resíduos Sólidos Urbanos</i> | <i>18</i> |
| <i>2.2.1.3.1. Grupo Coliforme</i> | <i>19</i> |
| <i>2.2.1.3.1.1. Coliformes Totais</i> | <i>20</i> |
| <i>2.2.1.3.1.2. Coliformes Termotolerantes</i> | <i>20</i> |
| <i>2.2.1.3.2. Streptococcus faecalis</i> | <i>20</i> |
| <i>2.2.1.3.3. Staphylococcus aureus</i> | <i>21</i> |
| <i>2.2.1.3.4. Clostridium perfringens</i> | <i>21</i> |
| <i>2.2.1.3.5. Pseudomonas aeruginosa</i> | <i>21</i> |
| <i>2.2.2. Fatores que Interferem na Evolução dos Processos Biodegradativos</i> | <i>23</i> |
| <i>2.2.2.1. Potencial hidrogeniônico</i> | <i>23</i> |
| <i>2.2.2.2. Temperatura</i> | <i>23</i> |
| <i>2.2.2.3. Alcalinidade</i> | <i>24</i> |
| <i>2.2.2.4. Teor de Umidade</i> | <i>25</i> |
| <i>2.2.2.5. Teor de Sólidos Voláteis</i> | <i>26</i> |
| <i>2.2.2.6. Teor de Metais Pesados</i> | <i>27</i> |
| <i>2.2.2.6.1. Origem dos metais pesados no lixo urbano</i> | <i>29</i> |
| <i>2.2.2.6.2. Bioacumulação e Biotransformação de metais</i> | <i>29</i> |
| <i>2.2.3. Fitotoxicidade e Metais</i> | <i>31</i> |
| <i>2.2.4. Relação Carbono:Nitrogênio</i> | <i>31</i> |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.5. DQO | 32 |
| 2.2.6. Outros Parâmetros Físico-químicos | 32 |
| 2.3. Geração de Lixiviado em Aterros de RSU | 34 |
| 2.4. Geração de Biogás em Aterros de RSU | 40 |
| 2.4.1. Duração das Fases | 45 |
| 2.4.2. Fatores que Influenciam na Produção do Biogás | 45 |
| 2.5. Aspectos Geotécnicos em Aterros Sanitários | 46 |
| 2.5.1. Escolha do local para disposição dos resíduos e parâmetros geotécnicos | 46 |
| 2.5.2. Recalques | 47 |
| 2.5.2.1. Tipos e Mecanismos de Recalques | 49 |
| 2.5.2.2. Influência da Biodegradação na Magnitude e Velocidade dos Recalques | 51 |
| 2.5.3. Ensaio de Penetração Dinâmica (SPT) | 52 |
| 2.5.4. Compactação dos Resíduos Sólidos Urbanos | 53 |
| CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA | 55 |
| 3.1. Campo Experimental para o Estudo: O Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca | 55 |
| 3.1.1. Condições Climáticas | 58 |
| 3.2. Instrumentação das Células | 59 |
| 3.2.1. Ensaio SPT | 65 |
| 3.2.2. Controle dos Recalques do Aterro | 65 |
| 3.2.3. Temperatura | 67 |
| 3.3. Programa de Ensaio | 68 |
| 3.3.1. Ensaio no Chorume das Células | 68 |
| 3.3.2. Controle da Vazão do Percolado | 70 |
| 3.4. Descrição das Metodologias Utilizadas por Grupos de Ensaio | 71 |
| 3.4.1. Ensaio Microbiológicos (Chorume) | 71 |
| 3.4.2. Ensaio nas Amostras Sólidas (Lixo) | 73 |
| 3.4.2.1. Ensaio Microbiológico (Lixo) | 75 |
| 3.4.2.2. Fitotoxicidade (Chorume e Lixo) | 75 |
| 3.4.2.3. Metais (Chorume e Lixo) | 78 |
| 3.4.2.4. Ensaio de Umidade e Sólidos Voláteis | 79 |
| 3.4.2.4.1. Ensaio de Umidade | 79 |
| 3.4.2.4.2. Ensaio de Sólidos Voláteis | 80 |
| 3.4.3. Controle dos Gases das Células | 80 |
| CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO | 82 |

| | |
|---|------------|
| <i>4.1. Condições Climáticas</i> | 82 |
| <i>4.2. Controle da Vazão de Percolado</i> | 85 |
| <i>4.3. Chorume e Resíduos Sólidos das Células (Análise da Evolução com o Tempo e Profundidade)</i> | 88 |
| <i>4.3.1. Análises Físico-químicas</i> | 88 |
| <i>4.3.1.1. Parâmetros Físico-químicos (Chorume)</i> | 88 |
| <i>4.3.1.2. Metais (Chorume e Resíduos Sólidos)</i> | 111 |
| <i>4.3.2. Microbiologia (Chorume e Resíduos Sólidos)</i> | 133 |
| <i>4.3.3. Fitotoxicidade e Metais (Chorume e Lixo: Análise com a Profundidade)</i> | 149 |
| <i>4.3.4. Umidade e Sólidos Voláteis (Resíduos Sólidos: Análise da Evolução com o Tempo e Profundidade)</i> | 157 |
| <i>4.3.5. Recalque (Análise da Evolução com o Tempo e Profundidade: Magnitude e Velocidade)</i> | 164 |
| <i>4.3.5.1. Recalques versus Condições Climáticas versus Biodegradação</i> | 164 |
| <i>4.3.6. Temperatura (Evolução com o Tempo e Profundidade)</i> | 180 |
| <i>4.3.7. Ensaio SPT (Resistência x Biodegradação)</i> | 186 |
| <i>4.4. Gases das Células</i> | 191 |
| <i>4.5. Interações Físicas, Químicas e Biológicas na Análise do Comportamento do Aterro da Muribeca</i> | 195 |
| <i>4.6. Alternativas Tecnológicas mais Adequadas de Tratamento de Resíduos e Operação do Aterro da Muribeca</i> | 202 |
| CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS | 205 |
| <i>5.1. Principais Conclusões</i> | 205 |
| <i>5.2. Sugestões para Futuras Pesquisas</i> | 208 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 210 |
| ANEXOS | 225 |

Lista de Figuras

| | |
|---|-----|
| Figura 1.1. Interações físicas, químicas e biológicas em aterros de RSU | 2 |
| Figura 2.1: Princípios da decomposição em aterros sanitários | 10 |
| Figura 2.2: Fase Aeróbia do processo | 11 |
| Figura 2.3: Digestão Anaeróbia | 11 |
| Figura 2.4: Grupos de Bactérias (Decomposição Anaeróbia) | 12 |
| Figura 2.5: Esquema resumido das etapas metabólicas desenvolvidas durante o processo de digestão anaeróbia num aterro de RSU | 13 |
| Figura 2.6. Curva de crescimento bacteriano mostrando as quatro fases (Tortora, 2000). | 15 |
| Figura 2.7. Representação esquemática das possíveis interações entre metais e as células bacterianas. Fonte: Garcia Jr (1997). | 30 |
| Figura 2.8. Padrão de produção de biogás. I) Fase Aeróbia, II) Fase anóxica de transição, III) Fase ácida, IV) Fase metanogênica, V) Fase de maturação. (Tchobanoglous et al., 1994). | 41 |
| Figura 3.1. Fluxograma da Metodologia Desenvolvida | 55 |
| Figura 3.2. Vista das Células do Aterro da Muribeca (Projeto Inicial) | 56 |
| Figura 3.3. Perfil de Enchimento e Idade do Lixo – Célula 1 | 57 |
| Figura 3.4. Perfil de Enchimento e Idade do Lixo – Célula 4 | 58 |
| Figura 3.5. Desenho Esquemático do Piezômetro Instalado no Aterro da Muribeca | 60 |
| Figura 3.6. Planta da Célula 1 do Aterro da Muribeca | 62 |
| Figura 3.7. Planta da Célula 4 do Aterro da Muribeca | 63 |
| Figura 3.8. Perfil da Célula 1 do Aterro da Muribeca | 64 |
| Figura 3.9. Perfil da Célula 4 do Aterro da Muribeca | 64 |
| Figura 3.10. Ensaio NMP (Tubos Múltiplos) e Tabela de Conversão de Resultados | 73 |
| Figura 3.11. Esquema dos ensaios de campo realizados no Aterro da Muribeca (Maciel & Jucá, 2000) | 80 |
| Figura 4.1. Comportamento hídrico no Aterro da Muribeca | 85 |
| Figura 4.2. Vazão de chorume no Aterro da Muribeca (Células 1,2,3,4,5,6,7 e 8) | 85 |
| Figura 4.3. Evolução do pH com o tempo (Célula 1) | 89 |
| Figura 4.4. Evolução do pH com o tempo (Célula 4) | 90 |
| Figura 4.5. Perfil de variação do pH ao longo da profundidade da Célula 4 | 91 |
| Figura 4.6. Evolução da alcalinidade ao longo do tempo (Célula 1) | 92 |
| Figura 4.7. Evolução das concentrações de sódio na Célula 1 | 94 |
| Figura 4.8. Evolução da alcalinidade com o tempo (Célula 4) | 94 |
| Figura 4.9. Perfil da alcalinidade ao longo da profundidade (Célula 4) | 95 |
| Figura 4.10. Evolução das concentrações de cloreto ao longo do tempo (Célula 1) | 96 |
| Figura 4.11. Evolução das concentrações de cloretos na Célula 4 | 97 |
| Figura 4.12. Perfil da concentração de cloretos ao longo da profundidade (Célula 4) | 97 |
| Figura 4.13. Evolução da DQO com o tempo (Célula 1) | 99 |
| Figura 4.14. Evolução da DQO com o tempo na profundidade 10m (Célula 4) | 100 |
| Figura 4.15. Perfil de DQO com a profundidade (Célula 4) | 101 |
| Figura 4.16. Evolução da DBO com o tempo (Célula 1) | 103 |
| Figura 4.17. Evolução da DBO com o tempo (Célula 4) | 104 |
| Figura 4.19. Evolução do teor de sólidos voláteis do chorume (Célula 1) | 109 |
| Figura 4.20. Evolução do teor de sólidos voláteis do chorume com o tempo (Célula 4) | 110 |
| Figura 4.21. Teor de sólidos voláteis do chorume com a profundidade (Célula 4) | 110 |
| Figura 4.22. Concentração de sódio com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 115 |
| Figura 4.23. Concentração de potássio com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 116 |
| Figura 4.24. Concentração de cálcio com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 117 |
| Figura 4.25. Concentração de magnésio com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 117 |
| Figura 4.26. Concentração de alumínio com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 118 |
| Figura 4.27. Concentração de fósforo com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 118 |
| Figura 4.28. Concentração de manganês com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 120 |
| Figura 4.29. Concentração de ferro com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 121 |
| Figura 4.30. Concentração de zinco com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 122 |
| Figura 4.31. Concentração de níquel com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 122 |
| Figura 4.32. Concentração de chumbo com o tempo (Célula 1 – Pz9) | 123 |
| Figura 4.33. Concentração de manganês com o tempo (Célula 4) | 127 |
| Figura 4.34. Concentração de ferro com o tempo (Célula 4) | 127 |
| Figura 4.35. Concentração de zinco com o tempo (Célula 4) | 128 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.36. Concentração de chumbo com o tempo (Célula 4) | 129 |
| Figura 4.37. Concentração de cádmio com o tempo (Célula 4) | 129 |
| Figura 4.38. Concentração de cobre com o tempo (Célula 4) | 130 |
| Figura 4.39. Anaeróbios totais com o tempo - Célula 1 | 134 |
| Figura 4.40. Aeróbios totais com o tempo - Célula 1 | 135 |
| Figura 4.41. Coliformes Totais e Fecais – Célula 1 | 137 |
| Figura 4.42. <i>Staphylococcus aureus</i> – Célula 1 | 138 |
| Figura 4.43. <i>Clostridium perfringens</i> – Célula 1 | 138 |
| Figura 4.44. <i>Streptococcus faecalis</i> – Célula 1 | 139 |
| Figura 4.45. <i>Pseudomonas aeruginosa</i> – Célula 1 | 139 |
| Figura 4.46. Anaeróbios totais com o tempo - Célula 4 | 141 |
| Figura 4.47. Aeróbios totais com o tempo - Célula 4 | 141 |
| Figura 4.48. Anaeróbios totais com a profundidade - Célula 4 - SP1B | 144 |
| Figura 4.49. Aeróbios totais com a profundidade - Célula 4 - SP1B | 144 |
| Figura 4.50. Coliformes totais e fecais com a profundidade - Célula 4 - SP1B | 145 |
| Figura 4.51. <i>Clostridium perfringens</i> com a profundidade - Célula 4 - SP1B | 146 |
| Figura 4.52. <i>Pseudomonas aeruginosa</i> com a profundidade - Célula 4 - SP1B | 146 |
| Figura 4.53. Germinação de sementes e comprimento da raiz de repolho e tomate (Célula 1) | 150 |
| Figura 4.54. Germinação de sementes e comprimento da raiz de repolho (Célula 4 – SP1B) | 153 |
| Figura 4.55. Variação dos teores de umidade ao longo do tempo e profundidade (Célula 1) | 158 |
| Figura 4.56. Variação dos teores de umidade ao longo do tempo e profundidade (Célula 4) | 159 |
| Figura 4.57. Variação dos teores de sólidos voláteis ao longo do tempo e profundidade (Célula 1) | 160 |
| Figura 4.58. Variação dos teores de sólidos voláteis ao longo do tempo e profundidade (Célula 4) | 161 |
| Figura 4.59. Recalques superficiais com o tempo (Célula 1) | 165 |
| Figura 4.60. Curvas de iso-recalques e localização das placas de recalques (Célula 4) | 167 |
| Figura 4.61. Evolução dos recalques superficiais com o tempo (Célula 4) | 168 |
| Figura 4.62. Evolução dos recalques em profundidade com o tempo (Célula 4) | 168 |
| Figura 4.63. Velocidades dos recalques em profundidade com o tempo (Célula 4) | 169 |
| Figura 4.64. Velocidades dos recalques em profundidade com o tempo (Célula 4) | 169 |
| Figura 4.65. Deformação específica ao longo do tempo (Placas) | 170 |
| Figura 4.66. Deformação específica de cada camada ao longo do tempo (Aranhas) | 170 |
| Figura 4.67. Desenho esquemático da Célula 4 mostrando em detalhes as camadas | 172 |
| Figura 4.68. Recalques superficiais ao longo do tempo (Célula 4) | 174 |
| Figura 4.69. Recalques profundos ao longo do tempo (Célula 4) | 175 |
| Figura 4.70. Recalques versus microbiologia com o tempo (Célula 4) | 180 |
| Figura 4.71. Medições de temperatura na Célula 1 | 181 |
| Figura 4.72. Medições de temperatura na Célula 4 | 182 |
| Figura 4.73. Ensaio SPT (Célula 1) | 187 |
| Figura 4.75. Concentrações de gases nos pontos de inspeção (Célula 1) | 192 |
| Figura 4.76. Fluxo de gás na cobertura (Fonte: Jucá 2003) | 194 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|-----|
| <i>Tabela 2.1. Espécies de bactérias e protozoários presentes em sistemas aeróbios</i> | 18 |
| <i>Tabela 2.2. Espécies de bactérias anaeróbias presentes em sistemas anaeróbios</i> | 19 |
| <i>Tabela 2.3. Concentração de metais pesados em chorume (mg/l) de aterros em diversos países</i> | 28 |
| <i>Tabela 2.4. Efeitos dos metais pesados na digestão anaeróbia</i> | 28 |
| <i>Tabela 2.5. Composição média do chorume produzido em aterros recentes e antigos</i> | 33 |
| <i>Tabela 2.6. Composição típica de chorumes de aterros sanitários</i> | 33 |
| <i>Tabela 2.7. Parâmetros físico-químicos de chorume de aterros de RSU de acordo com sua idade</i> | 34 |
| <i>Tabela 2.8. Valores encontrados na literatura para indicadores orgânicos usados para definir a decomposição de resíduos</i> | 34 |
| <i>Tabela 2.9. Composição típica do biogás</i> | 40 |
| <i>Tabela 3.1. Monitoramento das condições climáticas no Aterro da Muribeca</i> | 59 |
| <i>Tabela 3.2. Instrumentação das Células</i> | 61 |
| <i>Tabela 3.3. Parâmetros físico-químicos e microbiológicos de líquidos</i> | 69 |
| <i>Tabela 3.4. Profundidade das amostras de chorume coletadas nas Células 1 e 4</i> | 70 |
| <i>Tabela 3.5. Parâmetros dos resíduos sólidos monitorados</i> | 74 |
| <i>Tabela 3.6. Ensaio de Fitotoxicidade: Líquidos e Resíduos Sólidos</i> | 75 |
| <i>Tabela 3.7. Amostras coletadas para os ensaios de Fitotoxicidade</i> | 76 |
| <i>Tabela 4.1. Relação DBO/DQO com o tempo (Pz9 - Célula 1)</i> | 107 |
| <i>Tabela 4.2. Relação DBO/DQO com o tempo (Pz5 - Célula 1)</i> | 107 |
| <i>Tabela 4.3. Relação DBO/DQO com o tempo (Pz6 - Célula 1)</i> | 107 |
| <i>Tabela 4.4. Relação DBO/DQO com o tempo (Célula 4)</i> | 108 |
| <i>Tabela 4.5. Relação DBO/DQO com a profundidade (Célula 4)</i> | 108 |
| <i>Tabela 4.6. Concentrações de metais ao longo da profundidade (Célula 1 - chorume)</i> | 124 |
| <i>Tabela 4.7. Concentrações de metais ao longo da profundidade (Célula 4 - Chorume)</i> | 131 |
| <i>Tabela 4.8. Concentrações de metais ao longo da profundidade (Célula 4 – Resíduos Sólidos)</i> | 131 |
| <i>Tabela 4.9. Análise por elemento (chorume e resíduos sólidos – Furo SP1B)</i> | 132 |
| <i>Tabela 4.10. Faixa de temperatura para crescimento de bactérias</i> | 183 |