



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

**UMA ANÁLISE DE RECALQUES ASSOCIADA A
BIODEGRADAÇÃO NO ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS
DA MURIBECA**

AUTOR: MARCIO CAMARGO DE MELO

ORIENTADOR: JOSÉ FERNANDO THOMÉ JUCÁ

CO-ORIENTADORA: JANETE MAGALI DE ARAÚJO

RECIFE, JUNHO DE 2003

**UMA ANÁLISE DE RECALQUES ASSOCIADA A BIODEGRADAÇÃO NO
ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA MURIBECA**

Marcio Camargo de Melo

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

Aprovada por:

Prof.: José Fernando Thomé Jucá, D.Sc.
(Presidente)

Profa.: Janete Magali de Araújo, D.Sc.

Prof.: Tácio Mauro Pereira de Campos, Ph.D.

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

Recife, PE – Brasil

Junho de 2003

Melo, Marcio Camargo de

Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca. / Marcio Camargo de Melo. - Recife : O Autor, 2003.

xii 127 folhas : il., fig., tab., graf., fotos..

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil , 2003.

Inclui bibliografia e anexos.

1. Resíduos sólidos urbanos –Muribeca (PE). 2 . Geotecnia ambiental – aterros . 3. Recalque - Biodegradação .
4. Microbiologia - RSU. I. Título.

624 CDD(21.ed.)

UFPE/ CTG 2003

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha grande companheira Veruschka, pessoa maravilhosa que não mediu esforços no sentido de colaborar com este trabalho. Sem dúvida, uma pessoa alegre e cordial sendo amiga nos momentos bons e, principalmente, nos momentos críticos, dando-me entusiasmo e ânimo para prosseguir. Por tudo isso será sempre guardada na minha memória e coração. Dedico também este trabalho ao meu pai e à minha mãe pelo grande exemplo de vida que sempre me passaram. Pelo apoio, principalmente incentivando a buscar o conhecimento, não medindo esforços para que eu estivesse hoje defendendo este trabalho que, sem dúvida nenhuma, é deles também.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Jeová Deus por permitir o desenvolvimento desse trabalho sempre com entusiasmo e confiança, mesmo nos maiores obstáculos.

Ao meu pai, Manoel 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, pelo apoio financeiro e pela amizade e cumplicidade que sempre tivemos.

Ao meu orientador Prof. Fernando Jucá que confiou num biólogo fazer uma dissertação no campo da engenharia civil e no desafio lançado numa área geotécnica incomum para biólogos, pois em momento algum descreditou do meu potencial, além das sugestões, sempre oportunas e valiosas, que me repassou.

À minha co-orientadora Janete Magali pela orientação conferida, pela disposição, profissionalismo característico, bem como pelas sugestões e críticas sempre construtivas.

A Veruschka pela colaboração incansável no decorrer de todo o trabalho e pela apresentação desta área tão fascinante, dos resíduos sólidos e geotecnia, antes não conhecida.

Aos professores do curso de mestrado pelo esforço empreendido e, especialmente, ao Professor Félix pela colaboração extra na disciplina de matemática.

Às professoras e amigas Alice e Ángeles pela confiança depositada em mim e pelas inúmeras colaborações durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Aldo Dillon, do Instituto de Biotecnologia da Universidade de Caxias do Sul, meu primeiro orientador na área de pesquisa, que me incentivou a arte de pesquisar e a carreira acadêmica que tanto me encanta.

Também não posso deixar esquecer o grande amigo Rafael Rocha, que foi companheiro de festas e de estudos e pela contribuição inicial no manuseio e técnicas de laboratório nos tempos de graduação.

Quero também deixar meus agradecimentos a Edevaldo, colega do curso de graduação da Universidade de Caxias do Sul, que por muitas vezes foi um grande estimulador incentivando-me a prosseguir no caminho acadêmico.

Ao pesquisador John McDougall pelas sugestões sempre oportunas e estimável colaboração, como profissional que conseguiu juntar os seus conhecimentos da engenharia geotécnica aliado ao fascinante mundo da microbiologia.

Ao Eng. Antônio Brito pelo profissionalismo e pela dedicação com que executou o apoio técnico no decorrer deste trabalho.

Aos colegas do GRS: Vera, Andréa, Rodrigo, Paulo, Eduardo, Cecília, Catarina, Felipe, Perboyre, Rosângela, Keila, Stela, Odete, Adriana e Rosemberg que sempre tiveram consideração e participaram de um modo ou de outro nos resultados obtidos.

Aos funcionários do Laboratório de Solos: Severino, Laudénice, João Teles, Chico e Joaquim pela convivência agradável, amizade e pela ajuda conferida.

A Márcio, Cíntia e Artur do laboratório de Antibióticos pelo apoio técnico, pela amizade e sobretudo pelo companheirismo e profissionalismo.

Aos amigos Iriton, Luciano, Nilson e Ana Ghislane pelas sugestões e pelos finais de semanas que muitas vezes saímos para arejarmos os pensamentos.

Aos meus companheiros incansáveis do 6º andar: Múcio, Noêmia, Ricardo, Frank, Henrique, Valmir e Veruschka pela companhia em todos os momentos, inclusive fins de semana e feriados.

A João Barbosa pelos finais de semanas que trabalhamos no laboratório de solos e pela amizade e confiança.

A Múcio e Ricardo da área de transportes pelos muitos esclarecimentos e ajudas no uso de ferramentas computacionais no decorrer de todo este trabalho.

A Felipe, Samuel e Érico que, mesmo atarefados, dispenderam tempo para ajudar-me na compreensão e uso de modelos computacionais.

Aos colegas de turma Patriota, Jefferson Wanderley e Roberto, de Estruturas, pelo fantástico apoio que me deram na disciplina matemática, sobretudo pelo incentivo e amizade.

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

A Rizonildo pelo apoio e colaboração através de consultas nos seus livros e pelo conhecimento transmitido.

A Alberto pelas soluções rápidas e eficientes quando surgiam problemas nos computadores e pela colaboração sempre espontânea.

A Vânia pelas brincadeiras bem humoradas sempre fazendo os momentos ficarem mais alegres, além de tornar os ambientes mais agradáveis e limpos.

A todo o pessoal do Aterro da Muribeca pelo apoio na realização dos ensaios de campo desenvolvidos durante este trabalho.

Ao convênio EMLURB/ATEPE pelo apoio financeiro que, sem dúvida, foi determinante para o desenvolvimento da minha dissertação de mestrado.

Ao banco do Estado do Rio Grande do Sul (Banrisul), especialmente à funcionária Sheila pela confiança depositada.

Por último, quero agradecer as correções ortográficas que o Sr Dessoles fez neste trabalho, que foram enriquecedoras contribuições para o melhor entendimento da dissertação, compreensão e aprendizado da língua portuguesa.

RESUMO

Os resíduos sólidos depositados em aterros têm diversas origens e são estruturalmente diferentes, quanto à sua composição química e física. Aliado a esta diferença estrutural tem-se fatores ambientais como temperatura, umidade, além de parâmetros internos à célula de lixo que influem na biodegradação dos resíduos.

Todos estes fatores direcionam a magnitude e velocidade dos recalques, já que a maior parcela dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos é função da degradação biológica. Além dos recalques proporcionados pela degradação biológica da massa de lixo, tem-se os recalques que são função dos processos físicos e químicos. Os recalques que ocorrem no lixo podem ser divididos em imediatos, primários e secundários.

Em aterros de resíduos sólidos urbanos o recalque secundário, por ser mais longo, é, sem dúvida, o mais importante. A compressão secundária ocorre exclusivamente devido à biodegradação. Daí a importância de estudar os recalques correlacionando-os à biodegradação. O recalque secundário se prolonga com o tempo e está relacionado com o decaimento biológico e o progressivo acomodamento do esqueleto sólido.

O objetivo neste trabalho foi estabelecer uma estreita correlação entre a microbiologia e a geotecnia ambiental, na tentativa de melhor compreender o fenômeno dos recalques em Aterros de Resíduos Sólidos.

Os estudos abordados neste trabalho referem-se à compreensão do comportamento dos recalques secundários ocorridos na Célula 4 do Aterro da Muribeca correlacionando-os a aspectos mecânicos, biodegradativos e climáticos. Com os resultados obtidos pôde-se verificar que na Célula 4 do Aterro da Muribeca tem-se recalques acelerados, pois as condições climáticas são favoráveis ao processo degradativo da matéria orgânica. Além disso, os recalques ocorreram em três etapas de comportamentos distintos, tanto nos recalques superficiais e, mais visivelmente, nos medidos em profundidade. Estas três etapas do comportamento dos recalques foi explicado através de relações diretas entre aspectos mecânicos, biodegradativos e climáticos.

A comparação dos recalques medidos e os previstos em um modelo matemático tem um bom ajuste de curvas, tanto para os recalques medidos em profundidade como os superficiais. Além disso, fez-se uma previsão dos recalques teóricos para um período de 5 anos após o período de medição.

ABSTRACT

The solid waste disposed in landfills have various origins and are structurally different in their physical and chemical composition. Together with structural differences are environmental factors like temperature, moisture and waste cell internal parameters that influence waste biodegradation.

All these factors guide the settlement velocity and magnitude, since that the main part of the settlements in solid waste landfills is a function of biological degradation. In addition to the settlements caused by biological degradation there are settlements that are function of physical and chemical processes. Settlements in waste can be divided into immediate, primary and secondary.

In urban solid waste the secondary settlement is indeed the most important because it is longer. Secondary compression occurs exclusively due biodegradation, this explains the importance in studying settlements correlated with biodegradation. Secondary settlement lengthens with time and it is related with biological decay and progressive rearrangement of the solid skeleton.

The objective of this work was to establish a thin correlation between microbiology and environmental geotechnique with the attempt to better understand the settlement phenomena in Solid Waste Landfills.

The studies approached in this dissertation are focused on the comprehension of secondary settlement occurred at Cell 4 on Muribeca Landfill and on its correlation with mechanical, biodegradative and climatic aspects. The results show that Cell 4 of Muribeca Landfill has accelerated settlements because climatic conditions are propitious to organic material degradation process. Moreover, settlements occurred, superficially and more visible in depth, in three phases with distinct behavior. These three phases of settlement behavior were explained through direct relations between mechanical, biodegradative and climatic aspects.

The comparison of the measured and the mathematical model prevision settlements have a good curve fitting for measured settlements both in depth and superficially. Besides this, it was also done a forecast of theoretical settlements for a five year period after the measuring period.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Gerais	1
1.2. Descrição do Aterro da Muribeca	3
1.3. Estrutura da Dissertação	4
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Recalques em Aterros de Resíduos Sólidos	6
2.2. Evolução dos Recalques em Aterros de Resíduos Sólidos	6
2.3. Mecanismos dos Recalques	8
2.4. Modelos de Recalques e Biodegradação Enzimática	10
2.4.1. Modelo de Sowers (1973)	11
2.4.2. Modelo Meruelo, Palma (1995)	13
2.4.3. Modelo de biodegradação enzimática, McDougall & Philp (2001)	15
2.4.3.1. Digestibilidade relativa	15
2.4.3.2. Produto de inibição	16
2.4.3.3. Conteúdo de umidade	17
2.4.3.4. Descrição funcional combinada da hidrólise enzimática.	18
2.5. Microbiologia	19
2.5.1. Biotratamento de Resíduos Sólidos	19
2.5.2 Curva de Crescimento Bacteriano	20
2.6. Microrganismos Indicadores de Poluição Ambiental	22
2.6.1. Grupo Coliformes	22
2.6.1.1. Coliformes totais	23
2.6.1.2. Coliformes fecais (CF)	24
2.6.1.3. Streptococcus fecais (EF)	24
2.6.2. Staphylococcus aureus	25
2.6.3. Clostridium perfringens	25
2.6.4. Pseudomonas aeruginosa	25
2.7. Biodegradação em Resíduos Sólidos Urbanos	25
2.7.1. Fatores que Interferem nos Processos Biodegradativos	31
2.7.1.1. Potencial hidrogeniônico (pH)	32
2.7.1.2. Temperatura	32
2.7.1.3. Alcalinidade	33
2.7.1.4. Teor de umidade	33
2.7.1.5. Teor de Metais Pesados	35

2.8. Fitotoxicidade	36
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	38
3.1. Instrumentação Geotécnica da Célula 4	38
3.1.1. Ensaio SPT	42
3.2. Condições Climáticas	42
3.3. Recalques	43
3.4. Chorume e Resíduos Sólidos da Célula	44
3.4.1. Microbiologia (Chorume e Resíduos Sólidos)	45
3.4.1.1. Amostras de Chorume	46
3.4.1.1.1. Determinação de coliformes totais e fecais	48
3.4.1.1.2. Determinação de <i>Staphylococcus aureus</i>	50
3.4.1.1.3. Determinação de <i>Streptococcus fecalis</i>	50
3.4.1.1.4. Determinação de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	51
3.4.1.1.5. Determinação de <i>Clostridium perfringens</i>	52
3.4.1.1.6. Anaeróbios e Aeróbios Totais	53
3.4.1.1.6.1. Semeadura de Anaeróbios Totais	53
3.4.1.1.6.1. Semeadura de Aeróbios Totais	54
3.4.1.2. Amostras de Resíduos Sólidos	55
3.5. Fitotoxicidade (Chorume e Resíduos Sólidos)	56
3.6. Metais (Chorume e Resíduos Sólidos)	58
3.7. Umidade e Sólidos Voláteis (Resíduos Sólidos)	58
3.7.1. Coleta e Preservação das Amostras (Resíduos Sólidos)	58
3.7.1.1. Ensaio de Umidade (Resíduos Sólidos)	59
3.7.1.2. Ensaio de Sólidos Voláteis (Resíduos Sólidos)	59
3.8. Temperatura	59
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES	60
4.1. Resultados e Análises de Recalques	60
4.2. Análise geral dos recalques superficiais e em profundidade	61
4.3 Análise do comportamento dos recalques: aspectos mecânicos, biodegradativos e climáticos.	72
4.4. Recalques versus Condições Climática versus Biodegradação	77
4.4.1. Parâmetros Físicos químicos.	86
4.4.2. DBO e DQO.	86
4.4.3. Teor de Umidade e Sólidos Voláteis.	88

4.4.3.1. Teor de Umidade.	88
4.4.3.2. Teor de Sólidos Voláteis.	89
4.5 Toxicidade e biodegradação	91
4.5.1.Célula 4: Análise em Profundidade	92
4.6 Modelo de Compressibilidade	98
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	110
APÊNDICE A	119

LISTAS DE FIGURAS

FIGURAS

<i>Figura 1.1. Células de lixo (Aterro da Muribeca)</i>	4
<i>Figura 2.1. Curva de crescimento bacteriano mostrando as quatro fases</i>	21
<i>Figura 2.2. Seqüências das rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia Chernicharo. (1993)</i>	30
<i>Figura 3.1. Planta da Célula 4 mostrando a instrumentação instalada</i>	39
<i>Figura 3.2. Perfil da Célula 4 mostrando a instrumentação instalada</i>	40
<i>Figura 3.3. Ensaio NMP(Tubos Múltiplos) e Tabela de Conversão de Resultados</i>	48
<i>Figura 4.1. Curvas de isorecalques na Célula 4</i>	62
<i>Figura 4.2. Localização das placas de recalques (Célula 4)</i>	63
<i>Figura 4.3. Evolução dos recalques superficiais com o tempo (Célula 4)</i>	64
<i>Figura 4.4. Evolução dos recalques em profundidade com o tempo (Célula 4)</i>	65
<i>Figura 4.5. Velocidades dos recalques superficiais com o tempo (Célula 4)</i>	65
<i>Figura 4.6. Velocidades dos recalques em profundidade com o tempo (Célula 4)</i>	66
<i>Figura 4.7. Deformação específica ao longo do tempo (Placas)</i>	66
<i>Figura 4.8. Deformação específica de cada camada ao longo do tempo (Aranhas)</i>	67
<i>Figura 4.9. Desenho esquemático da Célula 4 mostrando em detalhes as camadas</i>	69
<i>Figura 4.10. Recalques superficiais ao longo do tempo (Célula 4)</i>	72
<i>Figura 4.11. Recalques profundos ao longo do tempo (Célula 4)</i>	73
<i>Figura 4.12. Avaliação Hídrica da área do Aterro da Muribeca.</i>	74
<i>Figura 4.13. Anaeróbios totais e aeróbios totais com o tempo (Célula 4)</i>	79
<i>Figura 4.14. Anaeróbios totais e aeróbios totais em profundidade (Célula 4)</i>	79
<i>Figura 4.15. Recalques versus microbiologia com o tempo (Célula 4)</i>	81
<i>Figura 4.16. Anaeróbios totais com o tempo (Célula 4)</i>	81
<i>Figura 4.17. Anaeróbios totais com o tempo (Célula 4)</i>	81
<i>Figura 4.18. Pseudomonas aeruginosa (Célula 4)</i>	82
<i>Figura 4.19. Clostridium perfringens (anaeróbio) (Célula 4)</i>	82
<i>Figura 4.20. Coliformes totais e fecais (Célula 4)</i>	83
<i>Figura 4.21. Teor de umidade com a profundidade (abril/00) - Célula 4</i>	86
<i>Figura 4.22. Índices de DQO e DBO com o tempo (Célula 4)</i>	87
<i>Figura 4.23. Teor de Umidade com a profundidade e tempo (Célula 4)</i>	89
<i>Figura 4.24. Teor de Sólidos Voláteis com a profundidade e tempo (Célula 4)</i>	90
<i>Figura 4.25. Ensaio de fitotoxicidade (Célula 4)</i>	93
<i>Figura 4.26. Ensaio Físico-químicos (Célula 4)</i>	93
<i>Figura 4.27. Curva de ajuste (Recalques teóricos e medidos da Célula 4 (Placa 7 e 9))</i>	101
<i>Figura 4.28. Curva de ajuste (Recalques teóricos e medidos da Célula 4 (Aranhas 1 e 2))</i>	101
<i>Figura 4.29. Previsão de recalques (Recalques teóricos da Célula 4 (Placa 7 e 9))</i>	103
<i>Figura 4.30 Previsão de recalques (Recalques teóricos da Célula 4 (Aranhas 1 e 2))</i>	104

LISTAS DE TABELAS

TABELAS

<i>Tabela 2.1. Espécies de bactérias e protozoários presentes em sistemas aeróbios</i>	31
<i>Tabela 2.2. Espécies de bactérias anaeróbias presentes em sistemas anaeróbio</i>	31
<i>Tabelas 2.3. Concentração de metais pesados (mg/L) em chorume de aterros em diversos países</i>	35
<i>Tabela 2.4. Efeitos dos metais pesados (mg/L) na digestão anaeróbia</i>	35
<i>Tabela 3.1. Instrumentação das Células</i>	41
<i>Tabela 3.2. Monitoramento físico-químico e microbiológico</i>	45
<i>Tabela 3.3. Ensaio de Fitotoxicidade: Líquidos e Resíduos Sólidos</i>	56
<i>Tabela 4.1. Idade do lixo aterrado</i>	60
<i>Tabela 4.2. Concentrações de cátions exigidas por microrganismos metanogênico</i>	85
<i>Tabela 4.3. Metais Célula 4 (Chorume)</i>	92
<i>Tabela 4.4. Metais Célula 4 (Resíduos Sólidos)</i>	92
<i>Tabela 4.5. Teor total de metais pesados (mg/kg peso seco)</i>	96
<i>Tabela 4.6. Valores de α e K_h obtidos através do Modelo Meruelo para a Célula 4</i>	100

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

Os resíduos gerados pela atividade humana sempre foram uma ameaça ao meio ambiente como um todo, desde tempos primitivos. Com o desenvolvimento da indústria e o crescente consumismo, a geração de resíduos tornou-se muito maior, tendo como consequência a degradação do meio ambiente. O problema maior da geração de resíduos é justamente a sua não disposição em lugares adequados, minimizando os efeitos ao meio ambiente. Alguns destes problemas estão relacionados com a contaminação do ar, do solo e de recursos hídricos de regiões próximas aos depósitos de lixo, conseqüentemente diminuindo a qualidade de vida dos circunstantes populações, inclusive de populações que vivam distantes destes depósitos.

Lixões a céu aberto são constantes em cidades de países subdesenvolvidos e em desenvolvimento. As áreas destinadas a estes lixões ocupam uma grande área e sempre que as cidades se expandem são utilizados novas áreas para acomodar estes resíduos gerados. Disponibilizar novas áreas sempre que as cidades aumentam já vem se tornando inviável devido à preocupação ambiental e no caso do Brasil, o próprio poder público vem cobrando medidas mais efetivas a fim de solucionar graves problemas ambientais gerados pela disposição inadequada de resíduos.

A destinação de resíduos em locais próprios como aterros sanitários, proporciona a diminuição de áreas para sua disposição, além de permitir uma degradação mais rápida e completa dos rejeitos biodegradáveis, pois vários parâmetros são controlados. Outro fator positivo na utilização de aterros sanitários para tratamento de resíduos é a diminuição de riscos ambientais. Deve-se deixar claro que ao se projetar um aterro sanitário condições favoráveis à biodegradação dos resíduos devem ser observadas, caso contrário os rejeitos não serão plenamente degradados.

Resíduos orgânicos depositados em aterros sanitários são biodegradados a compostos com menor peso molecular como água, dióxido de carbono, metano, oxigênio entre outros.

Esta transformação para compostos com menor peso molecular permite a um aterro diminuir em altura conforme estes compostos vão sendo transformados e retirados do aterro através do sistema de drenagem e camada de cobertura. Além do mais, principalmente nos primeiros meses de disposição de lixo, o aterro diminui de espessura à medida que os resíduos colocados exercem peso sobre as camadas inferiores de lixo, pois este fenômeno permite a expulsão de líquidos e gases. A diminuição de altura devido ao próprio peso do lixo e a biodegradação é denominada de recalque.

Num aterro de resíduos ocorrem três tipos de recalques. O recalque imediato, logo após a disposição do lixo, quando ocorre o seu acomodamento devido ao peso das camadas sobrejacentes e equipamentos de compactação. Tem-se também o recalque proporcionado pelo peso próprio dos resíduos, denominado de recalque primário, que ocorre em função do fenômeno de adensamento (drenagem de gases e líquidos). Já o recalque proveniente da degradação biológica é denominado de recalques secundário. Este tipo de recalque ocorre por toda a vida do aterro.

De acordo com vários pesquisadores um aterro sanitário é considerado um biorreator. Um biorreator, neste caso, permitiria a degradação completa da porção orgânica da matéria devido ao controle de umidade, temperatura, pressão, além de permitir a entrada de água através da pluviosidade ou até mesmo da própria umidade dos resíduos. Isso diferencia da visão de aterros totalmente isolados do meio ambiente, onde não é permitido a interação dos resíduos (isolados) com o meio que o circunda. Neste caso a velocidade e a magnitude dos recalques são menores se comparados com aqueles obtidos no modelo de aterros tido como biorreator.

Pesquisas desenvolvidas utilizando ensaios de campo indicaram a importância de fatores ambientais, tais como a pluviosidade e temperatura, na influência da decomposição biológica. Essa influência se reflete na velocidade e magnitude dos recalques, uma vez que a degradação biológica diminui a massa de lixo confinada. Entretanto, a própria composição do resíduo influencia nos recalques.

Todos esses fatores em conjunto influenciam na degradação biológica dos resíduos sólidos, que resulta na produção de chorume e gases e podem continuar por um período considerável de tempo, mesmo depois do fechamento do local. A conversão da massa de lixo em seus produtos de degradação diminui o volume do aterro. Quantificar os recalques que ocorrem nas células de lixo é de vital importância pois, com tais dados, pode-se prever a velocidade de degradação dos resíduos, podendo-se projetar, inclusive, o aproveitamento do aterro depois de encerrada a sua vida útil. Este controle pode também permitir avaliar se a biodegradação está ocorrendo de forma compatível com o previsto para determinadas condições.

Neste trabalho será destacada a evolução dos recalques ao longo do tempo e da profundidade numa Célula no Aterro da Muribeca, associando a magnitude e velocidade destes recalques aos processos degradativos que ocorrem na massa de lixo depositada e como estes são influenciados pelas condições climáticas da Região Metropolitana do Recife, onde está localizado o aterro.

A análise dos recalques será baseada nos processos físicos ou mecânicos e principalmente nos fenômenos decorrentes da degradação biológica que ocorrem na massa de lixo depositada no aterro. Esta análise baseia-se na quantificação e identificação dos principais microrganismos presentes nos resíduos sólidos urbanos (RSU). Foi também quantificado o nível de toxicidade das células de lixo através de ensaios específicos para complementar a análise do processo de redução de volume do lixo depositado no Aterro da Muribeca.

1.2. Descrição do Aterro da Muribeca

O Aterro da Muribeca está localizado na Região Metropolitana do Recife na Cidade de Jaboatão dos Guararapes. O aterro tem uma área de 60 hectares e recebe diariamente 3000 toneladas de lixo doméstico e industrial. O lixo que chega ao aterro é composto de 60% de matéria orgânica, 15% de papel, 8% de plástico, 2% de metais e 13% de outros materiais.

O Aterro funciona como depósito de resíduos desde 1985 e foram depositados ao longo deste período mais de 8.000.000 de toneladas desses detritos, diretamente sobre o solo, numa área de aproximadamente 60 hectares. Em 1994, com o objetivo de recuperar a área degradada, foi celebrado um convênio celebrado entre a EMLURB / PCR (Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana / Prefeitura da Cidade do Recife) e o Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, através da ATEPE (Associação Tecnológica de Pernambuco). Neste contrato foi iniciado um projeto de transformação da área no aterro sanitário constituindo, projeto este que se constitui basicamente da construção de 9 células de 200m x 200m e de altura de 20 a 30m. (Figura 1.1).

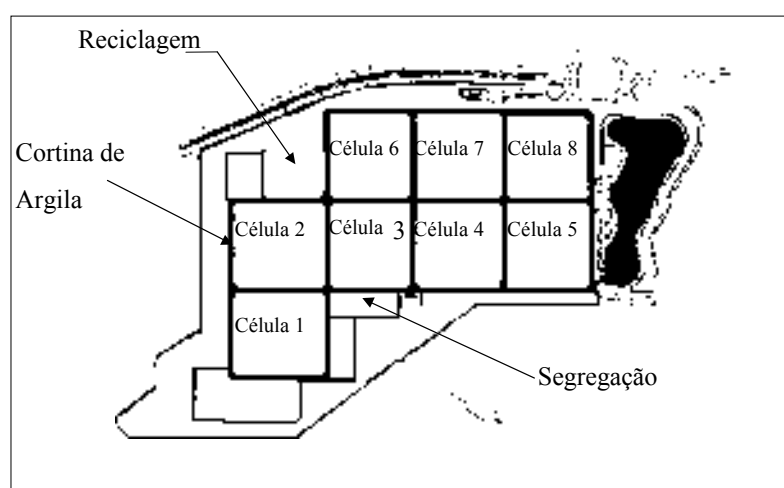


Figura 1.1. Células de lixo (Aterro da Muribeca)

Para o estudo de recalque utilizou-se como campo experimental a Célula 4 (Idade: aproximadamente 5 anos) do Aterro da Muribeca. Foram realizados ensaios físico-químicos e microbiológicos, bem como fitotóxicos em diversas profundidades ao longo desta Célula.

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação apresenta 5 capítulos. O Capítulo 1, a Introdução, aborda a problemática da disposição de lixo e faz uma descrição do Aterro da Muribeca, bem como traz o tema e os objetivos do estudo.

No Capítulo 2, a Revisão Bibliográfica, são vistos vários conceitos sobre o tema (recalque, microbiologia, condições climáticas e outros) e, como a biologia e a engenharia se interrelacionam, estes aspectos são abordados na tentativa de explicar melhor os recalques em aterros de resíduos sólidos.

O Capítulo 3 trata da Metodologia empregada na dissertação e faz uma descrição detalhada das técnicas de ensaios de campo e laboratório.

No Capítulo 4, faz-se apresentação e discussão dos resultados. Neste capítulo é abordado como os recalques são influenciados pelas condições climáticas locais. Foi amplamente discutido como a toxicidade, parâmetros físico-químicos se relacionam com a degradação microbiana e como consequência o comportamento dos recalques. Também foi exaustivamente debatido e investigado o Modelo Meruelo e, como este se aplica às condições locais.

Ao final, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais, conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um aterro de resíduos sólidos urbanos é basicamente uma obra de engenharia em que os resíduos depositados sofrem perdas em sua massa devido à decomposição e a esforços mecânicos, dando lugar a recalques secundários passando a representar uma redução na altura do lixo. Esta redução na altura de massa de lixo é função de processos físicos, químicos e biológicos que podem se prolongar por muitos anos. Hirata *et al.*, (1995) e Monteiro *et al.*, (2002) sugerem que em aterros com elevado conteúdo de resíduos orgânicos, os recalques secundários têm uma importância relevante no estudo do comportamento de aterros e reaproveitamento de áreas.

Os fenômenos da degradação afetam a fração biodegradável dos resíduos e manifestam-se na produção de gases e líquidos, produzindo recalques. Quantificar tais recalques é importante, não só para o aproveitamento da sua capacidade real de armazenamento, mas também para fazer previsões durante a fase de projeto e para a utilização do aterro após encerrada a sua vida útil (Mariano , 1999).

2.1. Recalques em Aterros de Resíduos Sólidos

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 resíduos sólidos urbanos 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.

2.2. Evolução dos Recalques em Aterros de Resíduos Sólidos

Os recalques que ocorrem na massa de lixo constituem um aspecto de especial importância prática e têm sido citados como um dos principais problemas operativos. 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 Moreda (2000), bem como, ao sistema de drenagem. 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 lixo 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 bioestabilização dos resíduos, além de se avaliar como a biodegradação ocorre (condições aeróbias, anaeróbias etc.).

Em aterros de resíduos sólidos urbanos 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 quer conseguir 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 de lixo 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 (chorume 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 esperado em locais com lixo recente, a compressão primária é praticamente 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. Este tipo de recalque se prolonga com o tempo e está relacionado com o decaimento biológico e o progressivo acomodamento 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.

2.3. Mecanismos dos Recalques

Os recalques que acontecem em Aterros de Resíduos Sólidos são complexos e dependem de inúmeros fatores. Parâmetros como o teor e fluxo de umidade e a própria composição dos resíduos devem ser considerados nos recalques secundários. Deve-se levar em conta que o recalque secundário também dependerá da compactação inicial que a massa de lixo sofreu. Esta compactação inicial como dita acima permitirá um maior ou menor fluxo de umidade no interior da célula, influenciando a degradação biológica.

A velocidade de recalques em aterros sanitários é variável e dependente da idade da massa de lixo, apresentando velocidades de recalques que diminuem com o tempo, mas se mantém perceptível durante anos até que os complexos processos de degradação dêem lugar a recalques e alcancem a sua estabilização Palma *et al.*,(1999).

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 do aterro 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 climáticas, tanto de pluviometria, como das temperaturas ambientais. Além do mais, é necessário ter presente as condições de evaporação, transpiração e congelamento em países de clima temperado, elementos estes que influem juntamente com os demais fatores de decomposição físico-química e bioquímica dos resíduos;
- Idade do aterro, condição fundamental na estabilidade deste.

Também, segundo 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. Contudo, McDougall & Philp, (2001), relata que as cargas impostas associadas aos fenômenos biodegradativos e climáticos 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. O projeto pode apontar conceitos claramente diferentes que determinam distintos comportamentos biológicos e estruturais: o conceito de aterro isolado do meio ambiente que minimiza a entrada de umidade e implica num largo período de estabilização e o conceito de um aterro como um biorreator que controla o isolamento dos resíduos e promove a entrada de umidade e, eventualmente, nutrientes para estimular a biodegradação. Finalmente, a operação do aterro é essencial para alcançar os objetivos planejados no projeto e ainda deve ser suficientemente flexível para corrigir e modificar as ações planejadas, de modo a fazer frente a novas situações mantendo as orientações gerais do projeto.

2.4. Modelos de Recalques e Biodegradação Enzimática

Os estudos de recalques são baseados em modelos utilizados habitualmente em geotecnia convencional. Entretanto, a teoria clássica da mecânica dos solos não consegue explicar satisfatoriamente os recalques que ocorrem em aterros sanitários. Características como: comportamento heterogêneo e variável com o tempo dos RSU associado a condições não saturadas, geometrias complexas e materiais sujeitos à perda de massa, tornam a mecânica dos solos clássica difícil de ser aplicada, no sentido de prever recalques em RSU. Além do mais, um item pouco conhecido dos engenheiros geotécnicos é o aspecto relativo à degradação enzimática. A degradação enzimática refere-se aos mecanismos de transformação de compostos através de arsenais protéicos liberados por microrganismos no ambiente, denominados enzimas. Estas enzimas têm a capacidade de se ligar ao substrato (alimento) e decompô-lo. Maior será a velocidade de decomposição quanto mais íntima for esta ligação enzima-substrato, ou seja, quanto mais afinidade houver entre enzima-substrato, maior será a velocidade de degradação e maior o grau de decomposição do substrato. Entender este mecanismo no qual os microrganismos degradam os compostos é de grande importância, pois somente com esclarecimento deste fator, modelos geotécnicos de previsão de recalques poderão ser satisfatórios.

Modelos que incorporam aspectos relativos à perda de massa, temperatura e outras variáveis têm sido estudados para melhor entender os recalques em aterros sanitários (Espinace *et al.*, 2000, McDougall, 2001).

Serão abordados alguns modelos utilizados para se prever recalques que enfocam diversas variáveis, além do que, será relatado um modelo de biodegradabilidade, levando em conta a cinética enzimática (velocidade de degradação do substrato). Entretanto será comentado inicialmente o modelo clássico de Sowers, (1973), pois, apesar das suas simplificações, outros modelos que se aproximam com maior precisão do mecanismo real de recalques, surgiram baseados na teoria precursora de Sowers.

2.4.1. Modelo de Sowers (1973)

A maioria das investigações sobre a compressibilidade em resíduos sólidos é baseada no modelo proposto por Sowers, (1973), o qual estabelece um paralelismo entre os recalques produzidos por incremento de cargas em solos e em aterros. Os recalques primários, segundo o mesmo autor, podem ser determinados pela teoria clássica da mecânica dos solos, pois tais recalques ocorrem pelo peso do próprio lixo e pela dissipação das pressões intersticiais. Este recalque acontece em aproximadamente 30 dias.

Logo após o recalque primário, começa a se desenvolver o recalque secundário, em função de mudanças físico-químicas, degradação biológica e deformação mecânica do tipo viscoso a qual o mesmo autor relata que em condições ambientais estáveis, a relação recalque *versus* logaritmo do tempo é aproximadamente linear. A Equação 2.1 traduz tal avaliação:

$$S_s = \frac{C\alpha}{1 + e^0} H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad \text{Eq.(2.1)}$$

onde:

S_s = recalque por consolidação secundária no tempo t_2

H = altura da célula no tempo t_1 (30 dias)

C_{α} = índice de compressão secundária

e_0 = índice de vazios

t_2 = tempo de previsão de recalques

t_1 = tempo de inicio da consolidação secundária

No caso de RSU, a determinação do índice de vazios inicial é bastante difícil. Desta forma, tem sido utilizado o coeficiente de compressão secundária, o qual é determinado pela Equação 2.2:

$$C_{\alpha}' = \frac{C_{\alpha}}{1 + e_0} \quad \text{Eq.(2.2.)}$$

O valor de C_{α} define a inclinação da reta semilogaritmica do índice de vazios contra log. Tempo. No entanto o valor C_{α}' corresponde a uma curva semilogaritmica de deformação unitária contra log. do tempo. Observa-se que, para definir o índice de compressão (C_{α}), requer-se-á a obtenção de amostras representativas e técnicos de laboratório que realizem ensaios confiáveis sendo difícil determiná-los.

A Equação 2.1 será então transformada na Equação 2.3 que para o cálculo dos recalques secundários, é mais prática e não requer a estimava dos índices de vazios.

$$S_s = H C_{\alpha}' \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Este modelo segundo Espinace *et al.*,(1999a), tem implicações como:

- Implica nas aceitação das teorias de Terzaghi-Frolich e suas hipóteses, entre a quais a saturação completa da célula;
- Por outro lado, tem que se considerar que, tanto a lei de recalques devido a cargas como a degradação biológica, são duas equações sem base teórica se contrastada com resíduos;

- Além do mais, existem dúvidas quanto ao índice C_{α} , de sua credibilidade (Watts & Charles, 1990, Yen & Scalon, 1975, entre outros). Fasset, Leonards & Repetto, (1994), afirmam que os motivos de discrepância se baseiam em variações do parâmetro C_{α}' com o tempo, como também a sua dependência com a espessura do aterro.

Em razão aos problemas acima citados, o modelo de Sowers torna-se falho, sendo difícil aplica-lo na determinação de recalques secundários em aterros de RSU.

2.4.2. Modelo Meruelo, Palma (1995)

Os modelos estudados em engenharia sanitária são aplicados à análise de processos em reatores de laboratório, considerando o processo com um início definido e com uma massa definida de material degradável existente num instante inicial, sem acréscimos adicionais de massa. Contudo, ao se projetar um aterro de RSU, tem-se que analisar o acréscimo de massa que se produz durante a etapa de construção (Espinace *et al.*, 2000), assim como, deve ser analisada também a redução da matéria orgânica sofrida em decorrência à degradação biológica durante o período de deposição.

Nos modelos embasados em reatores de laboratório implica que, para um período de tempo prolongado, a matéria orgânica biodegradável deveria desaparecer totalmente. No entanto, para RSU, uma parte da massa de lixo não é orgânica e, portanto, não sofre degradação. Por outro lado nem toda a matéria orgânica se degrada, razão por que fatores como estes deveriam ser considerados.

Segundo Palma, (1995), a diferença entre o total do material acrescido e o material remanescente em qualquer momento (t) determina o material degradado neste momento. Neste caso poderá se fazer uma relação entre a perda de massa e os recalques.

Neste modelo faz-se uma relação entre o total de massa perdida e o de redução de volume como sendo constantes para qualquer ponto da célula para todos os resíduos de um

aterro, que sejam independentes do tempo e que não dependa do estado tensional. Portanto, considera-se um aterro com uma massa homogênea, com densidades constantes, em toda a evolução do processo biodegradativo. Estabelecendo esta relação os recalques podem ser expresso pela Equação 2.4. para o período posterior à etapa de construção do aterro.

A Equação 2.4 exprime recalques após a etapa de construção de um aterro:

$$S_s = \alpha H \text{ COD} \left[1 - \frac{1}{k_h T_c} (\exp^{-k_h(t-T_c)} - \exp^{-k_h t}) \right] \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Onde:

S_s = recalques (mm)

α = coeficiente de massa perdida transformada em recalques

H = espessura do aterro (mm)

COD = conteúdo de matéria orgânica biodegradável dos resíduos sólidos

T_c = tempo de construção do aterro (dias)

K_h = coeficiente de hidrólise (dias^{-1})

t = Tempo no qual se querem prever os recalques (dias)

Nesta expressão reproduzem-se as formulações para a degradação de resíduos orgânicos modificadas para ter-se em conta que a massa de resíduos são degradadas continuamente e que tais resíduos têm sido acrescidos durante um tempo definido com um ritmo constante que, passado algum tempo, cessa. Além disso, o material degradado se expressa como a fração total do material do aterro.

Quando há uma relação correspondente e direta entre o volume de recalques produzidos e à massa perdida pela degradação, o coeficiente α é considerado constante e característico do tipo de aterro de resíduos depositados.

A equação 2.4 permite esboçar em consequência as previsões de recalques em longo prazo em aterros de RSU compactados. Em todos os casos existem dificuldades para se determinar a cota superficial no início do processo de degradação quando ainda se estão

colocando os resíduos. Assim, a determinação de um tempo deve ser imposta. Este é obtido quando se atinge um primeiro nivelamento levado a término num momento $t_0 > T_c$. Assim, se chega a Equação 2.5 que expressa o recalque produzido:

$$\Delta S = \frac{\alpha H \text{ COD}}{k_h T_c} (1 - \exp^{-k_h T_c}) (\exp^{-k_h t} - \exp^{-k_h t_0}) \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Onde:

ΔS = recalques ocorridos entre t_0 e t

t_0 = idade do aterro no início do nivelamento

t = idade do aterro no último nivelamento

A partir da Equação 2.5, pode-se prever os recalques ao longo do tempo, se conhecido os valores dos parâmetros. Pode-se, também, estimar o coeficiente de perda de massa que se transforma no recalque, além de, ajustar valores como o coeficiente de hidrólise.

Na formulação do Modelo Meruelo incorpora-se o parâmetro K_h de uma cinética de primeira ordem para a estimativa da velocidade de solubilização biológica da matéria orgânica. Com base nessa velocidade de biodegradação, e considerando acréscimos progressivos de massa que ocorrem durante a fase de soerguimento dos aterros sanitários, o modelo estima a perda de massa acumulada ocorrida ao longo do tempo da fração biodegradável dos resíduos sólidos. Assim, mediante um coeficiente empírico, o modelo converte a perda de massa em redução do volume indicador direto dos recalques.

2.4.3. Modelo de biodegradação enzimática, McDougall & Philp (2001)

2.4.3.1 Digestibilidade relativa

O trabalho de modelagem de McDougall & Philp, (2001) está baseado na biodegradação da matéria orgânica, de acordo com uma cinética de hidrólise enzimática.

Esta cinética de hidrólise enzimática terá uma taxa máxima quando ocorrer condições favoráveis de interação enzima-substrato.

A presença de material orgânico altamente biodegradável ou de uma colonização inicial ao ataque enzimático na superfície da matéria orgânica permite uma hidrólise rápida. Entretanto, a matéria orgânica que não foi degradada, devido a sua deficiência em interagir com enzimas, torna a hidrólise lenta. Lee & Fan, (1982) sugerem que fatores combinados mudam a acessibilidade ao substrato o qual é denominado digestibilidade relativa (ϕ), que pode ser relatado como uma extensa conversão do substrato por um parâmetro simples, n , (parâmetro de transformação estrutural). O parâmetro n refere-se à maior ou menor facilidade da degradação da matéria orgânica (substrato). A Equação 2.6 descreve a digestibilidade relativa (ϕ).

$$\phi = 1 - \left[\frac{S_o - S}{S_o} \right]^n \quad \text{Eq. (2.6)}$$

Onde:

S= Fração orgânica final

So = Fração orgânica inicial

2.4.3.2. Produto de inibição

Para simular a redução da atividade enzimática em razão de produtos de inibição (produtos tóxicos que influenciam na atividade microbiana), a função P, tem sido utilizada (Equação 2.7):

$$P = \exp(-k_{VFA}(c)) \quad \text{Eq. (2.7)}$$

Onde:

K_{VFA} = fator produto de inibição

(c) = é a concentração de VFA (Concentração de ácidos graxos voláteis).

O produto de inibição pode determinar a morte de microrganismos ou reduzir a atividade enzimática, ocasionando a redução de substrato degradado em subprodutos do metabolismo.

2.4.3.3. Conteúdo de umidade

A hidrólise segundo McDougall & Philp, (2001), ocorre na interface entre a fase aquosa e a fase sólida. Para controlar a influência do conteúdo de umidade na superfície do processo, um efetivo conteúdo de umidade no tempo é direcionado em função do crescimento da concentração de ácidos graxos voláteis (VFA).

A Equação 2.8 define o conteúdo de umidade volumétrica como:

$$\theta_E = \frac{\theta - \theta_R}{\theta_S - \theta_R} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

Onde:

θ = conteúdo de umidade volumétrico real

θ_E = conteúdo de umidade efetiva (varia entre 0 e 1- como o grau de saturação)

θ_S = conteúdo de umidade saturado – conteúdo de umidade máximo que os poros podem reter equivalente ao volume de poros total.

θ_R = Conteúdo de umidade residual – conteúdo de umidade mínima atingível sem aquecimento ou outra secagem prolongada.

Os ácidos graxos voláteis são formados a partir da decomposição da matéria orgânica, portanto quanto maior a formação de ácidos graxos voláteis, maior será a taxa de hidrólise (quebra da matéria orgânica) e tanto maior será o conteúdo de umidade direcionado para a formação de VFA.

2.4.3.4. Descrição funcional combinada da hidrólise enzimática.

Combinando o conteúdo de umidade, digestibilidade relativa, fator produto de inibição e a taxa máxima de hidrólise ou função de crescimento VFA, tem-se a seguinte Equação 2.9:

$$r_g = \theta_E b \phi P = \theta_E b \left[1 - \left[\frac{S_0 - S}{S_0} \right]^n \right] \exp(-k_{VFA}(c)) \quad \text{Eq. (2.9)}$$

Onde:

r_g = Hidrólise enzimática ou função de crescimento VFA.

θ = conteúdo de umidade volumétrico

E, S, R (subscrito) = refere-se a conteúdo de umidade efetivo, saturado e residual respectivamente.

Nesta equação o pesquisador aborda todos os fatores combinados e como estes influem na hidrólise enzimática. É interessante salientar que uma hidrólise enzimática eficiente tenha parâmetros regulatórios, que direcionam e modulam a velocidade de degradação microbiana.

Embora o modelo de McDougall & Philp, (2001), não aborde o cálculo final da magnitude e velocidade de recalques, sua proposta representa um avanço no sentido de estimar indiretamente os recalques. A hidrólise enzimática por ele estudada define a velocidade de degradação da matéria orgânica, pois, acoplar seus achados aos modelos de recalques é de suma importância, principalmente porque leva em consideração vários parâmetros associados à biodegradação, o que representa o principal fenômeno que ocorre nos resíduos sólidos.

2.5. Microbiologia

A microbiologia em aterros sanitários é, sem dúvida, fundamental, uma vez que a utilização de microrganismos, nos processos de degradação de lixo constitui um instrumento da biotecnologia de inestimável valor.

De acordo com Vazoller, (2001), a utilização de microrganismos no saneamento básico e ambiental é prática comum desde os primórdios do desenvolvimento dos processos biológicos de tratamento de águas residuárias e resíduos sólidos. É evidente que a capacidade microbiana de metabolizar diferentes compostos orgânicos, naturais ou sintéticos, e inorgânicos, extraindo desses compostos fontes nutricionais e energéticas, é o que possibilitou o emprego desses agentes biológicos pela engenharia sanitária como solução aos problemas gerados pelos rejeitos lançados no meio ambiente.

Também, segundo Vazoller, (2001), os seres vivos, especialmente os microrganismos, possuem estruturas protéicas denominadas enzimas que são responsáveis pelo metabolismo, ou seja, transformação/quebra de uma substância em outra. Os microrganismos possuem um sistema enzimático notável que consegue degradar uma enorme variedade de substâncias naturais de diferentes origens. Conforme o autor salienta, as células microbianas possuem "arsenais" enzimáticos que são, também, capazes de atuar sobre substâncias químicas sintéticas oriundas das atividades antropogênicas. Esta resposta do metabolismo de certos microrganismos, sem dúvida, confere algumas vantagens adicionais às células microbianas, tais como a exploração de novos nichos ecológicos e fontes energéticas.

2.5.1. Biotratamento de Resíduos Sólidos

O tratamento biológico ou biotratamento de resíduos sólidos emprega a ação conjunta de espécies diferentes de microrganismos em bioreatores que operados sob determinadas condições, resulta na estabilização da matéria orgânica poluente.

Segundo Vazoller, (2001), os sistemas biológicos de tratamento de resíduos deve atender alguns importantes aspectos:

- 1) remoção da matéria orgânica, portanto redução da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO);
- 2) se possível, degradação de compostos químicos orgânicos de difícil degradação (recalcitrantes);
- 3) fornecimento de um efluente em condições que não afete o equilíbrio do sistema receptor final (rios, lagos etc.).

O volume de informações existentes sobre os aspectos básicos dos processos de tratamento biológico de rejeitos, nos campos da engenharia e microbiologia, possibilita a adoção de diferentes tipos de reatores com elevado desempenho e eficiência na redução da DBO. E, ainda, os processos biológicos de tratamento de rejeitos incorporam uma variedade de espécies microbianas e, por conseguinte, uma versatilidade metabólica amplificada. Alguns processos apresentam espécies bacterianas capazes de degradar compostos complexos e artificialmente sintetizados. Ao mesmo tempo ocorrem bactérias que apenas degradam moléculas orgânicas simples, como o ácido acético, gerando o gás metano.

2.5.2 Curva de Crescimento Bacteriano

As culturas bacterianas crescem exponencialmente durante o crescimento ativo, aumentando em progressão geométrica, sendo este crescimento influenciado pela composição nutricional do meio e pelas condições físicas. Se o crescimento bacteriano ocorre num sistema fechado, ou seja, sem a entrada de novos nutrientes, bem como a remoção dos metabólitos gerados no processo, ocorre a exaustão do sistema. Durante o crescimento, a população em um sistema fechado é balanceada, havendo um aumento ordenado em todos os constituintes de cada célula microbiana. Quando é atingida a população máxima, verifica-se a exaustão de nutrientes e a intoxicação pelos produtos metabólicos gerados pelos próprios microrganismos. A reprodução é inibida e começa a morte celular.

O crescimento bacteriano é demonstrado por meio de uma curva de crescimento das células durante um período de tempo (Figura 2.1). Existem basicamente quatro fases de crescimento (Tortora *et al.*,2000):

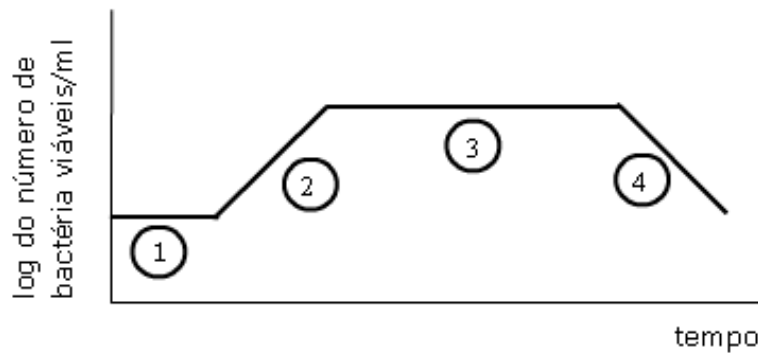


Figura 2.1. Curva de crescimento bacteriano mostrando as quatro fases

Legenda:

1: Fase Lag

2: Fase Log

3: Fase Estacionária

4: Fase de morte Celular

Fase Lag: No período inicial, parece não haver crescimento, é uma fase onde há uma adaptação microbiana ao ambiente imposto. Os microrganismos se adaptam enzimaticamente ao novo meio. Esta fase inicial é denominada fase lag.

Fase Log: A partir de um determinado momento as células iniciam seu processo de divisão entrando no período de crescimento exponencial ou logarítmico. Aqui as bactérias já estão adaptadas, culminando com o crescimento intenso com uma degradação biológica elevada. O gráfico logarítmico desta fase de crescimento é uma linha reta em razão de o tempo de geração ser constante. Esta fase log é o período de maior atividade metabólica. No entanto, nesta fase de crescimento log, os microrganismos são particularmente sensíveis às mudanças ambientais.

Fase Estacionária: Quando a fase de crescimento exponencial continua durante um longo período ocorrerá a formação de um grande número de células. Tortora *et al.*, (2000), afirma que se uma bactéria se divide a cada 20 minutos, durante somente 25,5 horas, produzirá, teoricamente, uma população equivalente em peso a de um avião de 80.000 toneladas. Porém, este fato não ocorre. Nesta fase o número de bactérias que morrem é igual ao que cresce. Portanto, não há crescimento evidente e a população se torna estável. Diversos fatores podem intervir nesta fase diminuindo a atividade microbiana. Entre eles tem-se: o término de nutrientes, acúmulo de produtos de degradação, assim como mudanças no pH os quais são danosos às células.

Fase de Morte Celular: Em determinado momento observa-se o declínio ou morte celular, pois o número de células mortas excede o de células novas. Esta fase continua diminuindo o número de células até existir uma fração ínfima do original e a população desaparece totalmente. Algumas espécies bacterianas fazem este ciclo das quatro fases em poucos dias; outras, no entanto, podem permanecer com poucas células viáveis indefinidamente. Vários são os fatores que determinam esta fase. Entre eles estão a diminuição do substrato, subprodutos do metabolismo que se tornam tóxicos quando em altas concentrações, entre outros.

2.6. Microrganismos Indicadores de Poluição Ambiental

Em RSU são encontrados diversos microrganismos. Por serem de interesse sanitário ambiental, são empregados em análises de diagnóstico ambiental. Abaixo são dados os conceitos dos principais grupos de microrganismos comumente encontrados em resíduos sólidos urbanos, de maneira que é importante conhecer algumas características desses grupos (Bidone, 2001).

2.6.1. Grupo Coliformes

Os grupos dos Coliformes Totais e Fecais atuam como indicadores de poluição ambiental, sendo expressos em densidade, ou seja, como o "número mais provável (NMP)

em cada 100ml de amostra". O grupo coliforme inclui todos os bacilos aeróbios, anaeróbios ou facultativos, gram negativos, não esporulados (*Escherichia sp*, *Enterobacter sp*, *Citrobacter sp*, *Klebsiella sp* etc.). Eles apontam a presença de poluição fecal e também por organismos que ocorrem em grande número na flora intestinal humana e de animais de sangue quente (ratos, cachorros etc.), traduzindo-se como "risco potencial". A contagem dos chamados coliformes totais corresponde ao total de microrganismos "gram negativos" encontrados em uma amostra. Já a contagem dos coliformes fecais indica a quantidade dos microrganismos oriundos de excretas humanos e animais, portanto com risco de serem possivelmente patogênicos. Segundo o Centro de Vigilância Sanitária, (2001), de São Paulo, embora seja usual denominar esses microrganismos como Grupo Coliforme, é conveniente dividi-los nos três principais subgrupos mais comumente utilizados como indicadores de contaminação fecal de águas de abastecimento: coliformes totais, coliformes fecais e *Streptococcus fecalis*. As bactérias do grupo coliformes também são encontradas no solo e em vegetais, algumas apresentando capacidade de se multiplicar na água com altos teores de nutrientes. Entretanto, há grupos que não se multiplicam com facilidade no ambiente externo, sendo pouco resistentes na água e comprovadamente de origem fecal, por isso denominados de "coliformes fecais", apontando a possível presença recente de seres patogênicos como a *Escherichia coli*, a *Salmonella typhi*, o *Vibrio cholerae* e *Shigella sp*, além dos vírus, protozoários e vermes, já que não conseguem permanecer vivos por muito tempo em ambiente desfavorável.

2.6.1.1. Coliformes totais

Estes grupos de bactérias apresentam-se na forma de bacilos, gram-negativas, não esporuladas, facultativas, que fermentam a lactose com produção de ácido e gás, em 48 horas, a 35°C (Tortora, 2000). São habitualmente normais do trato intestinal de qualquer animal. Indicam a presença de bactérias do gênero *Enterobacter*, *Citrobacter*, entre outros.

2.6.1.2. Coliformes fecais (CF)

Estas bactérias apresentam-se na forma de bacilos, gram-negativas, não esporuladas, facultativas, que fermentam a lactose com produção de ácido e gás, em 48 horas, a 44°C. São habitualmente normais do trato intestinal de animais de sangue quente. Indicam a presença de bactérias como *Echerichia coli*, *Klebsiella*, *Salmonella* e *Shigella* (Bidone, 2001).

2.6.1.3. Streptococcus fecais (EF)

Trata-se de um subgrupo importante, já que fazem parte dele as espécies do gênero *Streptococcus* que ocorrem apenas no trato intestinal do homem e de animais de sangue quente, como os Coliformes Fecais. Existe uma correlação entre a ocorrência de Coliformes Fecais e *Streptococcus fecais*. Normalmente empregada em cursos d'água, consiste em quantificar o número de microrganismos de cada um dos dois subgrupos existentes numa amostra. Se a relação CF/EF resultar maior que 4, diz-se que a amostra apresenta contaminação fecal predominantemente humana. Se essa relação for menor que 1 a contaminação fecal predominante será de outros animais de sangue quente. Os resultados que se encontrarem entre esses dois valores não permitem inferir nada a respeito da origem da contaminação fecal (Centro de Vigilância Sanitária, 2001).

2.6.2. Staphylococcus aureus

Staphylococcus aureus são cocos gram-positivos, catalase positiva e aeróbios. Este grupo forma colônias em forma de cachos de uva, crescendo em temperatura ótima de 37°C. O pH ótimo varia de 7,0 a 7,5, e os valores mínimo e máximo são 4,2 e 9,3, segundo Todar (1998 c).

Seu *habitat* comum são fossa nasais, garganta, intestino e pele e, segundo Madigan *et al.*,(1997), são facilmente dispersos no ar.

2.6.3. Clostridium perfringens

Este grupo é constituído de bacilos, gram-positivos, esporulado, anaeróbio patogênico para o homem e animais (Bidone, 2001). Indica a presença de microrganismos anaeróbios. *Clostridium perfringens* pode existir na forma de célula vegetativa ou na forma de esporo. Pode estar presente no solo, resíduos, além de animais e humanos.

2.6.4. Pseudomonas aeruginosa

Estas bactérias são gram-negativas, aeróbias ou anaeróbias facultativas, em forma de bastonetes. Este grupo é cosmopolita, com temperatura ótima de crescimento a 37°C. Segundo Todar, (2000), o pH ótimo de crescimento varia de 6,6 a 7,0 e os valores mínimos e máximos para o seu crescimento são 5,6 e 8,0, respectivamente. Sendo patógenos oportunistas dos seres humanos, são encontrados na superfície de frutas e legumes crus, piscinas, cosméticos, drogas injetáveis, entre outros locais.

Grande parte das variedades de *P. aeruginosa* produz um ou mais pigmentos os quais são tóxicos ao crescimento de outras bactérias, podendo facilitar a sua colonização, Gilligan, (1995).

Estes organismos são de grande interesse médico-sanitário por serem os grandes causadores de infecção médico-hospitalar, além de serem encontrados comumente nos resíduos sólidos. Por isso a sua importância de serem investigados. Além do mais, a quantificação destes microrganismos e outros podem indicar com que velocidade os resíduos estão sendo degradados, o que pode ser relacionado aos recalques.

2.7. Biodegradação em Resíduos Sólidos Urbanos

Em um aterro de resíduos sólidos a magnitude e velocidade dos recalques secundários é condicionada por microrganismos. Estes microrganismos são fungos,

bactérias, vírus e protozoários. Os recalques secundários em aterros sanitários decorrem da ação conjunta destes microrganismos, através de atividades bioquímicas complexas.

A biodegradação da massa de lixo se dá pela ação conjunta de diferentes espécies de microrganismos. Há na massa de lixo microrganismos aeróbios que estão presentes num primeiro momento, logo após a disposição do lixo, onde existe uma fonte de oxigênio (oxidante) para as suas atividades metabólicas. E organismos anaeróbios, os quais degradam a matéria orgânica sem a presença de oxigênio e perduram por toda a vida de um aterro.

No ambiente aeróbio o material orgânico é mineralizado pelo oxidante para produtos inorgânicos, principalmente a dióxido de carbono e água. Já em condições anaeróbias os materiais orgânicos sofrem transformações sem, contudo, serem mineralizados. Estas transformações ocorrem por processos alternativos chamados fermentações. Neste caso, formam-se também e, principalmente, CO_2 , H_2 , CH_4 e H_2O , especialmente na fase metanogênica.

Existem diferentes fases de degradação ao longo do tempo para que aconteça o fenômeno do recalque. Tem-se primeiro uma fase aeróbia e, posterior a esta fase, tem-se a anaeróbia. Esta última fase está dividida em outras quatro etapas, Campos (1999). São a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese que serão detalhadas posteriormente.

A fase aeróbia apresenta curta duração, pois a própria operação dos aterros sanitários, onde usualmente são utilizadas camadas de cobertura diária, limita a disponibilidade de oxigênio. Desta forma, esta fase é responsável por uma parcela reduzida da decomposição, portanto recalques pequenos. Entretanto, a camada de cobertura não deve ser impermeável. A reação da matéria degradável com oxigênio produz dióxido de carbono, água, materiais parcialmente degradados e biomassa, além de promover uma elevação da temperatura do meio.

A digestão anaeróbia pode ser considerada como um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão de matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas, (Simões, 2000). Contudo, devido à heterogeneidade de resíduos de cada comunidade e à técnica executiva do aterro, conduz a um ecossistema particular.

Também conforme Simões, (2000), 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 metano e dióxido de carbono. As bactérias metanogênicas são muito importantes para o processo, pois elas produzem um gás insolúvel (metano), possibilitando a remoção do carbono orgânico do ambiente, resultando na perda de massa, e utilizam o hidrogênio favorecendo o ambiente para que as bactérias acidogênicas fermentem compostos orgânicos com a produção de ácido acético, que é convertido em metano.

A degradação anaeróbia se dá em quatro fases segundo Campos (1999).

A primeira fase é a **hidrólise**, durante a qual o material orgânico particulado é convertido 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 **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, a partir da redução do 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, interferindo diretamente na sua bioestabilização. 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 aclimação 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 parcial do dióxido de carbono 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. 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 está condição favorável é determinada por grupos microbianos antecessores.

Na Figura 2.2 são apresentadas as fases da digestão anaeróbia com indicações dos grupos de bactérias envolvidos e as respectivas rotas metabólicas, de acordo com Chernicharo, (1993).

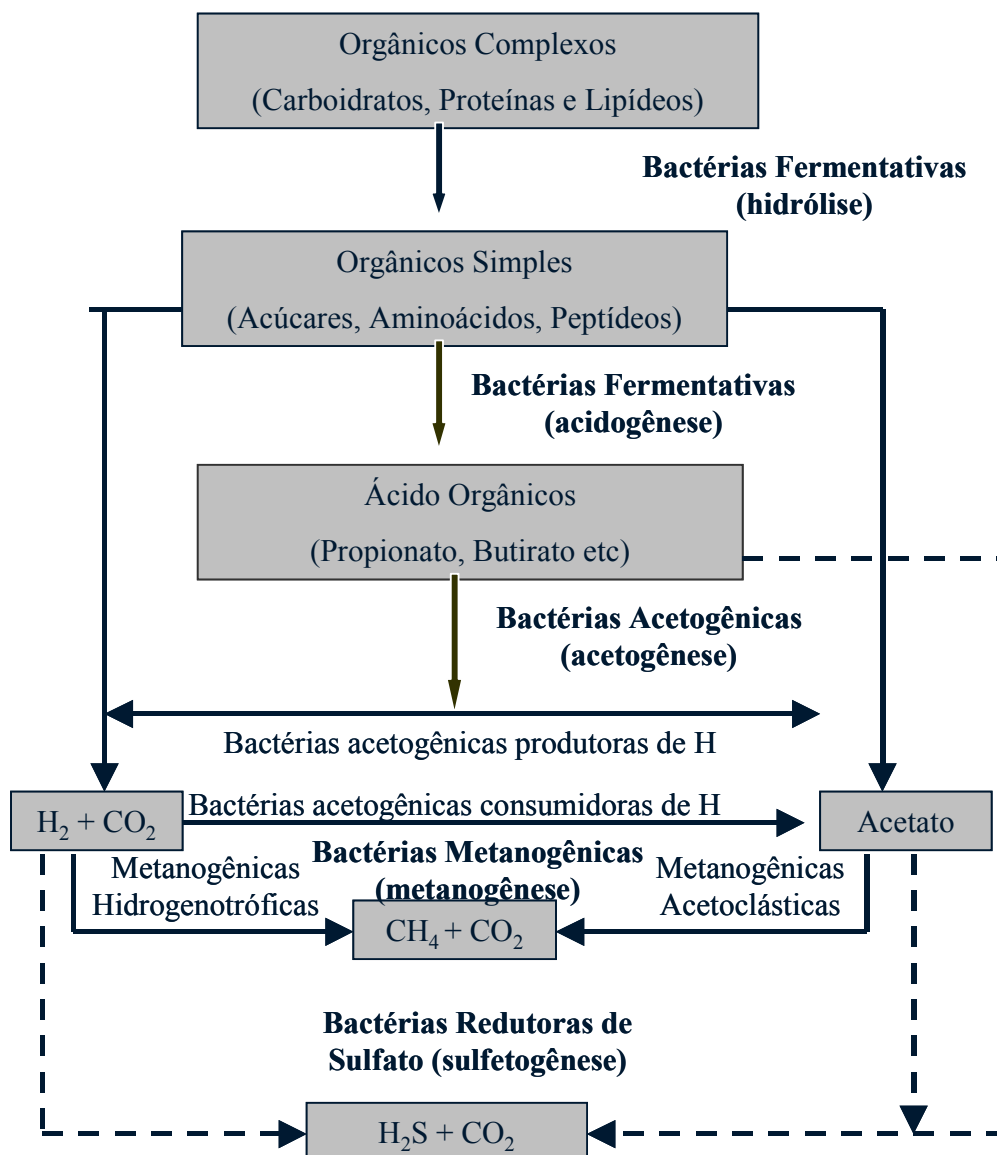


Figura 2.2. Seqüências das rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia Chernicharo. (1993)

A Tabela 2.1 apresenta um quadro das principais espécies de bactérias e protozoários em sistemas aeróbios (Vazoller, 2001) e na Tabela 2.2 exemplos típicos de bactérias anaeróbias e as diferentes fases de digestão.

Tabela 2.1. Espécies de bactérias e protozoários presentes em sistemas aeróbios

Tipos de Microrganismos	Espécies mais representativas
Bactérias Heterótrofas	<i>Pseudomonas sp</i> , <i>Zooglea ramigera</i> , <i>Achromobacter sp</i> , <i>Flavobacterium sp</i> , <i>Bdellovibrio sp</i> , <i>Mycobacterium sp</i> , <i>Alcaligenes sp</i> , <i>Arthrobacter sp</i> e <i>Citromonas sp</i> .
Bactérias Filamentosas	<i>Sphaerotillus natans</i> , <i>Beggiatoa sp</i> , <i>Thiothrix</i> , <i>Leucothrix sp</i> , <i>Microthrix parvicella</i> , <i>Nocardia sp</i> , <i>Nostocoida limicola</i> , <i>Haliscomenobacter hydrossis</i> , <i>Flexibacter sp</i> .
Bactérias Nitrificantes	<i>Nitrosomonas sp</i> e <i>Nitrobacter sp</i> .
Protozoários	<i>Arcella discoides</i> , <i>Amoeba sp</i> (Classe Sarcodina Amebas), <i>Aspidisca costata</i> , <i>Trachelophyllum sp</i> , <i>Paramecium sp</i> , <i>Dininium sp</i> , <i>Chilodenella sp</i> (Classe Ciliata, Ciliados livres-natantes e sésseis), <i>Spiromonas sp</i> , <i>Bodo sp</i> , <i>Euglena sp</i> , <i>Monas sp</i> , <i>Cercobodo sp</i> (Classe Mastigophora Flagelados)

Tabela 2.2. Espécies de bactérias anaeróbias presentes em sistemas anaeróbio

Etapas da biodigestão anaeróbia	Espécies bacterianas
Hidrólise e acidogênese	<i>Clostrídios</i> , <i>Acetivibrio cellulolyticus</i> , <i>Bacteroides succinogenes</i> , <i>Butyrivibrio fibrisolvens</i> , <i>Eubacteriom cellulosolvens</i> , <i>Bacillus sp</i> , <i>Selenomas sp</i> , <i>Megasphaera sp</i> , <i>Lachnospira multiparus</i> , <i>Peptococcus anaerobicus</i> <i>Bifidobacterium sp</i> , <i>Sthaphylococcus sp</i>
Acetogênese	<i>Syntrophomonas wolinii</i> , <i>S. wolfei</i> , <i>Syntrophus buswellii</i> , <i>Clostridium bryantii</i> , <i>Acetobacterium woddii</i> , várias espécies de bactérias redutoras do íons sulfato – <i>Desulfovibrio sp</i> , <i>Desulfotomaculum sp</i>
Metanogênese acetoclástica	<i>Methanosercina sp</i> e <i>Methanotrix sp</i> .
Metanogênese hidrogenotrófica	<i>Methanobacterium sp</i> , <i>Methanobrevibacter sp</i> , <i>Methanospirillum sp</i>

2.7.1. Fatores que interferem nos Processos Biodegradativos

Para que ocorra um crescimento bacteriano satisfatório, todos os microrganismos necessitam de condições mínimas para a sobrevivência e posterior reprodução. Para tanto, as fontes de nutrientes, oxigênio, pH, umidade e temperatura ideais são fatores essenciais para o seu desenvolvimento.

Segundo Barbosa & Torres, (1999); Todar, (1998), as fontes de energia devem prover as necessidades de carbono e macronutrientes como hidrogênio, cálcio, fósforo, potássio, magnésio e ferro, requeridos em grandes quantidades, além de micronutrientes, como manganês, cobalto, zinco, cobre e molibdênio.

A seguir serão abordados alguns dos fatores que influem no desenvolvimento microbiano.

2.7.1.1. Potencial hidrogeniônico (pH)

Grande parte das bactérias possui um pH ótimo ao redor da neutralidade, pois é o mais adequado para absorção de alimentos. Há, no entanto, uma faixa de pH em que os limites máximo e mínimo são estabelecidos, não restringindo a sobrevivência dos microrganismos a uma única condição de pH (Barbosa & Torres, 1999). O pH ótimo ao crescimento bacteriano é bem definido. Em função do pH, os microrganismos são classificados em acidófilos, neutrófilos ou basófilos. Porém, as espécies se adaptam a diferentes valores. São capazes de manter o pH intracelular em torno de 7,5 porque possuem tampões naturais e efetuam trocas de íons de hidrogênio com o meio externo (Bidone, 2001). As bactérias metanogênicas são as mais sensíveis à variação do pH. A faixa ótima de pH para o pleno desenvolvimento deste grupo varia de 6,5 a 7,6.

2.7.1.2. Temperatura

Analogamente ao pH, há uma faixa de temperatura em que as bactérias podem crescer (mínima, ótima e máxima). Na temperatura ótima as enzimas bacterianas estão na forma mais ativa. Na temperatura mínima as enzimas trabalham com menor eficiência (desaceleração), portanto mais demoradas no processo de conversão da matéria orgânica em metabólitos. Numa faixa máxima, ocorre a denaturação das proteínas (destruição do arranjo molecular) causando a morte celular (Barbosa & Torres, 1999). Apesar de evidências da importância da temperatura nos processos, poucos estudos práticos, em condições de campo, foram conduzidos para compreendê-lo. Do ponto de vista biológico, a temperatura das células de aterros é um fator de grande importância, pois os microrganismos que atuam no processo, ao contrário dos organismos superiores, não controlam sua própria temperatura corporal, seguindo a temperatura do meio. As bactérias metanogênicas, por exemplo, são bastante sensíveis às bruscas mudanças de temperatura. Markovich & Petrova, (1966), citam que as bactérias metanogênicas podem atuar em duas faixas distintas de temperatura: a mesofílica que varia de 29 a 45 °C e termófila que vai de 45 a 70°C.

2.7.1.3. Alcalinidade

A alcalinidade provoca a neutralização da acidez aumentando o pH e tende a precipitar os metais fora da solução. Desta maneira, a alcalinidade pode minimizar a ação inibidora dos metais pesados ao processo degradativo, sendo um elemento antagonista Polvinelli, (1987). Entretanto, em altos níveis de pH, o íon hidroxila pode se tornar inibidor e, portanto, a acidez atuaria como antagonista reduzindo a alcalinidade do meio e, conseqüentemente, os íons OH. Os metais alcalinos e alcalinos-terrosos controlam a acidez, particularmente na fase metanogênica, pois atuam como estimuladores do processo. Segundo Lima, (1983), na fase metanogênica há uma tendência de alcalinização do meio. Após a fase metanogênica a alcalinidade tende a subir, podendo variar de 6.000 a 14.000mg/L.

2.7.1.4. Teor de umidade

Os microrganismos dependem de um meio aquoso para atingir o seu pleno crescimento. Segundo Halvadakis *et al.*, (1983), a água fornece nutrientes requeridos pelos microrganismos, além de possibilitar sua rápida propagação ou espraiamento no meio sólido. A água também possibilita o transporte de enzimas e de outros metabólitos importantes no processo de decomposição.

Wujick & Jewell, (1980), mostraram em seus resultados que, adicionando-se diversos teores de água em digestões de meio sólido, a taxa de estabilização da matéria orgânica aumentou de forma significativa, possibilitando a rápida e potencial produção de metano.

O teor de umidade varia de acordo com vários fatores como: a composição do lixo, as condições climáticas, as práticas de coleta, entre outros, (Tchobanoglous *et al.*, 1977). Os componentes orgânicos do lixo geralmente concentram a maior parcela de umidade. Logo a seguir, vêm os papéis e papelões, trapos, couros etc. Por fim, estão os inertes e finos, (Lima & Nunes, 1994). Alguns autores sugerem que o teor de umidade e o teor de matéria

orgânica presentes no lixo fornecem os pré-requisitos necessários à fase inicial do crescimento bacteriano. Entretanto, grande quantidade de água infiltrada pode prejudicar a degradação. A faixa ótima de umidade para a degradação biológica deverá ser entre 20-40%, segundo Palmizano & Barlaz, (1996).

Valores de umidade fora desta faixa prejudicam a atividade metabólica dos diferentes grupos bacterianos, podendo, inclusive, desestabilizar a célula de lixo. Conforme Monteiro *et al.*, (2001), outro fator importante é que, com a infiltração de água proveniente das chuvas, uma carga extra de oxigênio entraria nas células, aumentando o número de bactérias aeróbias ou anaeróbias facultativas, provocando uma desestabilização do meio, pois o ambiente interno passaria por variações térmicas, alterando as condições iniciais estabelecidas no interior da célula. Segundo Junqueira, (2000), a entrada de uma carga extra de oxigênio dissolvida em água favorece o incremento das atividades de bactérias aeróbias ou anaeróbias facultativas, provocando um aumento da temperatura no interior da massa de lixo. Seus estudos mostraram que durante períodos chuvosos, em diversas ocasiões, são verificadas variações bruscas de temperaturas, as quais propiciam também uma desestabilização nos microrganismos anaeróbios, diminuindo a velocidade de degradação da matéria orgânica e, conseqüentemente, os recalques do período. O acúmulo excessivo de líquidos no interior da massa de lixo afeta os níveis de recalques em função de suas propriedades hidrostáticas, o qual distribui as tensões recebidas de modo igual em todas as direções. Considerando que os recalques também ocorrem em função da carga imposta pelo próprio peso do lixo, uma quantidade excessiva de água atenua essa carga e impede a compressão das partículas. O mesmo autor relatou que, em seus resultados, a infiltração de água provocou o surgimento de um padrão cíclico de comportamento para as taxas de recalques, observadas tanto em escala real como em escala intermediária (células de pequenas dimensões), com valores mais elevados de recalques durante períodos secos e valores bem menores durante as chuvas.

2.7.1.5. Teor de Metais Pesados

Os metais pesados estão presentes no lixo urbano em grande quantidade, principalmente nas grandes cidades, onde se tem a utilização de produtos domésticos que contêm grande quantidade de metais pesados. O lixo proveniente de indústria, também pode conter elevadas concentrações de metais pesados. Os metais pesados estão presentes em pilhas, baterias, jornais, tintas, tecidos, têxteis, enlatados, inclusive em alimentos, os quais para serem produzidos necessitam de substâncias à base de metais pesados. Conforme diversos autores a Tabela 2.3 mostra concentrações de metais pesados em chorume de aterros de diversos países.

Tabelas 2.3. Concentração de metais pesados (mg/l) em chorume de aterros em diversos países

Origem	Idade	Zn	Mn	Ni	Cr	Cu	Pb	Cd
Holanda	Novo	26		0,43	0,32	0,3	0,12	0,02
Espanha	Novo	0,53 - 1,4	4,8 - 7,6	0,3 - 0,5	0,13 - 0,57	0,08 - 0,19	0,05 - 0,45	
Inglaterra	Velho	0,37	2,15	0,09	0,04	0,03	0,14	0,01
Espanha	Velho	0,54 - 0,56	0,05 - 0,4	0,47 - 0,5	0,17 - 0,23	0,1 - 0,14	0,07 - 0,17	
Brasil		6,3 - 10,4	2,4 - 15,2		0,41 - 0,75	0,14 - 0,29	0,58 - 0,68	0,06
Portugal	Médio	1,92		0,12	0,68	0,681	0,37	0,035
USA		0,0 - 370	0,1 - 125			0,0 - 10	0,1 - 2,0	0,0 - 0,05

Segundo Lawrence & McCarty, (1965), os metais pesados são tóxicos à digestão anaeróbia, mesmo em baixas concentrações. A Tabela 2.4 apresentada por Lima & Nunes, (1994), mostra os efeitos dos metais na digestão anaeróbia, ou seja, a concentração que inibe o processo anaeróbio de degradação da matéria orgânica.

Tabela 2.4. Efeitos dos metais pesados (mg/L) na digestão anaeróbia

Cátions	Concentração Inibitória
Fe ⁺⁺	1 – 10
Zn ⁺⁺	4 – 10
Cd ⁺⁺	7 – 10
Cu ⁺	10 – 12
Cu ⁺⁺	10 – 16

Durante a hidrólise e acidogênese há uma tendência de solubilização dos metais pesados, no instante em que eles são liberados da fração sólida e incorporados ao chorume.

Entretanto, durante a acetogênese há uma tendência de aumento da concentração de metais no meio em função da lixiviação microbiana e da acidez. Neste período, os metais pesados conferem mais periculosidade, se forem liberados para o meio ambiente. Na fase metanogênica ou maturação da célula de lixo, há um declínio brusco da concentração de metais em função da precipitação química decorrente da capacidade de tamponamento do meio. Neste momento, inicia-se a formação de hidróxidos, fazendo com que os metais tornem-se menos solúveis e, portanto, menos perigosos segundo Lima & Nunes, (1994).

Todos os fatores citados acima afetam o crescimento microbiano e, conseqüentemente, afetam os níveis de recalques secundários, já que este é função da degradação biológica. Portanto, entender como os microrganismos se desenvolvem em um ambiente tão complexo é de suma importância no que se refere à compreensão do comportamento de aterros como um todo.

2.8. Fitotoxicidade

Os compostos tóxicos presentes em aterros de RSU podem inibir tanto o crescimento microbiano como serem potencialmente perigosos para o meio ambiente e a saúde pública. Segundo Civiatta *et al.*, (1993), Inbar *et al.*, (1990) e Zuconi *et al.*, (1982 a), o nível de toxicidade de um aterro de resíduos sólidos pode indicar em que fase de maturação este aterro se encontra. Aterros que apresentam grandes quantidades de agentes tóxicos são imaturos, enquanto aterros que possuem menores quantidades de agentes tóxicos possuem resíduos mais maduros (Morel *et al.*, 1985). Este fenômeno é devido entre outros fatores à atividade microbiológica que é capaz de diminuir a toxicidade dos resíduos ao longo do tempo. Portanto, através da quantificação de microrganismos e do nível de toxicidade, pode-se inferir o grau de estabilização de um composto.

O teste de fitotoxicidade que é baseado no crescimento de plantas em um determinado substrato é um teste bastante usado por ser uma técnica simples, rápida, segura e reproduzível para avaliar o nível e os danos causados pelas combinações tóxicas presentes em vários compostos, Wang & Keturi, (1990). Melo *et al.*, (2002), sugerem que ensaios

fitotóxicos são importantes para associar o grau de contaminação com a evolução microbiana e monitorar como os recalques se comportam em função da toxicidade que afeta a biota microbiana.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Os ensaios realizados no Aterro da Muribeca para obtenção dos dados da célula de lixo foram desenvolvidos segundo normas préestabelecidas que melhor se adaptavam as condições técnicas e econômicas locais.

As metodologias dos ensaios empregados buscaram aproximar os resultados obtidos às condições reais de campo.

Foram desenvolvidos ensaios de campo e laboratório na Célula 4. Os ensaios de campo foram desenvolvidos em escala real e os ensaios de laboratório foram desenvolvidos na tentativa de reproduzir as condições de campo. Os ensaios envolveram análises físicas, químicas e microbiológicas.

O trabalho foi iniciado com a instrumentação da célula a fim de obter os dados necessários para a pesquisa. A instrumentação consistiu da instalação de instrumentos de medida eletrônicos e manuais bem como da estação meteorológica automatizada do Aterro da Muribeca a fim de monitorar as condições climáticas locais. Também foram feitas coletas de líquidos, sólidos e gases, (Maciel & Jucá, 2000), os quais foram analisados em laboratórios.

3.1. Instrumentação Geotécnica da Célula 4

A Célula 4 foi instrumentada de acordo com Jucá *et al.*,(1999), e Monteiro & Jucá (2001), e envolvendo basicamente:

- Instalação de placas de recalque distribuídas ao longo da superfície da célula;
- Instalação de medidores de recalque em profundidade (aranhas);
- Execução de furo de sondagem para obtenção do perfil da Célula 4, definindo, portanto, a espessura de lixo, bem como a obtenção de amostras (sólidos voláteis, umidade e pH) ao longo da profundidade;

- Instalação de piezômetros em furo de sondagem para coleta de líquidos e medição do nível da manta líquida;
- Instalação de termopares para medição da temperatura da massa sólida em profundidade, também com o auxílio de furo de sondagem;
- Obtenção de dados relativos à concentração de gases.

A localização das placas de recalques e os medidores de recalques em profundidade (aranhas) na Célula 4, juntamente com toda a instrumentação dessa célula estão ilustradas nas Figuras 3.1 (planta) e 3.2 (perfil da Célula).

ATERRO DA MURIBECA CÉLULA 4 (PLANTA)

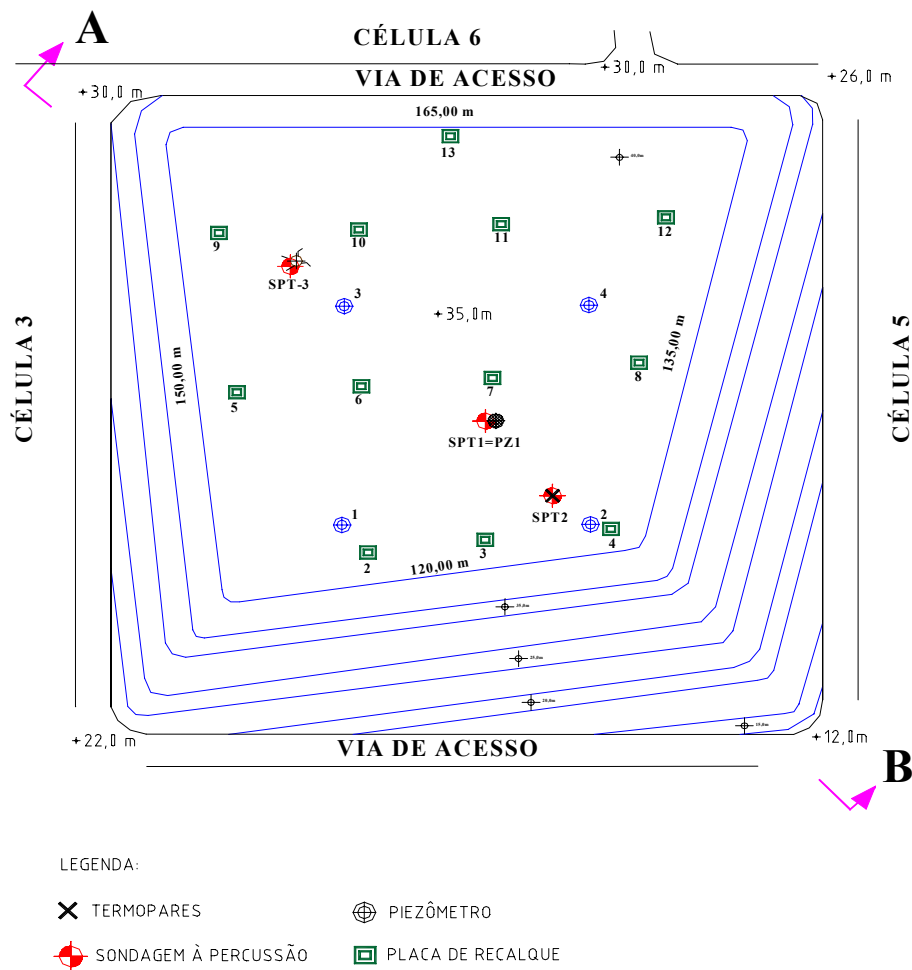


Figura 3.1. Planta da Célula 4 mostrando a instrumentação instalada

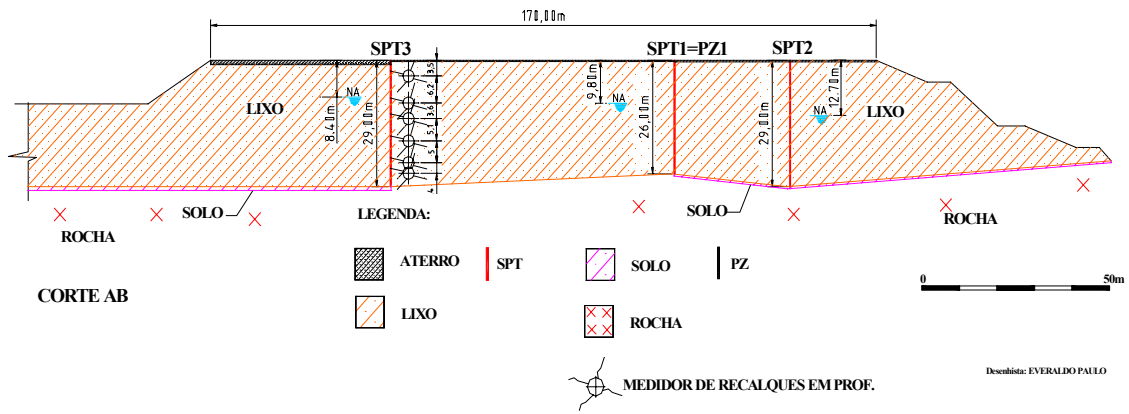


Figura 3.2. Perfil da Célula 4 mostrando a instrumentação instalada

A Tabela 3.1 ilustra como foi instrumentada a Célula 4 com os diversos parâmetros monitorados, os objetivos e equipamentos com as normas seguidas.

Tabela 3.1. Instrumentação das Células

Instrumentação					
Controle da Célula	Sondagens (SPT)	Piezômetros	Termopares	Medidor de recalques em profundidade (Aranhas)	Placas de recalque
Objetivo	Obter perfil: espessura de lixo.	Medir nível de água/chorume, coleta de amostras líquidas em profundidade.	Medir temperatura da massa de lixo em profundidade	Medir níveis de recalques nas diferentes camadas de lixo para avaliar o grau de decomposição dos resíduos em profundidade.	Medir recalques superficiais na massa de lixo
	Obter amostras líquidas/sólidas em profundidade para realização de ensaios de umidade, sólidos voláteis, fitotoxicidade, identificação/quantificação de microrganismos aeróbios/anaeróbios e patógenos, determinação de metais, além de outros parâmetros físico-químicos.				
	Instalar piezômetros				
	Instalar termopares				
Parâmetro	Nº de golpes / 30cm e coleta de amostras	Líquidos: água/chorume	Temperatura	Recalques: profundidade	Recalques superficiais
Método / Técnica / Norma	NBR 6484 / NBR 7250	Piezômetro de Casagrande: Dunnycliff (1988).	Conf Labfacility LTD (1986). Temperature fensing with termocaples and resistance termometros. A Pratical Handbook.	Conf.padrões geotécnicos internacionalmente utilizados	Conf. padrões geotécnicos internacionalmente-utilizados
Equipamento	Sondagem tipo contínua à percussão com diâmetro do tubo de revestimento de 3''	Tubo PVC rígido para rosca de diâmetro nominal 2''	Termopar tipo k e Termômetro digital.	Torpedo, tubo guia, imã, chave magnética, sensor (leitura através de um sinal sonoro).	Placas metálicas (0,60m x 0,60m) e haste (0,50m)
Freqüência	Anual	Mensais	Mensais	Mensais	Mensais

3.1.1. Ensaios SPT

Os ensaios de penetração dinâmica (SPT – Standard Penetration Test) foram realizados de acordo com as normas NBR-8036 (Normas Gerais de Sondagem de Reconhecimento para Fundações de Edifícios), NBR-6484 (Método de Execução de Sondagem) e NBR-6502 (Terminologia de Rochas e Solos) da ABNT. O equipamento utilizado é o convencional utilizado para solos, (Jucá *et al.*,2000).

A metodologia utilizada foi de acordo com Jucá *et al.*,(2000). Estes ensaios sofreram algumas alterações no que diz respeito às normas de sondagens convencionais. As sondagens foram do tipo contínua à percussão, sem lavagem e com o auxílio de um revestimento de 6,35cm (2 1/2”) de diâmetro interno. Para a caracterização dos materiais das diversas camadas, procedeu-se à extração das amostras com amostrador padrão de 3,40cm (1 3/8”) de diâmetro interno e 5,08cm (2”) de diâmetro externo e 78,117cm (30 3/4”) de comprimento total. O ensaio foi iniciado já na superfície do aterro (cobertura), havendo retirada de amostras a cada 0,5m para realização de ensaios em laboratório, obtendo-se perfis de umidade e de sólidos voláteis a cada metro em profundidade, além da obtenção de amostras sólidas e líquidas para realização de outros ensaios físico-químicos e microbiológicos.

3.2. Condições Climáticas

As condições climáticas interferem de maneira relevante na biodegradação, conseqüentemente na magnitude e velocidade dos recalques. Portanto, buscou-se relacionar as condições climáticas ao fenômeno de biodegradação e recalques.

O monitoramento das condições climáticas do Aterro de Muribeca foi realizado a partir de março de 1999 através da aquisição automática de dados meteorológicos na Estação (ELE MM950) do Aterro da Muribeca que está situada dentro do próprio Aterro (Monteiro *et al.*,2001), cujo dados foram coletados com o auxílio de um “notebook” que qual forneceu dados como precipitação, direção e velocidade do vento, temperatura do ar e

solo, pressão atmosférica e umidade relativa do ar. A aquisição automática de dados é feita a cada hora.

A evaporação é medida em um tanque Classe A de forma circular com diâmetro de 121 cm e profundidade de 25,5 cm, construída de aço galvanizado, e instalado sobre uma plataforma de madeira a 15 cm de uma superfície horizontal.

3.3. Recalques

De acordo com Monteiro *et al.*, (2000), e relatórios para Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB-1999), foram instalados previamente no Aterro da Muribeca 10 placas de recalques na Célula 4, (Foto 3.1), para monitoramento dos recalques superficiais. As placas de recalques têm dimensões 0,60m x 0,60m e uma haste de 0,50m. As placas foram colocadas diretamente sobre a camada de lixo e em seguida coberta com solo. Durante o período de medição dos recalques superficiais eram feitas leituras semanais utilizando-se equipamento de topografia, tomando-se como base o topo das hastes metálicas nas placas de recalque e um ponto fixo de referência onde era posicionada a mira a cada leitura. Desta forma, a cada nova leitura, o nível atual dos topos das hastes era comparado com os níveis iniciais, cuja diferença entre suas cotas correspondia aos recalques ocorridos.

Para o monitoramento dos recalques em profundidade foram utilizados medidores magnéticos, (6 aranhas), instalados através de um furo de sondagem tipo contínua à percussão com diâmetro do tubo de revestimento de 3''. Os medidores de recalques profundos, (Foto 3.1), são destinados a determinar as deformações verticais em vários pontos preestabelecidos ao longo da profundidade. As aranhas são providas de anel de imã permanente, com orifício central destinado à passagem de tubo guia de PVC. A leitura é realizada introduzindo-se um torpedo dentro do tubo guia, cuja passagem pelo imã aciona uma chave magnética no sensor, possibilitando uma indicação da leitura através de um sinal sonoro. Os recalques são obtidos através da comparação direta das distâncias entre o anel de referência e as aranhas, ao longo do tempo. As leituras foram realizadas mensalmente.



Foto 3.1. Placa de recalque superficial e Medidor de recalque em profundidade (aranha) respectivamente

3.4. Chorume e Resíduos Sólidos da Célula

Na Célula 4 foram realizadas análises de parâmetros físico-químicos e microbiológicos do chorume e dos resíduos sólidos.

As análises físico-químicas foram realizadas pelos Laboratórios de Engenharia Ambiental e da Qualidade, no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco. As determinações dos teores de metais foram realizadas pelo Laboratório de Minerais, Solos e Água do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco e Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco. As análises microbiológicas foram realizadas no Laboratório de Genética de Microorganismos do Departamento de Antibióticos da Universidade Federal de Pernambuco.

O monitoramento dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos do chorume e dos resíduos sólidos, os objetivos, equipamentos, métodos, técnicas ou normas, bem como as frequências de amostragens estão descritos na Tabelas 3.2.

Tabela 3.2. Monitoramento físico-químico e microbiológico

Chorume/Resíduos Sólidos			
Controle da Célula	Parâmetros físicos-químicos	Parâmetros Microbiológicos	Recalques (Resíduos Sólidos)
Objetivo	Verificar o nível de contaminação do chorume em profundidade e com o tempo	Verificar o nível de contaminação do chorume e resíduos sólidos em profundidade e ao longo do tempo	Medir os recalques da massa de lixo de lixo na superfície e em profundidade
	Acompanhar a evolução do processo de biodegradação dos resíduos em profundidade e com o tempo.	Acompanhar a evolução do processo de biodegradação dos resíduos em profundidade e ao longo do tempo através da quantificação e identificação de microrganismos patogênicos.	Avaliar o grau de decomposição dos resíduos ao longo da profundidade
		Avaliar os riscos ao meio ambiente e a saúde pública caso haja uma possível abertura de célula. Esta avaliação é feita através do Número Mais Provável (NMP) de patogênicos.	
Parâmetro	Metais: Cálcio, Magnésio, Potássio, Amônio, Nitrito e Nitrato. Metais: alumínio, cobalto, ferro, cádmio, chumbo, cobre, cromo, manganês, níquel, zinco e mercúrio.	Coliformes totais e fecais, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Streptococcus faecalis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Clostridium perfringens</i> , aeróbios e anaeróbios totais.	
Método / Técnica / Norma	Técnica de coleta e conservação: CETESB, 1986. Análises: APHA, 1992 (Standard Methods for the Analyses of Water and Wastewaters); Portaria nº 829, de 15 de Fevereiro de 2001 do Diário Oficial nº 35-E; Resolução Número 20 do CONAMA de 1986.	Técnica de coleta e conservação: CETESB, 1986. Análises: Quantitativa e qualitativa de microrganismos de acordo com a Portaria nº 829, de 15 de fevereiro de 2001 do Diário Oficial nº 35-E; Resolução Número 20 do CONAMA de 1986.	De acordo com padrões geotécnicos internacionalmente utilizados
Equipamento	Coletor de líquidos tipo caneca; Espectrofotômetro de absorção atômica; Induced Complex Plasma / Atomic Emission Spectroscopy (ICP/AES).	Coletor de amostras de líquidos anaeróbios (Brito, A.R.. 1999); Laboratório de Genética de Microorganismos, Departamento de Antibióticos da UFPE.	Superficiais: Placas metálicas (0,60m x 0,60m) e haste (0,50m) Em profundidade: Torpedo, tubo guia, imã, chave magnética, sensor
Frequência	Mensal	Mensal	Mensal

3.4.1. Microbiologia (Chorume e Resíduos Sólidos)

Inicialmente será abordada a metodologia aplicada na realização dos ensaios com chorume. Depois será enfocada as adaptações adotadas no caso dos resíduos sólidos. Toda 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 (Universidade Mackenzie-SP).

3.4.1.1. Amostras de Chorume

As amostras foram coletadas na Célula 4 (C4) em diferentes profundidades e ao longo do tempo. A coleta de líquidos foi realizada durante a execução de furos de sondagem SPT utilizando um coletor de amostras anaeróbias a vácuo, equipamento confeccionado no laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE. Após a realização dos furos de sondagem foram instalados piezômetros para coleta de amostras em diferentes profundidades.

Para a análise de quantificação e identificação de microrganismos patogênicos foram realizadas coletas no furo de sondagem SPT1B nas seguintes profundidades: 3,3m, 10m, 14m, 18m, 20m e 23m.

O chorume foi filtrado em papel Whatman nº1 e submetido a diluições sucessivas. As diferentes diluições foram inoculadas em meios de culturas diversos para quantificação dos microrganismos patogênicos.

Para determinação de Coliformes fecais e totais, *Streptococcus fecalis*, *Staphylococcus aureus*, *Clostridium perfringens* e *Pseudomonas aeruginosa* o método utilizado foi o de Número Mais Provável (NMP). 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. A determinação do NMP de microrganismos em uma dada amostra é efetuada a partir da aplicação da técnica de tubos múltiplos. 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 (NMP) através da aplicação de cálculos de probabilidade, (Sanchez, 1999).

O método do NMP é muito utilizado com certos tipos de microrganismos que não são capazes de crescerem em meio sólido para determinações quantitativas (bactérias quimioautotróficas nitrificantes). Bactérias quimioautotróficas são aquelas capazes de fabricar o seu próprio alimento básico utilizando moléculas orgânicas como nitrogênio, enxofre, compostos de ferro e da oxidação do hidrogênio gasoso. Estes compostos orgânicos provêm a sua fonte de energia. Quando os microrganismos a serem identificados devem crescer em meio líquido diferencial, o método do NMP pode também ser utilizado. O método do NMP fornece somente uma estimativa de 95% de probabilidade (Tortora, 2000).

Na Célula 4 foi utilizada a técnica dos tubos múltiplos a partir da diluição de 10^{-1} , uma vez que, nesta diluição houve um crescimento de microrganismos satisfatório para a contagem. Inicialmente, realizou-se para as amostras coletadas diluições sucessivas no intervalo de 10^{-1} a 10^{-6} em água destilada. Destas diluições foram realizados testes em meio presuntivo a fim de selecionar qual a seqüência de diluição a ser utilizada na técnica de tubos múltiplos. A diluição selecionada, (10^{-1}), foi adicionada em três séries de 3 tubos. Cada tubo da primeira série de cinco tubos recebe 10 mL de amostra de inóculo. Cada tubo da segunda série de tubos recebe 1ml de amostra e do terceiro grupo 0,1ml cada. Em seguida, foram verificados os tubos nos quais cresceram os microrganismos e então calculado o NMP.

A Figura 3.3 mostra como é calculado o NMP para os microrganismos das diversas espécies pesquisadas.

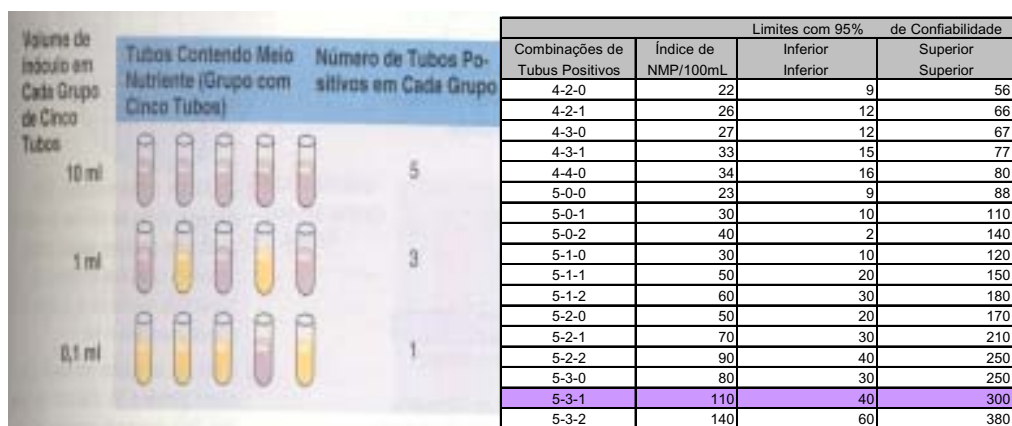


Figura 3.3. Ensaio NMP(Tubos Múltiplos) e Tabela de Conversão de Resultados

A descrição dos ensaios para a determinação dos microrganismos pesquisados, com exceção dos anaeróbios e aeróbios totais, foi embasada de acordo com Sanchez, (1999).

3.4.1.1.1. Determinação de coliformes totais e fecais

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

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 (EC):

Consiste na transferência de cada cultura com resultado presuntivo positivo (acidificação do meio com ou sem produção de gás após 24 ou 48 horas a 35°C), 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. Esta etapa do ensaio reduz a possibilidade de ocorrência de resultados falso-positivos decorrentes da atividade de bactérias esporuladas e de bactérias gram-positivas fermentadoras da lactose.

A Foto 3.2 mostra o ensaio confirmativo para coliformes totais após o período de incubação.



Foto 3.2. Tubos do ensaio confirmativo de coliformes totais

Diferenciação para Coliformes Fecais:

A diferenciação para Coliformes Fecais 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 contendo tubos de Durham invertidos, meio de cultura específico para coliformes fecais (EC) previamente aquecidos a 44°C durante 30 minutos. Em seguida, os inóculos foram levados a estufa a 44°C durante 24 horas. Se ocorre a produção de gás o resultado será positivo para Coliformes Fecais.

3.4.1.1.2. Determinação de *Staphylococcus aureus*

Este ensaio é realizado após a conclusão dos testes de diferenciação de Coliformes Fecais. Portanto, segue-se o ensaio confirmativo para *Staphylococcus aureus*.

Transferiu-se, através de estrias com alça de inoculação, um inóculo de 0,01ml das culturas com crescimento em Meio EC para placas contendo o meio Ágar Manitol. Estas foram incubadas em posição invertida durante 48h a temperatura de 35°C. Após o período de incubação, as colônias típicas apresentavam coloração amarela brilhante.

3.4.1.1.3. Determinação de *Streptococcus fecais*

O ensaio também é processado em duas etapas:

Ensaio Presuntivo:

Consiste na semeadura de volumes determinados da amostra em série de tubos contendo caldo dextrose azida, que são incubados a 35°C durante 24 – 48 horas. A turvação e/ou formação de precipitado no meio é resultado presuntivo positivo para *Streptococcus fecais*, neste ensaio.

Ensaio Confirmativo:

Consiste na transferência de cada cultura com resultado presuntivo positivo para placas de Petri contendo ágar PSE, sendo a incubação efetuada a 35°C, durante 48 horas. A presença de colônias com coloração castanho-enebecida, com halo marrom decorrente da (hidrólise da esculina), constitui resultado positivo neste ensaio, confirmando a presença de *Streptococcus fecais*.

3.4.1.1.4. Determinação de *Pseudomonas aeruginosa*

A determinação do NMP de *Pseudomonas aeruginosa* em uma amostra é efetuada a partir da aplicação da técnica dos tubos múltiplos. O ensaio se processa através de duas etapas:

Ensaio Presuntivo:

Consiste na inoculação de volumes determinados da amostra, em série de tubos de caldo aspargina, que são incubados a 35°C, durante 24-48 horas.

A produção de um pigmento fluorescente esverdeado, evidenciada através da leitura dos tubos sob luz ultravioleta de ondas longas (luz negra), constitui resultado positivo para o ensaio presuntivo.

Ensaio Confirmativo:

Consiste na transferência de cada cultura com resultado presuntivo positivo para caldo acetamida, sendo a incubação efetuada também a 35°C durante 48 horas. A alcalinização do meio, evidenciada pela sua coloração púrpura, constitui resultado confirmativo positivo para a presença de *Pseudomonas aeruginosa* (Foto 3.3).



Foto 3.3. Resultado confirmativo em meio caldo acetamida para *Pseudomonas aeruginosa*

3.4.1.1.5. Determinação de *Clostridium perfringens*

A determinação do número mais provável (NMP) de *Clostridium perfringens*, nas amostras foi efetuada a partir da aplicação da técnica de tubos múltiplos em duas etapas:

Ensaio Presuntivo:

Consiste na inoculação de volumes determinados da amostra em série de tubos de meio diferencial enriquecido para clostrídios (DRCM) tubos esses que são incubados em jarras de anaerobiose a 35°C, durante 48 horas. O enegrecimento do meio de cultura é uma prova presuntiva positiva para a presença de *Clostridium perfringens*.

Ensaio Confirmativo:

Consiste na transferência de cada cultura dos tubos de meio diferencial enriquecido para clostrídios com resultado presuntivo positivo para um tubo correspondente contendo o meio de leite tornassolado. Os tubos são incubados a 35°C, durante 48 horas. A formação de coágulos, rompidos pela grande quantidade de gás formada, e a acidificação do meio constituem uma prova confirmativa positiva para a presença de *Clostridium perfringens* (Foto 3.4).

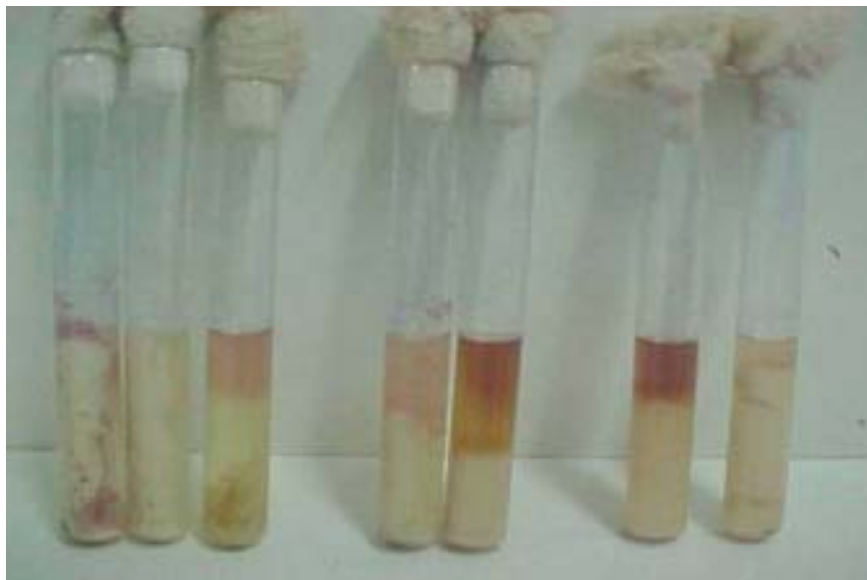


Foto 3.4. Ensaio confirmativo em meio de leite tornassolado de *Clostridium perfringens*

3.4.1.1.6. Anaeróbios e Aeróbios Totais

3.4.1.1.6.1. Semeadura de Anaeróbios Totais

O cultivo de bactérias anaeróbias apresenta um problema especial. Como o contato com o oxigênio pode causar a morte de bactérias anaeróbias, deve-se utilizar para o seu crescimento meios de cultivos especiais denominados meios redutores. Estes meios contêm reagentes como o tioglicolato de sódio que é capaz de se combinar com o oxigênio dissolvido eliminando este elemento do meio de cultura. O crescimento e sua manutenção rotineira de cultura de anaeróbios obrigatórios é realizado pelos microbiologistas em meio redutor colocado em tubos contendo tampas seladoras. Para a eliminação do oxigênio dissolvido estes tubos são aquecidos imediatamente antes de sua utilização.

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 (inserido N₂ líquido e eliminado O₂) durante 25 minutos. Posteriormente, foram autoclavados por 15 minutos a 121°.

Preparação do Meio Tioglicolato

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

Inóculo:

Com uma seringa foi retirado dos frascos que continha as amostras de chorume 0,5 ml da amostra em condições anaeróbias, sendo este adicionado em um frasco de TRD. Do frasco ao qual foi adicionado 0,5ml de amostra foi retirado 0,5ml para um próximo frasco de TRD e assim, sucessivamente, até serem selecionadas as diluições que favoreceriam o crescimento, as quais foram 10⁻⁴ a 10⁻⁶. 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 (3 repetições para cada tubo selecionado). 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 (Foto 3.5).



Foto. 3.5. Ensaio para Anaeróbios Totais

Contagem de anaeróbios totais:

Após o período de 96 horas descrito anteriormente, 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.

3.4.1.1.6.2. 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.

Inóculo

A amostra de chorume foi diluída em tampão fosfato até 10^{-5} . Das diluições 10^{-3} a 10^{-5} 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 37°C, durante 48 horas. Em seguida realizada a contagem do número de colônia.

Contagem de aeróbios totais (Ensaio realizado em 2001 e 2002)

Após o período de 48 horas descrito anteriormente, verificou-se em qual diluição foi possível fazer a melhor contagem de organismos em placas (triplicatas). Posteriormente, na diluição escolhida, fez-se o cálculo efetuando-se a média do número de colônias das três placas multiplicado pela diluição correspondente.

Contagem de aeróbios e anaeróbios totais (Ensaio realizado em 1999 e 2000)

O método de contagem em placa é a técnica mais utilizada na determinação do tamanho de uma população bacteriana. A grande vantagem deste método é que as células viáveis são quantificadas. A desvantagem pode ser considerada o tempo, em geral 24 horas, para o aparecimento das colônias visíveis em placa.

3.4.1.2. Amostras de Resíduos Sólidos

As amostras sólidas foram diluídas em água destilada na proporção de 10% (peso/volume), seguido de diluições sucessivas. Este procedimento foi utilizado a fim de viabilizar a realização dos ensaios com amostras sólidas. A metodologia aplicada foi a mesma utilizada para as amostras líquidas descritas no item 3.4.1.1.

3.5. Fitotoxicidade (Chorume e Resíduos Sólidos)

A Tabela 3.3 mostra o resumo da técnica e os parâmetros utilizados nos ensaios de fitotoxicidade, o qual tem como finalidade avaliar o grau de toxicidade do chorume e do resíduo sólido.

Tabela 3.3. Ensaio de Fitotoxicidade: Líquidos e Resíduos Sólidos

Monitoramento do Processo de Operação e Manutenção: Ensaio de Fitotoxicidade: Líquidos e Resíduos Sólidos		
Controle da Célula	Líquidos	Resíduos Sólidos
Objetivo	Verificar o grau de toxicidade em profundidade	Verificar o grau de toxicidade em profundidade
	Avaliar os riscos ao meio ambiente e a saúde pública, caso haja uma possível abertura de célula	Avaliar os riscos ao meio ambiente e a saúde pública, caso haja uma possível abertura de célula.
	Acompanhar a evolução do processo de biodegradação dos resíduos em profundidade.	Acompanhar a evolução do processo de biodegradação dos resíduos em profundidade.
Parâmetro	Germinação e comprimento da raiz de repolho (<i>Brassica oleraceae</i>)	Germinação e comprimento da raiz de repolho (<i>Brassica oleraceae</i>)
Método / Técnica / Norma	De acordo com Tiquia <i>et al.</i> , (1996)	De acordo com Tiquia <i>et al.</i> , (1996)
Equipamento	Estufa BOD	Estufa BOD
Frequência	Anual	Anual

Os procedimentos dos ensaios de fitotoxicidade foram de acordo com Tiquia *et al.*,(1996). Os ensaios de fitotoxicidade foram realizados com as amostras retiradas nas profundidades de 3,5, 10, 14, 18, 20 e 23m. Cada amostra foi repetida em 3 placas, bem como, as placas controle (Triplícatas), as quais foram utilizadas para referência em relação às outras. As placas-controle foram utilizadas após serem realizados os ensaios com um grupo de amostras. Foram utilizadas sempre 3 placas controle, independentes do número de amostras feitas no dia de ensaio.

Para os ensaios de fitotoxicidade, utilizaram-se amostras concentradas (10^0) e diluídas (10^{-1}) de resíduos sólidos e chorume. Posteriormente as amostras foram filtradas e acondicionadas em placas de Petri sobre papel filtro duplo (Foto 3.6).

Para o bioensaio foram utilizadas sementes de repolho (*Brassica oleraceae*) em placas de Petri para cada amostra de chorume e resíduos sólidos. Em cada placa foram

semeadas 20 sementes. Cada diluição, tanto das amostras de resíduos como das de chorume, foi feita em triplicata. Foram utilizadas placas controle para cada grupo de amostras. As placas controle foram realizadas em triplicatas contendo água destilada. Todas as placas foram incubadas em B.O.D. a 22°C, durante 5 dias. Ao final deste período as sementes germinadas foram contadas, bem como medido o comprimento das raízes. Os valores computados foram obtidos em relação as placas controle.



Foto 3.6. Ensaio de fitotoxicidade: sementes germinadas e comprimento de raiz

Para a determinação dos parâmetros a serem analisados para os testes de fitotoxicidade foram aplicadas as equações (3.1) e (3.2):

Germinação Relativa da Semente (GRS):

$$GRS (\%) = \frac{\text{número de sementes germinadas}}{\text{número de sementes germinadas no controle}} \times 100 \quad (3.1)$$

Crescimento Relativo da Raiz (CRR):

$$CRR (\%) = \frac{\text{média do comprimento da raiz}}{\text{média do comprimento da raiz do controle} \sqrt{\text{crescimento da raiz do controle}}} \times 100 \quad (3.2)$$

3.6. Metais (Chorume e Resíduos Sólidos)

A determinação de metais foi realizada para amostras de resíduo e chorume de acordo com APHA/AWWA/WEF (1992) – *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

Segundo Lima *et al.*, (2002), as amostras foram preservadas com HNO₃, digeridas de acordo com o método 3030 do *Standard Methods for the Analyses of Water and Wastewaters* e analisadas por ICP/AES (Induced Coupled Plasma / Atomic Emission Spectroscopy).

As soluções então obtidas foram analisadas para a determinação dos metais traços (Ag, Al, As, Ba, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn) usando um modelo ICP/AES (TJA, model IRIS/AP – Sistema óptico com detector no estado sólido/Axial Plasma: plasma horizontal), com os seguintes parâmetros operacionais: nebulizador concêntrico tipo Burgener; nebulizador de pressão, 32 psi; fluxo de argônio para resfriamento, 14l/min⁻¹; fluxo de argônio auxiliar, 1,5l/min⁻¹; potência para ascender o plasma, 1150kW; sistema óptico, tipo Echelle.

As análises quantitativas da curva de calibração foram obtidas usando soluções de elementos simples contendo 1000mg /l de Ag, Al, As, Ba, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn.

3.7. Umidade e Sólidos Voláteis (Resíduos Sólidos)

Foram utilizadas as determinações do teor de sólidos voláteis e da umidade para acompanhar indiretamente a evolução do processo de biodegradação dos resíduos.

3.7.1. Coleta e Preservação das Amostras (Resíduos Sólidos)

O procedimento foi realizado de acordo com NBR 10007 - Amostragem de Resíduos Sólidos, 1987.

3.7.1.1. Ensaio de Umidade (Resíduos Sólidos)

Para determinar o teor de umidade foi consultada a norma NBR 6457-Preparação para Ensaio de Caracterização, 1986.

O teor de umidade é dado pela equação 3.3.

$$WR\% = \frac{\textit{peso inicial} - \textit{peso final}}{\textit{peso final}} \times 100 \quad \text{Eq. (3.3)}$$

3.7.1.2. Ensaio de Sólidos Voláteis (Resíduos Sólidos)

O ensaio do teor de sólidos voláteis foi realizado segundo WHO, (1979).

3.8. Temperatura

Para o acompanhamento das temperaturas existentes no interior da massa de lixo foram instalados Termopares tipo k em diferentes profundidades e foram feitas leituras mensais com o uso de Termômetro digital. A instalação dos termopares foi feita após a realização de furos de sondagem SPT na Célula 4, sendo colocados em profundidade pré-definidas (Jucá *et al.*, 2002).

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E ANÁLISES

4.1. Resultados e Análises de Recalques

Os resultados apresentados serão analisados quanto ao o comportamento dos recalques associados à degradação microbiana, condições climáticas, parâmetros físico-químicos e toxicidade.

A Célula 4 do Aterro da Muribeca é bastante heterogênea em relação à idade do lixo aterrado. As camadas iniciais de aterramento (profundidade 15m a 29m) têm idade de 16 anos (1987 a 2003), (Tabela 4.1). As camadas superiores (profundidades 0 a 15m) têm idades de 5 anos (1998 a 2003). De 1985 a 1994 simplesmente se colocava o lixo a céu aberto em diversos pontos do Aterro da Muribeca. Em 1994 começou a recuperação do lixão à Aterro Sanitário. A Célula 4 tem disposição de lixo em tempos distintos Em 1987 houve a disposição de lixo na Célula 4 a uma espessura de 14m e, no mesmo ano, encerrou-se a disposição de lixo nesta Célula. Em 1998 uma sobrealtura de 15m de lixo foi novamente colocada perfazendo uma altura total de até 29m de lixo. Vale salientar que esta foi a altura máxima encontrada nos perfis de sondagem realizados na Célula 4, porém encontrou-se espessuras variáveis ao longo deste Célula.

Tabela 4.1. Idade do lixo aterrado

Célula 4		
Profundidade (m)	Idade	Ano de Disposição
0 a 15	5 anos (1998-2003)	1998
15 a 29	16 anos (1987-2003)	1987

A camada de cobertura dessa Célula também tem espessura bastante variável. Esta camada possui espessuras que variam de 0,20m a 1m. Para efeito dos cálculos de recalques totais e deformações específicas considerou-se apenas o deslocamento da camada superior, ou seja, o deslocamento dos 15m superiores de lixo. Os 14m abaixo daquela camada foram considerados como uma massa praticamente bioestabilizada, portanto, com deslocamentos verticais muito pequenos ou desprezíveis. Assim não serão considerados para efeito de calculo de deformação específica total máxima da massa de lixo da Célula 4.

Os recalques superficiais na Célula 4 do Aterro da Muribeca foram medidos semanalmente num período em torno de 3 anos (jun/99 a ago/02). Entretanto, a partir de março de 2001 até agosto de 2002, não houve medições por problemas operacionais. Neste mês foi feita a última leitura dos valores de recalques.

Para as medições de recalques em profundidade o período de medição também foi em torno de 3 anos (ago/99 a ago/02). Todavia, durante este período no intervalo de maio de 2001 a outubro de 2001, não houveram medições de recalques nas aranhas, também devido, a também, problemas operacionais.

No período de instalação da instrumentação (placas e aranhas) da Célula 4 a idade da massa de lixo já se encontra bastante avançada, mostrando que já ocorreram as etapas de recalque imediato e primário. Portanto, as análises serão feitas baseadas nos recalques secundários.

As análises dos recalques foram feitas de acordo com os seguintes itens:

- Análise geral dos recalques superficiais e em profundidade;
- Análise do comportamento dos recalques: aspectos mecânicos, biodegradativos e climáticos;
- Analogia entre os recalques e parâmetros físico-químicos.

4.2. Análise geral dos recalques superficiais e em profundidade

De um modo geral, os recalques superficiais (placas) e em profundidade (aranhas) observados tiveram um comportamento semelhante com o passar do tempo. Foi verificado, também, como já esperado, que espessuras maiores induzem a recalques igualmente mais elevados. Isto foi observado principalmente nos recalques medidos através das placas (Figuras 4.1 e 4.2).

Os recalques, tanto superficiais como profundos, tiveram uma redução em sua magnitude e velocidade com o tempo, (Figuras 4.3 a 4.6), como já era esperado. Vale salientar que ocorrem variações nas magnitudes e velocidades dos recalques tanto superficiais como em profundidade quando se comparam as placas entre si e as aranhas também entre si, devido à heterogeneidade do material e variações de espessuras ao longo da Célula.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram as Curvas de isorecalques bem, como a localização das placas na Célula 4. Para elaboração das curvas de isorecalques utilizou-se o software SURFER, versão 7, que utiliza coordenadas cartesianas para localização das placas de recalques juntamente com os dados de recalques. Estes dados de entrada são lançados no programa e este, automaticamente, traça as curvas que possuem os mesmos valores de recalques.

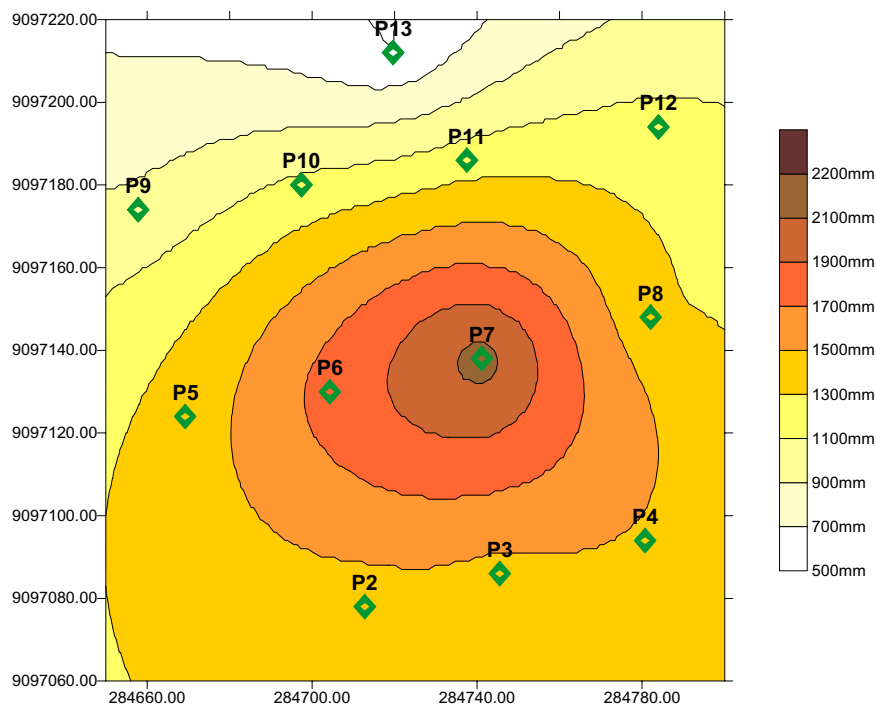


Figura 4.1. Curvas de isorecalques na Célula 4

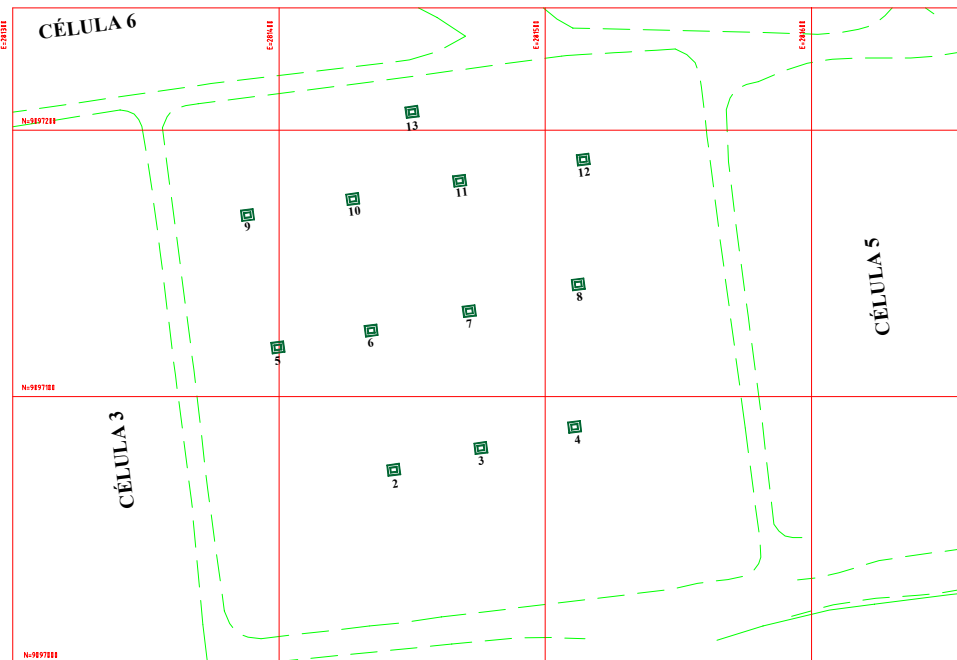


Figura 4.2. Localização das placas de recalques (Célula 4)

Nota-se, claramente, que os recalques são maiores no centro da Célula 4, o que condiz com o esperado. No centro da Célula 4, teoricamente tem-se as maiores espessuras de lixo, portanto maior quantidade de matéria orgânica e prováveis taxas de degradação mais significativas. Conseqüentemente maiores serão os valores de recalques. Nas bordas da célula de lixo tem-se menores espessuras de lixo devido à proximidade dos taludes, portanto é de se esperar que se tenha os menores valores de recalques. O menor valor de recalque foi observado na Placa 13 (500mm), justamente onde se tem a menor espessura de lixo. O maior valor de recalque foi observado na Placa 7 (2185mm) que se encontra no centro da Célula.

Analisando o comportamento geral dos recalques em profundidade, (Figura 4.4 Apêndices), as aranhas localizadas mais superficialmente apresentaram os maiores recalques, decrescendo gradualmente enquanto a profundidade foi aumentando. Isto se deve às maiores espessuras de lixo e à presença de resíduos mais recentes nas camadas superiores. As Aranhas 5 e 6 que estão localizadas em profundidades maiores (Aranhas 5 -

23m e 6 - 26m) mostram que a massa de lixo situada abaixo destas aranhas apresentou recalques discretos no início da medição mas no decorrer do tempo estes recalques foram praticamente nulos. Estas aranhas estão bem próximas da camada de solo que forma a base da Célula 4. Nas camadas mais profundas o estágio de biodegração já está bem avançado, o que poderia explicar os menores recalques, juntamente com as menores espessuras de lixo.

As Figuras 4.5 e 4.6 mostraram a tendência da redução da velocidade dos recalques com o tempo nas placas e aranhas. Nota-se, claramente, que as Placas 6 e 7 possuem maiores velocidade nos recalques. Igualmente as Aranhas 1 e 2 apresentam maiores velocidades nos recalques.

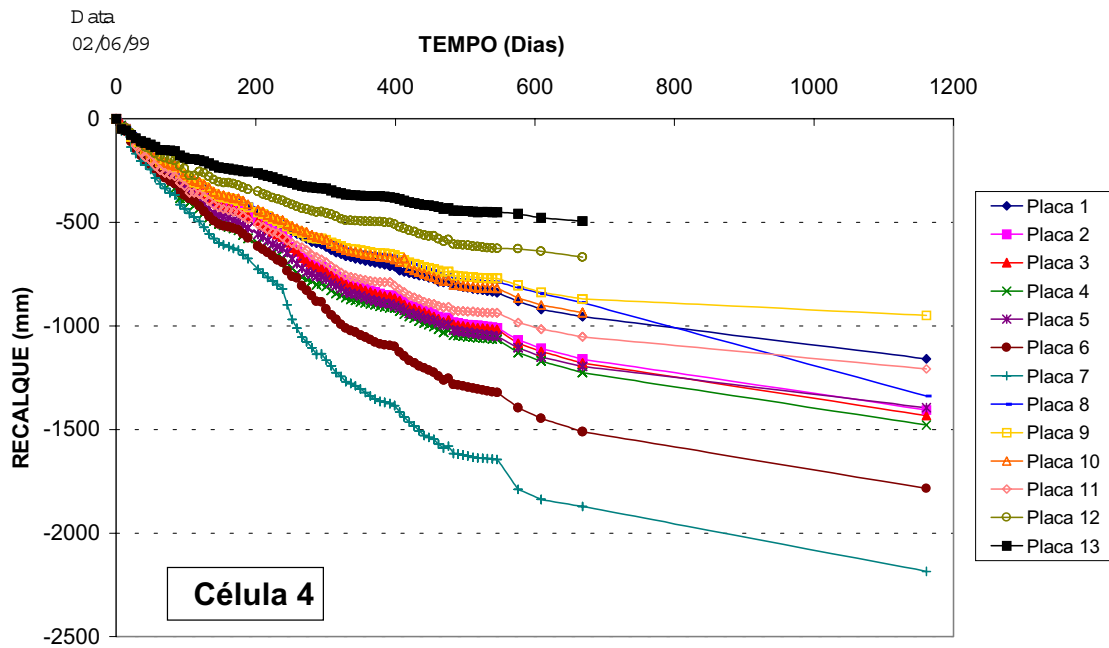


Figura 4.3. Evolução dos recalques superficiais com o tempo (Célula 4)

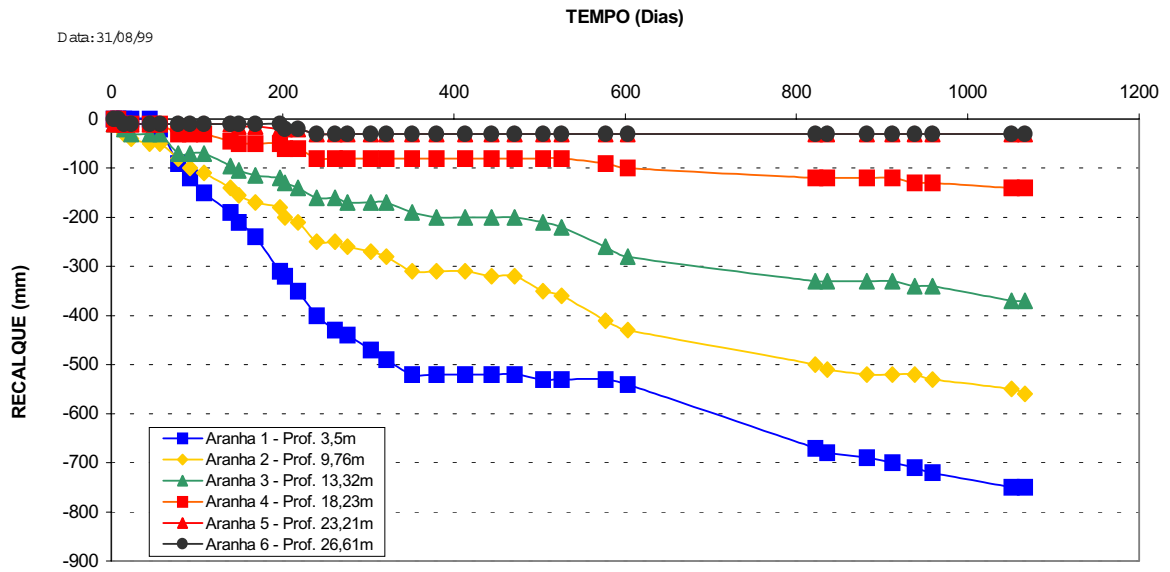


Figura 4.4. Evolução dos recalques em profundidade com o tempo (Célula 4)

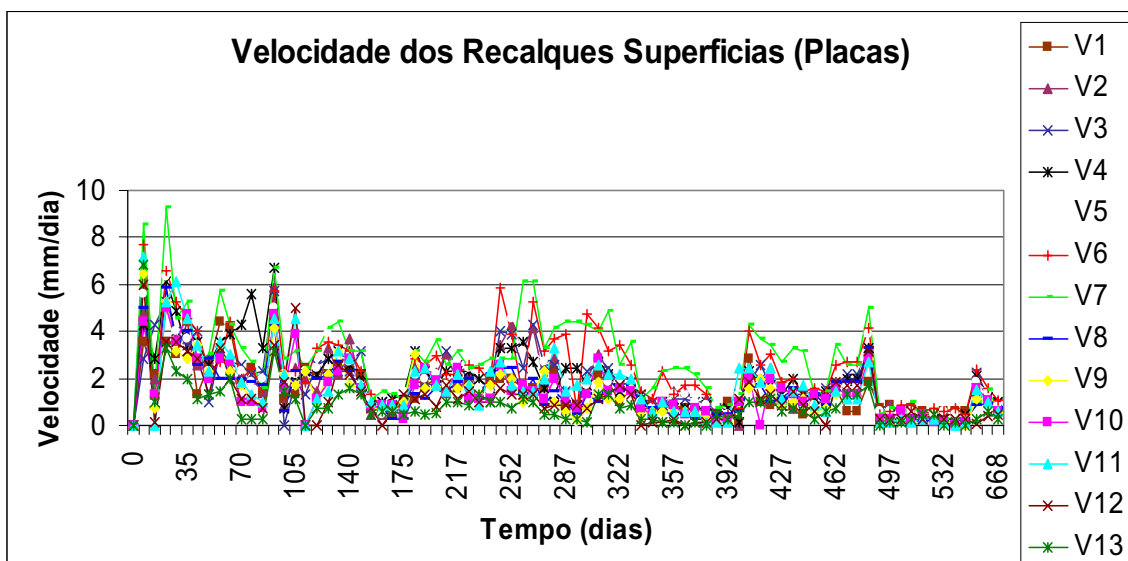


Figura 4.5. Velocidades dos recalques superficiais com o tempo (Célula 4)

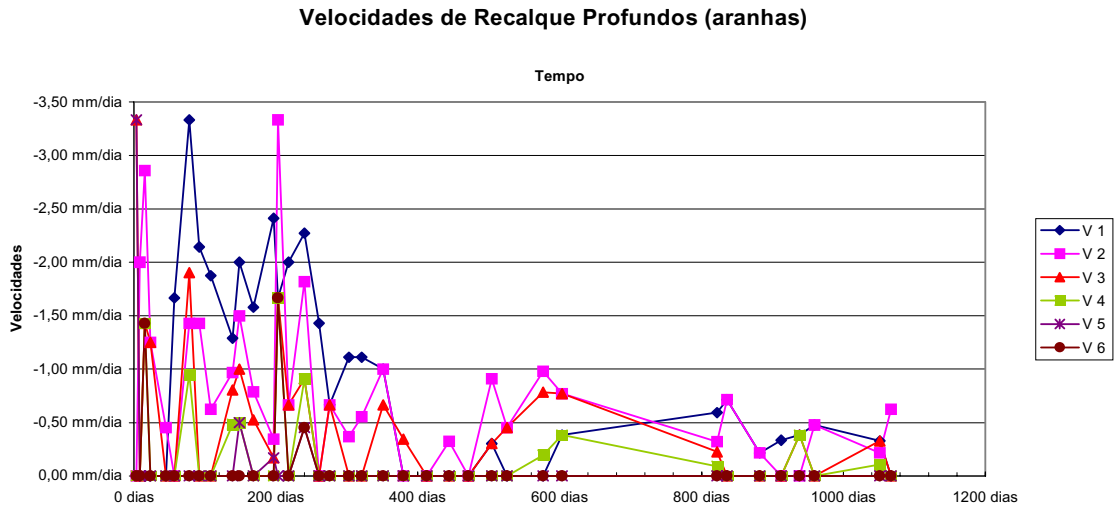


Figura 4.6. Velocidades dos recalques em profundidade com o tempo (Célula 4)

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram as deformações específicas sofridas pela massa de lixo. As deformações específicas observadas nas placas e aranhas, de uma maneira geral, apresentam comportamentos semelhantes, assim como a magnitude e velocidade dos recalques. Existem variações nos valores de deformações obtidos quando comparados às placas e aranhas entre si (Apêndice A).

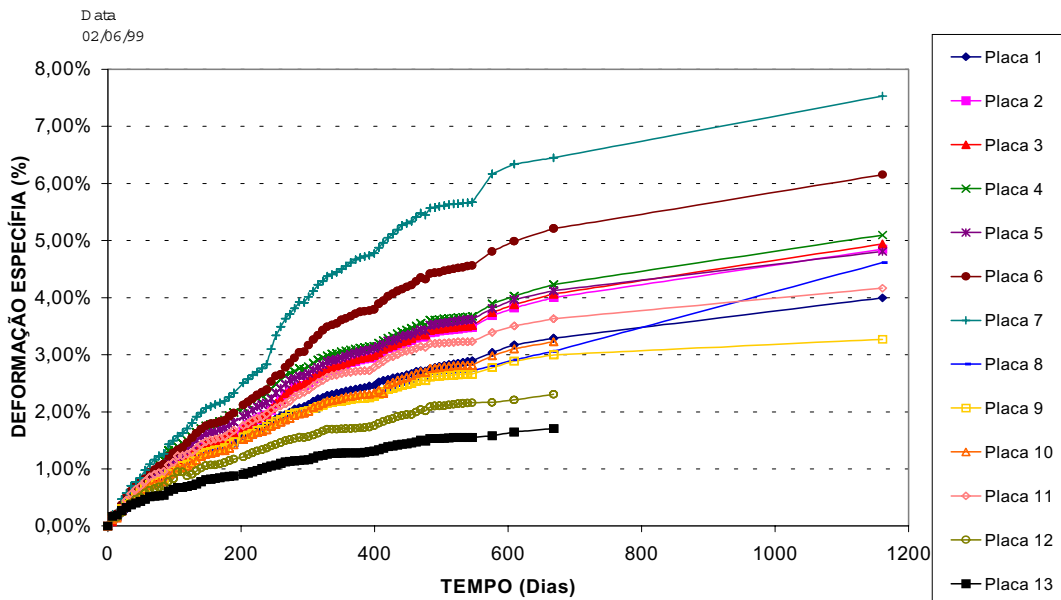


Figura 4.7. Deformação específica ao longo do tempo (Placas)

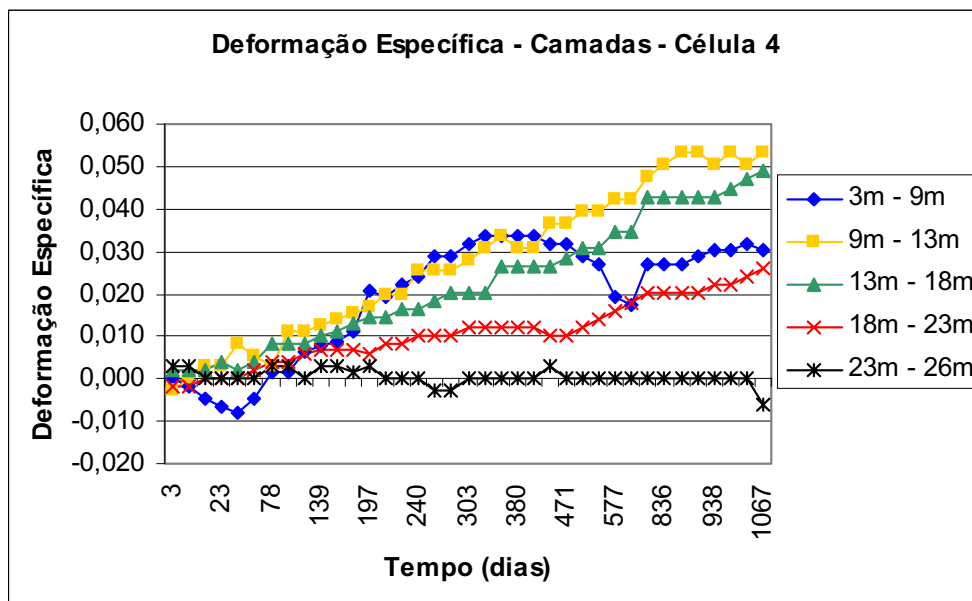


Figura 4.8. Deformação específica de cada camada ao longo do tempo (Aranhas)

Na Célula 4 os 15m superiores de lixo apresentam deslocamentos verticais significativos, pois esta camada possui lixo mais recente, portanto, suscetível a maiores recalques. Como a espessura de 15m superior deve sofrer as maiores deformações, o recalque e a deformação total máxima da Célula 4 serão calculados inicialmente com base nesta camada. Como a camada dos 14m inferiores deve sofrer deformações muito pequenas, tomou-se como referência as deformações observadas na Aranha 4 (profundidade de 18,23m), pois esta aranha está situada próxima à interface, ou seja, entre a massa deslocável e a massa que deve se encontrar bioestabilizada. Tendo em vista que camada dos 14m inferiores possui idade bastante avançada, (16 anos), espera-se que esta massa praticamente não se deforme. Contudo, não se tem informação de medidas anteriores que comprovem que já não há recalques dessa camada. Desse modo, o período de 3 anos de medição de recalques na Aranha 4 foi o ponto referencial. Os resultados encontrados na Aranha 4 mostram um recalque de 140mm para este período de medição, comprovando a bioestabilização da massa, já que este valor de recalque é muito pequeno.

O recalque total máximo (2185mm) da massa de lixo da Célula 4, foi calculado tomando-se como base a Placa 7 que foi a que mais sofreu deformações. Esta placa encontra-se no centro da Célula 4. Para o cálculo do deslocamento vertical máximo da

massa de lixo da Célula 4 subtraiu-se o recalque medido na Placa 7 pelo recalque obtido na Aranha 4 e, posteriormente, dividiu-se o resultado pela profundidade da Aranha 4, obtendo-se um percentual de 11,22%. Tomou-se como referência a Aranha 4, que foi considerada interface entre as duas espessuras de lixo (massa deslocável/massa praticamente bioestabilizada).

As Aranhas e a Placa 7 não estão horizontalmente próximas, mas o que se tentou sugerir é uma indicação do recalque máximo na zona superior (15m). Nos cálculos das deformações específicas para cada camada (recalque da aranha “n” superficial, menos o recalque da aranha “m” subsequente, dividido pela espessura da camada que se queira calcular a deformação específica) focalizou-se o recalque real em cada camada.

O recalque da Placa 9 (948mm) foi tomado como referência, já que esta encontra-se horizontalmente mais próxima das Aranhas. Para o cálculo da deformação específicas da massa de lixo deslocável, subtraiu-se o recalque medido na Placa 9 pelo recalque obtido na Aranha 4 e, posteriormente, dividiu-se o resultado pela profundidade da Aranha 4, obtendo-se um valor percentual de 4,43%. Tomou-se como referência a Aranha 4, que foi considerada interface entre as duas espessuras de lixo (massa deslocável/massa praticamente bioestabilizada).

Esse valor de deformação específica, tomando-se como base a Placa 9, é bastante diferente do deslocamento máximo da Célula 4 que levou em consideração a placa 7. Não se pode dizer que este é o recalque máximo, (Placa 9), mas é uma tentativa de se ter um recalque padrão (aumento de vazios e colapsos). E isto pode ser visto na zona superior a 0-18m. Nas camadas inferiores a deformação é muito pequena, principalmente devido ao lixo ser biologicamente degradado.

Esses valores para recalques estão abaixo dos encontrados por Gandolla *et al.*, (1996b). Entretanto, foram valores foram maiores que os encontrados por Sanches-Alciturri *et al.*, (1995), para o mesmo período de tempo e profundidades semelhantes.

Para efeito de análise dos recalques em profundidade a Célula 4 foi subdividida em camadas dispostas entre o lixo mais recente e o mais bioestabilizado. Essas subcamadas foram divididas em função das aranhas instaladas ao longo da profundidade (Figura 4.9). Para efeito de comparação entre os recalques superficiais e em profundidade, tomou-se como base os recalques medidos na Placa 9, pois essa placa encontra-se localizada mais próxima das aranhas.

O período inicial de medição dos recalques superficiais e em profundidade difere de 90 dias. Para aproximar-se estes períodos e estimar-se as deformações os recalques ocorridos na camada mais superficial da Célula 4, ou seja, 0m a 3,5m (profundidade onde encontra-se localizada a Aranha 1), utilizou-se do método matemático de interpolação linear, já que o primeiro trecho das curvas de recalques tem um comportamento linear (Figura 4.4).

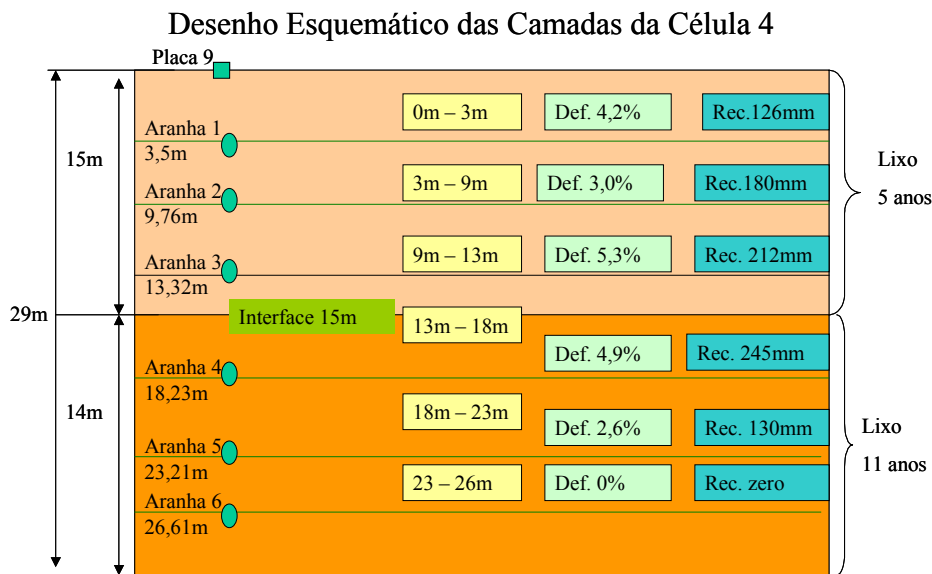


Figura 4.9. Desenho esquemático da Célula 4 mostrando em detalhes as camadas

Observa-se, claramente, na Figura 4.9, que as camadas têm espessuras variáveis e que as deformações específicas totais máximas, bem como as taxas de recalques máximas apresentam também variações. Nota-se que as maiores deformações e recalques ocorrem nas camadas que estão situadas no lixo mais novo, ou seja, nos primeiros 15m. Nas

subcamadas posteriores esses valores reduziram acentuadamente, inclusive, não havendo deslocamentos verticais descendentes, bem como deformações.

A camada que está situada entre 13 e 18m apresentou os maiores recalques, (245mm), durante o período de medição, enquanto a camada que está situada entre 9 a 13m apresentou as maiores deformações específicas (5,3%). Estes resultados, embora a princípio pareçam contraditórios, resultam das variações de espessura de cada camada, pois a deformação específica depende da espessura da camada. Portanto, nem sempre as maiores deformações estarão acompanhadas dos maiores recalques e vice-versa.

A Equação 4.1 descreve a deformação específica máxima na Célula 4. Como o período de medição dos recalques superficiais foi em torno de 3 anos, tem-se uma deformação máxima de 3,74% por ano (Placa 7).

$$\text{Deformação específica}(\%) = \frac{\text{recalque máximo}}{\text{altura}} \times 100 \quad (\text{Equação 4.1})$$

em que:

recalque máximo = recalque superficial máximo (Placa 7)

altura = altura de lixo deformável

De maneira geral, observou-se que as taxas nas magnitudes de recalques totais foram semelhantes, tanto na Placa 9 como nas aranhas. O recalque máximo medido na Placa 9 foi de 948mm e nas aranhas, em torno de 780mm. Esse valor foi obtido a partir do somatório dos recalques ocorridos em cada camada. Os resultados obtidos são coerentes, já que, apresentam extratos de lixo semelhantes.

Como já foi mencionado, na Célula 4 ocorreram variações entre as magnitudes observadas nas placas. A Placa 7 apresentou as maiores taxas de recalques (2185mm), enquanto a Placa 13 resultou em menores recalques (500mm), (Figura 4.1, 4.3 e Apêndice A). A diferença entre as duas placas girou em torno de 1,20m. Esses resultados mostram

como a espessura da massa de lixo pode influenciar na magnitude dos recalques. Moreda, (2000), relata que recalques diferenciais podem causar danos sérios à camada de cobertura. Na Célula 4 há infiltração de águas pela camada de cobertura, não só devido à má compactação da camada, mas também, possivelmente, devido aos recalques diferenciais que ocorreram na Célula de lixo.

Na Célula 4 os recalques foram os esperados, conforme a literatura. A velocidade de degradação da matéria orgânica foi relativamente rápida. Tal fato poderia ser explicado pela pequena compactação inicial do lixo, possibilitando uma maior velocidade na degradação da matéria orgânica. Também se deve levar em conta que a quantidade de matéria orgânica inicial é de 60%, o que permite recalques maiores e mais rápidos. Moreda, (2000), em seus experimentos, observou que colunas cheias de resíduos com quantidades variadas de compostos orgânicos, papel e plásticos apresentaram recalques com magnitudes diferentes, dependendo da quantidade de inertes e materiais orgânicos presentes em cada coluna. A Coluna 1 com maior quantidade de inertes, (25,37%), e materiais rígidos apresentou recalques primários apenas, dez dias depois de dispostos os resíduos na coluna. Além do mais, os recalques secundários foram pequenos se comparados a Coluna 2 (100% de matéria orgânica). Já a Coluna 2 com maior quantidade de matéria orgânica ,(100%), apresentou recalques primários logo que foram dispostos os resíduos na coluna. Tanto o recalque primário como o secundário na Coluna 2 foram maiores em relação à Coluna 1. Pode-se dizer que a presença de inertes permite redução nos valores de recalques. Isto se dá porque os materiais rígidos e inertes conferem uma certa rigidez às células de lixo.

Outro fator que contribui de maneira benéfica para aos maiores recalques observados inicialmente através das placas e aranhas, foram as condições climáticas favoráveis ao processo de biodegradação que acontece no Aterro da Muribeca, ressaltando elevados índices de precipitação e temperaturas adequadas à atividade metabólica da biota microbiana presente no aterro.

4.3 Análise do comportamento dos recalques: aspectos mecânicos, biodegradativos e climáticos.

A partir das medições de recalques obtidas na Célula 4 no período de 1999 a 2002 foram iniciados estudos referentes a recalques associados à biodegradação. Nas análises realizadas verificou-se três etapas de comportamentos distintos dos recalques tanto nos recalques superficiais, (placas), (Figura 4.10), e, mais visivelmente, nos medidos em profundidades (aranhas), (Figura 4.11). Os resultados mostraram uma relação direta entre aspectos mecânicos, biodegradativos e climáticos.

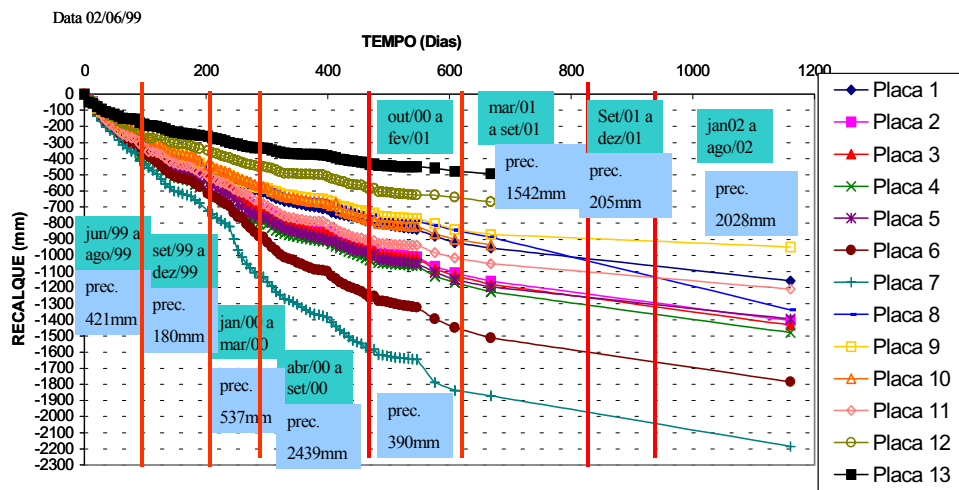


Figura 4.10. Recalques superficiais ao longo do tempo (Célula 4)

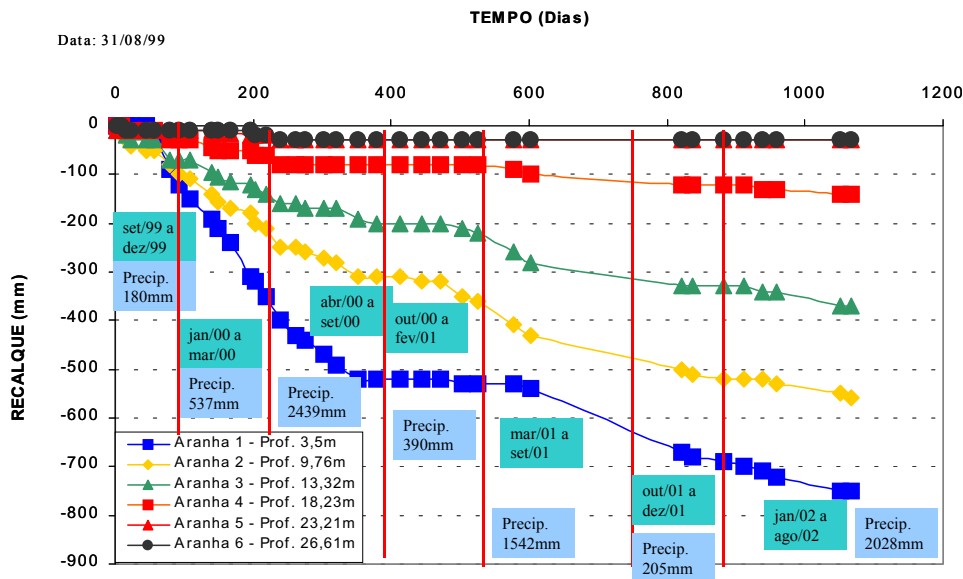


Figura 4.11. Recalques profundos ao longo do tempo (Célula 4)

De acordo com Jucá *et al.*, (2002), na Região Metropolitana do Recife (RMR) o clima, na classificação KOPPEN, é do tipo Ams', com chuvas de monções durante quase todo o ano. Esse clima é quente e úmido, possuindo uma taxa de precipitação pluviométrica anual excedendo a evapotranspiração. A taxa de evapotranspiração real é de 950mm. A umidade relativa é alta, atingindo um valor médio de 80%. A estação chuvosa ocorre no outono-inverno, nos meses de março a agosto, com valores de precipitação variando em torno de 170mm a 360mm mensais, sendo o mês mais seco o de novembro e a média anual em torno de 2200mm.

A Figura 4.12 mostra a variação hídrica no Aterro da Muribeca com o tempo.

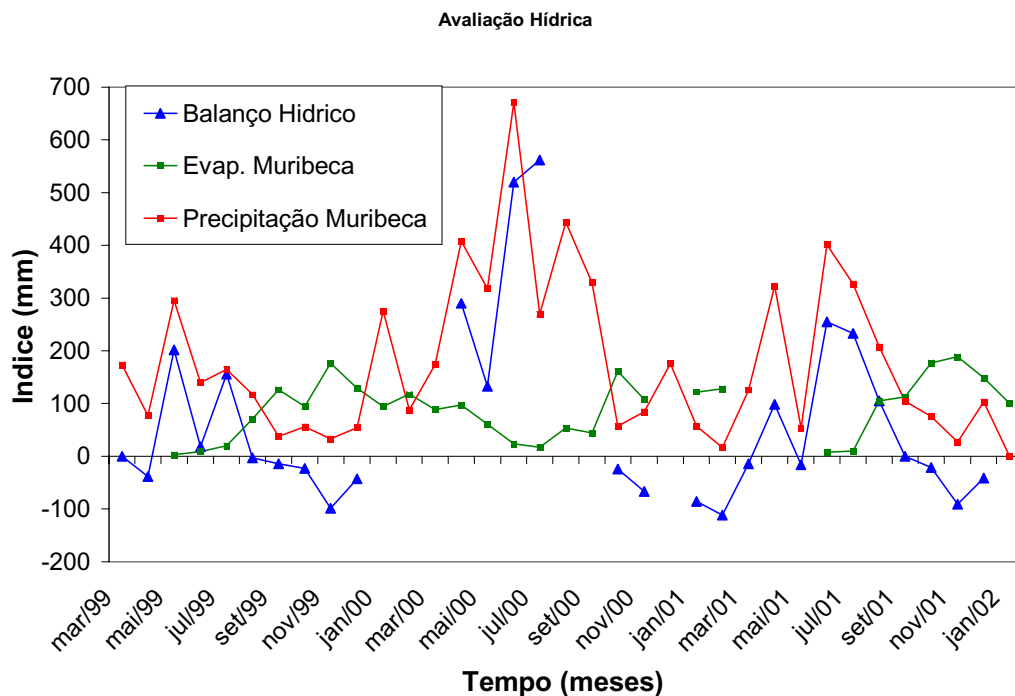


Figura 4.12. Avaliação Hídrica da área do Aterro da Muribeca.

Embora haja uma grande quantidade de chuvas durante o ano inteiro, o que favorece a infiltração de líquidos pela camada de cobertura das células, o teor de umidade do lixo está em torno de 20 a 40%. Isso estimula a biodegradação, conforme Palmisano e Barlaz, (1996). O teor de umidade geralmente não ultrapassa essa faixa, devido a alguns fatores como a topografia local, no qual há uma variação de altitude de 70m acima do nível do mar, (cota mais alta do Aterro), para 10m acima do nível do mar, (cota mais baixa), (Jucá *et al.*, 1996). Esta diferença de altitude permite o escoamento de líquidos na direção da estação de tratamento de chorume e dos rios que circundam o Aterro bem como há um sistema de drenagem anelar que circunda todas as células do Aterro, facilitando a drenagem de líquidos. Entretanto, a drenagem do Aterro da Muribeca é anelar nas vias de acesso. Contudo, não existe um sistema de drenagem na base das Células do Aterro.

A Figura 4.11 mostra, em detalhes que no primeiro trecho das curvas, (primeiros 380 dias), os recalques medidos nas aranhas tiveram deformações mais acentuadas seguido de um período de recalques zero. Passado, este período, novamente ocorre um aumento nas taxas de recalques, embora menores que os recalques iniciais.

No primeiro trecho os recalques foram mais acentuados pelo fato de a Célula de lixo apresentar maior quantidade de matéria orgânica e, portanto, maior carga. De fato, o que acontece é a degradação da matéria orgânica acompanhada do aumento dos vazios. Esses vazios se expandem até um determinado limite, ou seja, até suportarem a carga imposta pelo próprio lixo. Com a degradação da matéria 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 à mudanças de fase.

No primeiro período 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. No caso do Aterro da Muribeca, outro fator que, possivelmente, contribuiu para este período de recalques zero foi a presença de líquidos no interior da Célula. Esses líquidos podem acumular-se nas profundidades maiores devido à intensa precipitação que ocorre nos períodos chuvosos, o que, possivelmente, ocorreu nos meses de abril/2000 a setembro/2000. Este acúmulo de líquidos distribui as tensões de modo uniforme em todas as direções, impedindo o adensamento. Isto é observado nas camadas mais profundas onde se tem o recalque medido pelas aranhas (Aranhas 3, 4 5 e 6). Nota-se que nestas camadas não há recalques por um período maior de tempo. Assim que começam as precipitações intensas os recalques já se tornam menores. As precipitações intensas podem desestabilizar o ambiente microbiano e, conseqüentemente, os recalques secundários serão menores. Os microrganismos diminuem a velocidade de degradação microbiana (cinética) pelo fato de as águas que se infiltram pela camada de cobertura permitirem que o oxigênio também infiltre. O oxigênio extra desestabiliza o meio interno anaeróbio de degradação microbiana, reduzindo assim a cinética de degradação.

Segundo Junqueira, (2000), a entrada extra de oxigênio intoxica as bactérias anaeróbias, além de elevar bruscamente a temperatura do meio, pelo metabolismo microbiano que passa a ser aeróbio. Bactérias anaeróbias são mais sensíveis a mudanças

bruscas na temperatura. E como as bactérias anaeróbias são fundamentais para o surgimento dos recalques sua baixa atividade acarreta menores recalques.

Entretanto, quando se tem o controle da entrada de umidade e nutrientes, pode-se estimular a biodegradação. Segundo McDougall & Philp, (2001), e Moreda, (2000), aterros de RSU podem se comportar como bioreatores por permitirem a entrada de água e nutrientes quando necessário.

Os recalques medidos nas Aranhas 1 e 2 não sofrem interferência significativa e imediata durante as precipitações intensas que ocorreram no período de 200 a 480 dias devido, possivelmente, à maior quantidade de matéria orgânica e principalmente pelo fato de não existir nível de chorume constante nestas profundidades. O período de recalque zero nas camadas superficiais ocorreu principalmente pelo fato de as tensões efetivas serem pequenas e menores que nas camadas subseqüentes.

No período de recalques zero, nos meses de outubro/2000 a fevereiro/2001 embora as precipitações tenham sido pequenas, o que impediu maiores recalques provavelmente foi a quantidade de líquidos acumuladas nas maiores profundidades e um aumento de vazios por um período prolongado. Nas camadas superiores onde a drenagem é mais eficiente as tensões impostas pelo próprio lixo são pequenas para que ocorram deformações rápidas.

O índice de vazios formado no período de recalques zero pode ser até maior que os vazios formados no primeiro período. No primeiro momento em que os recalques são mais acentuados, ocorre a presença de vazios. Estes são, todavia, rapidamente desfeitos pelo fato de as cargas impostas a esses vazios serem grandes. Ocorre, então, a formação sucessiva de vazios seguidos de colapsos também sucessivos. No período de recalques zero os vazios formados possivelmente serão maiores, mas as cargas impostas são menores portanto, maior será o espaço de tempo para que os recalques aconteçam.

Após o período de recalque zero novamente ocorre a aceleração dos recalques. Entretanto esses recalques são menores que no primeiro período. Nessa etapa, os vazios

formados no período anterior já não suportam as cargas impostas, dando origem ao fenômeno de colapso, com recalques mais acelerados nas diversas aranhas estudadas. Nessa fase, apesar de ocorrerem precipitações elevadas, contudo bem menores que o período de abril/2000 a setembro/2000, não foram suficientes para interferir nos mecanismos de recalques.

Os recalques que ocorrem num Aterro de Resíduos Sólidos são bastante complexos. Quando se fala de recalques em aterros costuma-se pensar que eles ocorrem separadamente como acontece em solos. Entretanto, vale salientar que os recalques primários e secundários podem ocorrer juntamente, embora o primário tenha maior expressão nos primeiros 30 dias, (Sowers, 1973, Espinace *et al.*, 2000). Contudo, nos primeiros 30 dias, os recalques secundários poderiam se desenvolver juntamente com os recalques primários, embora muito discretamente. Isto se daria devido aos microrganismos começarem a colonizar o lixo e quase que imediatamente a degradar a matéria orgânica, resultando, desta maneira, em recalques secundários.

Os recalques secundários poderiam ser visto como recalques primários nos solos, uma vez que ocorre a dissipação de líquidos e gases, resultando em deformações. Esta expulsão de líquidos e gases é resultante da conversão da matéria orgânica sólida em líquidos e gases e dissipada pelas tensões impostas na massa de lixo. Como dito acima, afirmar que recalques primários acontecem separadamente dos secundários poderia ser bastante comprometedor, já que no momento que se dispõem o lixo em aterros, grupos de microrganismos (bactérias aeróbias e anaeróbios, fungos, protozoários e vírus) começam a degradar biologicamente os resíduos, conseqüentemente, é difícil diferenciar quando exatamente está acontecendo recalques primários ou secundários. O mais razoável seria dizer que estes podem ocorrer simultaneamente durante a vida útil do aterro.

4.4. Recalques *versus* Condições Climática *versus* Biodegradação

Os recalques secundários em lixo são fruto da degradação microbiana. Qualquer fator que venha interferir na biota microbiana afeta os recalques secundários. Como já

observado nos meses onde a precipitação foi extremamente intensa, os recalques diminuíram, em decorrência disso, a sua velocidade. Segundo Junqueira, (2000), a água proveniente das chuvas carrega consigo oxigênio que está dissolvido. Esse oxigênio está presente numa taxa de 7 a 14mg/l de chuva.

O oxigênio dissolvido na água é capturado por bactérias aeróbias e anaeróbias facultativas aumentando o número desse grupo de organismos. Em alguns casos na Célula 4 do Aterro da Muribeca o número total de microrganismos aeróbios totais supera os organismos anaeróbios (Figura 4.13). Dentre os fatores que contribuem para a entrada de ar no interior das células de lixo pode-se relacionar:

- Drenagem: no início da deposição do lixo há um aprisionamento do ar que fica retido no interior da massa de lixo. Isso se verifica devido à deficiência no sistema de drenagem que não possibilita a passagem do ar para o ambiente externo;
- Efeito da má compactação do lixo: quando o lixo é mal compactado, há maior probabilidade de haver oxigênio retido nos vazios;
- Inversão de fluxo (gradiente de pressão): quando o lixo atinge um certo grau de degradação, a quantidade de gás gerada decresce sensivelmente, diminuindo assim a pressão interna do aterro. Isso pode acontecer nos períodos prolongados de chuvas, época em que a produção de metano decai sensivelmente, embora nesses períodos a taxa na produção de CO₂ aumente. Nesses momentos pode ocorrer a inversão de gradiente para dentro do aterro;
- Entrada de ar pela camada de cobertura (superficial e lateral) por caminhos preferenciais no interior da massa de lixo.

A evolução dos grupos anaeróbios e aeróbios totais com o tempo na Célula 4 do Aterro da Muribeca são mostrados nas Figuras 4.13 e 4.14.

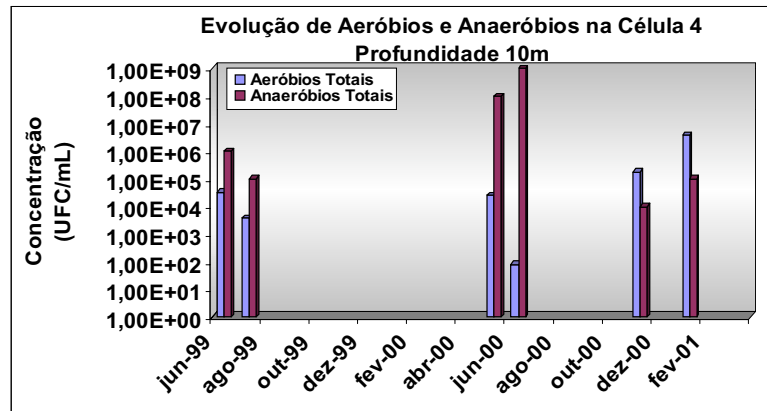


Figura 4.13. Anaeróbios totais e aeróbios totais com o tempo (Célula 4)

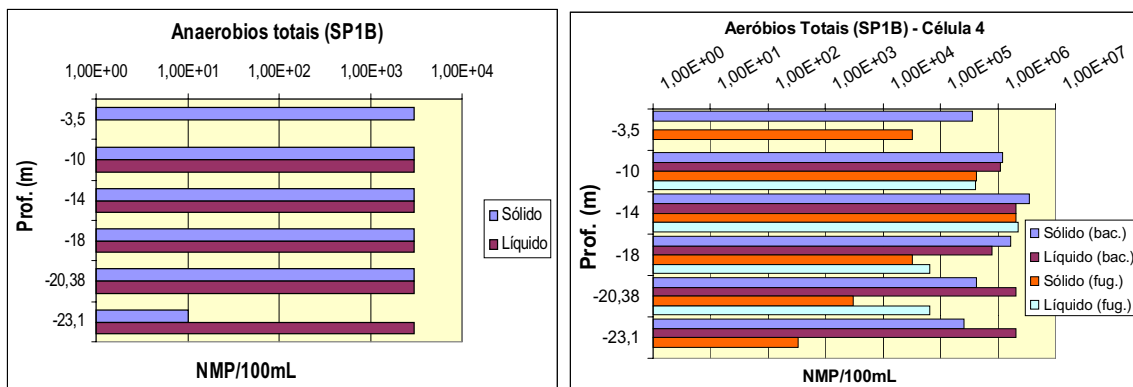


Figura 4.14. Anaeróbios totais e aeróbios totais em profundidade (Célula 4)

Provavelmente o que contribui para valores maiores de organismos aeróbios em relação aos anaeróbios foi a intensa precipitação em janeiro de 2002, durante a coleta das amostras. Além do mais, juntamente com a entrada de líquidos, há entrada de ar por caminhos preferenciais, uma vez que a camada de cobertura apresenta fissuras. Observa-se claramente, nas Figuras 4.13 e 4.14, a presença de microrganismos aeróbios em todas as profundidades, inclusive fungos (Figura 4.14), que só conseguem sobreviver com a presença de oxigênio. Além do mais, o CO₂ proveniente tanto das precipitações como do metabolismo microbiano, afetariam o ambiente anaeróbio das bactérias metanogênicas, pois estes compostos baixariam o pH das células. Se a redução do pH for menor que 6,5 o ambiente interno passa a ser muito desfavorável às bactérias metanogênicas, as quais são as principais responsáveis pela retirada de ácidos nessa fase pelo processo de conversão de compostos secundários em gás metano.

Outro fator que poderia contribuir para essa baixa quantidade de microrganismos anaeróbios é que o incremento das atividades das bactérias aeróbias ou anaeróbias facultativas provoca um aumento nas temperaturas no interior dos montes, em função das atividades exotérmicas desses microrganismos. Variações bruscas de temperaturas podem ocorrer durante a época de chuvas devido à alternância de períodos de chuva e seco. As bactérias anaeróbias são prejudicadas por essas variações de temperatura e por consequência, os recalques.

Numa análise mais detalhada, com o tempo nota-se obviamente, que a ordem de grandeza que expressa a quantidade de microrganismos diminui com o tempo (Figuras 4.13 a 4.15). Quando se tem uma diminuição da matéria orgânica devido à biodegradação, a quantidade de microrganismos também decresce, uma vez que os grupos microbianos dependem da quantidade de fontes nutricionais. É interessante que, em 1999, a ordem de grandeza desses microrganismos era de 10^6 chegando a 10^9 , passando em 2002 a 10^3 e para alguns casos 10^0 . Provavelmente, com a diminuição da matéria orgânica e o acúmulo de outros compostos tóxicos, inclusive subproduto do próprio metabolismo, a quantidade de microrganismos tenha diminuído. Em 1999, quando a ordem de grandeza de microrganismos era maior, também se teve maiores recalques; em 2002 quando a quantidade de microrganismos diminuiu acentuadamente, os recalques também diminuíram. A diminuição na grandeza de microrganismos também é acompanhada pela redução na temperatura. Em 1999, a temperatura alcançava 65°C na profundidade de 10 a 15m, enquanto que em 2002 a temperatura reduziu para 45°C nas mesmas profundidades, (Monteiro *et al.*, 2002). Fazer uma ligação entre a quantidade de microrganismos degradadores de matéria orgânica com a magnitude e velocidade dos recalques é bastante objetiva. Pode-se dizer que há uma correlação estreita entre essas grandezas, pois, à medida que um parâmetro varia, os demais obedecem a mesma relação. Isto foi claramente observado no Aterro da Muribeca, conforme a Figura 4.15. De acordo com a mesma Figura, com o passar do tempo, tem-se uma diminuição dos microrganismos anaeróbios, principais organismos responsáveis pelos recalques e a mesma correspondência acontece com as taxas de recalques, ou seja, os recalques diminuem conforme há uma redução quantitativa dos microrganismos no interior da massa de lixo.

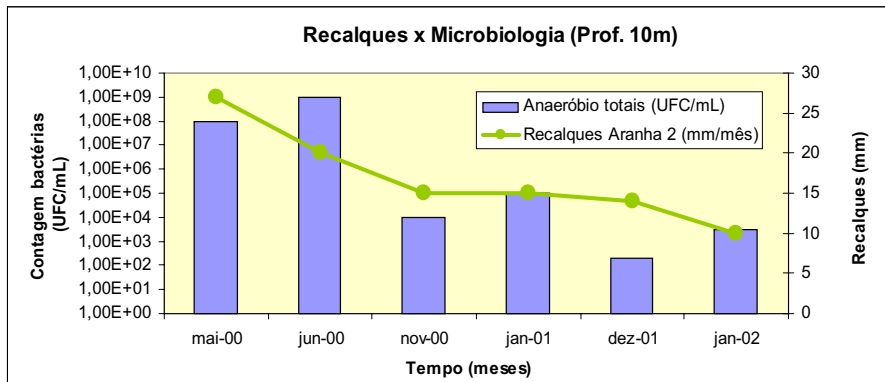


Figura 4.15. Recalques versus microbiologia com o tempo (Célula 4)

Para os ensaios realizados em 2002 o número mais provável (NMP) de anaeróbios totais, de maneira geral, em todas as profundidades no resíduo sólido e chorume ficou na ordem de grandeza de 10^3 (Figura 4.16). Entretanto, para os organismos aeróbios, (Figura 4.18), ocorreram oscilações que variaram de 10^5 a 10^6 tanto no resíduo sólido como no chorume, sendo maiores inclusive que os valores de NMPs registrados para os organismos anaeróbio.

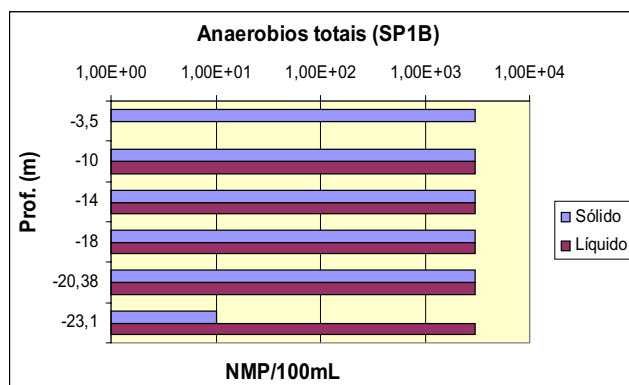


Figura 4.16. Anaeróbios totais com o tempo (Célula 4)

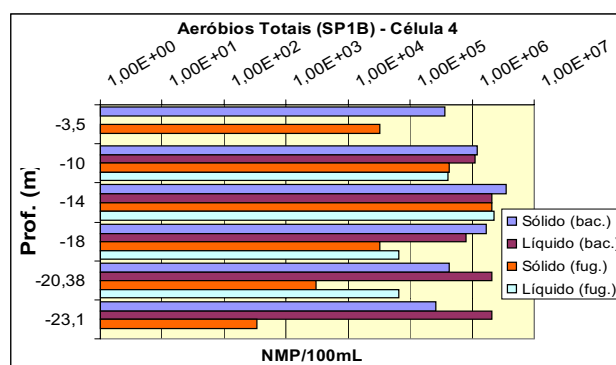


Figura 4.17. Anaeróbios totais com o tempo (Célula 4)

É importante observar que na Figura 4.17 houve desenvolvimento de fungos em todas as profundidades da Célula 4. Fungos são organismos que se desenvolvem em ambientes aeróbios e que degradam celulose, indicando que ocorre a entrada de ar por caminhos preferenciais na massa de lixo.

As Figuras 4.18 a 4.20 mostram os NMPs de microrganismos anaeróbios restritos (*Clostridium perfringens*), e anaeróbios facultativos ou aeróbios (Coliformes) e organismos aeróbios (*Pseudomonas aeruginosa*).

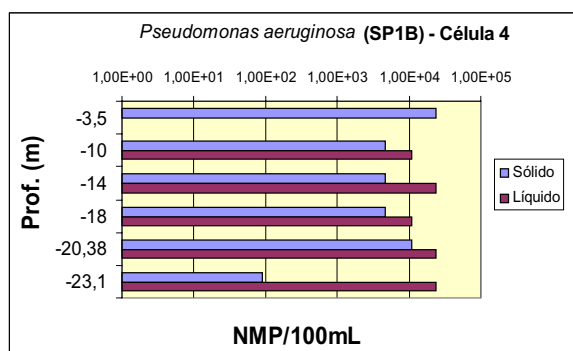


Figura 4.18. *Pseudomonas aeruginosa* (Célula 4)

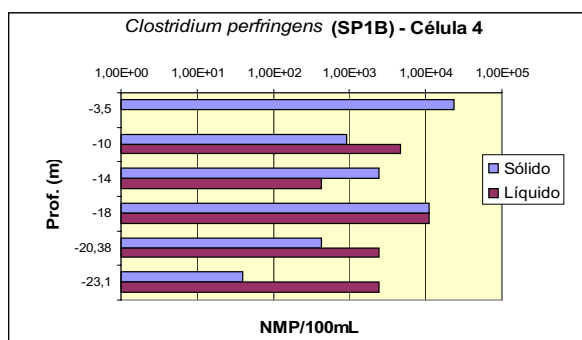


Figura 4.19. *Clostridium perfringens* (anaeróbio) (Célula 4)

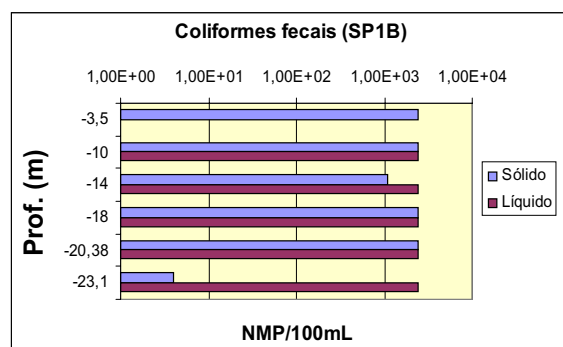
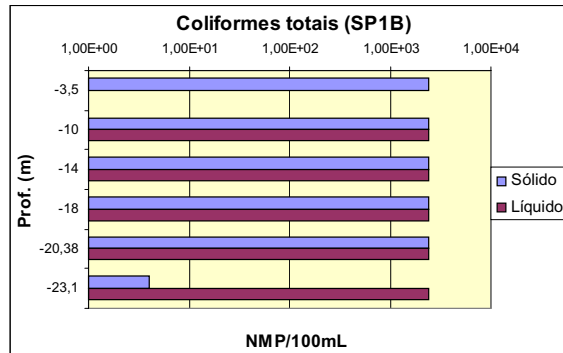


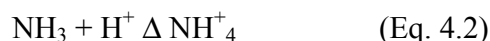
Figura 4.20. Coliformes totais e fecais (Célula 4)

Para os microorganismos pertencentes ao grupo coliformes o NMP foi bastante semelhante. Os coliformes totais e fecais apresentaram um NMP de 10^3 em, praticamente, todas as profundidades. Verificados na literatura esses números são baixos, uma vez que provêm de aterros sanitários. Deve-se salientar que a resolução do CONAMA nº 274 de 29 de novembro de 2000, considera águas impróprias ao contato e recreação quando forem verificados valores superiores a $2,5 \times 10^3$ de organismos do grupo coliformes.

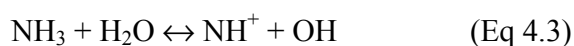
Vários fatores podem ter interferido nos valores obtidos de NMP para os diferentes organismos presentes na Célula 4 do Aterro da Muribeca. Além do oxigênio proveniente das águas infiltradas, outros parâmetros poderiam ter contribuído para o baixo índice de bactérias anaeróbias metanogênicas. Esse grupo bacteriano poderia ser inibido, também, pela alta concentração de amônia.

A amônia é gerada pela própria decomposição da matéria orgânica. As proteínas na fração orgânica do lixo aterrado são convertidas em grande parte para amônia pela ação de bactérias heterotróficas em condições anaeróbias ou aeróbias. A toxicidade da amônia,

segundo Junqueira, (2000), está relacionada ao estado que ela se encontra. A amônia livre (não iônica) é tóxica ao contrário do íon amônia (Equação 4.2), sendo a relação de ambas controlada pelo pH e concentração.



O mesmo autor afirma que elevados teores de amônia elevam o pH e CO_2 e ácidos graxos diminuem o pH, cátions gerados de alcalinidade, como os íons de nitrogênio amoniacal, tendem a elevar a alcalinidade e o pH do meio a partir da seguinte reação (Eq. 4.3):



A amônia livre na forma de gás (NH_3) é muito mais tóxica do que o íon amônia, principalmente em condições de pH elevado (acima de 8), quando o equilíbrio da reação se desloca quase totalmente para a esquerda. Contudo, as concentrações de nitrogênio amoniacal muito elevada (acima 15 mg/l) independem do pH, passando a ser tóxico para as bactérias metanogênicas inibindo as suas atividades. Dever ser ressaltado que a atividade ótima dos grupos microbianos metanogênicos presentes na massa de lixo se dá em pH variando de 6,8 e 7,4, (Lima, 1988). Na Célula 4 do Aterro da Muribeca o pH ficou na faixa de 8 e grandes quantidades de amônia foram encontradas o que poderia justificar baixo NMP para organismos anaeróbios.

Na Célula 4, durante a coleta de janeiro de 2002, não foi detectado metano pelo medidor de gás, sugerindo um ambiente tóxico para as bactérias metanogênicas. Também foram verificadas que as a concentração de metais como Ca, Na, K e Mg foram baixíssimas se comparadas à literatura internacional. Segundo Lima, (1994), microrganismos que atuam durante a hidrólise e a fermentação reduzem as suas taxas de crescimento quando há deficiência de nutrientes. No entanto, esta carência de nutrientes não ocasiona severas implicações no processo degradativo, pois esses microrganismos, normalmente, têm altas taxas de crescimento. Todavia, tratando-se dos microrganismos metanogênicos, pequenas limitações de nutrientes podem causar grandes instabilidades no processo. Essa pequena

quantidade de nutrientes provavelmente contribui para o baixo número de organismos dos vários grupos existentes na Célula 4. A Tabela 4.2 mostra as concentrações de cátions exigidas por microrganismos metanogênicos.

Tabela 4.2. Concentrações de cátions exigidas por microrganismos metanogênico

Cátion (mg/L)	Estimulante	Moderadamente inibidor	Fortemente inibidor
Sódio	100 – 200	3500 – 5500	8000
Potássio	200 – 400	2500 – 4500	1200
Cálcio	100 – 200	2500 – 4500	8000
Magnésio	75 – 150	1000 – 1500	3000
Amônia total	50 – 200	1500 – 3000	3000

Fonte: McCarty e McKinney

Vale ressaltar que, de maneira geral, o NMP dos vários grupos foi baixo se comparados à literatura, (Resolução nº 274 CONAMA, 2000). Tal fato é bastante interessante, uma vez que a Célula 4 é bastante nova se comparada a outras células dispostas no Aterro da Muribeca.

A umidade excessiva também é um fator negativo na atividade dos organismos como um todo. A atividade microbiana ótima se dá numa faixa de umidade que varia de 20 a 40% segundo Palmisano & Barlaz, (1996). Portanto, chuvas excessivas tendem a elevar essa taxa de umidade interna do lixo, prejudicando a atividade metabólica dos organismos. Nos períodos de chuvas intensas o teor de umidade apresentou uma tendência ao aumento, principalmente nas maiores profundidades (Figura 4.21).

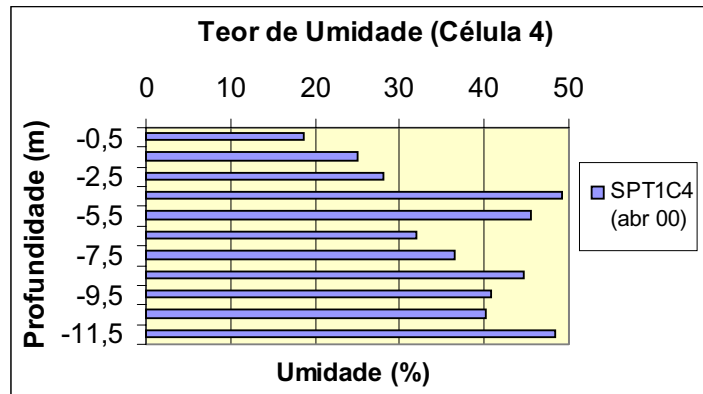


Figura 4.21. Teor de umidade com a profundidade (abril/00) - Célula 4

Como dito acima, vários fatores contribuíram para os baixos números de microrganismos. As condições climáticas, camada de cobertura com fissuras, carência de nutrientes, pH e agentes tóxicos contribuíram para os valores baixos de NMP.

4.4.1. Parâmetros Físicos químicos.

A biota microbiana que degrada a matéria orgânica tem sua atividade metabólica aumentada ou diminuída quando o seu habitat sofre variações. Essas variações podem ser benéficas, aumentando a velocidade de degradação microbiana, ou maléfica, diminuindo a velocidade de degradação microbiana. Qualquer fator que altere as condições ótimas das atividades metabólicas dos microorganismos por consequência interfere na magnitude e na velocidade dos recalques. Portanto, avaliar parâmetros físico-químicos, condições climáticas, quantidade de matéria orgânica, umidade entre outros, deve ser uma prática. Estes parâmetros são ferramentas que auxiliam no entendimento do comportamento da atividade microbiana numa célula de lixo e, como medidas a fim de melhorar esta atividade, podem ser tomadas.

4.4.2. DBO e DQO.

A demanda química de oxigênio (DQO) é um teste utilizado com a finalidade de medir a quantidade de oxigênio necessária para a oxidação da matéria orgânica e das substâncias inorgânicas presentes no despejo líquido por ação de um poderoso agente

oxidante químico. Assim, pode-se dizer que, por analogia, a variação da DQO em relação ao tempo de aterramento expressa, de forma indireta, o rendimento da atividade microbiana ativa. Essa afirmação é suportada na premissa de que a variação da DQO em relação ao tempo de aterramento é função da atividade microbiana específica. A matéria orgânica presente nos resíduos é oxidada por ação enzimática microbiana. Assim, medir o comportamento da DQO ao longo do tempo, significa aferir, indiretamente, a atividade microbiana.

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) expressa a quantidade de matéria orgânica presente no chorume. A análise de DBO mostra a quantidade de oxigênio requerida por microrganismos para a oxidação e estabilização da matéria orgânica biologicamente degradável (Eckenfelder, 1991).

A Figura 4.22 mostra a variação dos índices de DQO e DBO com o tempo (Célula 4)

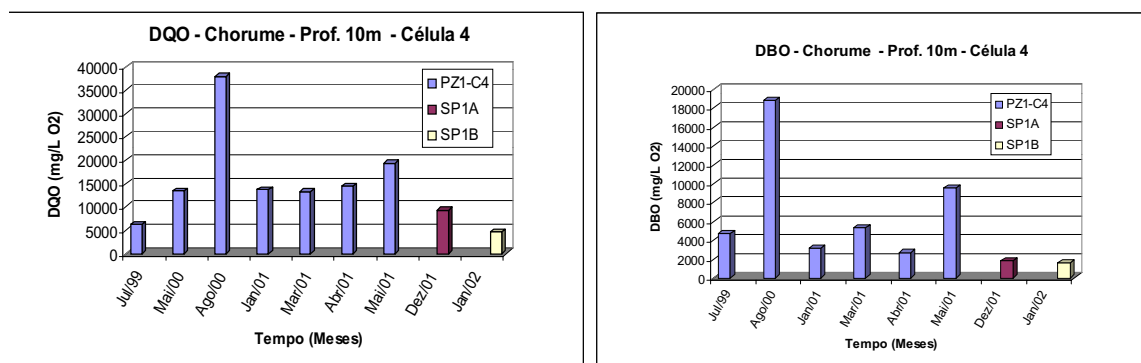


Figura 4.22. Índices de DQO e DBO com o tempo (Célula 4)

Observando-se os índices de DBO e DQO, vê-se que a última coleta apresenta valores de DQO e DBO mais baixos que os anteriores: a DQO oscilou de 6000 a 37000mg/O₂ nos meses de julho/99 a maio /01. Entretanto, para a última análise de DQO, obteve-se um valor em torno de 4500. Para a DBO a variação foi de 4000 a 18000 no intervalo de julho/99 a maio/01. Para a última análise em janeiro/02 obteve-se 1500 de DBO. Portanto, os índices de DBO e DQO caíram com o tempo. Esses resultados estão de acordo com a literatura, (Tchobanoglous *et al*, 1994), para células de lixo de idades

semelhantes. Esses autores também sugerem que com o tempo os índices de DBO e DBO decrescem.

É interessante salientar que a DBO e DQO permitem avaliar a atividade microbiana. Na Célula 4 os índices de DBO altos, principalmente no mês de agosto de 2000, coincidem com a alta concentração de microrganismos que oscilou em torno de 10^8 a 10^9 (Figura 4.13). No mês de janeiro de 2000, quando os índices de DBO e DQO baixaram, verificou-se também uma redução na contagem de organismos anaeróbios principalmente, que variou de 10^0 a 10^3 em todas as profundidades (4.20 e 4.21), sugerindo um material bastante degradado e homogêneo em todo o perfil da Célula 4. Indiretamente o mesmo comportamento aconteceu com os recalques. Quando se teve valores mais altos de DQO, DBO e microrganismos, obteve-se maiores recalques.

4.4.3. Teor de Umidade e Sólidos Voláteis.

4.4.3.1. Teor de Umidade.

Os teores de umidade da Célula 4 apresentaram valores numa faixa que variou de 20 a 40% com alguns valores fora dessa faixa (Figura 4.23), o que pode ser justificado pelas altas precipitações ocorridas durante os períodos chuvosos. Os índices de umidade praticamente não variaram com o tempo e profundidade. Palmisano e Barlaz, (1996), relatam que esses valores de umidade estão na faixa ótima para degradação microbiana.

Os índices constantes nos teores de umidade da Célula 4 podem ser justificados pela infiltração de água pela camada superficial, quando há precipitação. Igualmente ao teor de sólidos voláteis, parece não haver uma relação direta entre os teores de umidade e sólidos voláteis com os recalques produzidos através de biodegradação da matéria orgânica.

Os ensaios físico-químicos e microbiológicos realizados na Célula 4 mostraram que algumas relações podem ser feitas com a evolução dos recalques nesta Célula. Entretanto,

mais estudos devem ser realizados a fim de se compreender melhor as relações entre parâmetros físico-químicos, biológicos e recalques.

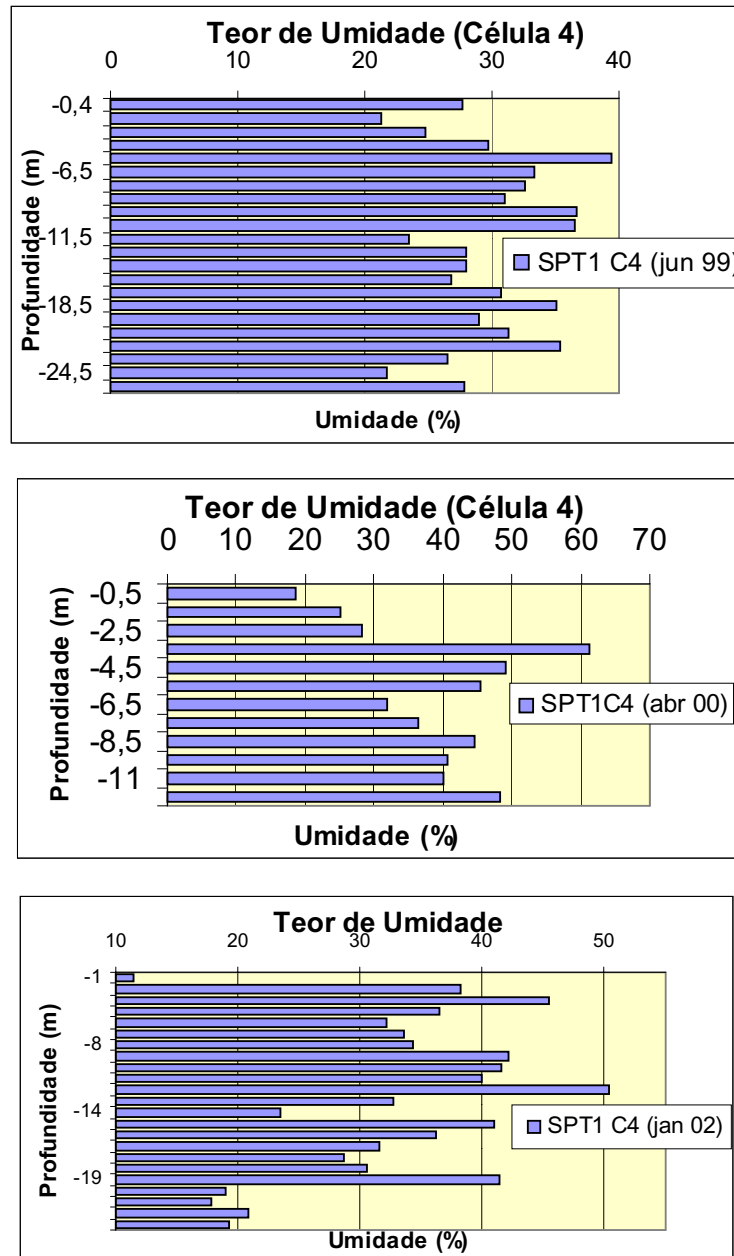


Figura 4.23. Teor de Umidade com a profundidade e tempo (Célula 4)

4.4.3.2. Teor de Sólidos Voláteis.

Segundo Gomes, (1989), através de determinação do teor de sólidos voláteis determina-se a porcentagem de cinzas e a quantidade de matéria orgânica existente nos

resíduos sólidos. Portanto, este parâmetro pode ser indicador da degradabilidade do RSU ao longo do tempo. Um alto percentual de sólidos voláteis indica a presença de muita matéria orgânica para ser degradada e baixos valores indicam que o resíduo já passou por um acentuado processo de degradação.

A Figura 4.24 mostra o teor de sólidos voláteis com a variação do tempo e a profundidade.

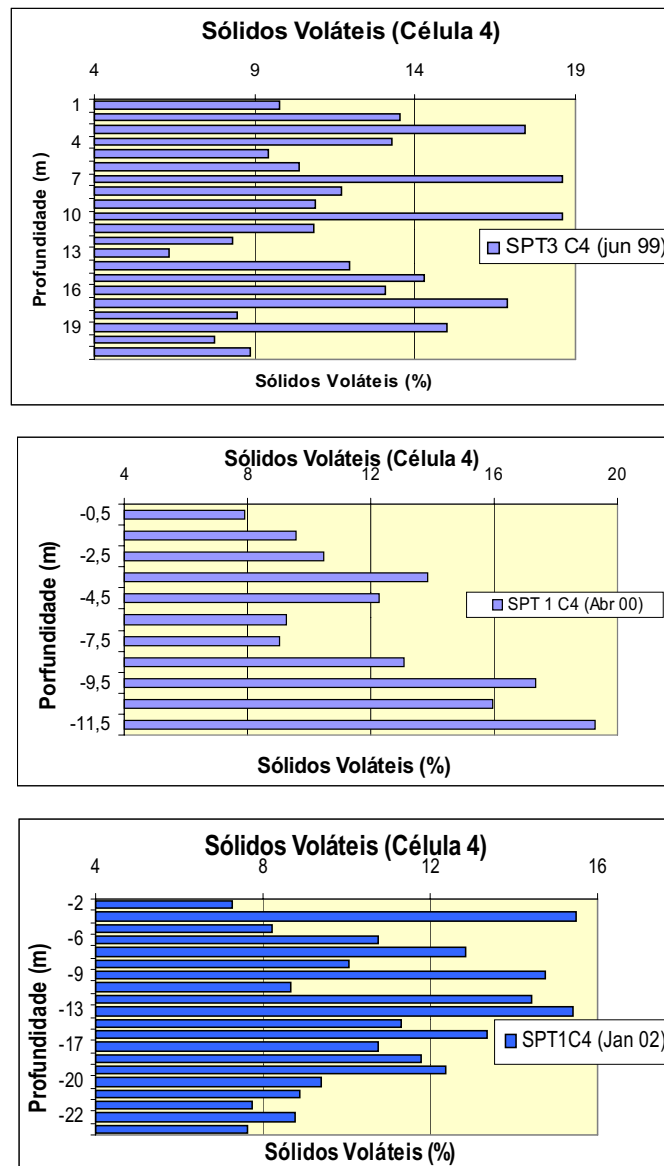


Figura 4.24. Teor de Sólidos Voláteis com a profundidade e tempo (Célula 4)

Durante o período das determinações os teores de sólidos voláteis obtidos não mostraram muitas variações, salientando-se que, em 1999, esses teores já não apresentam elevadas percentagens (Figura 4.24), embora houvesse uma pequena redução destes teores com o passar do tempo.

Para o ano de 1999 a variação no teor de sólidos voláteis foi de 9 a 19% aproximadamente, sendo que o teor de sólidos voláteis médios fica em torno de 13% nas profundidades iniciais, decrescendo gradualmente até próximo a 10% em 21m.

Em 2000, tem-se uma faixa de variação semelhante de 1999 para os teores de sólidos voláteis até a profundidade de 11,5m. Entretanto, os valores não coincidem entre si quando se comparam as mesmas profundidades.

Para 2002 a faixa de variação dos teores de sólidos voláteis foi de 7 a 15%, inclusive tendo um comportamento semelhante a 1999. Vale salientar que houve uma diminuição do teor de sólidos voláteis com o tempo, embora seja pequena. Também é importante salientar que o teor de sólidos voláteis foi baixo para os três anos que se determinou o sólidos voláteis na Célula 4.

4.5 Toxicidade e biodegradação

Na Célula 4 foram realizados testes de fitotoxicidade em diferentes profundidades, afim de avaliar o grau de toxicidade que esta apresenta e no caso de uma possível reabertura da célula. Além do mais, objetivou-se verificar como a toxicidade afeta a biota microbiana e conseqüentemente nos recalques. O teste de fitotoxicidade foi realizado com a semente de repolho, ao longo de todo o perfil da Célula ate atingir a camada de solo de base. Paralelo ao teste de fitotoxicidade, análise de metais foram também realizados, com a finalidade de verificar o grau de influencia desses metais na fitotoxicidade da Células de lixo.

4.5.1.Célula 4: Análise em Profundidade

Com base no ensaio SPT (Furo SP1B) realizado na Célula 4, em janeiro de 2002, verificou-se que a espessura do lixo encontrada neste furo foi 19,5m. Acrescentado-se que em outros ensaios realizados anteriormente nesta Célula, essa espessura alcançou 29m de lixo. Abaixo da camada de lixo existe uma camada de solo classificada de acordo com a classificação unificada dos solos como uma argila arenosa prof. 20m a 21m (CL), seguido de uma areia argilosa prof. 21m a 22m, (SC), e areia siltosa prof. 22,20m a 23,50m (SM). É importante mencionar as características da camada de solo abaixo da Célula 4, pois as análises dos resultados dos ensaios de fitotoxicidade e metais levam em conta tanto o perfil de lixo como a camada de solo na base dessa Célula.

A Figura 4.25 mostra resultados obtidos com sementes de repolho nos testes de fitotoxicidade realizados com o chorume e resíduos sólidos da Célula 4 ao longo da profundidade. As Tabelas 4.3 e 4.4 mostram os teores de metais (chorume e resíduos sólidos).

Tabela 4.3. Metais Célula 4 (Chorume)

Metais Célula 4 - Chorume (mg/L) - SP1B/jan/02										
Prof.	SP1B									
(m)	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Ca	Al	Fe
-4	<0,05	0,33	0,25	1,23	0,03	0,64	1,3	Nd	Nd	x
-10	<0,05	0,25	0,07	0,6	0,14	0,14	0,92	Nd	Nd	x
-14										
-18	<0,05	0,63	0,15	3,07	<0,05	<0,05	1,51	9,55	2800	822
-20	<0,05	0,87	0,03	1,84	<0,05	<0,05	2,94	11,96	1460	492
-23	0,03	3,33	0,26	3,92	<0,05	<0,05	7,14	18,7	3348	1330

Tabela 4.4. Metais Célula 4 (Resíduos Sólidos)

Metais Célula 4 - Resíduos Sólidos (mg/Kg) - SP1B/jan/02												
Prof.	SP1B											
(m)	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	Ti	Zn
-3,5	0	0	0	55	26	0	0	246	121	20	0	139
-4,5	3023	8105	0	55	87	22274	912	289	85	45	58	543
-10	4128	7342	0	47	31	10374	854	186	4	48	83	510
-14	3698	10779	0	61	12	7525	1047	185	10	31	116	291
-18	3715	8499	0	43	18	7347	1098	177	80	120	103	200
-20	11939	538	0	37	0	10285	191	41	0	13	40	428
-23	12649	1824	0	31	0	7490	1649	168	0	13	0	417

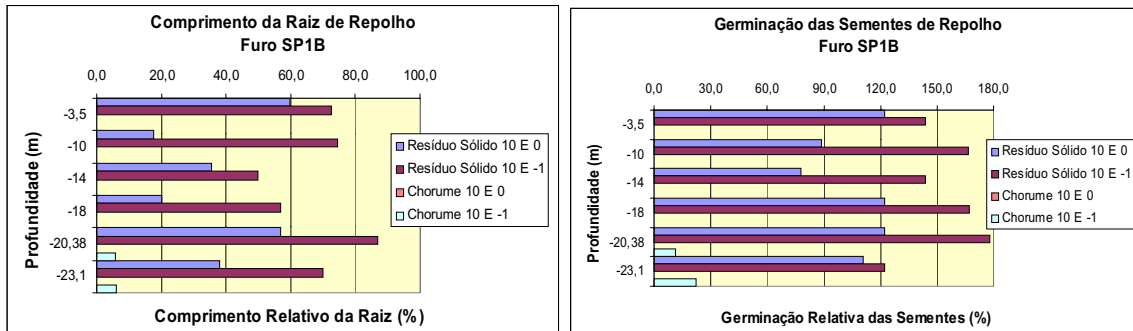


Figura 4.25. Ensaios de fitotoxicidade (Célula 4)

De maneira geral, a toxicidade para ambos os parâmetros (crescimento e germinação da raiz) pesquisados no teste de fitotoxicidade apresentou oscilações. Não houve tendência de aumento ou diminuição da toxicidade da Célula ao longo da profundidade. Isto contrariou o esperado, uma vez que a massa de lixo depositada nas camadas inferiores é mais velha, portanto o lixo é mais maduro e por conseguinte, menos tóxicos.

Não obstante, a Célula 4 encontra-se em metanogênese, (Figura 4.26), o que contribuiria para elevação do pH em toda a sua extensão. Observa-se que na Célula 4 o pH ficou em torno de 8. A elevação do pH, possivelmente, poderia contribuir para menor toxicidade dos metais, pois em pH altos os metais precipitam e ficam retidos no material depositado do aterro. Estudos feitos por Amaral Sobrinho *et al.*, (1999), em solo tratados por resíduos de metalurgia alcalinos, resultaram na baixa solubilidade do Pb e da retenção de Zn, Cd e Ni. Tais fatores podem ter contribuído para homogeneização dos resultados nos resíduos, uma vez que os metais não estariam facilmente disponível para as plantas.

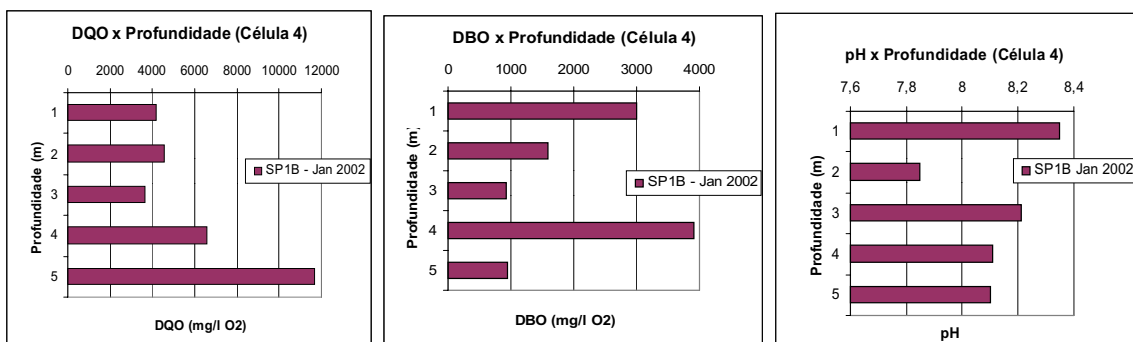


Figura 4.26. Ensaios Físico-químicos (Célula 4)

Verificou-se que Chorume presente na Célula 4 foi altamente tóxico se comparado aos resíduos para o desenvolvimento das sementes (Figura 4.25). Como observado, o chorume é mais tóxico que o resíduo. Tal fato pode ocorrer devido ao chorume apresentar possivelmente, metais, bem como outros contaminantes tóxicos dissolvidos em solução. Portanto, com maior facilidade de absorção pelas raízes. Os resíduos podem conter número significativo de metais. Contudo, estar complexados às frações óxidos-Fe, Mn, orgânica e residual, (Sheppard & Thibault, 1982, Mazur, 1997 & Oliveira, 1998), apresentando pouca mobilidade e portanto, menor toxicidade.

Também se verificou que o comprimento da raiz de repolho em amostras de resíduo sólido concentrado foi menor que em resíduo sólido diluído. Tal fato pode estar relacionado com a diluição das amostras que poderiam favorecer a diluição de contaminantes tóxicos às sementes.

Para os resíduos sólidos houve germinação e crescimento da raiz em todas as profundidades pesquisadas e em ambas concentrações. Entretanto, a germinação apresentou índices maiores.

Nas profundidades de 20 e 23m já é encontrada a camada de solo (base da Célula). No chorume houve apenas germinação e crescimento da raiz na diluição de 10^{-1} . Os resultados também mostraram que os índices de comprimento da raiz foram menores que os da germinação das sementes em todo perfil. Nas profundidades de 20 e 23m o comprimento da raiz apresentou valores em torno de 6% e a germinação atingiu 11% em 20m e 22% em 23m (Figura 4.25). Entretanto, estes resultados são bastante discretos em relação aos resultados encontrados no resíduo sólidos nas mesmas profundidades.

De alguma maneira, o solo poderia estar atenuando a toxicidade dos líquidos ali depositados. Tal como acontece para os micronutrientes, as substâncias húmicas podem reter os cátions polivalentes dos metais pesados, reduzindo, assim, a sua atividade e, portanto, a sua fitotoxicidade, (Santos, 1995). Sendo assim, menores quantidades de metais pesados do composto estão sob uma forma móvel após a incorporação no solo. Entretanto,

no chorume a concentração de metais nas profundidades de 20 e 23m para alguns metais foi alta se comparado às camadas acima (Tabela 4.3). Desta forma, a interação solo/chorume poderia ter algum fator que contribuisse, mesmo que discretamente para a germinação e posterior desenvolvimento da raiz.

Os resultados obtidos dos ensaios realizados no Aterro da Muribeca mostraram-se semelhantes aos obtidos por Tiquia *et al.*, (1996), com relação à germinação de sementes e crescimento da raiz, ou seja, os índices de germinação foram superiores ao do comprimento da raiz.

Isto pode ser explicado pelo fato que a germinação é dependente de água. Como sugere a literatura, entre os fatores do ambiente, a água é o fator que mais influencia o processo de germinação. Com a absorção de água, ocorre a reidratação dos tecidos e, conseqüentemente, a intensificação da respiração e de todas as outras atividades metabólicas que resultam com o fornecimento de energia e nutrientes necessários para a retomada de crescimento por parte do eixo embrionário.

A embebição é essencialmente um processo físico, (Warren & Bennett, 1997, Shimizu & Demarquette, 2000), relacionado às características de permeabilidade do tegumento (película que reveste as sementes) e das propriedades dos colóides que constituem as sementes, cuja hidratação é uma de suas primeiras conseqüências. O movimento de água para o interior da semente é devido tanto ao processo de capilaridade quanto de difusão e ocorre no sentido do maior para o menor potencial hídrico. Esta característica permitiu que os resultados fossem maiores para a germinação da raiz, uma vez que a presença de água ativou processos enzimáticos necessários à germinação das sementes.

Em relação ao teor de metais encontrado no chorume da Célula 4, estes são relativamente inferiores aos encontrados na literatura em aterros de RSU com as mesmas características, inclusive, estando dentro dos limites aceitáveis conforme Ribeiro *et al.*, (artigo não publicado - Tabela 4.5).

Tabela 4.5. Teor total de metais pesados (mg/kg peso seco)

	Composto 1	Composto 2	Composto 3	Limite de Qualidade*	Limite Aceitável*
Alumínio	11760	5508	2958		
Cádmio	4	2	2	5	20
Cromo	70	39	19	500	750
Cobre	987	615	986	500	1000
Ferro	21530	13409	8505		
Chumbo	882	497	290	350	750
Magnésio	348	189	184		
Níquel	210	35	19	150	300
Zinco	1470	1028	1003	1500	3000

*Regione Piemonte, 1990 in Ribeiro *et al*, artigo não publicado.

Em geral, os maiores valores de concentração de elementos químicos no chorume são encontrados nas maiores profundidades, devido à promoção de um elevado gradiente de concentração na interface solo/chorume, (Oliveira, 1998). Esta concentração de fundo deve-se aos processos de lixiviação e solubilização. Isso condiz com o que foi observado no Aterro da Muribeca. De maneira geral, os teores de metais pesados no chorume foram maiores nas profundidades de 20 e 23m.

É importante ressaltar que a Célula 4 encontra-se em metanogênese, conforme análises de parâmetros físico-químicos (Figura 4.26). Essas análises mostram que a Célula 4 não está completamente maturada. Células maturadas apresentam menores quantidades de agentes tóxicos, segundo Morel *et al.*,(1985).

Por outro lado, compostos imaturos, conforme Zucconi *et al.*, (1981 a), podem induzir a alta atividade microbiológica (reduz a concentração de oxigênio no meio e bloqueia a existência de nitrogênio disponível no solo). E de acordo com Tam & Tiquia, (1994), compostos imaturos também introduzem compostos fitotóxicos, excesso de acumulação de sais, bem como metais pesados e compostos fenólicos. Conforme Manios *et al.*,(1989), introduzem etileno, amônia e ácidos orgânicos. Esses compostos podem retardar o crescimento e a germinação das sementes, bem como afetam o crescimento microbiano.

Ciavatta *et al.*, (1993), relataram que durante a estabilização da matéria orgânica os metais mostraram um decréscimo em solubilidade. Similar descoberta foi também relatada

por Inbar *et al.*, (1990), e Zucconi *et al.*, (1981 a). Segundo esses autores, fitotoxinas desaparecem quando a matéria orgânica torna-se completamente estabilizada. Deste modo, o desaparecimento da toxicidade dos resíduos pode ser usado como indicador de compostos maduros.

Outro fator, tal como a aeração, poderia ter um significativo papel na destruição dos níveis letais dos compostos e, em particular, da toxicidade da amônia. Zucconi *et al.*, (1985), relataram que a aeração é o mais importante fator na destruição de fitotoxina orgânica.

A Célula 4, encontra-se em atividade metanogênica, portanto em anaerobiose o que, também, poderia justificar uma maior toxicidade dessa Célula em relação a outra Célula (Célula 1) já estudada (bioestabilizada) do mesmo aterro onde foram realizados testes de fitotoxicidade, (Melo *et al.*,2002).

É importante ressaltar que o teste de fitotoxicidade é um indicador do nível de contaminação e de bioestabilização. Segundo Marques & Silva, (2001), existem inúmeros critérios de maturação de resíduos de compostagem que podem ser usados:

- Razão C/N menor que 20 (AGHTM,1985, Martin, 1991, e Rosen, 1993);
- Ausência de inibidores de crescimento das plantas, como sejam os ácidos alifáticos e compostos fenólicos que podem ser determinados por cromatografia ou testes de inibição de germinação de sementes;
- Ausência de microrganismos patogênicos para o homem, como Salmonela, Estreptococos e Coliformes fecais, (Martin, 1991);
- Existem, além destes, inúmeros outros testes específicos, como por exemplo, bioensaios em animais e plantas, atividade microbiana e respiratória, análises químicas, físicas e espectroscópicas, assim como grau de humificação, (Rosen, 1993).

Entretanto, no caso de Aterros de RSU de modo geral, a ausência total de fitotóxicos e microrganismos patogênicos, depois de encerrada a sua vida útil, é uma prática difícil de ser alcançada, uma vez que, microrganismo e agentes tóxicos permanecem no ambiente por vários anos.

O teste de fitotoxicidade foi mais um parâmetro empregado a fim de auxiliar na compreensão do comportamento da Célula 4 envolvendo os recalques. Entretanto, em razão de a Célula 4 já estar num estágio avançado de degradação, não foi possível correlacionar, de maneira mais detalhada, os recalques com a fitotoxicidade. Entretanto, a pequena quantidade de agentes tóxicos induz a avaliar que essa Célula encontra-se em um estágio avançado de degradação, uma vez que a baixa concentração de contaminantes é um indicativo de células no estágio final de decomposição.

Com relação aos pequenos valores no NMP de microrganismos na Célula 4, em 2002, é provável que a pequena quantidade de microrganismos seja devido a baixos conteúdos de matéria orgânica e não ao seu nível de toxicidade, já que foi visto que houve uma redução na taxa de microrganismos presentes na Célula 4 com o tempo, (Figuras 4.16, 4.19 a 4.21). Contudo, se forem feitas análises graduais, com o passar do tempo desde a operação inicial de uma célula de lixo até o estágio final de operação, poderia ser correlacionado à concentração dos agentes tóxicos com a concentração de grupos microbianos e daí analisa-los com a magnitude e velocidade dos recalques.

4.6 Modelo de Compressibilidade

Neste trabalho utilizou-se o modelo de previsão de recalques “Meruelo”, desenvolvido por Palma, (1995). O objetivo central desta pesquisa foi entender o mecanismo de recalques levando-se em consideração dados experimentais, os quais baseiam-se na análise do comportamento mecânico dos recalques associados aos aspectos biodegradativos e climáticos. Entretanto buscou-se utilizar o Modelo Meruelo na tentativa de prever recalques teóricos ao longo do tempo, comparando-o aos resultados experimentais obtidos na Célula 4 do Aterro do Muribeca.

Os Modelos matemáticos só poderão ter maiores precisões em se prever recalques, à medida que os mecanismos dos recalques em aterros de RSU forem intimamente relacionados com os fenômenos físico-químicos e biológicos.

Na literatura técnica estão disponíveis alguns modelos de previsão de recalques. No entanto, optou-se pelo Modelo Meruelo para este estudo, pois esse modelo leva em consideração parâmetros como o coeficiente de hidrólise e o coeficiente da massa transformada em recalques que estão intimamente associados a fatores biológicos. O Modelo Meruelo parece ser o mais razoável para previsão de recalques, já que leva em consideração aspectos biodegradativos. Por todos estes fatores, pelo fato de ainda não ter sido aplicado às condições brasileiras e especificamente para às condições da RMR, o modelo foi eleito como o mais razoável para ser testado no Aterro da Muribeca, levando em consideração as características dos resíduos locais.

O Modelo Meruelo faz uma estimativa de recalques utilizando a Equação 4.4.

$$\Delta S = \frac{\alpha H \text{ COD}}{K_h T_c} (1 - \exp^{-k_h T_c}) (\exp^{-k_h t} - \exp^{-k_h t_0}) \quad \text{Eq: 4.4}$$

em que:

ΔS = recalques ocorridos (mm);

α = coeficiente de massa perdida transformada em recalques (constante);

H = espessura do aterro (mm);

COD = conteúdo de matéria orgânica biodegradável dos resíduos sólidos;

T_c = tempo de construção do aterro (Célula 4) (dias);

K_h = coeficiente de hidrólises (dias^{-1});

t = idade do aterro nos términos das medidas (dias);

t_0 = idade do aterro no início das nivelções (dias).

O parâmetro COD, conteúdo orgânico degradável, foi considerado como $\text{COD} = 0,3$ para os estudos da Célula 4 no Aterro da Muribeca. Segundo Palma, (1995), e Pereira, (2000), nos seus estudos de compressibilidade de resíduos sólidos na Espanha, o valor de

COD corresponde ao conteúdo de matéria orgânica biodegradável dos resíduos sólidos depositados no aterro. Na fração orgânica biodegradável dos resíduos sólidos pode-se encontrar resíduos que se degradam mais rapidamente que outros. Dessa fração, assume-se que uma parte se degradará nos primeiros trinta anos. Assim os recalques principais ou mais importantes estarão em função do valor dessa fração. Nos resultados de Palma, (1995), foi considerado que a fração total de matéria orgânica dos resíduos sólidos da Espanha é 50% e assume-se que o COD corresponde a 0,25, ou seja, este valor equivale a metade da fração total orgânica. No caso do Aterro da Muribeca o valor de COD foi de 0,30, pois a porcentagem total de matéria orgânica é 60%. De forma geral, o critério aplicado é que, do total da matéria orgânica dos resíduos, somente metade dará lugar aos recalques.

O tempo de construção da Célula 4 adotado foi de 6 meses (180 dias). O valor do coeficiente de hidrólises (k_h), bem como o coeficiente de massa perdida (α) foram determinados por ajustes das curvas pelo método dos mínimos quadrados. Para a aplicação do método dos mínimos quadrados utilizou-se o programa Microsoft Excel que dispõe da ferramenta “Solver” e este ajusta automaticamente os parâmetros (α e K_h) requeridos buscando a melhor aproximação entre as curvas teóricas e experimentais. Ambas as constantes variam conforme o local de disposição do lixo. Estas constantes são dependentes da idade da massa de lixo aterrada e do grau de decomposição da matéria orgânica.

Na tabela 4.6 são mostrados os valores de α e K_h obtidos através do Modelo Meruelo.

Tabela 4.6. Valores de α e K_h obtidos através do Modelo Meruelo para a Célula 4

Instrumentos	Parâmetros	
	α	K_h
Placas	0,148 a 0,517	0,001 a 0,003
Aranhas	0,024 a 0,269	0,01 a 0,002

Para efeito de cálculos de recalques a espessura da massa de lixo considerada foi de 18230 mm para as placas (massa de lixo deslocável). Para as aranhas utilizou-se esta espessura subtraída da profundidade em que se encontrava cada aranha, isto

correspondendo à espessura de lixo abaixo dos medidores profundos. Até a espessura de 18230mm a massa de lixo apresenta deslocamentos verticais significativos, pois esta camada possui lixo mais recente, portanto, suscetível a maiores recalques. Como a camada dos 14m inferiores deve sofrer recalques muito pequenos, tomou-se como referência os recalques observados na Aranha 4 (profundidade de 18,23m), pois esta aranha está situada próxima a interface, ou seja, entre a massa deslocável e a massa que deve se encontrar bioestabilizada.

Para análise dos resultados utilizou-se as Placas 7 e 9 e as Aranhas 1 e 2, pois a Placa 7 e Aranha 1 e 2 apresentam os recalques mais significativos e a Placa 9 encontra-se horizontalmente mais próxima da localização das aranhas (Figuras 3.1 e 3.2).

As Figuras 4.27 e 4.28 mostram as curvas de recalques experimentais e teóricas através do Modelo Meruelo. Nota-se, pois, que as curvas teóricas se ajustam perfeitamente às curvas dos valores medidos, tanto para as placas como para as aranhas.

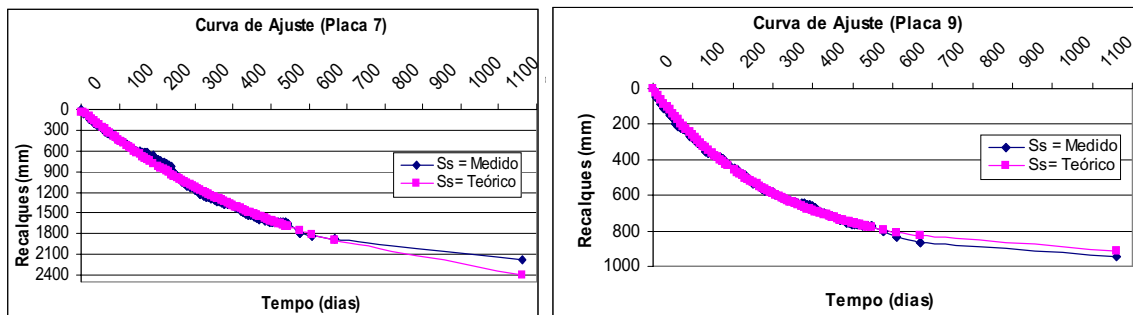


Figura 4.27. Curva de ajuste (Recalques teóricos e medidos da Célula 4 (Placa 7 e 9))

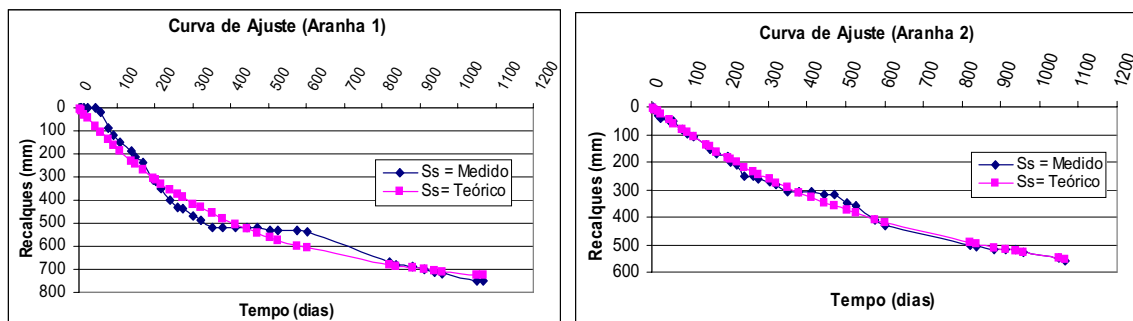


Figura 4.28. Curva de ajuste (Recalques teóricos e medidos da Célula 4 (Aranhas 1 e 2))

Como a redução da altura é diretamente proporcional à diminuição da matéria orgânica que, por sua vez, é dependente da velocidade de degradação, os valores de K_h e α mudam para cada espessura e composição química dos resíduos. Sendo assim, para cada uma das situações em que foram comparados os recalques medidos no campo e os recalques teóricos, obteve-se um α e um K_h diferentes, através dos ajustes das curvas. Essa diferença nos valores das constantes K_h e α são perfeitamente compreensíveis. Como já mencionado anteriormente, uma célula de lixo apresenta distintas quantidades de matéria orgânica e espessura de lixo, bem como o grau de decomposição em uma mesma célula de lixo pode ser variável devido a fatores internos.

Para Pereira, (2000), o valor de K_h encontrado, aplicando o Modelo Meruelo, foi de 0,00126, assemelhando-se aos encontrados na Célula 4 do Aterro da Muribeca, (0,0016 a 0,0033), e aos de Palma, (1995). Nos resultados de Pereira, (2000), o valor de k_h encontrado foi maior do que os encontrados por Mariano, (1999), utilizando o Modelo de Gandolla (*et al.*, 1994). Nos trabalhos realizados por Mariano, (1999), em Células de idade mais avançada, (15 anos, no período de publicação) do Aterro da Muribeca, os valores de K_h foram bem menores que os encontrados para a Célula 4 do mesmo aterro. Esse fato deve-se a que células com lixos mais recentes apresentam velocidades de degradação maiores, já que o lixo apresenta condições de degradabilidade mais favoráveis ao ataque microbiano.

No caso dos estudos de Mariano, (1999), os valores do K_h são mais baixos justamente devido à massa de lixo disposta ter idade avançada. No caso da Célula 4 do Aterro da Muribeca os valores das constantes K_h e α serem mais altas está diretamente relacionada à maior quantidade de matéria orgânica e à idade da Célula de lixo. Deve-se levar em consideração que foram achados diferentes k_h e α nos diferentes pontos onde foram medidos os recalques na Célula 4, o que também foi encontrado por Palma, (1995), nos seus estudos com um aterro de características semelhantes, indicando que diferentes locais apresentam diferentes velocidades de degradação devido a condições internas variáveis.

Pereira, (2000), através dos ajustes da curva encontrou como valor de α 0,097, enquanto que nos estudos referentes a Célula 4, o valor α oscilou de 0,1485 a 0,5175 para os recalques medidos nas diferentes placas e aranhas. Esses diferentes valores para ambas as constantes no Modelo Meruelo podem ser devido a diferentes idades e espessuras da massa de lixo. Palma, (1995), encontrou valores de α bastante semelhantes àqueles encontrados na Célula 4 do Aterro da Muribeca.

Na Célula 4 do Aterro da Muribeca fez-se a previsão dos recalques para 5 anos após o período de medição, (Figuras 4.29 e 4.30), e observa-se claramente que, tanto para as placas como para as aranhas, a magnitude dos recalques diminui acentuadamente com o tempo e há uma tendência de uma estabilização dos recalques para períodos superiores a 1800 dias para a Placa 7 e 1200 dias para a Placa 9. Como o período de medição foi até meados de 2002, no final desse período de medição, tanto os dados experimentais como os teóricos, mostram que já há uma tendência à estabilização dos recalques observados na Placa 7. Utilizando o Modelo Meruelo para previsão de recalques, nota-se que apenas um ano após este período haverá a estabilização destes recalques. Para a Placa 9 o período de estabilização ocorre imediatamente após o término das medições dos recalques experimentais.

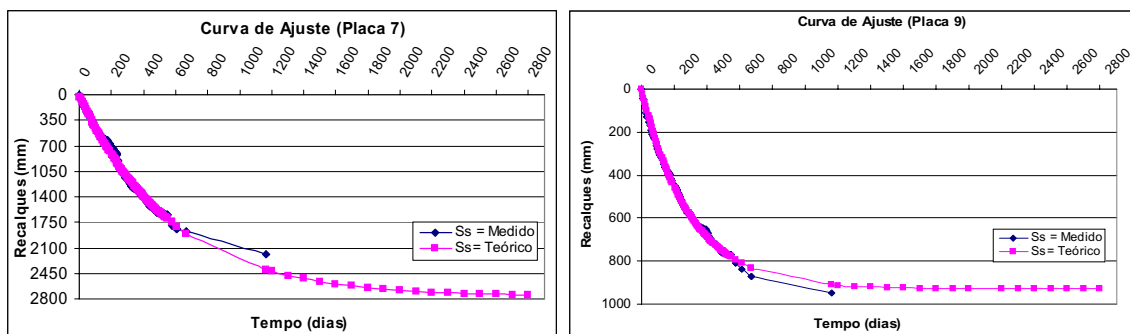


Figura 4.29. Previsão de recalques (Recalques teóricos da Célula 4 (Placa 7 e 9))

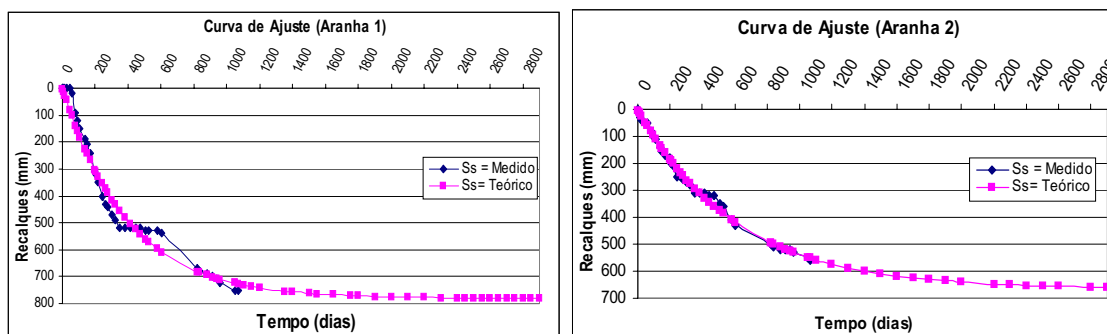


Figura 4.30 Previsão de recalques (Recalques teóricos da Célula 4 (Aranhas 1 e 2))

Para as aranhas o período de estabilização ocorre por volta de 1800 dias (Aranhas 1 e 2). Nas as aranhas subseqüentes o período para estabilização varia de 1800 para a Aranha 3 e 1400 dias para a Aranha 4 (apêndices A).

Usando o Modelo Meruelo para a previsão dos recalques, nota-se que logo após o período de medição dos recalques experimentais ocorre o período de estabilização dos recalques para a Aranha 1, enquanto que para as aranhas subseqüentes este período é bem maior.

Os resultados observados nas placas parecem estar relacionados com a maior quantidade da matéria orgânica. Na região onde esta localizada a Placa 7, que apresenta teoricamente maior quantidade de lixo, por estar no centro da Célula 4, o período de tempo para que os recalques se estabilizem é maior em relação às demais placas que apresentam menor quantidade de matéria orgânica.

Um comportamento semelhante é observado para os medidores em profundidade. As aranhas mais superficiais apresentam um maior tempo de estabilização comparado às aranhas mais profundas, embora essas diferenças sejam bastante discretas. A Aranha 1 que está situada mais superficialmente apresenta lixo com maiores tempo previstos para estabilização dos recalques (1800 dias) em relação a Aranha 4 (1400 dias), que está há uma profundidade de 18,23m, (interface de lixo novo e velho), o que era esperado. Dois fatores determinam esse comportamento: a quantidade de matéria orgânica e a carga impostas à massa de lixo. A quantidade de matéria orgânica juntamente com a carga imposta

determinam quando ocorrerá a estabilização dos recalques. Nas camadas mais profundas a quantidade matéria orgânica é menor, além do que a carga imposta é bem maior em relação as camadas superiores, o que leva a previsões de estabilizações mais rápidas para os recalques. Desta maneira, conforme a profundidade aumenta, maiores são as cargas que agem comprimindo os resíduos (diminuindo os vazios no lixo). Além do mais, menor é a quantidade de matéria orgânica, portanto os tempos de estabilização para os recalques são atingidos mais previamente.

Numa análise mais detalhada, o Modelo Meruelo apesar de se ajustar muito bem aos recalques medidos experimentalmente na Célula 4 do Aterro da Muribeca, esse modelo não leva em consideração as diferentes fases de degradação da matéria orgânica. Em cada fase, devido à predominância de alguns grupos bacterianos e decréscimo de outros, o coeficiente de hidrólise também varia, portanto o valor de K_h deve ser variável conforme a fase de degradação bacteriana, e não constante como os autores propõem.

Outro aspecto interessante a ser considerado é que os recalques observados principalmente nas Aranhas apresentam o período de recalques zero. Nestes pontos a curva teórica não se ajusta perfeitamente à curva experimental (Figuras 4.28). Estes períodos de recalques zeros estão associados às cargas impostas e ao alargamentos de vazios, bem como à taxa de degradação microbiana. Portanto, deve-se fazer uma relação entre as condições climáticas, coeficiente de hidrólise (K_h), índice de vazios e à carga imposta sobre estes vazios para se determinar quando ocorrerá o período de recalque zero e qual o período de sua duração.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Com base no trabalho desenvolvido ao longo da pesquisa e a partir de observações feitas em ensaios de campo, laboratório, programas computacionais e na literatura disponível, verificou-se que:

- Os resultados obtidos nas análises dos recalques superficiais e em profundidade mostraram uma relação direta entre aspectos mecânicos, biodegradativos e climáticos;
- De modo geral, os recalques superficiais e em profundidade observados tiveram um comportamento semelhantes com o passar do tempo. As aranhas localizadas mais superficialmente apresentaram os maiores recalques, decrescendo gradualmente à medida que a profundidade foi aumentando;
- O recalque total máximo da massa de lixo da Célula 4 foi obtido na Placa 7 que se encontra no centro dessa. O deslocamento vertical máximo da Placa foi de 11,22%.
- As condições climáticas favoreceram a degradação da matéria orgânica que foi relativamente rápida;
- Através das análises dos resultados, verificaram-se três etapas de comportamentos distintos dos recalques, tanto nos recalques superficiais e, mais visivelmente, nos medidos em profundidades. Estas três etapas do comportamento dos recalques foi explicada através de relações direta entre aspectos mecânicos, biodegradativos e climáticos;
- Observou-se, sem dúvida, que no primeiro trecho das curvas os recalques medidos tiveram deformações mais acentuadas seguido de um período de recalques zero, enquanto, passado este período novamente, ocorre um aumento nas taxas de

recalques caracterizadas por aumento de vazios seguidos por colapsos. Nesta 3ª fase os recalques são menores que os recalques iniciais;

- O Modelo Meruelo utilizado para comparação entre os recalques experimentais e teóricos teve um bom ajuste de curvas, tanto para os recalques medidos em profundidade como para os superficiais. Na utilização deste modelo nos ajustes das curvas, parâmetros como o coeficiente de perda de massa transformadas em recalques, como o coeficiente de hidrólise diferem para cada ponto da Célula 4. Estas variações em ambos parâmetros estão intimamente associadas as características dos resíduos depositados e a idade do lixo aterrado;
- O Modelo Meruelo, apesar de se ajustar muito bem aos recalques medidos experimentalmente na Célula 4 do Aterro da Muribeca, não leva em consideração as diferentes fases de degradação da matéria orgânica;
- Outro aspecto interessante a ser considerado é que os recalques observados principalmente nas Aranhas, apresentaram o período de recalques zero. Nestes pontos a curva teórica não se ajusta perfeitamente à curva experimental. Esses períodos de recalques zero estão associados à carga imposta e ao aumento de vazios, bem como à taxa de degradação microbiana. Portanto, deve-se estabelecer uma relação entre o K_h , índice de vazios e a carga imposta sobre estes vazios para se determinar quando ocorrerá o período de recalque zero e qual o período de sua duração;
- No caso particular do Aterro da Muribeca as condições climáticas predominantes na RMR somente interferiram e modificaram o comportamento dos recalques, principalmente nas camadas abaixo de 18m, quando ocorreram precipitações elevadas e por um longo período de tempo;

- Verificou-se que índices de DBO e DQO reduziram com o tempo como era o esperado. Indiretamente, o mesmo comportamento aconteceu com os recalques e microrganismos;
- Os teores de umidade na Célula 4 praticamente não se alteram ao longo do tempo, permanecendo numa faixa de 20% a 40% que é favorável a biodegradação. Entretanto, não se pode correlacioná-los com as variações nas condições climáticas locais nas estações secas e chuvosas;
- O teste de fitotoxicidade mostrou que o chorume foi mais tóxico que os resíduos sólidos;
- O teor de metais encontrados no chorume são relativamente inferiores aos encontrados na literatura em aterros de RSU com as mesmas características;
- Com relação aos pequenos valores no NMP de microrganismos na Célula 4 em 2002 é provável que a pequena quantidade de microrganismos deve-se mais a baixos conteúdos de matéria orgânica do que realmente a seu nível de toxicidade;
- Num Aterro de Resíduos Sólidos, quando se quer otimizar recalques para aumentar a capacidade de armazenamento e até mesmo para avaliar a evolução do processo de degradação dos resíduos, tem-se que interagir a engenharia moderna com os aspectos mais avançados da microbiologia e ambos com parâmetros físico-químicos, condições climáticas entre outros;
- Para se entender não só o comportamento dos recalques, como também o comportamento do aterro de uma maneira geral, deve-se valer do monitoramento do aterro em condições controladas, a longo prazo e, mais importante, projetar e executar aterros dentro dos padrões exigidos;

- No Brasil e em alguns lugares do mundo o comportamento dos recalques é bem compreendido sob aspectos mecânicos. Estes aspectos são estudados, na maioria dos casos, por profissionais da engenharia geotécnica. Entretanto a compreensão dos recalques sob os aspectos microbiológicos são pouco estudados e compreendidos, devido à complexidade, não só do aspecto microbiológico em si, mas de interagir a engenharia com a microbiologia.

Como base no estudo desenvolvido nessa pesquisa e, levando-se em conta as dificuldades e as necessidades que surgiram, algumas sugestões para futuras pesquisas são formuladas:

- A medição dos recalques devem ser metódicas e mensais aliada a análises físico-químicas e microbiológicas;
- Avaliar a camada de cobertura quanto à infiltração de líquidos e de gases a fim de relacioná-la a eficiência da degradabilidade da matéria orgânica;
- Estudos mais detalhados devem ser desenvolvidos sobre fitotoxicidade em RSU para se ter mais confiabilidade da toxicidade que o lixo apresenta;
- Como trabalho futuro sugerem-se estudos de modelos matemáticos, levando-se em consideração as condições climáticas locais e a cinética de degradação microbiana em cada fase de degradação da matéria orgânica dispostas em Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. AGHTM.,(1985). “Les Résidus Urbains - Traitement et Valorization”. Technique et Documentation - Lavoisier 2e Édition. Vol. 2.
2. Amaral Sobrino, A.N.M.B., Velloso, A.C.X., Costa, L.M., (1999). “Lixiviação De Pb, Zn, Cd e Ni em Solo Podzólico Vermelho Amarelo Tratado com Resíduos Siderúrgicos”. Floresta e Ambiente. Rio de Janeiro. Vol.. 6, n.1, pp. 65-75.
3. APHA - American Public Health Association., (1992). “Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater”. Washington, DC.
4. Barbosa, H.R., Torres B.B., (1999) “Nutrição e Metabolismo Bacteriano” In: Trabulsi, L.R., Altherthum , F., Gompertz, O.F., Candeias, J.A.N. (eds) Microbiologia. 3 ed, São Paulo, Atheneu, Cap 3, pp. 585.
5. Bidone, F.R.A., (2001). “Resíduos Sólidos Provenientes de Coletas Especiais: Eliminação e Valorização”, Projeto PROSAB 2 – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, ABES Rio de Janeiro. pp. 1-218.
6. Bjarngard, A, Edgers, L., (1990). “Settlements of Municipal Solid Waste Landfills”. Proc. 13th Annual Madison Waste Conference, Madison. pp. 192-205.
7. Pinto, C.S.,(2000). “Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas” Ed. Oficina de Textos, São Paulo. pp 107-120.
8. Campos, J.R., (1999). “Tratamento de Esgoto Sanitário por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo. ABES – Projeto PROSAB. Rio de Janeiro, RJ, pp. 499.
9. CONAMA, (1986). “Resolução Número 20”.
10. CONAMA , (2000). “Resolução nº 274 de 29 de Novembro”.
11. Centro de Vigilância Sanitária (CVS)., (2001). “Padrões de Potabilidade da Água”.Centro Estadual de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano, V, 2 <<http://www.cvs.saude.sp.gov.br/pvol2.html>>
12. CETESB, (1986). “Guia de coleta e conservação de amostras de água”.
13. Chernicharo, C.A.L, (1993). “Reatores Anaeróbios”. DESA, Belo Horizonte, pp. 245.

14. Ciavatta, C, Govi, M, Simoni, A, & Sequi, P., (1993). "Evaluation of heavy metals during stabilization of organic matter in compost produced with municipal solid wastes", *Biosource Technology*, 43 pp. 147-153.
15. Dunicliff, J., (1988). "Geotechnical Instrumentation for Monitoring Filled Performance", A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, USA, pp. 1-577.
16. Eckenfelder, W., (1991). "Principles of Water Quality Management. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida, EUA. pp. 573.
17. Espinace, R. A., (2000). "La Geotecnia Ambiental Aplicada a los Vertederos sanitarios", Curso XX: Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos: Una Perspectiva Internacional. Suances, España.
18. Espinace, R.A, Palma J., (1991). "Propiedades Mecánicas del Relleno Sanitario de Limache", IX Congreso panamericano de Mecánica de Suelos e ingeniería de fundaciones, Viña del Mar, Chile.
19. Espinace, R., Palma J, Valenzuela P, Szanto M., Schiappacasse, M.C., Chamy, R., (1999a). "Assentamentos em um Vertedero Controlado a Escala com Recirculacion de Líquidos Lixiviados.
20. Espinace R., Palma J., Sánchez-Alciturri J.M., (1999b). "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 Iguaçu, Brasil.
21. Experiência em Eliminação de Resíduos Sólidos. Capítulo 4, pp. 135 – 105
22. Fasset, J.B., Leonards, G.A., And Repetto, P.C., (1994). "Geotechnical Properties of Municipal Solid Wastes and Their Use in Landfill Design". Proceedings, WasteTech '94 -Landfill Technology Conference, Charleston SC, National Solid Waste Management Association, pp. 31.
23. Gandolla, M., Acaia C. & Decka I. , (1996). "Previone dei Cedimenti della Superficie di una Discaria per RSU". Anais do III SIBESA.
24. Gandolla, M., Acaia C. & Decka I. , (1996). "Prediction of Settlement at MSW Disposal Sites".
25. Gandola, M.; Dugnani, L. , Bressi, G. & Acaia, C., (1994). "A determinação dos efeitos do recalque sobre os depósitos de lixo sólido municipal". Simpósio Internacional de Destinação do Lixo, novembro, Salvador.
26. Gomes, L. P., (1989). "Estudos da Caracterização Física e da Biodegradabilidade dos Resíduos Sólidos Urbanos em Aterros Sanitários". Departamento de Hidráulica

e Saneamento.. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado.

27. Gerba C.P., (1996). “Microbial pathogens, in municipal solid waste. In Microbiology of Solid Waste”. 1996, pp. 155-157
28. Gilligan, P.H., (1995). “Pseudomonas and Burkholderia”. In: MURRAY, P.R. *et al.* Manual of Clinical Microbiology. 6° ed. Washington, ASM Press. Cap. 40.
29. Halvadakis, C.P, Robertson, A.P, Leckie, J.O., (1983). “Landfill Methanogenesis: Literature Review and Critique” Env. Eng. And Science. Department of Civil Eng. Stanford University.
30. Hirata, T., Hanashima M., Matsufuji, Y., Yanase,R.,And Maeno Maenoy. (1995). “Construction of facilities on the closed landfills”. Sardinia 95. Fifth International Landfill Symposium, Proceedings, volumenes I,II y III, editorial CISA, Itália.
31. Imbar, Y, Chen, Y, Hadar, Y, & Hoitink, H.A.J., (1990). “New approaches to compost maturity”. BioCycle, 31 (12) pp. 64-69.
32. Jucá, J.F.T., Mariano, M.O.H., Barreto Campello,E.M., (1996). “Ground and urface water contamination due to Municipal Solid Waste in Recife, Brazil”, Environmental Geotechnics, Edited by Masashi Kamon, Kyoto, Balkema, SBN 90 5410 849 5, pp. 91- 96.
33. Jucá, J.F.T., Melo, V.L.A., Monteiro, V.E.D. (2000), “Ensaio de Penetração Dinâmica (SPT) em Aterros de Resíduos Sólidos”, IX SILUBESA – Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Seguro – BA, CD.
34. Jucá, J.F.T, Monteiro, V.E.D.,Melo, M.C., (2002). “Monitoreo ambiental de la recuperación del Vertedero de residuos sólidos de Muribeca, Brasil – 1a parte.”, Residuos – Revista Técnica Medio Ambiente. Ategrus – Asociación Técnica para la Gestión de Residuos y Medio Ambiente, Año XII, No 64 Enero-Febrero 2002, I.S.S.N.: 1.131-9.526, pp. 100-106. España.
35. Jucá, J.F.T, Monteiro, V.E.D.,Melo, M.C., (2002). “Monitoreo ambiental de la recuperación del Vertedero de residuos sólidos de Muribeca, Brasil – 2a parte.”, Residuos – Revista Técnica Medio Ambiente. Ategrus – Asociación Técnica para la Gestión de Residuos y Medio Ambiente, Año XII, No 65 Marzo - Abril 2002, I.S.S.N.: 1.131-9.526, pp. 68-76. España..
36. Jucá, J.F.T., Monteiro, V.E.D., Oliveira, F.J.S, Maciel, F.J. (1999), “Monitoramento Ambiental do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca, III Seminário Nacional sobre Resíduos Sólidos Urbanos”, Toledo, Paraná, CD.
37. Junqueira, F. F., (2000). “Análise do Comportamento de Resíduos Urbanos e Sistemas Dreno Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência ao Aterro do

- Jóquei Clube – Df. Tese de Doutorado”, Universidade de Brasília, pp. 283, Brasília, DF.
38. Kinman, R.,J. Richabaugh, J. Donnelly, J. Nutini, And M. Lambert., (1986). “Evaluations and disposal of waste materials within 19 teste lysimeters at Center Hoill”. EPA- 600/2-86-035.U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH,
 39. Landva, A, O. Valsangkar A.J. & Pelkey S.G., (2000). “Lateral earth pressure at rest and compressibility of municipal solid waste”. Canadian Geotech, J. Vol 37, No 6, pp. 1157-1165.
 40. Lawrence, A.W. McCarty, P.L., (1965). The Role of Sulfide in Preventing Heavy Metal Toxicity in Anaerobic Tratmant. J. WPCF, V. 37, pp. 392-409.
 41. Lee Y.H. & Fan L.T., (1982). “Kinetic studies of enzymatic hydrolysis of insoluble cellulose: (I) Analysis of the initial rates”. Biotechn. & Bioeng., V. 24, pp. 2383-2406.
 42. Lee Y.H. & Fan L.T., (1983). “Kinetic studies of enzymatic hydrolysis of insoluble cellulose: (II) Analysis of the initial rates”. Biotechn. & Bioeng., V. 25, pp. 939-966.
 43. Lima, L.M.Q., (1983). “Estudos de Otimização do Processo de Metabolização de Lixo em Aterro Sanitário”. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Modalidade Térmica e Flúidos. UNICAMP
 44. Lima, E.S., Jucá, J.F.T., Bastos Leite, P.R., Melo, V.L.A., Barros Souto E.J., (2002). “Preliminary assessment of the metal contaminant potential of the leachate produced in a controlled sanitary landfill, Muribeca, Pernambuco, Brazil”, Waste Management and the Environment, Fist International Conference on Waste Management and the Environment, WIT Press, Southampton, UK. pp. 454-458.
 45. Lima, L.M.Q. Nunes, C.R., (1994). “Aterro Sanitário Celular”.
 46. Lima, L.M.Q.,(1988). “Estudos da Influência da Reciclagem de Chorume na Aceleração da Metanogênese em Aterro Sanitário” Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (USP) – São Carlos. Vol I., pp. 01-433.
 47. Maciel, F.J., Jucá, J.F.T., (2000). “Laboratory And Field Test For Studying Gas Flow Through Msw Landfill Cover Soil”, Asce Geotechnical Special Publication, Number 99, pp. 569.
 48. Madigan, M.T., Martinko, J. M., Parker, J., (1997). “Procariótic Diversity”, In: Brock Biology of Microorganisms, 8. ed. Upper Saddle River, Prentice Hall, Cap. 16, pp. 986.

49. Manios, V.I., Tsikalas, P-E. & Siminis, H.I., (1989). "Phytotoxicity of olive tree in relation to organic acid concentration". *Biollwastes*, 27, pp. 307-317.
50. Mariano, M.O.H., (1999). "Recalques no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca" Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Recife, PE.
51. Martin, A. M. (1991). "Bioconversion of Waste Materials to Industrial Products". Elsevier Applied Science.
52. Marques, A.C.M., Vilar, O.M., Kaimoto, L.S. (2002). "Compactação de Resíduos Sólidos Urbanos", Solos e Rochas – Revista Latino-americana de Geotecnia, ISSN 0103-7021, Vol. 25, Nº 1, Janeiro-abril 2002, pp. 37-50.
53. Marques, A.S., Silva, A.J.P.,(2001). "Composto de Resíduos Sólidos Urbanos-Vantagens e Desvantagens da sua Aplicação no Solo" Universidade de Évora. Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais. Portugal.
54. Mazur, N., (1997) "Níquel, zinco, chumbo e cobre em solos que receberam composto de resíduo sólidos urbanos". Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, pp.129, (Tese de Doutorado).
55. McDougall J.R. & Philp J.C., (2001). "Parametric Study of Landfill Biodegradation Modelling: Methanogenesis & Initial Conditions", In Proc. Sardinia 2001, 8th Intl. Waste Man. & Landfill Symp. Eds. Christensen TH, Cossu R & Stegmann R, CISA, Cagliari, Vol. 1, pp. 79-88
56. Markovich, A, V. Petrova, L.Y., (1966). "Chromatography of Proteins on Cellulose Ionites. Acad. SCI. USSR, Moscow.
57. Melo, M.C. Monteiro, V.E.D. Neves, M.L, Araujo, J.M. Jucá, J.F.T., (2002). "Estudos de toxicidade em aterros de resíduos sólidos urbanos". *Revista Biotecnologia*. Ano V, Setembro/outubro nº 28, pp. 48-52.
58. Miller, F.C., (1991). "Biodegradation of solid Wastes by composting". In *Biological Degradation of Wastes*, ed. A M. Martin, Elsevier Applied Science, London, UK, pp. 1-25
59. Moreda, I.L., (2000). "El Asentamiento en un Relleno Sanitario y su Relación com la Biodegradación". XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería sanitaria y Ambiental. Porto Alegre, RS,
60. Monteiro, V.E.D., (2002). "Interações Físicas, Químicas e Biológicas na Análise do Comportamento de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos". Qualificação para obtenção do título de doutor, UFPE, Recife, PE.

61. Monteiro, V.E.D., Jordão, R.B., Jucá, J.F.T., Brito, A R., (2000). “Uma Análise Comparativa de Recalques Superficiais e em Profundidade no Aterro da Muribeca”, XXVII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Porto Alegre, RS, CD.
62. Monteiro, V.E.D. & Jucá, J.F.T., (2001). “Municipal Solid Waste Landfill Behavior Using Geotechnical Instrumentation”, XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, Turquia.
63. Monteiro, V.E.D., Jucá, J.F.T., Rêgo, C.C., (2001). “Influência das Condições Climáticas no Comportamento do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca”, 21º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa, PB.
64. Monteiro, V.E.D., Melo, M.C., Jucá, J.F.T., (2002). “Biological Degradation Analysis in Muribeca Solid Waste Landfill Associated with Local Climate – Recife, Brazil”, Fourth International Congress on Environmental Geotechnics 4ISEG, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
65. Morel, J.L., Colin, F., Germon, J.C., Godin, P., Juste, C., (1985). “Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost”. In *Composting of Agricultural and Other Wastes*, ed. J.K.R. Gasser. Elsevier Applied Science, New York. USA, pp. 56-72.
66. NBR 10004 – Resíduos Sólidos
67. NBR 10007, (1987). “Amostragem de Resíduos”.
68. NBR 6457, (1986). “Preparação para Ensaios de Caracterização”.
69. NBR 6484, (1979). “Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento nos Solos”.
70. NBR 6502. “Terminologia de Rochas e Solos
71. NBR 7250, (1980). “Identificação e Descrição de Amostras de Solos Obtidos em Sondagens de Simples Reconhecimento”.
72. NBR 8036 – Normas Gerais de Sondagem de Reconhecimento para Fundações de Edifícios.
73. Oliveira, C., (1998). “Avaliação do potencial de contaminação de dois solos agrícolas com lodo de esgoto enriquecido com Cd, Pb, e Zn. Seropédica”. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (Tese de Doutorado), pp.191,.
74. Pahren, H., (1987). “Microorganisms in municipal solid waste and public health implications”, *CRC Crit. Environ. Control.* 17, pp. 187-228.

75. Palma, J. H. (1995). "Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos". Tesis Doctoral. ETSCCP, Universidad de Cantabria. España.
76. Palma, J. H., Espinace, R., Valenzuela P., Szanto M., (1999). "Reducción de Los Tiempos de Estabilización em Rellenos Sanitários Operados com Recirculação de Lixiviados Tratados". XIII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS.
77. Palmisano, A.C. & Barlaz, M.A., (1996). Microbiology of Solid Waste, In Anna C. Palmisano, Morton A. Barlaz (eds), pp. 1-224.
78. Pereira, A.G.H., (2000). "Compressibilidad de los Residuos Sólidos Urbanos, Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, España.
79. Polvinelli, J., (1987). "Ação dos Metais Pesados nos Processos Biológicos de Tratamento de Águas Residuárias. Tese de livre docência, EESC - USP.
80. Powrie W. Richards D.J. & Beaven R.P., (1998). "Compression of waste and implications for practice. In Geotechnical Engineering of Landfills", eds. Dixon N. Murray E.J. & Jones D.R.V. Thos Telford, London, pp. 3-18.
81. Relatórios EMLURB, (1999). "Relatórios do Monitoramento Ambiental do Aterro da Muribeca", Universidade Federal de Pernambuco (ATEPE/PCR), Recife, PE
82. Ribeiro, H. M. F.; Duarte, E. F. A.; Baião, M.; Rola, E. & Vaz, M. C. (artigo não publicado). "An Evaluation of Three Municipal Solid Waste Composts". Fertilizer Research. Kluwer Academic Publishers.
83. Rosen, C. J.; Halbach, T. R. & Swanson, B. T., (1993). "Horticultural uses of Municipal Solid Waste Composts". Horticultural uses of Municipal Solid Waste Composts. Hort Technology 3(2). American Society for Horticultural Science.
84. Sanchez, P. S., (1999). "Atualização em Técnicas para o Controle Microbiológico de Águas Minerais", Universidade Mackenzie – Pós Graduação em Ciências Ambientais, SP.
85. Sanches, Alciturri J.M., Palma J.G., Sagasetta C. & Cañizal J., (1995). "Three Years of Deformation Monitoring at Meruelo Landfill". Waste Disposal by Landfill – GREEN'93. Sarsby (ed), 1995, Balkema, '93. Sarsby (ed), 1995, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410356 6., Vol., pp. 365-371.
86. Santos, L.A.O. & Presa, E.P., (1995). "Compressibilidade de Aterros Sanitários Controlados" III REGEO. Vol.2, pp. 577-591
87. Sheppard, M. I. & Thibault, D. H., (1992). "Desorption and extraction of selected heavy metals from soils". Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, n. 56, p.415-423.

88. Shimizu, R.N. & Demarquette, N.R., (2000). "Evaluation of Surface energy of solid polymers using different models". *J of Applied Polymer Science.*, 76 (12):pp, 1831-1845
89. Simões, G. F., (2000). "Modelo para Avaliação de Recalques em Aterro de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos" Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Brasil.
90. Sowers, G.F., (1973). "Settlements of Waste Disposal Fills". *Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 4, pp. 207 – 210.*
91. Tam , N.F.Y. & Tiquia, S.M., (1994). "Assessing toxocity of spent sawdust pig-litter using seed germination technique" *Resour. Conservy, Recycl.*,11, pp. 261-274.
92. Tchobanoglous, G. Theisen, H & Eliassen, R., (1977). "Solid Wastes: Engineering and Management Issues" McGraw-Hill Book Company, N.Y.
93. Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S.A., (1994), "Gestión Integral de Residuos Sólidos", Ed. McGraw-Hill, Madrid, pp. 1-1080
94. Tiquia, S.M., N.F.Y & Hodgkiss.I.J.; (1996). "Effects of composting on phytotoxicity of spent Pig-manure Sawdust Litter". *Hong Kong*, 93,pp. 249-256.
95. Todar, K., (1998). "Bacterial of Medical Importance", In: Baron's medical microbiology. Madison, <<http://www.bact.wisc.edu/Bact303/medicalimportance>>
96. Todar, K., (2000). "Nutrition and Bacterian Growth", In: Baron' Medical Microbiology, Madison, <<http://www.bact.wisc.edu/Bact303/NutritionandGrowth>>
- 95 Todar, K., (2001). "Mechanisms of Bacterial Pathogenicity". In: Baron s medical microbiology. Madison. <<http://www.bact.wisc.edu/bact303/bact303pathogenesis>>.
- 96 Tortora, G.J, Funke, B.R. Case, C.L., (2000). "Microbiologia". Editora Artimed, 6^o ed. Porto Alegre, RS Cap., 51, pp. 1-827.
97. USEPA (US Enviromental Protection Agency). (1982). Seed Germination/Root Elongation Toxicity Teste. EG – 12. Office of Toxic Substances, Washington D.C., USA
98. Vazoller, R.F., (2001) "Microbiologia e Saneamento Ambiental". USP.
99. Wall D.K. & Zeiss C., (1995). "Municipal Landfill Biodegradation and Settlement". *ASCE J. of Env. Eng.*, Vol. 121, No 3, pp. 214-223.

100. Wang, W.& Keturi, P.H., (1990). Comparative Seed Germination Tests Using Ten Plant Species for Toxicity Assessment of a Metal Engraving Effluent Sample. *Wat. Air Soil Pollut.*, 52, pp. 369-376.
101. Warren, J.E., Bennett, M.A.,(1997). Seed Bydration Using the Drum Priming System. *HortScience*, 32: 1222-1221.
102. Watts, K.S., Charles, J.A., (1990). "Settlements of recently placed domestic refuse landfill"., *Proc. Instn. Civ. Engrs*, Part 1, Dec., pp. 971-993.
103. WHO - International Reference Center for Wastes Disposal. (1979), "Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost", Switzerland.
104. Wong, M.H., (1985). "Effects of animal manure composts on tree (*Acacia confusa*) seedling growth. *Agric. Wastes*, 13, pp. 261-272.
105. Wong, M.H, Cheung, Y.H. & Cheung, C.L., (1983). "The Effects of ammonia and ethylene oxide in animal manure and sewage sludge on seed germination and root elongation of *Brassica parachinenses*". *Environ Pollut.*,30, pp. 109-123.
106. Wulcik, W.J. & Jewell, W., (1980). "Dry Anaerobic Fermentation" In: SCOTT, C.C. (eds). *Second Symposium on Biotechnology for Energy Production and Conservation*. John Wiley & Sons, N.Y.
107. Yen, B.C., Y Scanlon, B., (1975). "Sanitary landfill settlement rates". *ASCE Jnl. Geotechnical Engineering Division*, 101, GT5, pp. 475-487.
108. Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A. & De Bertoldi, M., (1981 a). "Biological evaluation of Compost Maturity". *BioCycle*, 22, pp. 27-29.
109. Zucconi, F.M., Monaco, A.& Forte, M., (1985). "Phytotoxins during the stabilization of organic matter", In *Composting of Agricultural and Other Wastes*, ed. J.K.R. Gasser. Elsevier Applied Science Publishers, New York, USA, pp. 73-86.

APÊNDICE A

Nas Figuras A1 a A25 são mostradas as magnitudes e velocidades medidos nas placas e aranhas.

Placas

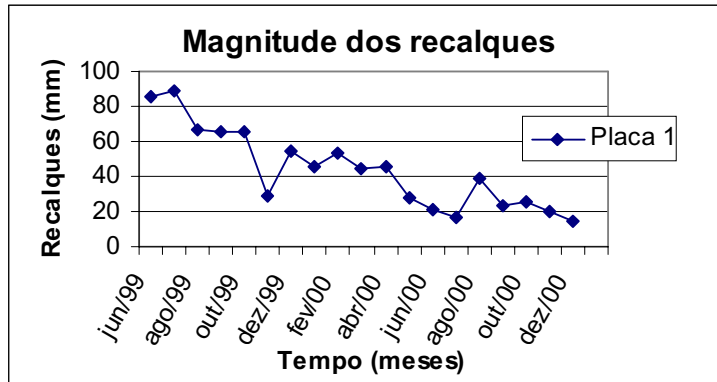


Figura A.1 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 1)

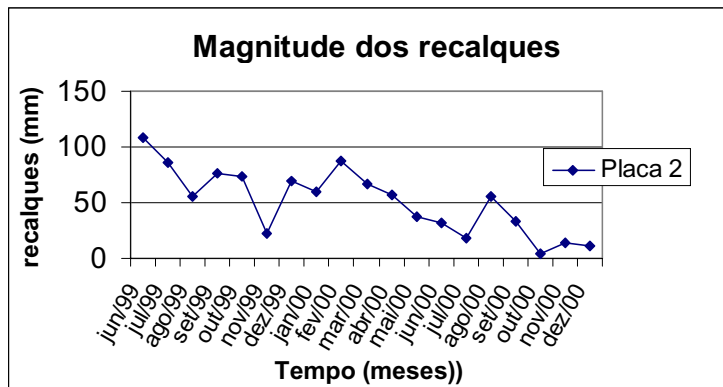


Figura A.2 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 2)

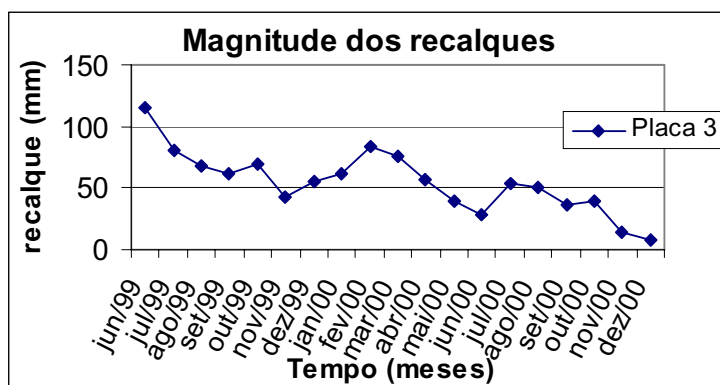


Figura A.3 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 3)

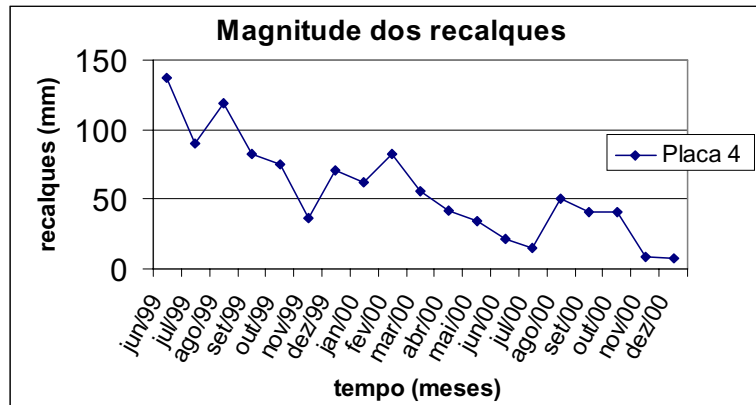


Figura A.4 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 4)

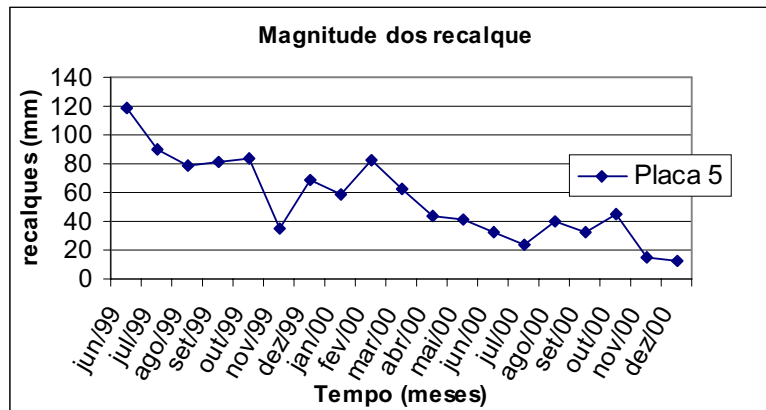


Figura A.5 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 5)

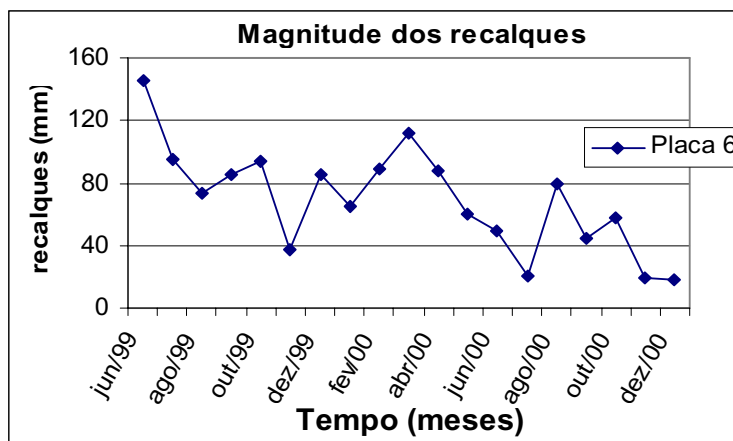


Figura A.6 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 6)

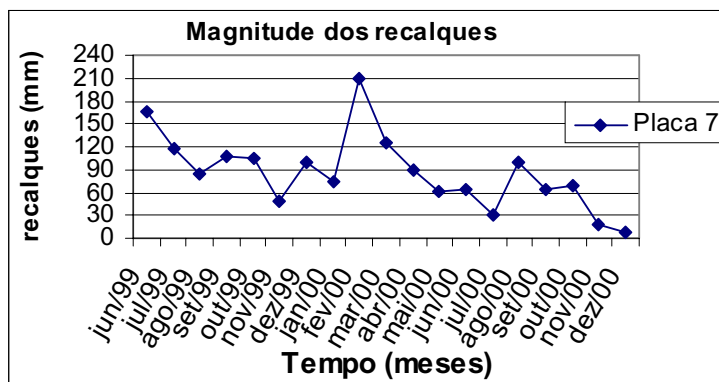


Figura A.7 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 7)

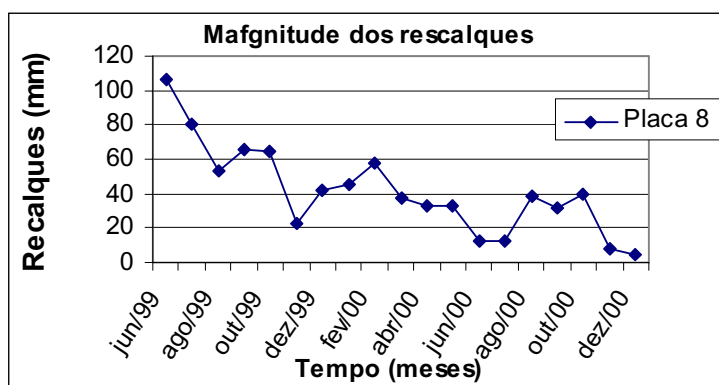


Figura A.8 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 8)

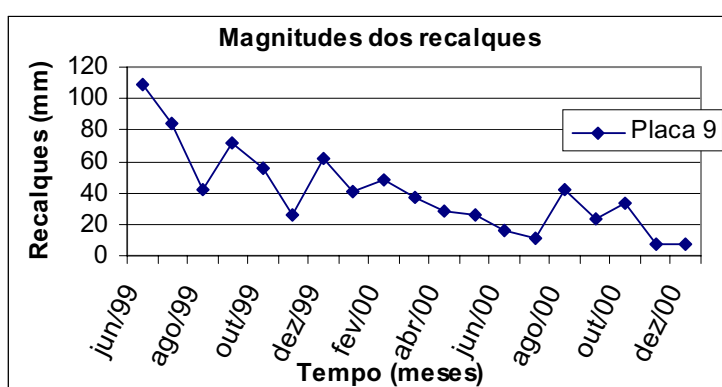


Figura A.9 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 9)

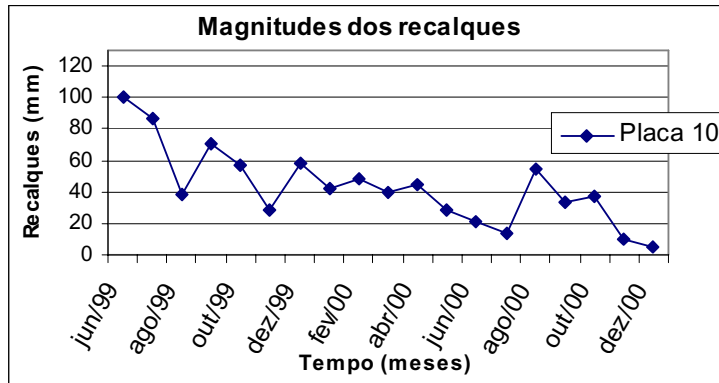


Figura A.10 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 10)

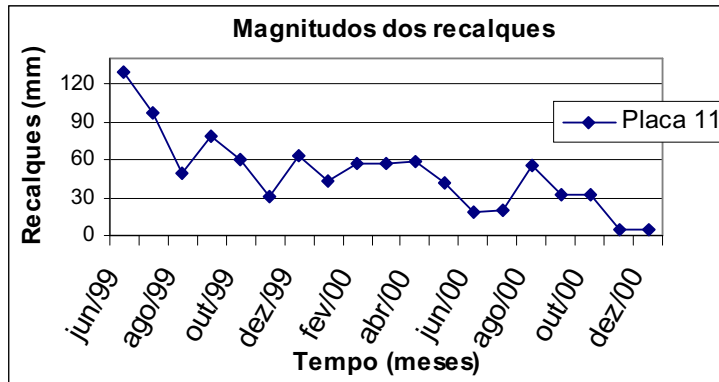


Figura A.11 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 11)

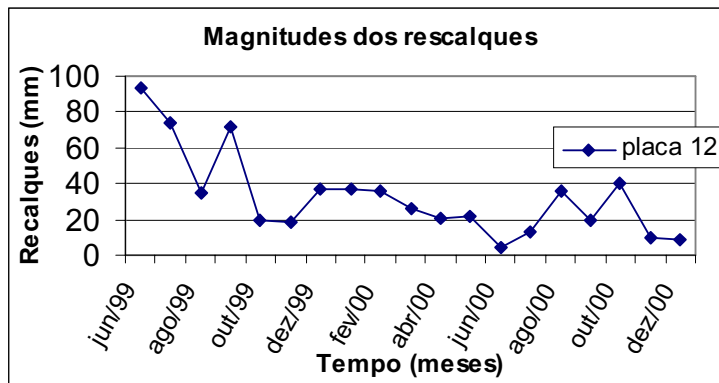


Figura A.12 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 12)

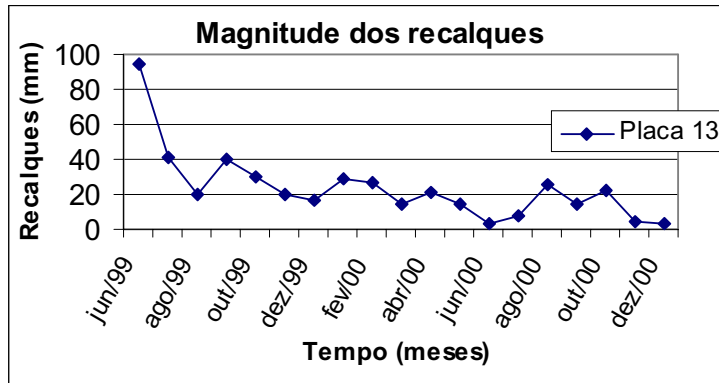


Figura A.13 – Magnitudes dos recalques com o tempo (placa 13)

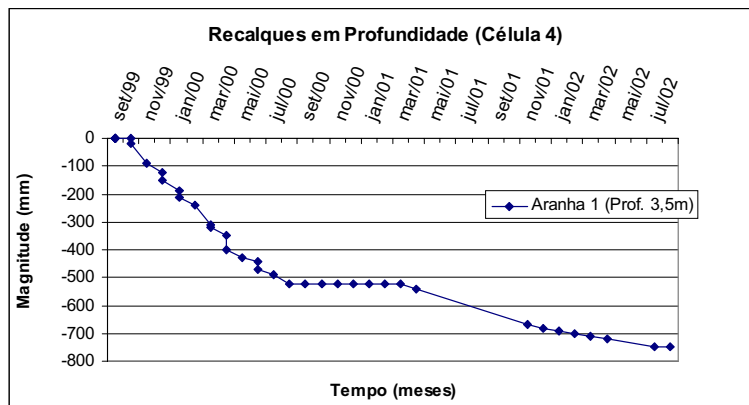


Figura A.14 – Magnitudes dos recalques com o tempo (Aranha 1)

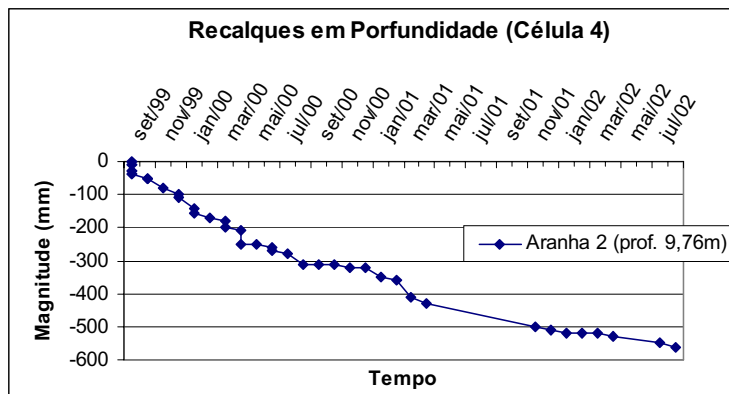


Figura A.15 – Magnitudes dos recalques com o tempo (Aranha 2)

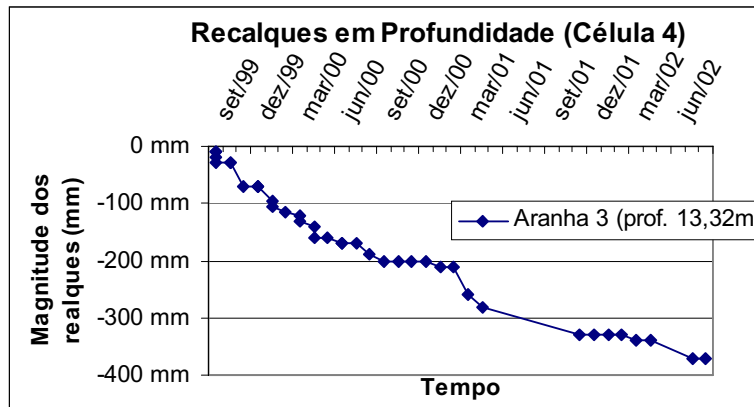


Figura A.16 – Magnitudes dos recalques com o tempo (Aranha 3)

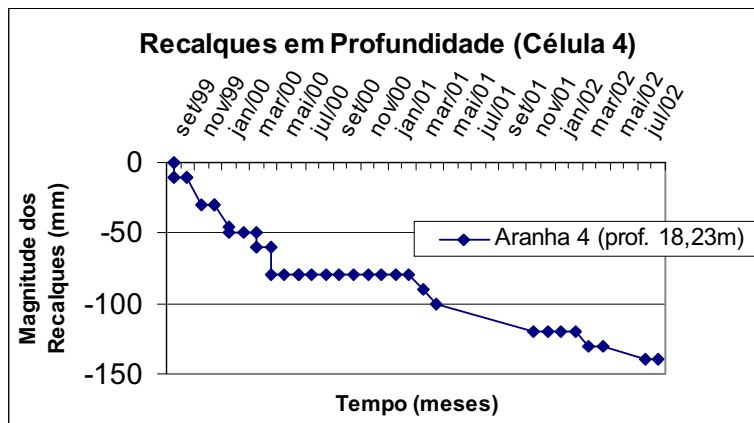


Figura A.17 – Magnitudes dos recalques com o tempo (Aranha 4)

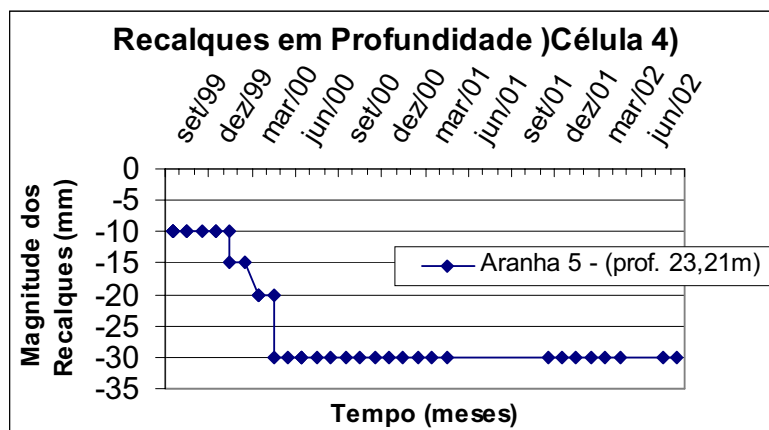


Figura A.18 – Magnitudes dos recalques com o tempo (Aranha 5)

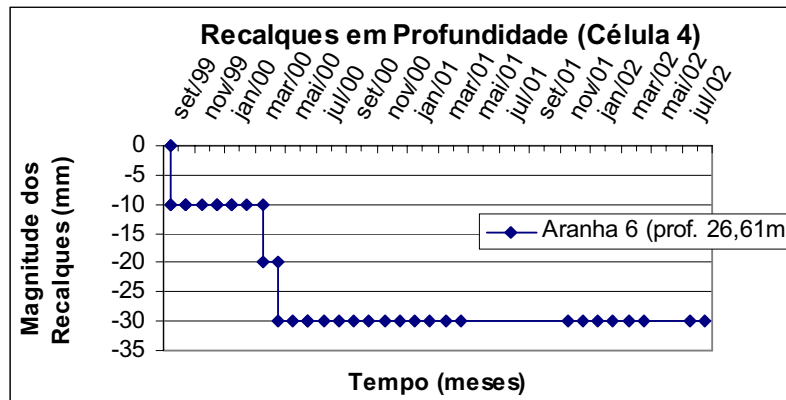


Figura A.19 – Magnitudes dos recalques com o tempo (Aranha 6)

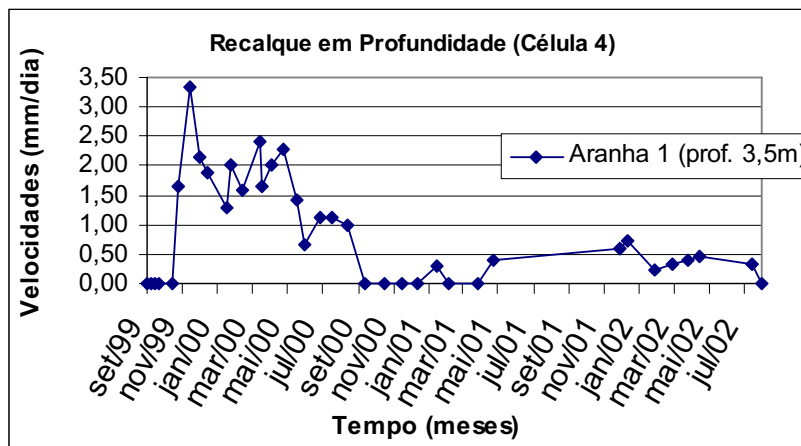


Figura A.20 – Velocidades dos recalques com o tempo (Aranha 1)

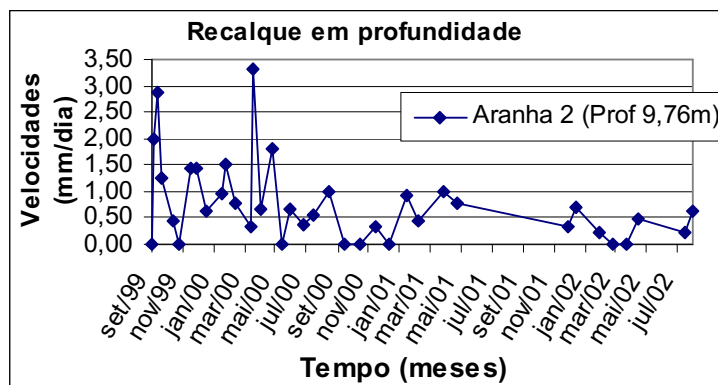


Figura A.21 – Velocidades dos recalques com o tempo (Aranha 2)

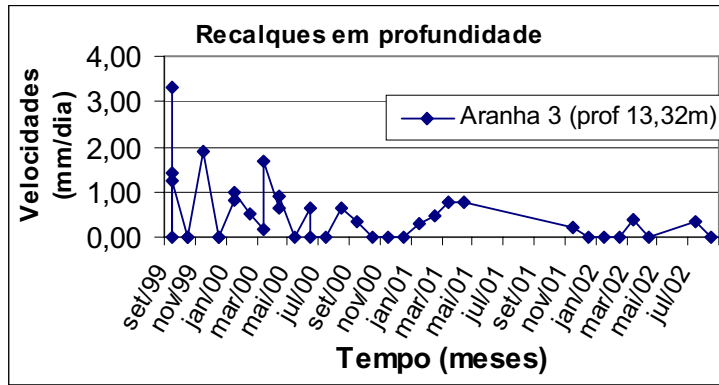


Figura A.22 – Velocidades dos recalques com o tempo (Aranha 3)

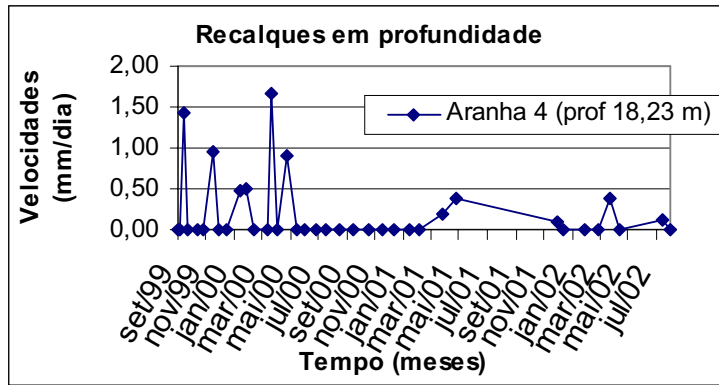


Figura A.23 – Velocidades dos recalques com o tempo (Aranha 4)

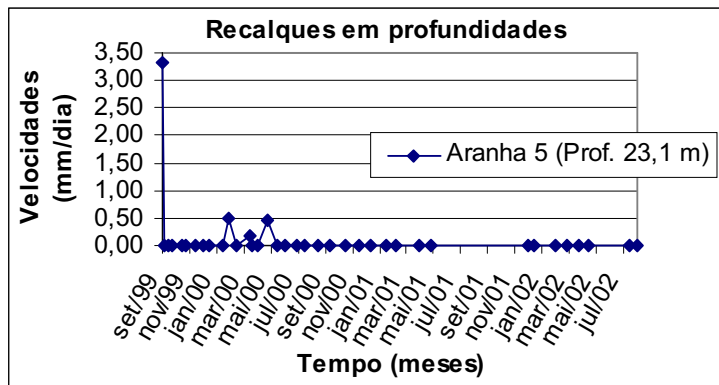


Figura A.24 – Velocidades dos recalques com o tempo (Aranha 5)

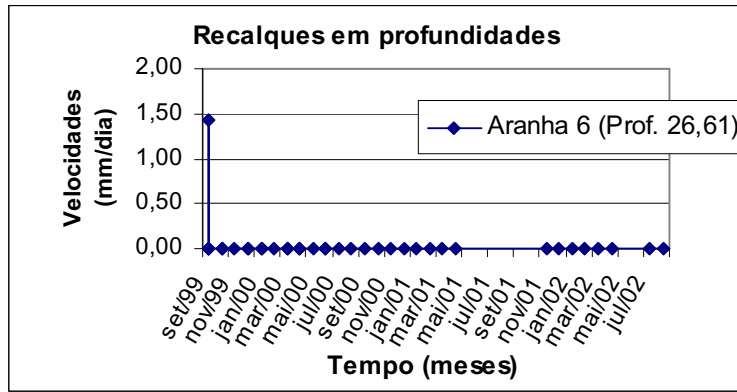


Figura A.25 – Velocidades dos recalques com o tempo (Aranha 6)

Nas Figuras A26 e A 27 são mostradas as previsões de recalques nas Aranhas 3 e 4 .

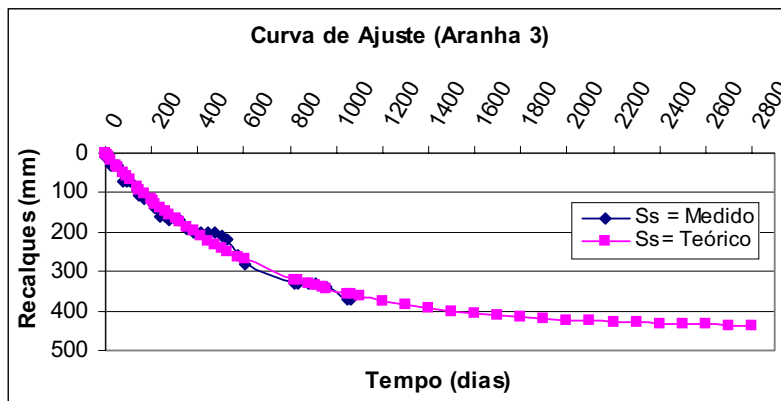


Figura A.26. Previsão de recalques (Recalques teóricos Célula 4 (Aranha 4))

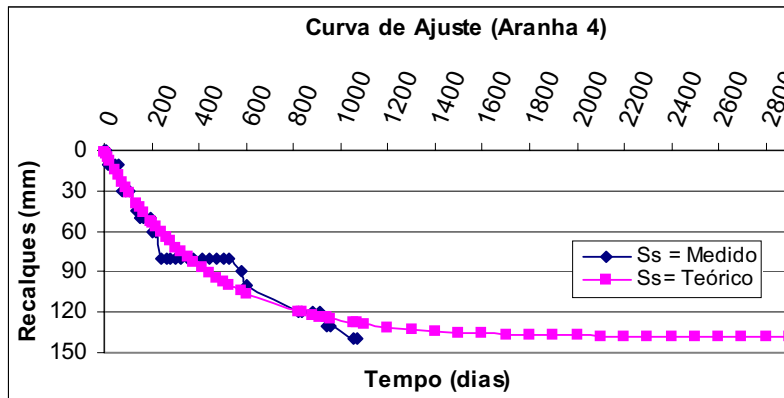


Figura A.27. Previsão de recalques (Recalques teóricos da Célula 4 (Aranha 4))