

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E MONITORAMENTO DE CÉLULAS DE
RESÍDUOS SÓLIDOS COM ACELERAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO.**

ENG^a SUZANA MICHELINNE DELLABIANCA ARAÚJO

ORIENTADOR: PEDRO MURRIETA SANTOS NETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO G.DM-082/2001-06-07

**BRASÍLIA - DF
JULHO / 2001**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

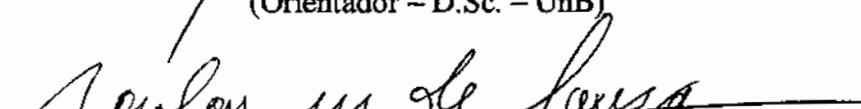
**PROJETO, CONSTRUÇÃO E MONITORAMENTO DE CÉLULAS DE
RESÍDUOS SÓLIDOS COM ACELERAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO**

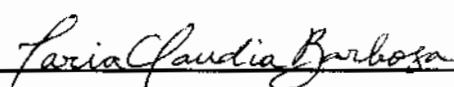
ENG^a SUZANA MICHELINNE DELLABIANCA ARAÚJO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS (M. Sc.).

APROVADA POR:


Prof. Pedro Murrieta Santos Neto
(Orientador – D.Sc. – UnB)


Prof. Newton Moreira de Souza
(Examinador Interno – D.Sc. – UnB)


Prof^a. Maria Cláudia Barbosa
(Examinador Externo – D.Sc. – UFRJ)

BRASÍLIA, 06 DE JULHO DE 2001.

FICHA CATALOGRÁFICA

DELLABIANCA, Suzana Michelinne Araújo

Projeto, Construção e Monitoramento de Células de Resíduos Sólidos com Aceleração da Decomposição, 2001

xvii, 125 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, M.Sc., Geotecnica, 2001)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil.

- | | |
|---------------------|-----------------------------|
| 1. Aterro Sanitário | 2. Resíduos sólidos urbanos |
| 3. Tratamento | 4. Monitoramento |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DELLABIANCA, S. M. A. (2001). Projeto, Construção e Monitoramento de Células de Resíduos Sólidos com Aceleração da Decomposição, Publicação nº G.DM-082/2001, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 113 p.

CESSÃO DE DIREITOS

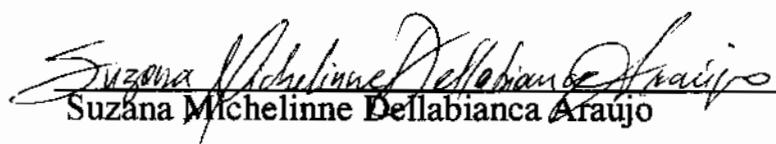
NOME DO AUTOR: Suzana Michelinne Dellabianca Araújo

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Projeto, Construção e Monitoramento de Células de Resíduos Sólidos com Aceleração da Decomposição

GRAU: Mestre em Ciências

ANO: 2001

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Suzana Michelinne Dellabianca Araújo

Rua Marechal Álvaro Alvim Câmara, 33/404 - Praia da Jatiúca

CEP 57.035-660

Maceió – Alagoas – Brasil

E-mail: sumaceio@unb.br

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, por sua constante proteção, a meus inesquecíveis avós Suzana Bezerra de Araújo e Nicolau Pedro de Araújo, por minha eterna gratidão e a meus amados pais Mélia Delabianca Araújo e Mauro Araújo Bezerra pelo amor, incentivo e por terem sido fonte de inspiração nessa trajetória que percorri.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente com imensa gratidão agradeço a meu amado primo-pai Jôao Bosco Delabianca e a minha inesquecível irmã (gêmea) Luciana Michèle Dellabianca Araújo. Sem o apoio de vocês minha vinda à Brasília não teria acontecido.

Mais uma vez dedico esse trabalho aos meus pais e agradeço pelo constante apoio moral e, muitas vezes, financeiro. Vocês merecem essa vitória tanto quanto eu!!

As minhas amadas irmãs Maura Michaela, Mellia Nichole e Sarah Dominique Dellabianca Araújo, vocês mesmo distantes, estão muito perto do meu coração. E ao meu amado Fred, pelo seu apoio e incentivo.

Ao meu querido amigo Huberlandy (Huber), por sua constante ajuda e companheirismo e a querida amiga Neide, por sua demonstração de carinho e preocupação em todas os momentos.

Ao professor Pedro Murrieta, meu agradecimento pela orientação e compreensão dispensadas ao Chicão (ENTERPA) e equipe por sua grande contribuição na construção das células.

Ao amigo Luis Guilherme pela grande ajuda mesmo nos momentos mais críticos (carregar lixo) e as queridas amigas Ana Karina, Maruska e Zanna pela constante presença na fase final da minha pesquisa.

Pela grande amizade demonstrada em todos os momentos, agradeço as queridas Janaína (Jana), Zanna e Cristina Roriz (Cris), por todos os momentos de descontração que passamos juntas. Valeu garotinhas!!!

As queridas companheiras de bola, pelos momentos de descontração vivenciados no futsal do SG 12. Que a vitória as acompanhe em todas as partidas do jogo da vida!

Finalmente a amiga Caroline De Zorzi pelo grande apoio na impressão dos exemplares dessa dissertação e a todos os amigos que fizeram parte da minha inesquecível fase de mestrado.

RESUMO

A problemática da disposição do lixo é uma constante no dias atuais e há muito tem sido tema de estudos, podendo-se citar aqueles relacionados com os aterros sanitários, tendo em vista serem uma das principais formas de destinação final para os resíduos sólidos. Partindo desse contexto, desenvolveu-se uma pesquisa visando encontrar maneiras de acelerar a decomposição da matéria orgânica presente na massa de lixo, para com isso se ganhar espaço para novas disposições em aterros sanitários.

Assim, foram projetadas e construídas cinco células de resíduos sólidos urbanos em grande escala (12 m x 12 m de comprimento e de largura e aproximadamente 4 m de altura total de lixo). Dentre as células, uma serviu como referência, não sendo submetida a nenhum tratamento alternativo da matéria orgânica. Nas demais foram adotados tratamentos diferenciados para acelerar a decomposição, a saber: a) tratamento anaeróbios via recirculação de chorume e via circulação de água, b) tratamento com cobertura final granular e c) tratamento aeróbio com injeção de ar. Todas as células foram monitoradas no intuito de se acompanhar as transformações físicas da massa de resíduos (recalques, temperaturas, resistência) e a qualidade do chorume (análises físico-químicas). Também fez parte do trabalho um estudo paralelo em laboratório, objetivando um melhor entendimento a respeito do tratamento aeróbio de resíduos sólidos (reator aeróbio).

Os resultados mostraram que a aceleração da decomposição, quando bem controlada, traz algumas vantagens do ponto de vista físico da massa de lixo, ou seja, influencia diretamente no aumento dos recalques proporcionando um ganho de área. Quanto às características do chorume produzido, o tempo de pesquisa ainda não foi suficiente para se chegar a conclusões mais precisas.

ABSTRACT

The problematic of the disposal of the municipal solid waste is a constant in the current days and for a long time has been subject of studies, being to cite those related with the sanitary landfills, the ones in view of being one of the main forms of final destination to the urban waste. Having this context, a research was developed aiming at to find ways to speed up the decomposition of organic substance in the urban waste mass, with this gaining space for new disposal in landfills.

Had been projected and constructed five cells of solid waste in a large-scale (12 meters x 12 meters of size and width and approximately 4 meters of total height of waste). Among the cells, one served as reference, being submitted to no alternative handling of the organic substances. In differentiated handlings had been excessively adopted to rapid stabilization in other four cells , to know: a) leachate recirculation and water circulation (anaerobic decomposition), b) cell with granular final covering and, c) air injection (aerobic decomposition). All the cells had been monitoring with in the intention of following the physical hashings of the solid waste mass (settlement, temperatures, strength), and the quality of leachate (analyses physicist-chemistries). Also it was part of the work a parallel laboratory study objectifying one better agreement regarding the aerobic decomposition of urban waste (aerobic reactor).

The results had show that the rapid stabilization of lanfills, when well burst, beings some physical advantages of the solid waste mass, or either, influence directly in the increase of settlement providing them an area profit. How much to the features of the produced leachate, the research time stile was not enough to arrive the conclusions most necessary.

ÍNDICE

Capítulo	página
1 – INTRODUÇÃO	
1.1 – MOTIVAÇÃO	001
1.2 – ESCOPO DA PESQUISA	001
1.3 – SINOPSE DA PESQUISA	003
2 – RESÍDUOS SÓLIDOS	
2.1 – INTRODUÇÃO	004
2.2 – RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (LIXO)	004
2.2.1 – Classificação dos Resíduos Sólidos	004
2.3 - LIXO NUM ENTORNO URBANO	006
2.4 – LIXO E POLUIÇÃO	007
2.4.1 – Chorume	007
2.4.2 – Fatores que Influenciam a Quantidade de Chorume	007
2.4.3 – Fatores que Influenciam a Qualidade de Chorume	008
2.5 – MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE LIXO	009
2.5.1 – Aterro a céu aberto	009
2.5.2 - Aterro Controlado	010
2.5.3 – Aterro Sanitário	010
2.6 – O ECOSISTEMA ATERRO SANITÁRIO	013
2.7 – DEGRADAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA	015
2.7.1 – Fases da Degradação	015
2.8– MÉTODOS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	017
2.8.1 – Compostagem –Reciclagem	017
3 – ATERRO SANITÁRIO	
3.1 – INTRODUÇÃO	021
3.1.1 – Remediação de Lixões	021
3.2– PROJETO DE ATERRO SANITÁRIO EM ÁREAS NOVAS	022
3.2.1 - Sistema de Drenagem Superficial	023

3.2.2 - Sistema de Impermeabilização	024
3.2.3 – Sistema de Drenagem e Tratamento dos Gases	033
3.2.4 – Sistema de Drenagem e Coleta do Percolado (chorume)	035
3.2.5 – Análise da Estabilidade	044
3.2.6 – Sistemas Alternativos de Tratamento de Resíduos Sólidos	047
3.2.7 - Sistemas de Monitoramento	049
4 – METODOLOGIA	
4.1 – INTRODUÇÃO	055
4.2 – PROJETO DAS CÉLULAS	056
4.2.1 – Sistema de Impermeabilização das Células	058
4.2.2 – Análise da Estabilidade dos Taludes	059
4.2.3 – Análise da Estabilidade do Lixo	061
4.2.4 – Sistema de Drenagem dos Gases	061
4.2.5 – Sistema de Drenagem do Chorume	062
4.2.6 – Camada de Cobertura Final	063
4.2.7 – Sistema de Tratamento Diferenciado	063
4.2.8 – Sistema de Monitoramento das Células	065
4.3 – EXECUÇÃO DAS CÉLULAS E DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO	067
4.3.1 – Abertura das Células	067
4.3.2 – Execução do Sistema de Impermeabilização	068
4.3.3 – Execução do Sistema de Drenagem do Chorume	069
4.3.4 – Enchimento das Células	071
4.3.5 – Implantação do Monitoramento	072
4.4 – PROJETO PILOTO DO SISTEMA AERÓBIO	075
4.4.1 – Elaboração do Projeto	075
4.4.2 – Metodologia Adotada no Estudo	076
5 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	
5.1 – INTRODUÇÃO	079
5.2 – ANÁLISE DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DAS CÉLULAS	080
5.2.1 – Análise dos Recalques	080
5.2.2 – Análise dos Ensaios de SPT	085

5.2.3 – Análise Físico-Química do Chorume	091
5.2.4 – Temperaturas	096
5.3 – ANÁLISE DO SISTEMA AERÓBIO DESENVOLVIDO NO LABORATÓRIO	097
5.3.1 – Recalques	097
5.3.2 – Teor de Sólidos Voláteis	098
5.3.3 – Abertura do Tambor	099
5.3.4 – Análise do Ar Circulado no Interior do Reator	100
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	
6.1 – CONCLUSÕES	101
6.2 – SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	102
APÊNDICE	
APÊNDICE A	113
APÊNDICE B	122

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
Figura 2.1 -	Classificação dos resíduos sólidos, em ordem crescente, de acordo com seu grau de periculosidade (Fonte: Koener, 1994).	005
Figura 2.2 -	Esquema simplificando os tipos de lixo produzidos num entorno urbano.	006
Figura 2.3 -	Método da trincheira: a) Planta; b) Corte A-A (modificado de Bagchi,1994)	012
Figura 2.4 -	Método da rampa: a) Planta; b) Corte A-A (modificado de Bagchi,1994)	012
Figura 2.5 -	Método da área: a) Planta; b) Corte A-A (modificado de Bagchi,1994)	013
Figura 2.6 -	Ecossistema de um aterro sanitário. (Fonte: Adaptado de Schalch, 1992)	014
Figura 2.7 -	Variação na composição do gás de aterros sanitários (modificado de Pohland, 1987).	016
Figura 2.8 -	Efeito da umidade na produção de gás em aterros sanitários. (Modificado de Tchobanoglous, et al. 1993)	017
Figura 2.9 -	Esquema de uma Usina de Triagem e Compostagem	018
Figura 3.1 -	Drenagem provisória e permanente de águas pluviais	024
Figura 3.2 -	Classificação da dispersão hidrodinâmica	027
Figura 3.3 -	Sistema único de impermeabilização de fundo e laterais de aterro sanitário	031
Figura 3.4 -	Sistema duplo de impermeabilização de fundo e laterais de aterro sanitário	032
Figura 3.5 -	Tipo de sistema de impermeabilização com detector de vazamento	032
Figura 3.6 –	Detalhe de um sistema de drenagem de gás	033

Figura 3.7 -	Parcelas do balanço hídrico usado pelo modelo HELP (modificado de Schroeder, 1994).	039
Figura 3.8 -	Balanço hídrico para o futuro aterro sanitário de Juiz de Fora - MG de acordo o HELP – Simulação 1 e 2 (Fonte: Correa Sobrinho & Azevedo, 1999).	041
Figura 3.9 -	Produção de chorume para o futuro aterro de Juiz de Fora – MG a) caso 1 b) caso 2 (fonte: Correa Sobrinho & Azevedo, 1999)	041
Figura 3.10 -	Sistemas de drenagem do chorume, a) Dreno cego; b) tubulação	043
Figura 3.11 -	Variação da densidade e da resistência dos resíduos sólidos em função do tempo (Walter, 1992).	046
Figura 3.12 -	Superfície de ruptura máxima para análises da estabilidade de resíduos sólidos. (modificado de Bagchi, 1990).	047
Figura 3.13 -	Esquema da recirculação de chorume em aterro sanitário para acelerar a decomposição da matéria orgânica, (Lima, 1995).	048
Figura 3.14 -	Monitoramento de recalques em reatores com e sem recirculação de chorume, (Fonte: Palma, 1997).	051
Figura 4.1 -	Esquema geométrico das células, a) planta; b) corte A-A	057
Figura 4.2 -	Disposição das células na área de pesquisa	057
Figura 4.3 -	Traçado das prováveis superfícies de ruptura de acordo com o programa SLOPE	060
Figura 4.4 -	Análise da estabilidade dos taludes das células via programa SLOPE	060
Figura 4.5 -	Detalhe do sistema de drenagem de gás das células	061
Figura 4.6 -	Croqui das placas de recalques	065
Figura 4.7 -	Limpeza da área destinadxa para pesquisa	067
Figura 4.8 -	Detalhe da locação das células	068
Figura 4.9 -	Detalhe da compactação no fundo das células	069
Figura 4.10 -	Execução do sistema de drenagem das células	070
Figura 4.11 -	Vista geral do sistema de drenagem do chorume	070
Figura 4.12 -	Análise gravimétrica do lixo da Célula I	071
Figura 4.13 -	Análise gravimétrica, lixo do Distrito Federal (Junqueira, 200)	071

Figura 4.14 -	Assentamento da placa de recalque sobre o colchão drenante	072
Figura 4.15 -	Enchimento das células	073
Figura 4.16 -	Introdução de um termopar na massa de lixo, a partir do furo de sondagem SPT	073
Figura 4.17 -	Esquema do sistema de tratamento aeróbio em laboratório	075
Figura 4.18 -	Vista do Sistema Aeróbio desenvolvido	076
Figura 4.19 -	Sistema de distribuição do ar no interior do reator	077
Figura 4.20 -	Características do lixo no interior do reator	078
Figura 5.1 -	Recalque absoluto para as placas 1 e 2, na Célula I	080
Figura 5.2 -	Recalque relativo Célula I (placas 1 e 2)	081
Figura 5.3 -	Recalque relativo das Células II e III	082
Figura 5.4 -	Recalque absoluto da Célula II	083
Figura 5.5 -	Recalque absoluto da Célula III	083
Figura 5.6 -	Recalque absoluto da Célula IV	084
Figura 5.7 -	Comparação entre as curvas de recalque das Células I, II, III e IV	085
Figura 5.8 -	Ensaio SPT na Célula I (Furo 01 – primeiro ensaio)	086
Figura 5.9 -	Ensaio SPT na Célula I (Furo 02 – primeiro ensaio)	087
Figura 5.10 -	Segundo ensaio de SPT realizado na Célula I	087
Figura 5.11 -	Comparação entre os dois ensaios de SPT (Célula I)	088
Figura 5.12 -	Dados do SPT realizado na Célula II	089
Figura 5.13 -	Dados do SPT realizado na Célula III	089
Figura 5.14 -	Dados do SPT realizado na Célula IV	090
Figura 5.15 -	Comparação entre os dados de SPT das quatro células	091
Figura 5.16 -	Demanda Química de Oxigênio (DQO) na Célula I	093
Figura 5.17 -	Concentração de nitrato e nitrogênio amoniacal na Célula I	094
Figura 5.18 -	Concentração de cloreto na Célula I	095
Figura 5.19 -	Recalque relativo médio no reator aeróbio	098
Figura 5.20 -	Recalque absoluto no reator aeróbio	098
Figura 5.21 -	Teor de sólidos voláteis no reator	099
Figura 5.22 -	Aspecto da camada de brita após abertura e retirada do lixo	099

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
Tabela 2.1 -	Gerenciamento da produção dos diferentes tipos de resíduos (modificado de Consoni & Peres, 1995).	05
Tabela 3.1 -	Capacidade de Campo para alguns solos, modificado de Tchobanoglous et al, (1993)	36
Tabela 3.2 -	Valores típicos da composição do chorume para aterros novos e antigos. (modificado de Tchobanoglous, 1993)	54
Tabela 4.1 -	Resumo dos sistemas utilizados nas células	56
Tabela 4.2 -	Dados característicos do solo da região do Aterro do Jockey Club (Pereira et al, 1997)	58
Tabela 4.3 -	Cronograma de fechamento das células	72
Tabela 5.1 -	Comparação entre os padrões de potabilidade da água e a qualidade atual do chorume produzido nas Células I e IV	96

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Constante empírica
A	Área do terreno
ADR	equação de advecção, difusão e retardo
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Batch Equilibrium Test
C	Concentração de poluente
C	Carbono
C_I	Célula I
C_{II}	Célula II
C_{III}	Célula III
C_{IV}	Célula IV
C_V	Célula V
c	Constante empírica
c'	Coesão efetiva
Ca	Cálcio
C H₄	Metano
Cl	Cloro
CL	Argila siltosa
CO₂	Dióxido de carbono
D	Coeficiente de difusão ideal da água
D*	Coeficiente de difusão efetiva
D_L	Coeficiente de dispersão hidrodinâmica
D_m	Coeficiente de dispersão mecânica
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
∂C* / ∂t	Taxa de retenção
Eh	Potencial Redox
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
ET	Evapotranspiração
F.S.	Fator de segurança

Fe	Ferro
g	Constante
G	Total de gás gerado
H₂	Hidrogênio
H₂O	Água
IP	Índice de Plasticidade
I_{cr}	Intensidade de chuva crítica
i	Declividade do dreno
I	Gradiente hidráulico
K	Condutividade hidráulica
K_θ	Condutividade hidráulica não saturada
K_d	Coeficiente de distribuição
K	Permeabilidade intrínseca
KPa	Quilo Pascal
KVL	Aterro Keele Valley
LAA	Laboratório de Análise de Águas
L_f	Escoamento lateral entre camadas
L	Coordenada curvilínea de direção ao longo do fluxo
MG	Minas Gerais
M_g	Magnésio
NBR	Norma Brasileira
N_aOH	Hidróxido de sódio
NH₃	Amônia
NO₃	Nitrato
N	Coeficiente de rugosidade
n	Porosidade do meio
O₂	Oxigênio
P	Precipitação média anual
P₁	Placa 1
P₂	Placa 2
P200	Peneira 200
P_r	Percolado
p	Porosidade do meio drenante

pH	Potencial Hidrogeniônico
Q	Vazão média
R_d	Coeficiente de retardo
R_h	Raio hidráulico
R_s	Escoamento superficial
S	Área da bacia contribuinte
S	Área da seção transversal
SV	Sólidos voláteis
SPT	Standart Penetration Test
ΣPG	Perdas e ganhos
ΣRC	Termo referente a reações químicas
T	Tempo
t	Tempo
t	Tonelada
V	Velocidade média de percolação
v^a	Velocidade cinemática da água
V_x	Velocidade de percolação do fluido
W	Fator empírico
w_L	Limite de liquidez
Y	Total de gás produzido no tempo
α_L	Dispersividade longitudinal
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
γ_t	Peso específico total do lixo
λ	Constante de decaimento radioativo ou biológico
ρ_d	Massa específica aparente seca do solo
ΔS_w	Variação do armazenamento de água no solo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – MOTIVAÇÃO

Sabendo-se que, na maioria das vezes, para cada produto consumido, uma certa percentagem é transformada em resíduo sólido, fica fácil concluir que a problemática do lixo urbano está intimamente associada ao aumento populacional e a eventuais mudanças na economia do país, já que, em função das necessidades diárias, a produção per capita de resíduos sólidos é contínua e tende a ser crescente.

As consequências advindas de uma inadequada disposição final de resíduos sólidos, há tempos, tem sido motivo de preocupação, servindo como válvula propulsora para vários estudos ligados ao tema. A prática de aterro sanitário é, sem dúvida, uma das soluções mais viáveis. Entretanto, o fato de ocuparem grandes áreas e a consequente produção de chorume, são aspectos negativos, que devem ser levados em consideração em um projeto de aterro sanitário.

1.2 – ESCOPO DA PESQUISA

Baseado nesse contexto, desenvolveu-se um trabalho visando encontrar maneiras de acelerar a decomposição do lixo sem aumentar seu poder poluidor, para que, no menor espaço de tempo possível, se possa reaproveitar áreas de um aterro sanitário.

Para tanto, idealizou-se um estudo experimental comparativo via construção de cinco células de resíduos sólidos urbanos (grande escala), visando analisar a eficiência dos sistemas de tratamento adotados para acelerar a decomposição da matéria orgânica. Embora, até o fechamento desse trabalho, nem todos os objetivos tenham sido alcançados, pode-se dizer que

o principal deles foi plenamente concluído, ou seja, o de servir como ponto de partida para uma série de pesquisas que já estão em andamento.

As células foram executadas no Aterro do Jockey Clube de Brasília (DF), mais precisamente na área destinada às pesquisas da Universidade de Brasília (UnB). Todas elas possuem os mesmos sistemas de impermeabilização, drenagem dos gases, drenagem e coleta de chorume, diferenciando-se apenas em relação ao tipo de sistema alternativo adotado para acelerar a decomposição do lixo.

Entre as cinco células, a primeira (Célula I – C_I) foi executada para servir de referência entre as demais, não sendo objeto de nenhum tratamento extra. Quanto aos diferentes sistemas de tratamentos da matéria orgânica a serem utilizados nas outras células, os mesmos encontram-se detalhados a seguir:

- Célula II (C_{II}) – Tratamento com recirculação de chorume bruto (tratamento anaeróbio);
- Célula III (C_{III}) – Tratamento com injeção de água do subsolo (tratamento anaeróbio);
- Célula IV (C_{IV}) – Tratamento via cobertura final granular (tratamento misto);
- Célula V (C_V) – Tratamento com injeção de ar (tratamento aeróbio);

Todas as células foram preparadas com um sistema de monitoramento visando acompanhar as mudanças nas características físicas do lixo como compressibilidade (placas de recalques), temperaturas no interior da massa (termopares) e resistência (ensaios de penetração tipo SPT) bem como avaliar a qualidade do chorume gerado (análises físico-químicas).

Também fez parte do trabalho o desenvolvimento de um estudo paralelo, em laboratório, visando obter maiores informações a respeito do tratamento aeróbio de resíduos sólidos. Esse estudo foi baseado na construção de um reator simulando um aterro, no qual se injetou ar durante um certo período de tempo.

Vale salientar que as conclusões obtidas com o desenvolvimento do reator aeróbio servirão como base para o desenvolvimento do tratamento da célula (C_V) no campo experimental da UnB (Aterro do Jockey Clube de Brasília). Lembrando que a mesma encontra-se em fase construtiva, não contribuindo com os dados analisados na presente dissertação.

1.3 – SINOPSE DA PESQUISA

O Capítulo 1 apresenta um breve comentário a respeito da presente dissertação.

No Capítulo 2, discorre-se sobre alguns conceitos básicos da geotecnia ambiental, em particular os resíduos sólidos urbanos e a eventual produção do chorume.

Maiores explicações sobre os sistemas que compõem um aterro sanitário são dispensadas num capítulo à parte (Capítulo 3).

A metodologia empregada na pesquisa, juntamente com o processo executivo das células (trabalho de campo) e do reator (trabalho em laboratório), encontram-se no Capítulo 4.

Os dados obtidos junto ao monitoramento de campo (células) e de laboratório (reator), bem como os resultados das análises físico-químicas do chorume são apresentados e discutidos no Capítulo 5.

Finalizando a dissertação, no Capítulo 6, apresenta-se as conclusões sobre o trabalho e recomendações para futuras pesquisas em temas afins.

CAPÍTULO 2

RESÍDUOS SÓLIDOS

2.1 - INTRODUÇÃO

Para o bom entendimento desse trabalho, é de fundamental importância alguns conceitos básicos que estão relacionados à problemática do lixo e ao meio ambiente. Sendo assim, achou-se por bem abordá-los no decorrer do capítulo.

2.2 – RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (LIXO)

Na maioria das vezes, lixo e resíduo sólido são considerados sinônimos, a grosso modo pode-se denominá-lo como sendo todo e qualquer resíduo produzido pela atividade humana, de natureza sólida ou semi-sólida que deixa de ser útil para os seus devidos fins, passando a ser indesejável ou descartável..

Tchobanoglous et al (1993), resume lixo como sendo todos os resíduos produzidos das atividades humana e animal, normalmente sólidos, que são descartados ao se tornarem inúteis ou desnecessários. Estes resíduos compõem-se basicamente de sobras de alimentos, papéis, papelões, plásticos, trapos, tecidos, couros, madeira, latas, vidros, lamas, poeiras, sabões, detergentes e outras substâncias lançadas pelo homem no meio ambiente.

2.1.1 – Classificação dos Resíduos Sólidos Urbanos

Pode-se classificar os resíduos sólidos tomando-se como base o local de sua origem. Dessa forma, temos:

- Domiciliar - originado da vida diária das residências,
- Comercial – produzido nos diversos estabelecimentos comerciais,
- Público – tem como origem os serviços de limpeza pública urbana,
- Serviço de saúde – produzido em serviços de saúde, hospitais, postos de saúde,

- Industrial – advindo dos diferentes ramos da indústria,
- Agrícola – originado nas atividades agrícolas, podas, jardinagem e na pecuária,
- Entulho – resíduos da construção civil,
- Mineração – cinzas e resíduos advindos da mineração.

Em se tratando da responsabilidade do gerenciamento de cada um dos tipos de lixo mencionados anteriormente Consoni et al (1995), sugerem a seguinte tabela:

Tabela 2.1 – Gerenciamento da produção dos diferentes tipos de resíduos sólidos (Fonte: Consoni et al, 1995).

<i>Tipos de Resíduos</i>	<i>Responsáveis pelo gerenciamento</i>
Domiciliar	Prefeitura
Comercial	Prefeitura
Público	Prefeitura
Serviços de Saúde	Gerador (hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, clínicas, etc.)
Industrial	Gerador (indústria metalúrgica, química, petroquímica, alimentícia etc.)
Agrícola	Gerador (agricultores)
Entulho	Gerador (construtores)

Koener, (1994), sugeriu uma classificação, em ordem crescente, baseada no grau de periculosidade dos resíduos sólidos. A figura abaixo resume, de maneira ilustrativa, a classificação do autor.

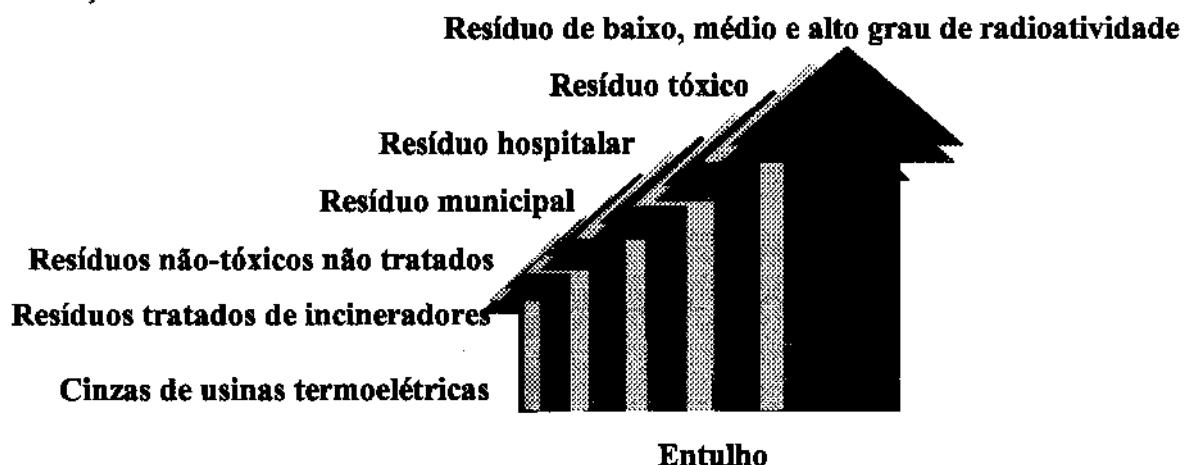


Figura 2.1 – Classificação dos resíduos, de acordo com Koener, (1994).

2.3 - LIXO NUM ENTORNO URBANO

Pode-se denominar lixo municipal como sendo todo aquele gerado num entorno urbano, constituído basicamente por: lixo domiciliar (restos de alimentos, produtos deteriorados, embalagens em geral, jornais entre outros), lixo comercial (gerado em supermercados, lojas, bares, restaurantes, etc.) e lixo público (advindos de limpeza pública urbana, de feiras livres, restos de podas de árvores, etc.).

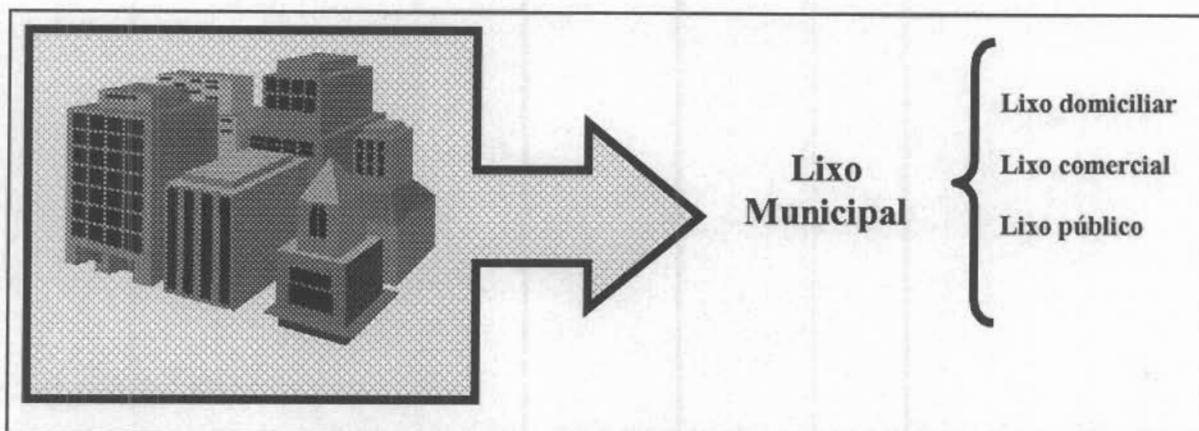


Figura 2.2 – Esquema ilustrando os tipos de lixo produzidos num entorno urbano

De acordo com Lima (1988), dentre os principais fatores que influenciam na quantidade e qualidade do lixo municipal, pode-se citar: área relativa de produção, número de habitantes, variações sazonais, condições climáticas, hábitos e costumes, nível de educação e poder aquisitivo, sendo este último um dos fatores mais importantes.

Principalmente nos grandes centros o aumento populacional somado ao incremento do poder aquisitivo funcionam como válvula propulsora da problemática do lixo urbano. Quando ocorrem variações expressivas na economia local, percebe-se claramente o reflexo dessas mudanças nos locais de coleta, tratamento e destino final do lixo.

As alternativas para minimizar o problema seriam a redução da quantidade de lixo gerado, separação do lixo com uso da reciclagem (plásticos, papéis, vidros, metais e compostagem), incineração, e o imprescindível aterro sanitário, que nunca poderá ser descartado, mesmo nas sociedades do mais alto nível de desenvolvimento e gerenciamento de resíduos sólidos, (Benvenutto, 1995).

2.4 – LIXO E POLUIÇÃO

2.4.1 – Chorume

Líquido resultante da decomposição do lixo, formado principalmente a partir de enzimas de bactérias de decomposição, água de constituição e água de chuva (Orth, 1981). Tchobanoglous et al. (1993) comentam que a água é o principal fator de formação do chorume, e que penetraria no aterro nas seguintes condições e formas: precipitação, escoamento superficial, movimentação do lençol freático e líquidos resultantes da decomposição da matéria orgânica (reações fisico-químicas).

A composição do chorume está intimamente relacionada com o meio formador, sendo influenciada pelas características dos despejos; condições ambientais do aterro (temperatura, pH, umidade, O₂, CO₂ e Eh); características das fontes externas de água; composição do solo de cobertura e idade do aterro, Merbach, (1989) apud Carvalho (1997).

A biodegradabilidade do chorume varia em função do tempo. Um controle da taxa de DBO/DQO pode indicar o grau de contaminação do chorume. Inicialmente, as taxas situam-se em torno de 0,5. Razões entre 0,4 e 0,6 geralmente indicam que a matéria orgânica presente no chorume é rapidamente biodegradável. Quando o aterro é antigo, freqüentemente essa taxa varia entre 0,05 e 0,20. A capacidade poluidora do chorume, pode atingir não só o solo como a água e o ar alterando substancialmente as características desses elementos (Tchobanoglous et al, 1993).

2.4.2 – Fatores que Influenciam a Quantidade de Chorume

• Precipitação

Existe uma relação direta entre os índices pluviométricos e a produção de chorume, considerando-se que a presença da água dentro da massa de resíduos é proporcional à intensidade e ao tempo de duração das chuvas. Contudo, a dinâmica das precipitações não pode ser desconsiderada, de modo que as chuvas muito fortes, em curtos espaços de tempo propiciam taxas de infiltração menores, e o aparecimento de escoamento superficial (*run off*).

Por outro lado, chuvas mais fracas, porém mais prolongadas, permitem uma maior taxa de infiltração, (Junqueira, 2000).

- **Introdução de águas subterrâneas**

Essa situação ocorre quando o lixo é disposto em regiões abaixo do lençol freático ou quando o nível do lençol está muito próximo da base do aterro ou lixão, podendo subir no período de alta pluviosidade.

- **Condições dos resíduos**

A quantidade de chorume pode aumentar em função da própria constituição dos resíduos. Devido ao peso próprio, os resíduos liberam a água contida em seus poros durante o processo de compressão.

- **Ausência de cobertura**

De acordo com estudos de SopHocleous et al, (1996), a camada de cobertura colocada acima do lixo reduz a infiltração de água e a consequente produção de chorume em torno de 25%. Caso essa cobertura esteja associada a um sistema de coleta de chorume e a um sistema de impermeabilização da base, a remoção do líquido produzido pode chegar a 56%.

2.4.3 – Fatores que Influenciam a Qualidade de Chorume

- **Composição dos resíduos**

A variação da composição dos resíduos influencia diretamente sobre a qualidade do chorume gerado. Pode-se dizer que quanto maior a quantidade de resíduos perecíveis presentes na massa de lixo, maior também será a variação na qualidade do percolado.

- **Tempo decorrido**

Vários estudos indicam que o poder de contaminação do chorume alcança um pico após alguns anos e depois decai gradualmente, porém, os contaminantes não atingem valores de pico ao mesmo tempo e muitas vezes não se percebe uma similaridade ao se plotar os valores de concentração dos contaminantes em função do tempo decorrido (Junqueira, 2000).

• Temperatura ambiente

Sabe-se que o efeito da temperatura pode afetar o processo de crescimento de bactérias e reações químicas, entretanto não há estudos que indiquem um efeito direto da temperatura ambiente sobre a composição do chorume.

• Oxigênio disponível

Os elementos liberados devido à decomposição aeróbica são significativamente diferentes daqueles liberados devido à decomposição anaeróbica, sendo assim, conclui-se que um aumento do nível de oxigênio no interior da massa de resíduos pode afetar diretamente a composição do chorume.

• Introdução de água no sistema

A introdução de água no interior da massa de resíduos, afeta a qualidade do percolado diluindo-o e consequentemente diminuindo a sua taxa de poluição. Em contrapartida quanto maior o volume de água introduzido no aterro, maior será a sua produção de chorume.

2.5 - MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE LIXO

2.5.1 – Aterro a céu aberto

Também conhecido como “lixão” ou vazadouro, é toda forma de armazenagem de lixo sem a utilização de técnicas de proteção e tratamento, onde o contato direto do lixo com o solo além de provocar a poluição do meio ambiente, traz sérios problemas de ordem social e de saúde pública. O “lixão” por muito tempo tornou-se a principal forma de acomodação do lixo. Dados históricos demonstram que desde os primórdios o homem utilizava-se dessa técnica para dar um destino final a tudo aquilo que não mais lhe seria útil. De acordo com Benvenutto, (1995), são características da disposição na forma de “lixão”:

- Total ausência de controle sobre o tipo, volume e periculosidade dos resíduos despejados;
- Permanência dos resíduos a céu aberto; e
- Ausência de controle de entrada e saída de animais e pessoas.

A proliferação de vetores transmissores de doenças, assim como a poluição do ar, solo e águas superficial e subterrânea são as principais consequências geradas a partir dessa maneira desastrosa de dispor o lixo.

2.5.2 - Aterro Controlado

Difere do aterro comum por levar em consideração alguns aspectos da engenharia, tais como: cobertura diária do lixo com material inerte (solo) e compactação (não controlada) das camadas lançadas. Porém, esse método de disposição de lixo ainda não é o mais adequado uma vez que fatores poluentes como os líquidos e gases gerados não são levados em consideração.

Como citado por Bidone & Povinelli, (1999), embora essa seja uma técnica preferível ao lançamento a céu aberto, não substitui o aterro sanitário. Ainda segundo os pesquisadores, o aterro controlado é uma solução adotada em aproximadamente 13% dos municípios dos brasileiros.

2.5.3 – Aterro Sanitário

Dentre os vários conceitos a respeito de aterro sanitário pode-se dizer que trata-se de uma técnica de acomodação final para resíduos sólidos baseada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, capaz de assegurar o confinamento seguro dos resíduos, evitando danos ou riscos à saúde pública e minimizando os impactos ambientais.

Os critérios de engenharia mencionados dizem respeito aos projetos de impermeabilização (base e laterais do aterro), drenagem superficial e periférica para o controle da água das chuvas, drenagem de fundo e sistema de coleta e tratamento para o percolado (chorume), drenagem e queima dos gases gerados. Sendo esse um dos principais temas do trabalho, o mesmo será tratado com mais profundidade em um capítulo à parte.

Basicamente três, são os métodos existentes na construção de aterros sanitários: o método da trincheira, o método da rampa e o método da área. A escolha entre um deles é função,

principalmente, das características físicas e geográficas do local escolhido para servir de aterro.

• Método das Trincheiras

Como o próprio nome recomenda, trata-se da abertura de trincheiras a partir da superfície do solo, onde o lixo é disposto, compactado e recoberto com o próprio solo anteriormente escavado.

Deve ser aplicado quando o local for plano ou levemente inclinado, e quando a produção diária de lixo, preferencialmente não ultrapassar 10 t, sendo assim um método próprio para pequenas comunidades.(Bidone & Povinelli, 1999)

• Método da rampa

É o método mais apropriado para terrenos planos, consiste na escavação de uma rampa e posterior lançamento do lixo de forma ascendente. O solo retirado é aproveitado para recobrir a célula no final do dia. Também conhecido como escavação progressiva ou trincheira progressiva.

• Método da área

Empregado em locais onde há irregularidade topográfica. Consiste no preenchimento de depressões a partir da topografia da área. Como quase não há escavação, necessita de empréstimo para o material de cobertura. Vale salientar a necessidade de cuidados com o sistema de drenagem de águas superficiais que deve garantir a proteção do aterro em relação às águas da chuva. Esse método assim como os demais são totalmente desaconselháveis para erosões, salvo algumas exceções como no caso dos entulhos (resíduos de baixa periculosidade).

A seguir encontram-se as definições e o esquema ilustrativo de cada um dos métodos comentados anteriormente. As figuras foram adaptadas das ilustrações de Bagchi, (1994).

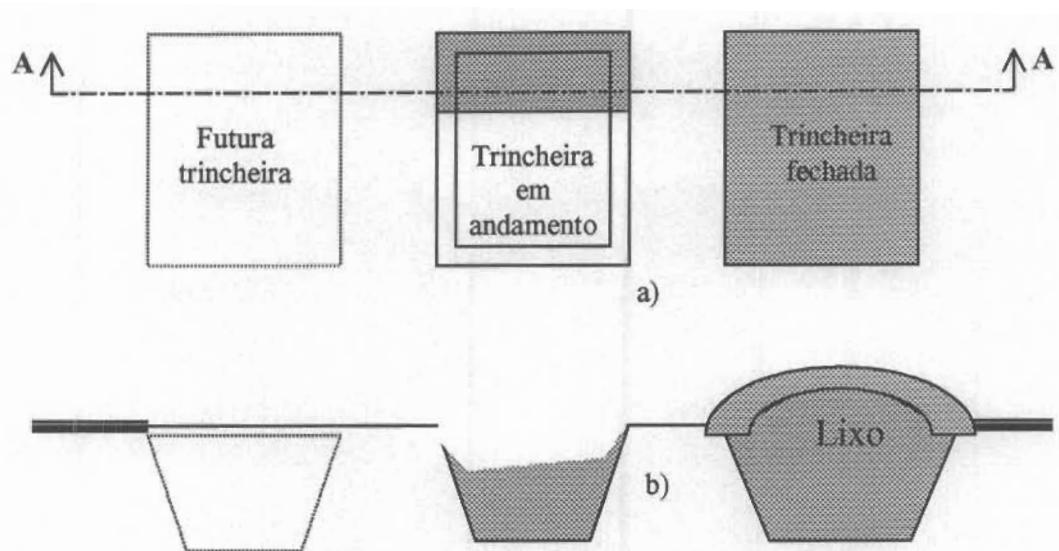


Figura 2.3 – Método da trincheira: a) Planta; b) Corte A-A (modificado de Bagchi, 1994)

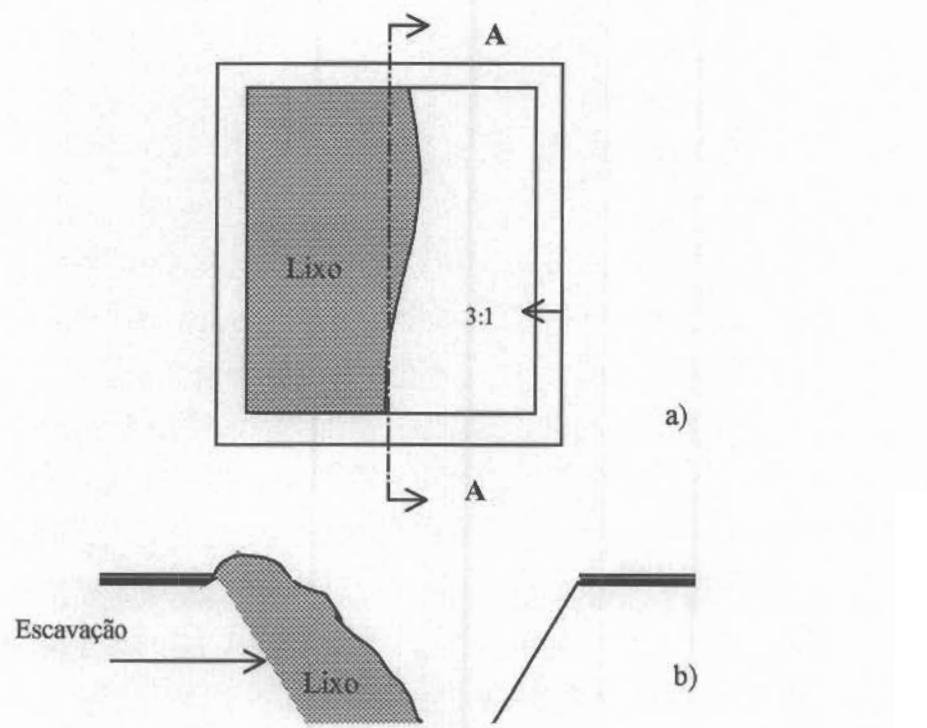


Figura 2.4 – Método da rampa: a) planta; b) Corte A-A (modificado de Bagchi, 1994)

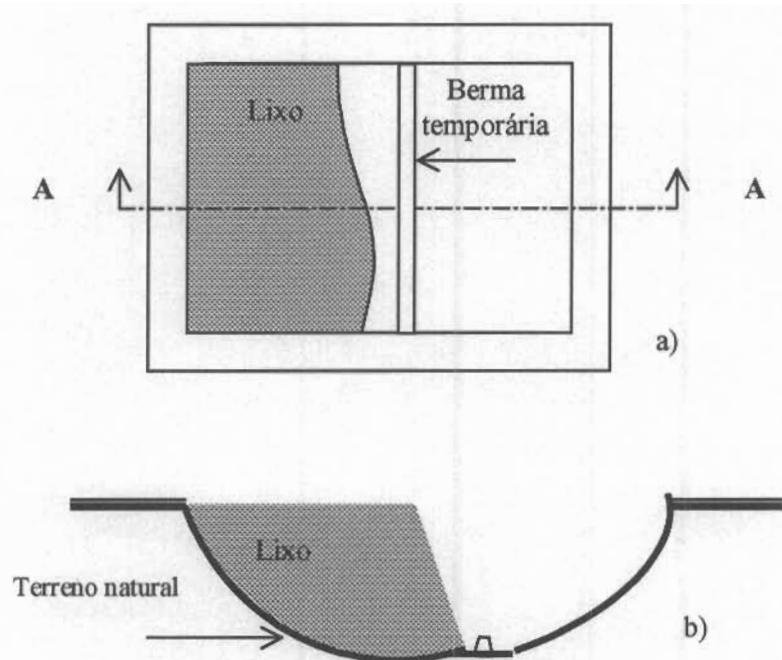


Figura 2.5 – Método da área: a) Planta; b) Corte A-A (modificado de Bagchi, 1994)

2.6 – O ECOSISTEMA ATERRO SANITÁRIO

As características físico-químicas e microbiológicas dos resíduos sólidos urbanos apresentam uma enorme diversidade de cidade para cidade, sendo diretamente influenciadas pelas condições sócio-econômicas e culturais de cada região.

A partir da disposição e independente da composição dos resíduos, as populações de microorganismos existentes nos mesmos passam, em condições ambientais favoráveis, a multiplicar-se no ambiente do aterro (que opera como um verdadeiro reator), estabelecendo-se assim um meio ambiente, no sentido ecológico da palavra. (Bidone & Povinelli, 1999).

A multiplicação desses microrganismos (dependente principalmente dos aspectos nutricionais que a massa de resíduos apresenta), transforma o material biodegradável em massa parcial ou totalmente bioestabilizada, gerando interações muito complexas no ambiente dos aterros.

O nível de compactação/impermeabilização conferido à massa de resíduos, a precipitação e a variação sazonal de temperatura na região onde o aterro está implantado são alguns fatores

externos que influenciam definitivamente no desempenho dos aterros. O controle dos fatores internos e externos é extremamente dificultado, seja pela complexidade das reações ocorridas no ambiente dos aterros, seja pelos seus aspectos dimensionais.

Embora o caminho percorrido pela biotransformação dos resíduos sólidos dentro dos aterros sanitários seja o mesmo, a heterogeneidade do lixo de cada comunidade e a técnica executiva do aterro estabelecendo determinadas condições de contorno (nível de compactação, afastamento de águas pluviais, sistemas de tratamento dos resíduos entre outros) são aspectos que sugerem que cada aterro conduz a um ecossistema particular.

Na figura 2.6 apresenta-se uma representação esquemática de um ecossistema aterro sanitário proposto por Schalch (1992). Salientando que as normas preconizam uma distância mínima entre o aquífero e o aterro, situação não observada no exemplo citado pelo autor.

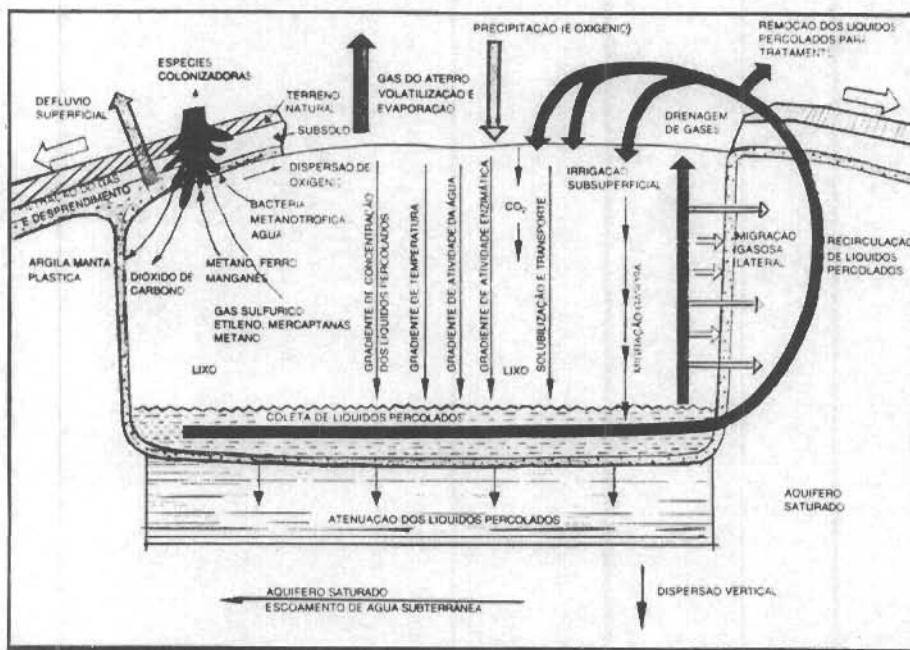


Figura 2.6 –Ecossistema aterro sanitário. (Fonte: Adaptado de Schalch, 1992)

2.7 – DEGRADAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA

2.7.1 – Fases da Degradção

A degradação dos resíduos se inicia logo após o acondicionamento do lixo no aterro, sendo fruto de uma complexa integração de agentes físicos, químicos e biológicos. Sumariamente,

dá-se o nome de metanogênese ao processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica com a geração do gás metano e a consequente bioestabilização da matéria. Tal processo ocorre em etapas, as quais há muito vêm sendo alvo de estudos.

Rees (1980) ressalta que a metanogênese em aterro sanitário ocorre de forma natural e é função de uma série de fatores tais como heterogeneidade do lixo, grau de compactação e umidade, composição dos substratos, etc.

Nenhum aterro sanitário apresenta uma única fase distinta ou uma seqüência ordenada de fases, na verdade, o que existe é um conjunto de diferentes fases e idades, cujo desenvolvimento pode variar de acordo com as condições físicas, químicas e biológicas, associadas às células do aterro (Merbach Jr., 1989 apud Carvalho, 1997). Em geral a metanogênese é assumida como um processo de cinco fases, a saber:

Fase I (Aeróbia) – é a fase mais curta, também conhecida como fase de ajustamento inicial. Logo após a disposição dos resíduos no aterro, a matéria orgânica é facilmente decomposta via processos aeróbios, produzindo CO₂ aproximadamente nos mesmos equivalentes molares do O₂ consumido.

Fase II (Anaeróbia Não-Metanogênica) - primeira fase anaeróbia, inicia-se após o desaparecimento do O₂. A atividade microbiana anaeróbia passa a ser dominante, decompondo a matéria orgânica em CO₂ e produtos de decomposição (ácidos orgânicos e hidrogênio); consequentemente há uma diminuição no pH e Eh e aumento da DQO. Com a crescente geração do CO₂ e H₂, ocorre a diminuição da concentração do nitrogênio.

Fase III (Anaeróbia Metanogênica Instável) - assim conhecida devido à variação crescente na concentração de CH₄ até atingir valores relativamente constantes. Paralelamente há uma diminuição considerável de CO₂ e H₂, aumento do pH e diminuição contínua do Eh, permitindo o decréscimo das concentrações de sulfatos, condutividade e DQO.

Fase IV (Anaeróbia Metanogênica Estável) - a taxa de produção e a composição dos gases permanecem constantes. A taxa de produção do CH₄ é muito elevada, variando entre 50% e 70% de todo o gás produzido no aterro.

Fase V (Metanogênica em Declínio) - a taxa de produção do CH₄ é consideravelmente baixa favorecendo o reaparecimento do nitrogênio. Somente o carbono orgânico mais resistente permanece no aterro. Zonas aeróbias e regiões com Eh elevado começam a surgir nas camadas superiores do aterro, fora das condições de formação do CH₄.

Na figura 2.7 ilustra-se a seqüência de degradação em cinco fases de acordo com Pohland, (1987). Vale acrescentar que estas fases ocorrem quando se tem uma cobertura de baixa permeabilidade favorecendo a condição anaeróbia.

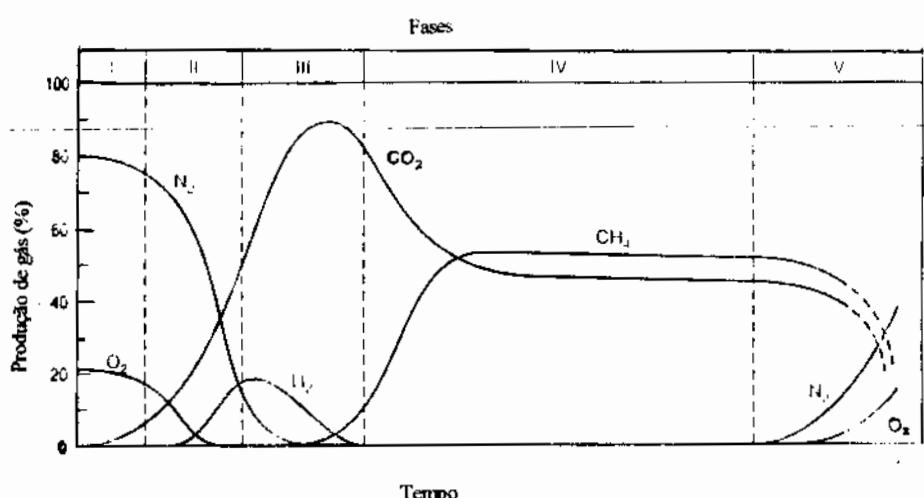
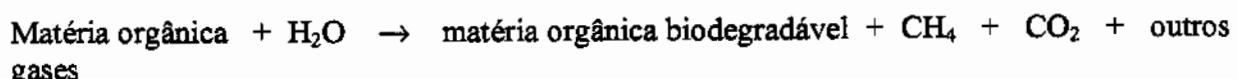


Figura 2.7 – Variação na composição do gás de aterros sanitários (modificado de Pohland, 1987).

Thcoubanoglous et al. (1993), sugerem uma expressão para simplificar as reações químicas ocorridas no processo de decomposição anaeróbia a qual está intimamente ligada ao teor de umidade da massa orgânica dos resíduos sólidos. Segundo os autores, estando o aterro na umidade adequada, as reações se processarão mais rapidamente, ocasionando uma maior produção dos gases gerados.



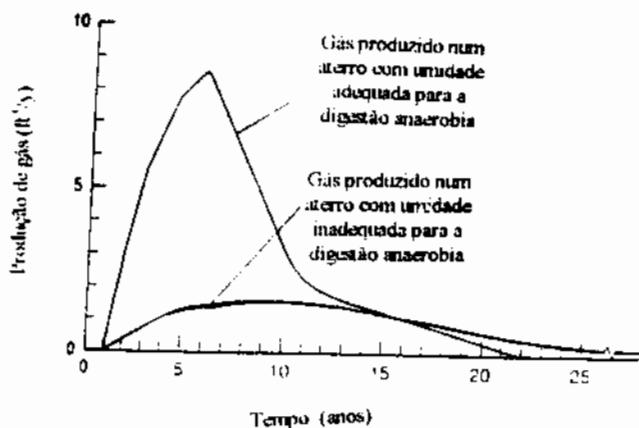


Figura 2.8 – Efeito da umidade na produção de gás em aterros sanitários. (Modificado de Tchobanoglous, et al. 1993)

2.8 – MÉTODOS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Além do aterro sanitário existem alguns métodos de tratamento que podem ser utilizados na atenuação da problemática do lixo, podendo-se citar: compostagem-reciclagem, incineração, técnicas especiais de tratamento de resíduos sólidos industriais e de serviços de saúde. Tais métodos há muito vêm sendo estudados e, a soma da escassez de recursos naturais aos problemas relacionados ao meio ambiente, têm levado o homem a pensar cada vez mais seriamente a respeito da evolução dessas técnicas. Será tratado aqui apenas o método da compostagem tendo em vista ser o mais próximo ao âmbito da pesquisa.

2.8.1 - Compostagem-Reciclagem

A grosso modo, compostagem pode ser definida como o processo de decomposição aeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos. Resumindo-se esse processo, pode-se dizer que alguns componentes da matéria orgânica são utilizados pelos próprios organismos para formação de seus tecidos, outros são volatilizados e outros, ainda, são transformados biologicamente em uma substância escura, uniforme, com aspecto de massa amorfa, rica em partículas coloidais, com propriedades físicas, químicas e físico-químicas inteiramente diferentes da matéria prima original. (Bidone & Povinelli, 1999). À massa resultante da compostagem dá-se o nome de composto ou húmus.

Para Lima, (1988) o processo de compostagem-reciclagem encerra duas fases distintas: o tratamento físico (reciclagem) e o tratamento biológico (compostagem), onde, no tratamento

Para Lima, (1988) o processo de compostagem-reciclagem encerra duas fases distintas: o tratamento físico (reciclagem) e o tratamento biológico (compostagem), onde, no tratamento físico, além de recuperada a fração orgânica é preparada para favorecer a ação biológica; no tratamento biológico ocorre a fermentação ou digestão dos resíduos pela ação dos microrganismos presentes ou inoculados pela adição de lodo de esgoto.

Normalmente a compostagem é realizada em pátios, nos quais o material (apenas a fração orgânica) é disposto em forma de pilhas cônicas ou distribuído de forma prismática, com seção similar à triangular (leiras). Antes, porém, o material bruto passa pela usina de triagem, onde é feita a separação do resíduo nas diversas frações (função do tipo de material: papel, papelão, alumínio, vidros...).

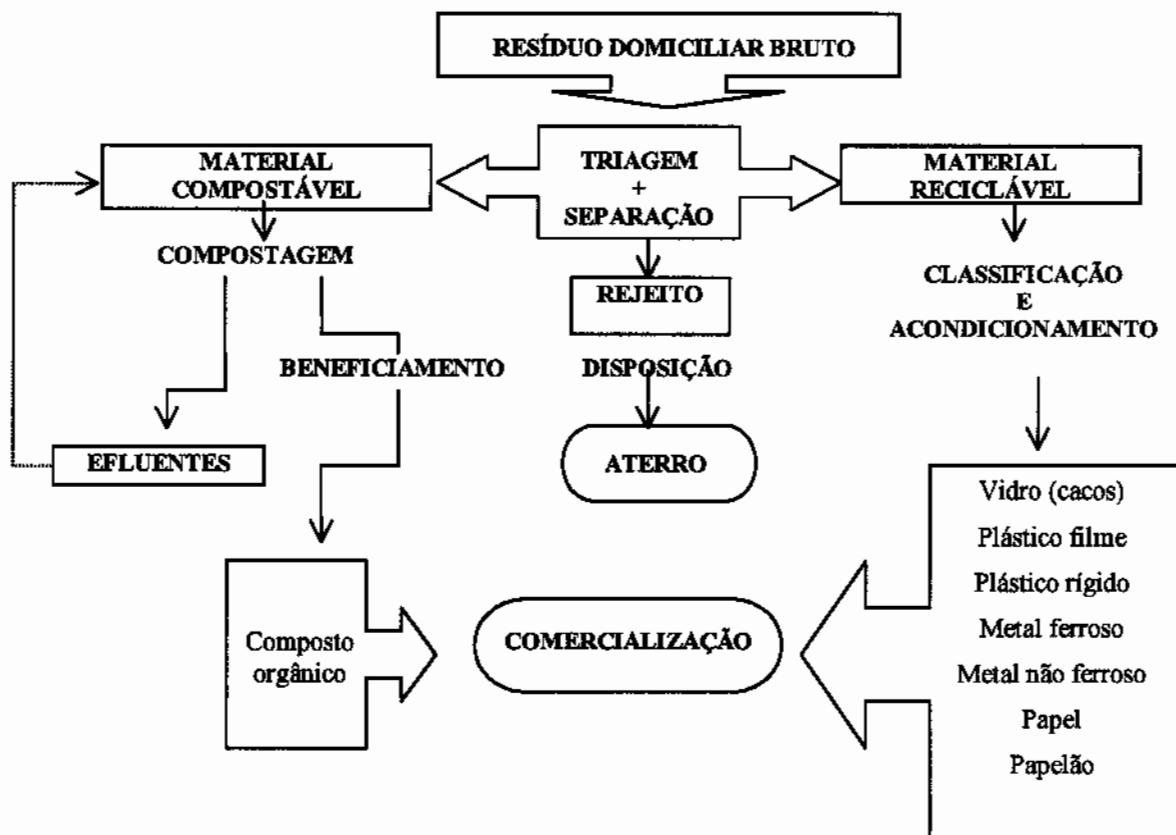


Figura 2.9 – Esquema de uma Usina de Triagem e Compostagem.

Os principais microrganismos responsáveis pela transformação da matéria orgânica crua em matéria orgânica humificada (compostagem) são as bactérias, os fungos e os actomicetos. No entanto, dependendo das características do material bruto a compostar, alguns fatores podem interferir na atividade biológica desses microrganismos, a saber: umidade, oxigenação,

temperatura, relação carbono/nitrogênio, pH e tamanho das partículas. A seguir será feito um breve comentário a respeito de cada um dos fatores citados.

• Umidade

O controle da umidade é fundamental durante todo o processo. Pesquisas tem demonstrado que o teor de umidade ideal fica em torno de 50 a 55%. Umidades abaixo de 40% reduzem significativamente a atividade biológica e acima de 60% a aeração é prejudicada, podendo levar à anaerobiose.

• Oxigenação

Talvez uma das maiores características da compostagem seja o fato dela ser realizada em ambiente aeróbio. Essa realidade a torna um processo mais rápido, sem produção de odores desagradáveis nem proliferação de moscas.

A aeração pode ser feita com o revolvimento manual do material ou por meios mecânicos com insuflamento de ar. Tendo em vista a grande dificuldade na medição do O₂ o controle da oxigenação geralmente é feito tomando-se como base a temperatura, a umidade e o tempo de revolvimento (Bidone & Povinelli, 1999).

• Temperatura

Há duas fases ideais de temperaturas nas quais a compostagem deve realizar-se: a mesófila, 45 °C a 55 °C, e a fase termófila, acima de 55 °C. Na verdade, o processo se inicia à temperatura ambiente e à medida que a ação microbiana se intensifica, a temperatura se eleva até atingir valores acima de 55 °C – 60 °C, (Naumoff et al, 1995). De acordo com Bidone & Povinelli (1999), o aquecimento do material se dá naturalmente em função do metabolismo exotérmico dos microrganismos. E, a passagem de uma fase para outra ocorre rapidamente, com a multiplicação da massa de microrganismos (dois a três dias). Idealmente, a fase termófila deve ser mantida por pelo menos um mês.

O controle da faixa ideal de temperatura é feito por intermédio da oxigenação do material, ou por sua irrigação, ou, se necessário, por ambos. Alguns autores indicam que às vezes o simples rebaixamento da pilha ou leira já é suficiente para se ter um decréscimo na temperatura.

- **Relação carbono/nitrogênio (C/N)**

Os elementos carbono e nitrogênio são absorvidos pelos microrganismos como fonte de nutrientes. A relação (C/N) desejável para o início da compostagem deve ser da ordem de 30/1. Onde, das trinta partes do carbono, vinte são eliminadas na forma de gás (CO_2) e dez são usadas no crescimento microbiano. Quanto ao nitrogênio todo ele é retido no material na forma de nitrogênio orgânico ou inorgânico. Sendo assim, o húmus apresenta C/N na proporção de 10:1. Relações elevadas de C/N (acima de 60:1) demandam maior tempo de compostagem, por outro lado, se essa relação for muito baixa, teor de nitrogênio elevado, deve-se incorporar ao material outro resíduo, rico em carbono.

Embora não seja a única solução, pode-se dizer que uma usina de triagem e compostagem acarreta numa diminuição de 70%, em média, da tonelagem de lixo destinada ao aterro, com a consequente redução de custos de aterramento por quantidade coletada e aumento da vida útil da área destinada à sua disposição (Naumoff et al, 1995).

CAPÍTULO 3

ATERRO SANITÁRIO

3.1 – INTRODUÇÃO

A prática construtiva do aterro sanitário é, sem dúvida, uma das mais utilizadas na solução de disposição de resíduos, haja vista sua relativa simplicidade executiva e seu relativo baixo custo. Tchobanoglous et al, (1993), baseado em experiências americanas, concluiu que a forma mais econômica e o método mais aceitável de disposição final de resíduos sólidos urbanos é o aterro sanitário.

O presente capítulo além de abordar os principais elementos que compõem um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos, dará uma ênfase às técnicas atualmente utilizadas para acelerar a decomposição do lixo quando do seu aterramento.

3.1.1 – Remediação de Lixões

Não se pode falar em aterro sanitário sem comentar, primeiramente, sobre a técnica da remediação de lixões, tendo em vista que, basicamente, a remediação consiste no processo que antecede a transformação de um lixão em um aterro sanitário.

Consoni et al, (1995), definem remediação de lixão como sendo um processo que objetiva reduzir, o máximo possível, os impactos negativos causados pela disposição inadequada do lixo urbano no solo. Para tanto citam algumas ações tidas como fundamentais na remediação de lixões:

- Delimitação da área (lixo/não lixo);
- Movimentação e conformação da massa de lixo;
- Limpeza da área de domínio;
- Drenagem das águas superficiais;

- Drenagem dos gases e do chorume da massa de lixo;
- Coleta e tratamento dos gases e do chorume;
- Cuidados para evitar ou minimizar a contaminação do lençol freático
- Arborização em torno da área.

O passo seguinte, após a remediação e principalmente quando a vida útil da área está se esgotando, é a eventual desativação do local, visando um melhor aproveitamento futuro da área. Dessa forma faz-se necessário, paralelamente à remediação, um estudo de novas áreas capacitadas para a disposição dos resíduos.

3.2 – PROJETO DE ATERRO SANITÁRIO EM ÁREAS NOVAS

Basicamente o dimensionamento de um aterro sanitário é função da quantidade e tipologia dos resíduos a serem dispostos, das características fisiográficas e ambientais da área previamente escolhida e do destino futuro que será dado ao local.

O mesmo está dividido no projeto das instalações de apoio, compostas pelas edificações: guarita, prédio de controle da balança eletrônica, prédio da administração e galpão de manutenção. Um segundo passo diz respeito ao dimensionamento de todos os elementos que farão parte do aterro sanitário propriamente dito, podendo-se citar:

- Sistema de drenagem superficial;
- Sistema de tratamento da base e laterais (impermeabilização);
- Sistema de drenagem e tratamento dos gases;
- Sistema de drenagem e coleta dos líquidos percolados (chorume);
- Análise da estabilidade dos maciços (terra e resíduos sólidos);
- Sistema alternativo de tratamento dos resíduos;
- Sistema de monitoramento.

3.2.1 - Sistema de Drenagem Superficial

É incontestável a importância da drenagem superficial das águas pluviais em um aterro sanitário uma vez que a função dos drenos projetados é de desviar o fluxo das águas da chuva

da frente de serviço e proteger os taludes e a cobertura final de erosões, reduzindo assim a carga de líquidos percolados no aterro. A rede de drenos deve ser dimensionada em função da área da bacia contribuinte, da intensidade das chuvas e das características físicas do terreno.

Na maioria das vezes, a equação matemática utilizada para o cálculo da vazão contribuinte é expressa pela fórmula racional:

$$Q = (S * I_{cr} * C)$$

Onde:

Q = vazão (m^3/s)

S = área da bacia contribuinte (m^2)

I_{cr} = intensidade da chuva crítica (m/s)

C = coeficiente de escoamento

Vale ressaltar que este método considera, para cada seção do sistema, a duração da chuva crítica igual ao tempo de concentração, hipótese pela qual, ocorre a contribuição simultânea de todos os setores da bacia em questão, situados à montante de cada ponto considerado.

Obtido o valor da vazão, lança-se a rede de drenagem superficial seguido do dimensionamento dos drenos. Para tanto, pode-se utilizar a fórmula de Chézy modificada por Manning:

$$Q = (Rh)^{2/3} * S * i^{1/2} * n^{-1}$$

Onde:

Q = vazão de projeto (m/s),

Rh = raio hidráulico da seção (seção molhada/perímetro molhado),

S = área da seção transversal ocupada pelo líquido (m^2),

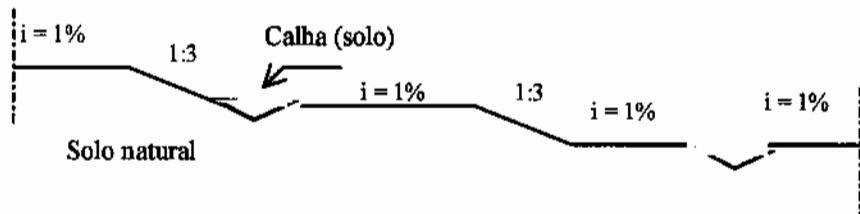
i = declividade do dreno (m/m) e

n = coeficiente de rugosidade

A implantação dos drenos é de fácil execução. Para drenos provisórios, a simples escavação de valas (retroescavadeira ou motoniveladora) já é suficiente. Quanto aos drenos permanentes, a seção deve ser revestida por algum tipo de material adequado, exemplificando, os tubos

meia-cana em concreto. Alguns exemplos de drenos utilizados na canalização de águas pluviais podem ser observados na figura 3.1

a) Drenos provisórios



b) Drenos permanentes

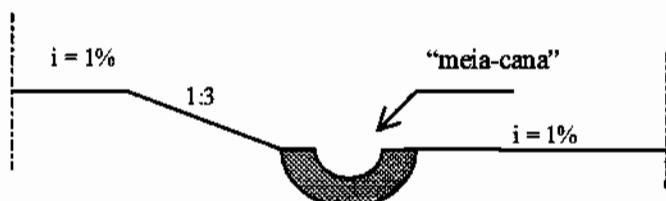


Figura 3.1 – Drenagem de águas pluviais, a) Drenagem provisória; b) Drenagem permanente

3.2.2 - Sistema de Impermeabilização

O principal objetivo dos sistemas de impermeabilização é minimizar a infiltração do percolado através do solo de base do aterro, impedindo com isso a eventual contaminação do lençol freático. Tomando-se como base estudos geológicos/geotécnicos realizados na área do aterro define-se qual a melhor solução a ser implantada para garantir o total isolamento das laterais e do fundo das células de lixo. Atualmente, vários são os tipos de materiais, já estudados e disponíveis no mercado que garantem a impermeabilização exigida pelas normas.

Segundo Daniel & Koerner (1995), a seleção do tipo de camada impermeabilizante dependerá de um amplo conhecimento da geologia e das exigências ambientais do local escolhido para o aterro. Bagchi, (1994), define como sendo três as categorias de materiais usados na construção dessas barreiras impermeabilizantes: (1) solos argilosos, (2) membranas sintéticas ou outro tipo de material fabricado artificialmente (geomembranas), e (3) solos misturados com bentonita ou outras misturas (concreto, concreto asfáltico, concreto asfáltico hidráulico, solo cimento).

- Impermeabilização por solos argilosos

A utilização da argila como impermeabilizante, é sem dúvida, uma das soluções mais econômicas quando há disponibilidade do material e o mesmo possui propriedades compatíveis com as exigidas por normas. No Brasil, a NBR 13896/1997 recomenda uma camada de revestimento compactada de acordo com os estudos específicos (densidade máxima e umidade ótima). Essa camada deve ter espessura mínima de 60 cm, garantindo um coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 1×10^{-6} m/s. Bagchi, (1994), recomenda alguns critérios quando da escolha do tipo de solo a ser compactado. Segundo ele, um solo com as especificações a seguir seria o mais indicado na construção de um liner:

W_L - maior ou igual a 30%

IP – maior ou igual a 15%

Fração de argila – maior ou igual a 25%

Fração de finos passando na P200 – maior ou igual a 50%

De acordo com o autor, dificilmente encontra-se um solo que satisfaça a todas as especificações exigidas acima. Assim sendo, baseado em experiências de campo, Bagchi indica as características abaixo como sendo suficientes para se obter uma baixa permeabilidade:

W_L – entre 25 e 30%

IP – entre 10 e 15%

Fração de argila – entre 18 e 25%

Fração de finos passando na P200 – entre 40 e 50%

A espessura da camada de argila pode ser determinada em função do tempo dispensado para que uma certa concentração do contaminante atravesse a camada impermeabilizante. Seguindo essa linha de raciocínio foram desenvolvidas algumas formulações matemáticas que levam em consideração o transporte do contaminante devido à sua advecção, e dispersão quando em contato com a camada barreira. Vale ressaltar que não há maiores pretensões quanto ao aprofundamento do assunto nesse trabalho, ficando o mesmo a título de informação.

Freezy e Cherry, (1979), chamaram a atenção a respeito dos processos físicos e químicos que podem afetar o transporte do contaminante em relação a uma camada impermeável. Segundo os autores, nos processos físicos os poluentes podem ser transportados por advecção e dispersão hidrodinâmica, ocorrendo geralmente em conjunto; porém há situações em que pode ocorrer predomínio de um em relação ao outro.

Mudanças na concentração do poluente podem ser causadas devido a reações químicas. Quando isso ocorre há uma transferência de parte do soluto para a fase sólida do meio ou uma transferência de outros elementos desta fase para o próprio poluente. Esse mecanismo é conhecido como sorção. (Eslinger et al, 1994).

Advecção

O processo da advecção ocorre quando a velocidade do solvente (água) em meios porosos ou fraturados é relativamente elevada (acima de determinado valor). Nesses casos, o transporte do soluto (poluente) é praticamente controlado pela velocidade do solvente. A maior possibilidade de transporte do poluente com predomínio do processo de advecção ocorre em meios porosos e/ou fraturados com condutividade hidráulica maior do que 1×10^{-7} cm/s, sob ação de um gradiente hidráulico. (Freeze & Cherry, apud Eslinger, 1994)

A velocidade (V_x) do fluido (solvente + soluto) pode ser calculada pela Lei de Darcy modificada:

$$V_x = -K * \frac{i}{n}$$

Onde:

V_x – velocidade de percolação do fluido (solvente + soluto);

K – coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (m/s);

i – gradiente hidráulico (m/m);

n – porosidade do meio (%);

Partindo-se da Lei de Darcy, obtém-se uma relação entre a condutividade hidráulica (K), parâmetro que depende das características do meio e do líquido que por ele flui, e a permeabilidade intrínseca (k), a qual é função apenas das características do meio:

$$K = k * \left(\frac{\gamma}{\mu} \right)$$

Onde:

- K – condutividade hidráulica (m/s);
- k – permeabilidade intrínseca (m^2);
- γ - peso específico do fluido (kgf/m^3);
- μ - viscosidade do fluido.

Dispersão hidrodinâmica

Pode-se dizer que a dispersão hidrodinâmica está dividida em: dispersão mecânica e difusão molecular. A primeira só é realmente relevante nos casos do fluxo se desenvolver a altas velocidades, onde ocorre o atrito entre o fluido e as partículas de solo (canalículos) ou nas paredes das fraturas. A mesma está dividida em duas componentes, dispersividade transversal e longitudinal. Quanto à difusão molecular pode-se dizer que ela ocorre quando há gradientes de concentração.

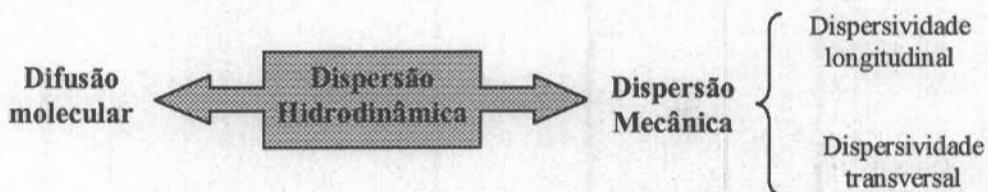


Figura 3.2 – Classificação da dispersão hidrodinâmica.

A dispersão hidrodinâmica é calculada somando-se o coeficiente de dispersão mecânica (D_m) e o coeficiente de difusão efetiva (D^*), denominado coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D_L), como mostrado a seguir:

$$D_L = D_m + D^* \quad (1)$$

O coeficiente de dispersão mecânica (D_m) é função da dispersividade longitudinal (α_L) e da velocidade do fluido (V_x), sendo igual a:

$$D_m = \alpha_L * V_x \quad (2)$$

Na verdade, quando o fluido escoa a velocidades muito baixas, os processos de advecção e de dispersão mecânica passam a ser insignificantes, sendo a difusão molecular a maior forma de transporte dos poluentes, que pode ser calculada pelo coeficiente de difusão molecular efetivo (D^*), anteriormente mencionado. Este coeficiente difere do coeficiente de difusão ideal da água (D) devido ao efeito da tortuosidade criado pelas partículas minerais. A relação entre D^* e D é dada por (Fetter, 1988):

$$D^* = w * D \quad (3)$$

Sendo w um fator empírico determinado em laboratórios.

Adsorção

A adsorção de um soluto por sólidos imersos em um solvente ocorre quando as forças de atração entre as moléculas do soluto e a superfície do sólido são maiores do que as forças de atração entre as moléculas do soluto e as moléculas do solvente.

A adsorção é possível de ser determinada, a nível de laboratório, por intermédio do ensaio de BET (Batch Equilibrium Test), de acordo com a norma ASTM ES-10-85 (ou D4319). O resultado do ensaio resulta em uma isoterma, conhecida como isoterma de adsorção. A equação da curva é dada por:

$$C^* = K_d * C^b \quad (4)$$

Onde:

C^* - massa de poluente adsorvida/unidade de massa seca do solo

C – concentração de poluente em equilíbrio na fase líquida;

b – constante paramétrica;

K_d – inclinação da curva log-log ou coeficiente de distribuição entre a fase líquida e a sólida.

Se $b = 1$ $C^* = K_d * C$, e $K_d = \partial C^* / \partial C$

Se $b \neq 1$ $C = K_d * C^b$, resultando: $\log C^* = b \log C + \log K_d$

Conhecido o valor de K_d , é possível determinar o coeficiente de retardo do soluto devido à adsorção pelas partículas sólidas.

$$Rd = 1 + \left(\frac{\rho_d}{n} \right) * K_d$$

Onde:

ρ_d – massa específica aparente seca do solo;

n – porosidade do solo

Equação de Advecção, Difusão e Retardo (ADR)

Admitindo-se a velocidade (V_x), a porosidade do solo (n) e coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D_L) constantes no espaço e no tempo, a equação geral pode ser escrita da seguinte forma:

$$n \frac{\partial C}{\partial t} = nD \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} - nV \frac{\partial C}{\partial l} - \rho_d \frac{\partial C^*}{\partial t} - \lambda C \pm \sum RC \pm \sum PG$$

Onde:

C – concentração do contaminante a profundidade l, num tempo t;

t – tempo;

l – coordenada curvilínea de direção ao longo do fluxo;

D_m – coeficiente de dispersão mecânica

D^* - coeficiente de difusão molecular;

ρ_d - massa específica seca do solo na profundidade l.

$(\partial C^*/\partial t)$ - taxa de retenção, onde $\rho(\partial C^*/\partial t) = \rho(\partial C^*/\partial C) . (\partial C/\partial t) = K_d . (\partial C/\partial t)$

C^* - massa do soluto adsorvido/unidade de massa do solo;

λ - constante de decaimento radioativo ou biológico;

$\sum RC$ – termo referente a reações químicas diversas (precipitação, oxi-redução, etc)

$\sum PG$ – Perdas e ganhos

Para o caso do solo não estar totalmente saturado (grau de saturação menor que 100%), a porosidade (n), deve ser substituída pelo teor de umidade volumétrica (θ) do solo.

A resolução da equação geral de transportes de contaminantes exige um certo grau de complexidade, podendo ser encontrada através dos seguintes modelos:

- a) Determinísticos – soluções analíticas, semi-analíticas e soluções numéricas;
- b) Probabilísticos – geralmente utilizado quando há uma incerteza nos dados de entrada, calculando-se a probabilidade de ocorrência de um determinado valor.

A maioria dos modelos de resolução utilizados atualmente são do tipo determinístico. A solução analítica mais conhecida é a proposta por Ogata e Banks, (1961), que se aplica ao caso de fluxo em meios onde a concentração (C) é assumida como igual a zero à distância infinita e ao longo de todo o tempo. Vale citar também a solução proposta por Rowe & Booker, (1987).

Entre as soluções semi-analíticas mais famosas encontram-se as propostas por Rowe & Booker, (1987), incorporadas no programa POLLUTE (Rowe et al., 1994). Essa solução permite avaliar o avanço da contaminação através de várias camadas, inclusive através de uma barreira impermeabilizante. Várias condições de contorno podem ser incorporadas à diferentes níveis, tratando-se de solução para problemas unidimensionais.

As soluções numéricas são adequadas para modelagem de situações complexas, como o caso de camadas inclinadas, dobradas ou falhadas, compostas por materiais anisotrópicos. Entre os vários programas disponíveis no mercado, destacam-se os programas de elementos finitos FEMWATER e FLOTRANS e o de diferenças finitas MT3D. Alguns pacotes incorporam estes programas num ambiente gráfico, facilitando o estudo dos casos analisados. Como por exemplo, MODINE, VISUAL MOD FLOW e o GMS.

• Impermeabilização por geomembranas

Pohl, (1992), cita que o uso de geomembranas na impermeabilização de aterros, como alternativa a materiais tradicionais, tem aumentado significativamente nos últimos anos em todo o mundo. Este aumento deve-se, em parte, às novas regulamentações de atividades ambientais, à maior distribuição de dados e informação sobre as propriedades e eficácia das geomembranas, bem como ao desenvolvimento de métodos de controle de qualidade na produção e instalação das mesmas.

A principal desvantagem do uso das geomembranas está relacionada ao fato da instalação exigir mão de obra especializada e equipamentos específicos (Bagchi, 1994). Outro ponto a ser considerado diz respeito às juntas ou costuras. Estudos realizados por Haxo, (1982), apud Bagchi, 1994, demonstram que a compatibilidade química entre o chorume e a geomembrana, nos pontos de solda varia consideravelmente, afetando assim sua durabilidade a longo prazo.

- **Sistemas de impermeabilização indicados**

Recomenda-se que o sistema seja composto no mínimo por uma camada selante, como por exemplo argila compactada. Todavia, um sistema formado por duas ou mais camadas de materiais de baixa permeabilidade assegura, com maior precisão, a proteção do aterro quanto a eventuais vazamentos, garantindo assim a eficiência do conjunto. Obviamente, a decisão a ser tomada depende em muito das condições locais e da disponibilidade de verba. A seguir encontram-se alguns exemplos de sistemas impermeabilizantes possíveis de serem adotados. (Figuras 3.3 e 3.4)

Sistema único (argila compactada)

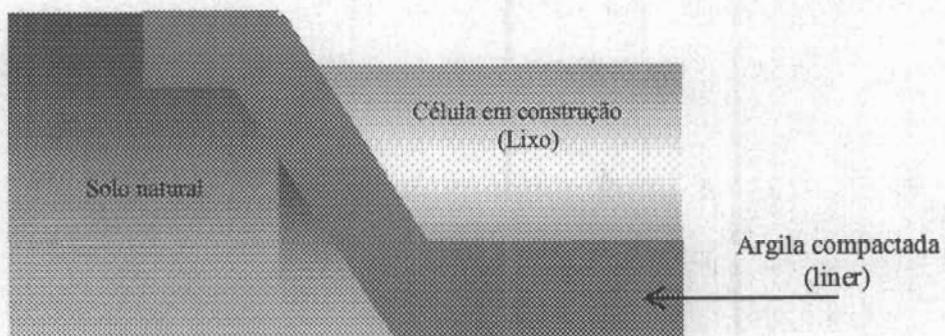


Figura 3.3 – Sistema único de impermeabilização de fundo e laterais de aterro sanitário.

Sistema duplo (geomembrana e argila compactada)

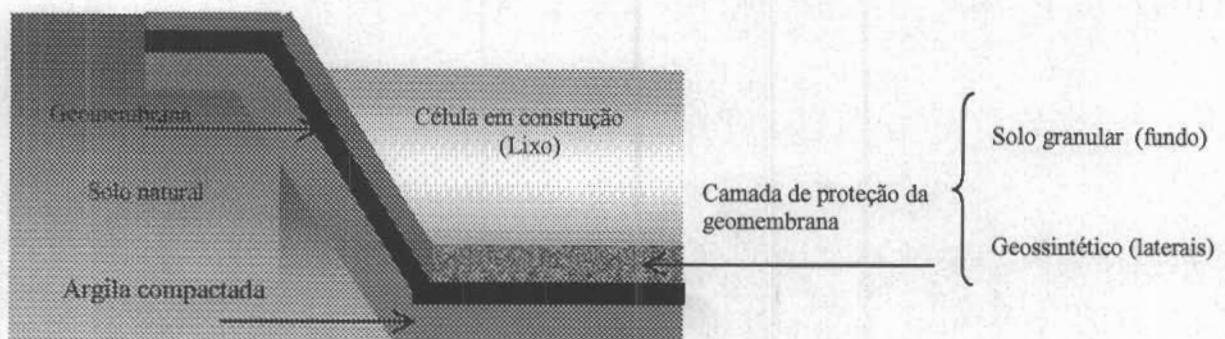


Figura 3.4 - Sistema duplo de impermeabilização de fundo e laterais de aterro sanitário

Para os casos que exigem uma proteção máxima (aterros de resíduos perigosos e hospitalares), devem ser utilizados sistemas detectores de vazamento. Para tanto, sob a camada de geomembrana e argila compactada é necessário a introdução de um sistema extra de drenagem capaz de acusar um possível vazamento.

Sistema Múltiplo (com detector de vazamento)

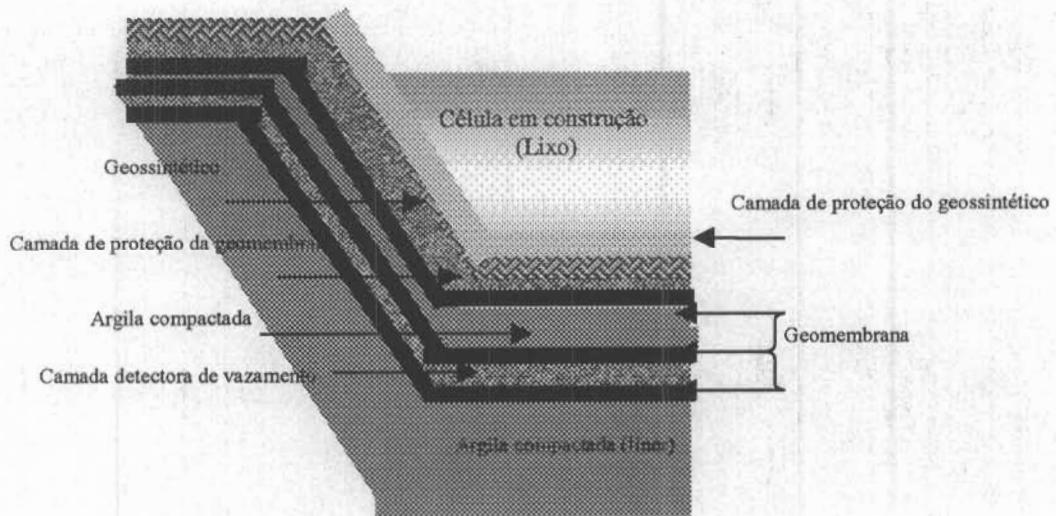


Figura 3.5 – Tipo de sistema de impermeabilização com detector de vazamento

3.2.3 – Sistema de Drenagem e Tratamento dos Gases

Como já comentado anteriormente (fases da decomposição do lixo), uma vez confinado, o resíduo sólido sofre um processo de decomposição predominantemente anaeróbio, capaz de gerar gases nocivos ao meio ambiente. Entre eles o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2). Bidone e Povinelli, (1999), alertam para o fato de que o metano, além de ser um gás poluidor, é inflamável e passível de explosão espontânea (quando em concentração de 5% a 15% no ar). De acordo com os mesmos autores esses gases podem infiltrar-se no subsolo, atingindo a rede de esgotos, fossas e, até mesmo, garagens de edifícios. Percebe-se então que é inevitável um controle da geração e migração desses gases num projeto de aterro sanitário.

A captação é feita por meio de um sistema de drenagem vertical. Quanto ao seu destino final, geralmente o sistema de drenagem de gás termina em queimadores especiais conhecidos como flares. No entanto, principalmente em aterros de grandes dimensões há a possibilidade de recuperação do biogás.

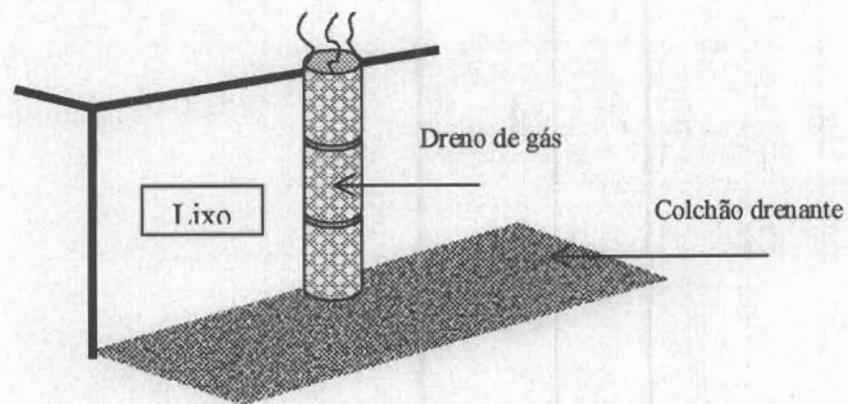


Figura 3.6 – Detalhe de um sistema de drenagem de gás.

De acordo com as normas brasileiras (NBR 13896, 1997), todo aterro deve ser projetado de maneira a minimizar as emissões gasosas e promover a captação e tratamento adequado das eventuais emanações. Porém, estimar a produção dos gases gerados em um aterro sanitário é uma tarefa extremamente difícil, cercada de incertezas.

Alguns autores como Lima, (1995), comentam que, apesar das incertezas envolvendo o montante de gás produzido, muitos estudos têm sido feitos neste sentido e alguns modelos foram propostos e tiveram relativa aceitação prática, especialmente o de Simpos, 1960, que, utilizando-se de biodigestores em batelada, chegou à seguinte equação:

$$\frac{dy}{dt} = g (G - y)$$

Onde:

G - total de gás gerado (Nm^3);

y - total de gás produzido no tempo t;

g - constante = 0.3/dia.

Devido à falta de modelos de geração comprovados, normalmente os drenos são construídos de forma intuitiva, prevalecendo o bom senso do projetista. Na prática, os diâmetros dos tubos variam de 0.2 m a 1.00 m, em função da altura do aterro. Assim, nos aterros de pequena altura (até 15 m) e grande área superficial, são utilizados tubos de até 0.40 m; nos aterros de alturas mais elevadas, geralmente são utilizados tubos de concreto armado de até 1.00 m de diâmetro, visando dar não só vazão aos gases gerados, como suportar os recalques diferenciais e a movimentação sofrida pelos resíduos aterrados. (Bidone e Povinelli, 1999)

Em relação ao espaçamento entre os drenos de gás, também não há um critério definido. Baseando-se em observações de campo, recomenda-se que entre um dreno e outro sejam deixadas distâncias variáveis entre 30 m e 50 m.

Quanto ao método construtivo dos drenos, existem duas possibilidades, 1 – execução durante a construção da célula; 2 – execução após o término da célula. No primeiro caso, o sistema de drenagem é preparado enquanto a célula está sendo preenchida, já no segundo, há necessidade do uso de algum equipamento adequado para que a massa de lixo seja escavada de forma propícia à construção da drenagem.

Vale acrescentar que, mesmo nos casos de aterros bem drenados, comumente observa-se a saída de gases através de eventuais fissuras na superfície de cobertura final. Portanto, principalmente nos casos em que o reaproveitamento da área exige maior responsabilidade, (estacionamentos para veículos, instalações com utilização de equipamentos elétricos, entre

outros) faz-se necessário uma malha de drenos horizontais sob a cobertura final do aterro, convergindo para os drenos verticais.

3.2.4 - Sistema de Drenagem e Coleta do Percolado (chorume)

• Capacidade de campo

Em se tratando do sistema de drenagem dos líquidos percolados, a importância do comentário a respeito da capacidade de campo reside no fato que, só após a mesma ter sido atingida os canais coletores são acionados. A grosso, modo pode-se definir capacidade de campo como sendo a umidade acima da qual dá-se início ao fluxo de chorume no aterro sanitário, ou seja, o chorume só começa a percolar após a capacidade de campo ter sido atingida.

Zornberg et al (1999), exemplifica que, se uma certa quantidade de água é adicionada a um material poroso que já tenha atingido a sua capacidade de campo, então, uma mesma quantidade de líquido será drenada para que seja restaurado o equilíbrio da umidade. Partindo desse princípio, vários estudos foram realizados no intuito de estabelecer uma relação entre a porosidade do material e a sua capacidade de campo.

De acordo com estudos de Fungaroli & Steiner, (1979), a permeabilidade dos resíduos sólidos varia entre 10^{-2} cm/s e 10^{-4} cm/s. No mesmo ano, Walsh & Kinman, (1979), encontraram um valor para a permeabilidade de 6×10^{-3} cm/s , concordando com a faixa determinada por Fungaroli.

Fungaroli & Steiner, (1979), baseados em resultados experimentais concluíram então que a chance da capacidade de campo ser atingida, aumenta com o peso específico do lixo, devido em parte, à redução do seu índice de vazios. Os mesmos autores propõem a seguinte expressão:

$$\theta_{FC} = 21.7 \ln \gamma_t - 5.4$$

Onde:

θ_{FC} = capacidade de campo volumétrica (%);

γ_t = peso específico total do lixo(kN/m³)

Percebe-se então que, só após a capacidade de campo ter sido atingida é que o sistema de drenagem de fundo passa a ser solicitado. A tabela abaixo, proposta por Tchobanoglous et al, (1993), indica alguns valores para a capacidade de campo de determinados solos. (Tabela 3.1)

Tabela 3.1 – Capacidade de Campo para alguns solos, modificado de Tchobanoglous et al, (1993).

Tipo de solo	Faixa de valores (%)	Valor típico (%)
Areia	6 – 12	6
Areia fina	8 - 16	8
Silte	19 - 28	24
Silte Argiloso	27 - 35	31
Argila	31 - 39	35

• Dimensionamento do sistema coletor

Um bom sistema de coleta e remoção do percolado é um fator fundamental para o sucesso do funcionamento geral do aterro. Para evitar o acúmulo de chorume no fundo das células, deve-se adotar uma inclinação que seja suficiente para drenar o chorume em direção aos canais coletores, que o conduzirão para algum tipo de tratamento ou destino final (Daniel & Koerner, 1995).

Normalmente o conjunto é composto por uma camada drenante, (usualmente areia), um sistema coletor (tubos perfurados ou drenos cegos), fossa coletora e sistema de remoção do chorume.

O diâmetro dos condutores é projetado em função da produção diária de chorume. Luz, (1981), salienta que a produção de chorume é mínima, chegando a tender a zero, em períodos de estiagem, nos aterros corretamente executados. No entanto, nos períodos de chuva, o chorume é produzido junto com as águas de percolação.

Dimensionar o sistema coletor de chorume não é uma tarefa facilmente executável; inúmeras são as imprecisões relacionadas à quantificação de todos os fatores responsáveis pelo surgimento dos líquidos na massa de resíduos. Em função disso, algumas formulações matemáticas foram propostas com o intuito de facilitar os projetos. Dentre elas destacam-se na literatura, dois métodos que prevêem a quantidade de chorume produzido em um aterro: Método Suíço e o método do Balanço Hídrico.

- a) **Método Suíço** – tal método considera como componentes principais a precipitação pluviométrica e a compactação do lixo no aterro. Onde:

$$Q = \left(\frac{1}{t} \right) * P * A * K$$

Onde:

Q = vazão média (l/s)

P = precipitação média anual (mm)

A = área do aterro (m^2)

t = tempo (s)

K = coeficiente (função do grau de compactação do lixo)

Sendo:

$K = 0.15 - 0.25$ - forte compactação, com massa específica $> 0.7 \text{ t/m}^3$.

$K = 0.25 - 0.50$ - fraca compactação, com massa específica entre 0.4 e 0.7

- b) **Método do Balanço Hídrico** - método bem mais elaborado que o apresentado anteriormente, baseado principalmente nas relações de precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e potencial de armazenamento de água pelo solo (Bagchi 1994).

O cálculo do balanço hídrico é feito computando-se mês a mês, durante o período de um ano, os valores dos parâmetros: precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial, infiltração, capacidade de armazenamento de água do solo e percolação. Atualmente existem modelos computacionais desenvolvidos para calcular o balanço hídrico de maneira mais prática e eficiente. A exemplo pode-se citar o HELP que pela sua atual utilidade em projetos de aterros sanitários, merece uma maior ênfase nesse trabalho.

• O programa HELP

O HELP é um modelo hidrológico quase bidimensional desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency – EPA*) que tem como principal objetivo auxiliar na análise e comparação de alternativas de projetos tendo como base o Balanço Hídrico. O programa executa simulações quanto ao movimento de água através de aterros sanitários. Para tanto, exige algumas especificações quanto às camadas constituintes do aterro (ou da sua cobertura), tais como: camada de percolação vertical; camada de drenagem lateral; camada impermeabilizante; ou geomembranas.

- **Camada de percolação vertical** – assume-se fluxo não saturado e escoamento baseado num gradiente hidráulico unitário na direção vertical (Lei de Darcy). A condutividade hidráulica não saturada (K_θ), é calculada pela equação de Campbell (1974).
- **Camada de drenagem lateral** – são camadas que direcionam o fluxo para sistemas de coleta lateral ou de remoção de percolados. O fluxo é modelado de maneira idêntica à da camada de percolação vertical.
- **Camadas impermeabilizantes** – tais camadas são projetadas para restringir o fluxo vertical do fluido e possuem condutividade hidráulica significativamente inferior à das outras duas camadas anteriormente comentadas.

Vale salientar que a taxa de percolação alcançada dependerá da existência de uma carga hidráulica positiva na superfície da camada em questão, da sua espessura e condutividade hidráulica saturada. Além disso, para cada uma das camadas o programa requer a porosidade, a capacidade de armazenamento de campo e o ponto de murcha (*wilting point*).

Segundo Schroeder et al, (1994), o modelo HELP divide a precipitação em escoamento superficial e infiltração de forma aproximada, levando em consideração a condutividade hidráulica da camada superficial, as condições em termos de vegetação (descoberta, pobre, boa, etc), a inclinação e o comprimento da cobertura.

De acordo com o modelo, a água é removida do sistema de cobertura por evapotranspiração até uma profundidade máxima. O HELP prevê valores padrões, para a profundidade, baseados na localização e nas condições de vegetação. A quantidade de água retirada por evapotranspiração é calculada em função do potencial de evapotranspiração e da disponibilidade de água do solo. O cálculo do balanço hídrico é realizado através da seguinte expressão:

$$P = P_r + R_s + ET + L_f + \Delta S_w$$

Onde:

P = precipitação;

P_r = percolado;

R_s = escoamento superficial;

ET = evapotranspiração (evaporação + transpiração);

L_f = escoamento lateral entre camadas e

ΔS_w = variação do armazenamento de água no solo.

Nos casos apresentados com geomembranas, a taxa de percolação é função da espessura do solo saturado acima da geomembrana, da condutividade hidráulica da camada de solo drenante, do contato entre a camada adjacente e a geomembrana, das propriedades da geomembrana, do tamanho e do número de buracos existentes na geomembrana, e da qualidade de instalação da mesma. O esquema da figura 3.4, mostra de maneira gráfica as parcelas constituintes do balanço hídrico utilizadas nas simulações do HELP.

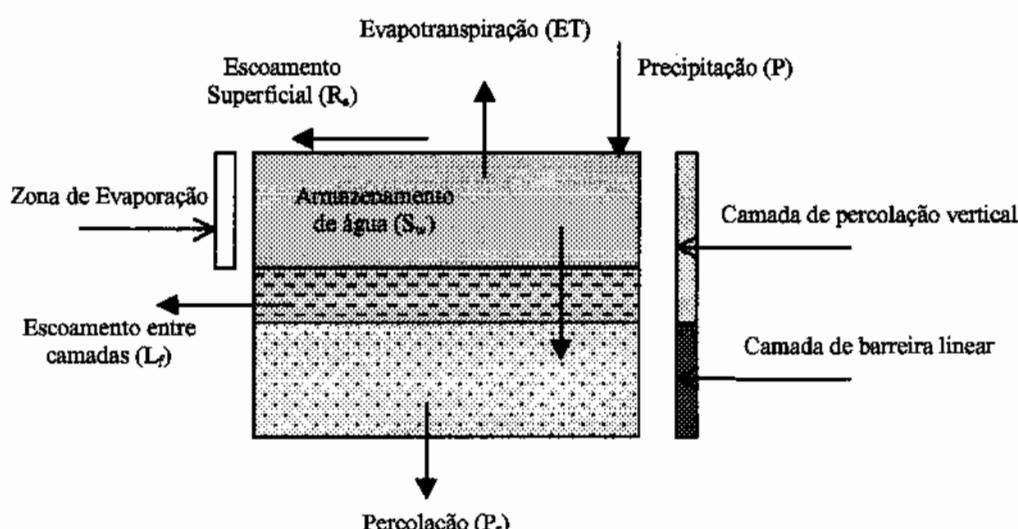


Figura 3.7 – Parcelas do balanço hídrico usado pelo modelo HELP (modificado de Schroeder, 1994).

A seguir estão listadas as hipóteses básicas adotadas pelo programa na utilização do Método do Balanço Hídrico:

- Espessura do solo de cobertura = 0.6m (solo compactado) e inclinação de 2% a 4%;
- A percolação inicia-se após o acabamento do aterro;
- A área aterrada destina-se a áreas verdes ou pastos;
- Toda a infiltração é fruto da precipitação direta sobre o aterro;
- Em termos hidráulicos, lixo e solo são considerados isotrópicos;
- A área ocupada pelo aterro é muito maior que a sua profundidade (unidimensional).

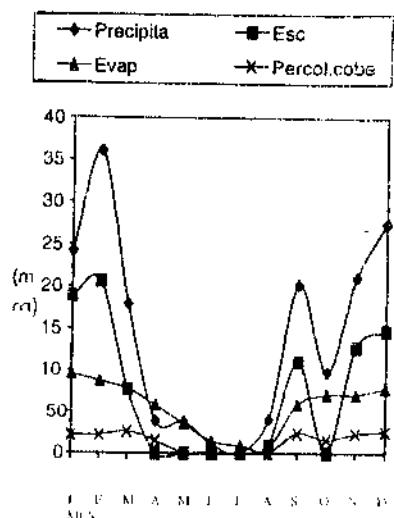
Vários são os estudos utilizando o HELP como fonte de informação do comportamento hídrico de aterros sanitários após cobertura final. Dentre eles pode-se citar o trabalho de Correa Sobrinho & Azevedo, (1999), no qual apresentam dados de duas análises distintas para o futuro aterro sanitário de Juiz de Fora (MG).

Em ambas as análises os autores utilizam como sistema de cobertura final uma camada de 90 cm de solo, sendo os 30 cm iniciais (camada superficial) preparado para receber uma cobertura vegetal e os 60 cm restantes (camada barreira) composta por um solo argiloso compactado.

Na simulação 1 a camada de 60 cm foi considerada uma camada de barreira linear de solo, enquanto na simulação 2 a mesma camada foi considerada como uma camada de percolação vertical, admitindo a futura deterioração da cobertura, que na verdade é quase inevitável, devido ao surgimento das fissuras ou rachaduras, seja, por ressecamento, recalques diferenciais ou por compactação inadequada, entre outros.

A seguir, apresenta-se os gráficos do balanço hídrico e produção de chorume, referentes a esse estudo, figura 3.8 e figura 3.9 respectivamente .

Simulação 1



Simulação 2

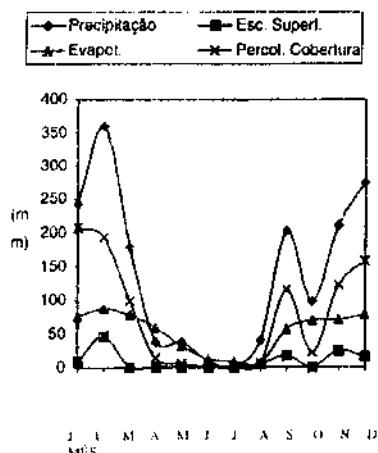


Figura 3.8 – Balanço hídrico para o futuro aterro sanitário de Juiz de Fora - MG de acordo o HELP – Simulação 1 e 2 (Fonte: Correa Sobrinho & Azevedo, 1999).

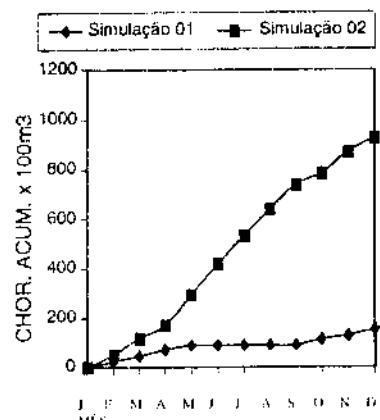
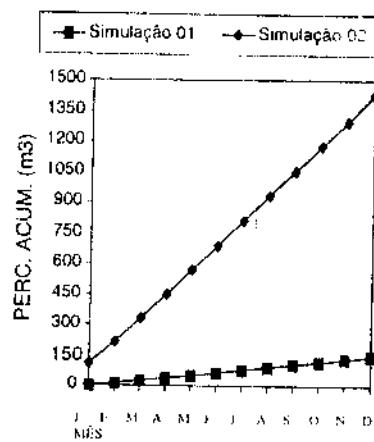


Figura 3.9 – Produção de chorume a para o aterro de Juiz de Fora - MG (Fonte: Correa Sobrinho & Azevedo, 1999).

Como observado anteriormente, para o caso em que a camada de cobertura foi considerada como uma camada barreira (simulação 1), a produção de chorume obtida foi bem inferior ao caso inverso (simulação 2), onde a cobertura foi considerada uma camada de percolação vertical.

• Dimensionamento dos canais coletores

Uma vez estimada a produção de chorume no aterro, tem-se então condições para dimensionar a seção do sistema coletor. A formulação utilizada depende do tipo de dreno a ser adotado.

Em se optando por drenos cegos (drenos sem tubulação), por se tratar de um escoamento na faixa de transição (para grandes produções de chorume), entre o regime laminar e o turbulento, pode-se adotar o modelo de Wilkins:

$$V = C * v^a * R_h^b * I^c * p \quad (1)$$

Onde:

V – velocidade média de percolação (cm/s)

C – coeficiente que depende da forma e rugosidade das partículas;

v^a – viscosidade cinemática da água;

R_h – raio hidráulico do meio poroso considerado (cm);

I – gradiente hidráulico;

a, b, c – constantes empíricas;

p – porosidade do meio drenante

Após realizar vários ensaios de percolação em rocha britada e esferas de mármore, Wilkins desenvolveu uma nova expressão que, de acordo com vários pesquisadores, fornece bons resultados para materiais limpos e constituídos por fragmentos razoavelmente uniformes. A equação (1) pode ser reescrita na forma:

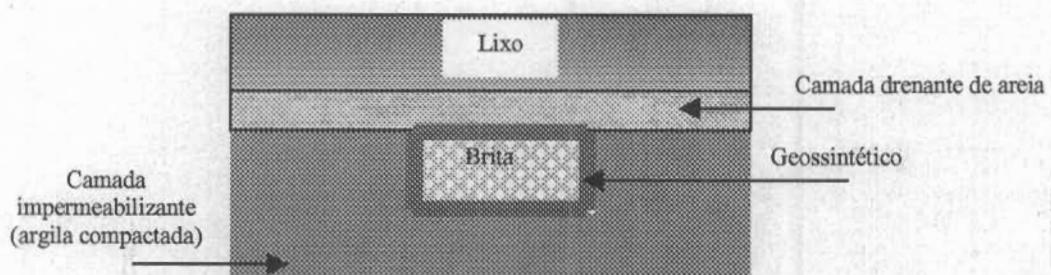
$$V = 52.45 * p * (R_h)^{0.5} * (i)^{0.54}$$

Com o valor estimado para a velocidade encontrada e, aplicando-se a equação da continuidade a partir de uma seção adotada, chega-se a uma vazão de drenagem. Comparando-se o valor da vazão encontrada com a vazão prevista, chega-se então a um valor seguro para a seção do dreno.

Geralmente a inclinação adotada no fundo da célula é mínima ficando em torno de 1%. Quanto à inclinação do sistema de drenagem (drenos e tubos coletores) em direção ao sistema coletor (poço, fossa ou sistema de tratamento) é de cerca de 2%.

Muito comumente os canais coletores são envolvidos por geossintético ou outro material que sirva de filtro, embora essa solução não garanta a total proteção do sistema quanto a uma eventual colmatação. A colmatação dos drenos causa muita preocupação em aterros sanitários tendo em vista não só a grande quantidade de material carreado durante a percolação como a impregnação do geossintético por substâncias produzidas nos processo de decomposição da matéria orgânica. Ressaltando que este fator pode afetar toda a eficiência do sistema de drenagem.

a) Detalhe de sistema de drenagem via dreno cego



b) Detalhe de sistema de drenagem via tubulação

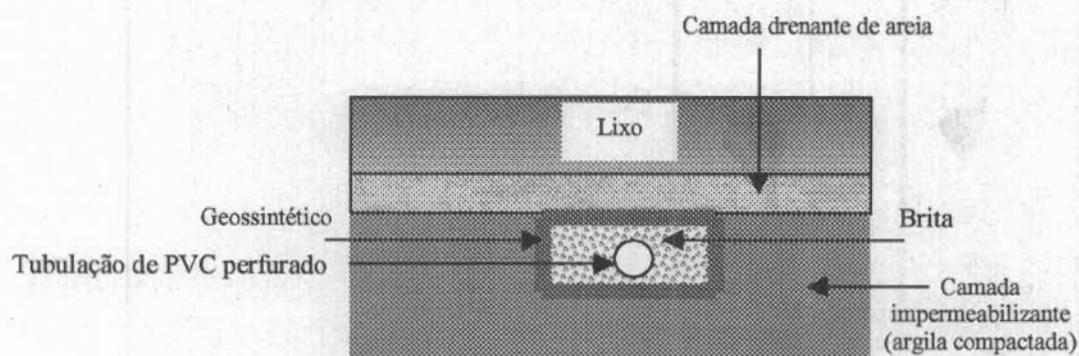


Figura 3.10 – sistemas de drenagem do chorume, a) Dreno cego; b) tubulação.

3.2.5 – Análise da Estabilidade

A análise da estabilidade em aterros sanitários pode ser dividida nas análises referentes ao solo da região escolhida para disposição e nas análises referentes ao maciço de resíduos sólidos propriamente dito, como discutido a seguir.

- Análise da estabilidade dos solos**

Sendo esse um assunto de conhecimento geral no meio geotécnico, decidiu-se por abordá-lo superficialmente, apenas citando algumas maneiras práticas de tratá-lo, como será feito a seguir.

De acordo com o método construtivo escolhido para o aterro, há necessidade de um maior conhecimento da capacidade resistiva do solo a ser escavado para a confecção das células de lixo, tendo em vista uma possível ruptura do maciço. Há na literatura inúmeros estudos de estabilidade envolvendo teorias que consideram as principais propriedades geotécnicas dos solos e a geometria dos taludes em questão. Como produto desses estudos surgiram os Métodos de Equilíbrio Limite, podendo-se destacar os Métodos de Bishop; Janbu; Morgenstein e Price, entre outros.

Junto com o avanço tecnológico surgiram programas capazes de executar simulações utilizando os renomados métodos de análises. O programa Slope-W é um bom exemplo a ser citado quando se trata do assunto.

- Análise da Estabilidade dos Resíduos Sólidos**

Não é novidade falar sobre os artifícios disponíveis para estudos de estabilidade em solos, porém, em se tratando de lixo, não há ainda na literatura, certezas que possam indicar qual o melhor método de análises referentes ao assunto. Porém tem-se plena conscienteza da importância desse estudo principalmente quando se leva em consideração o reaproveitamento da área destinada ao aterro, após sua vida útil.

Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos

Mitchel & Mitchel, (1992), advertem que a natureza coesiva dos resíduos sólidos há tempos vem sendo estudada, mas ainda não foi adequadamente caracterizada. Devido à heterogeneidade do material fica difícil adotar um modelo de comportamento entre as partículas constituintes do lixo. Sing & Murphy, (1990), recomendam alguns critérios em relação a esse tema e segundo eles, o modelo de caracterização de Mohr-Coulomb não é o mais apropriado para estudos referentes à resistência do lixo.

Alguns autores como Grisolia el al, (1991), Jessberger & Kockel, (1993), através de ensaios triaxiais com amostras de grande tamanho estudaram o comportamento resistivo do lixo obtendo valores para o ângulo de atrito entre 35° e 40°, confirmando a grande resistência ao cisalhamento e elevada deformabilidade do material.

Por outro lado, são abundantes as referenciais a respeito de cortes, praticamente verticais, estáveis, em resíduos sólidos com alturas elevadas. Baseados nisso, alguns autores como Kölsch, (1993), Kavazanjian, (1994), desenvolveram estudos comparando o comportamento da massa de lixo com o de um solo reforçado.

Deve-se também considerar o efeito da degradação do lixo sobre a resistência do material, pensando nisso, Landva & Clark, (1987), compararam resultados de ensaios de cisalhamento sobre dois grupos de amostras retiradas de um aterro no Canadá, onde aquelas armazenadas e ensaiadas um ano depois, apresentaram-se com resistência inferior às que foram ensaiadas logo após a coleta. Walter, (1992), propõe um gráfico de evolução da densidade e da resistência do lixo com o passar do tempo; lamentavelmente, o mesmo autor não apresenta maiores explicações a respeito do tipo de material nem escala gráfica.

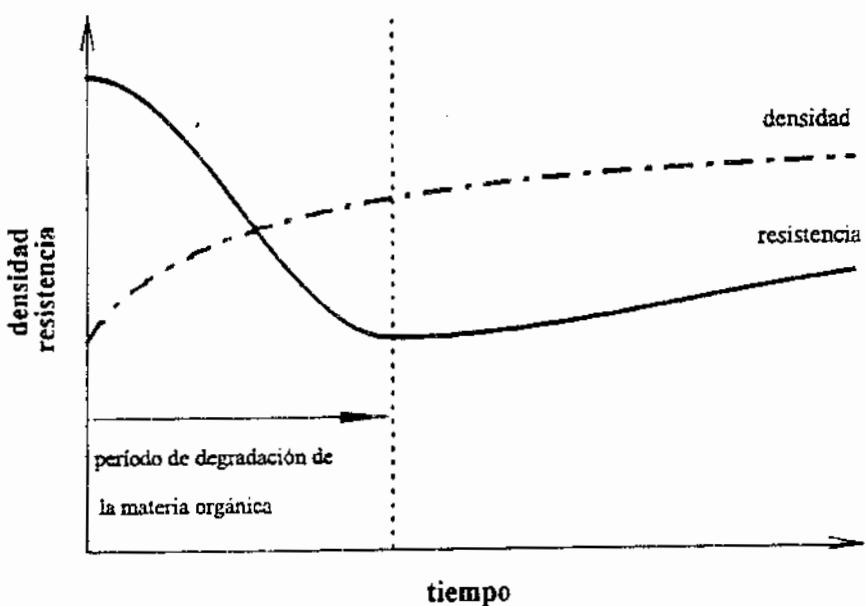


Figura 3.11 – Variação da densidade e da resistência dos resíduos sólidos em função do tempo (Walter, 1992).

Tendo em vista a complexidade do tema, percebe-se que um estudo mais realista só será possível quando forem desenvolvidos modelos específicos levando em consideração as grandes deformações alcançadas antes da ruptura, a estrutura especial do material, bem como o efeito da degradação sobre a resistência do lixo.

Até o presente momento, pela ausência de outros modelos consolidados, o estudo da estabilidade de aterros sanitários vem sendo desenvolvido segundo os métodos clássicos de análise de estabilidade por condições de equilíbrio limite.

Bagchi, (1994) acrescenta que uma combinação entre os métodos clássicos e estudos de campo seria o mais adequado quando se deseja fazer alguma previsão a respeito da estabilidade de taludes de lixo. Fatores de segurança altos (1,5-2,0) ou baixos valores de ϕ' e c' também devem ser utilizados nesse caso. O mesmo autor admite que as propriedades de resistência (ϕ' e c') obtidas para o lixo em ensaios de laboratório possuem uma defasagem entre 15% a 25% do valor real de campo. Um modelo de superfície de escorregamento para o lixo é mostrado na figura a seguir. (Figura 3.12)

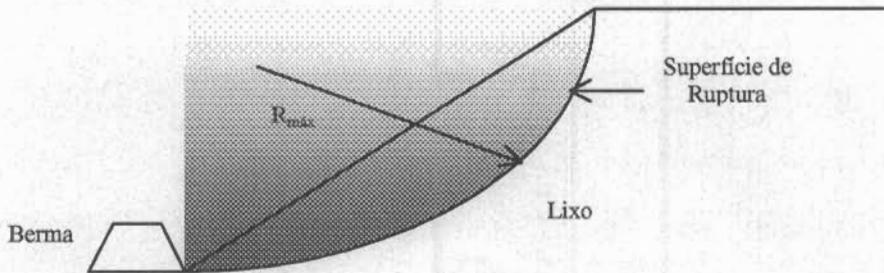


Figura 3.12 – Superfície de ruptura máxima para análises da estabilidade de resíduos sólidos. (modificado de Bagchi, 1994).

3.2.6 - Sistemas Alternativos de Tratamento de Resíduos Sólidos

Até hoje vários estudos foram desenvolvidos com o intuito de tratar resíduos sólidos, haja vista a técnica da compostagem-reciclagem anteriormente comentada. Ao nível de aterro sanitário, pode-se dizer que o processo mais utilizado é o da recirculação de chorume que consiste, basicamente, na remoção do chorume produzido, com a reintrodução do mesmo no aterro, após um pré-tratamento.

O processo de recirculação só é eficiente quando é capaz de mudar a concentração dos poluentes, reduzindo-a, e alterar as características dos resíduos. Esse tipo de tratamento tem a *finalidade de acelerar o processo de decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos* e envolve dois importantes processos da bioengenharia: aterrimento celular e reatores para o tratamento do chorume.

Lima, (1995 b), descreve um sistema de tratamento baseado na recirculação composto por dois reatores anóxicos para tratamento fisico-químico do chorume e um reator biológico que consiste de um vaso de fluxo misto, descendente-ascendente, preenchido com material poroso onde os microrganismos são fixados. Segundo o autor, o percolado deve ser reciclado através dos três reatores num prazo médio de cinco dias, para então produzir o inóculo, com características acetogênicas, que será injetado no aterro.

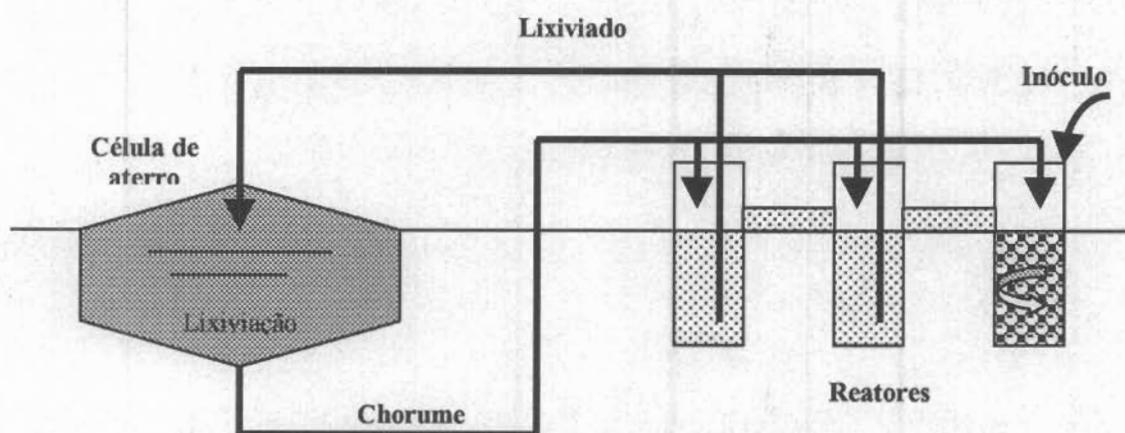


Figura 3.13 - Esquema da recirculação de chorume em aterro sanitário para a aceleração da decomposição da matéria orgânica, (Lima, 1995 b).

Outro estudo envolvendo o mesmo tema foi desenvolvido por Espinace et al, (1997), onde os mesmos analisaram o comportamento de dois reatores idênticos, apenas diferenciados pelo tipo de tratamento adotado para o lixo, no caso, a recirculação de chorume tratado em um filtro aeróbio. Em ambos os reatores foi adicionado água para simular a chuva. O reator tratado apresentou um comportamento quanto aos recalques e produção de chorume bem superior (maiores recalques e maior produção de chorume) ao que não foi submetido a tratamento, comprovando a eficiência da recirculação.

Independente do tipo de tratamento utilizado para tratar o chorume, o importante é que a sua reintrodução no aterro seja capaz de acelerar a degradação do resíduo, sem aumentar a sua capacidade poluente.

Mosher et al. (1997) ao estudarem uma maneira alternativa de acelerar a degradação no Aterro Keele Valley (KVL) situado no Canadá, concluíram que pode haver uma redução no nível de contaminação do aterro em função do aumento da sua umidade. Esse mesmo estudo indicou que a recirculação do chorume sem um tratamento prévio (chorume bruto), aumentaria o tempo de biodegradação da massa de lixo. Partindo desse princípio, a água purificada e a infiltração natural foram identificadas como as melhores fontes de umidade a serem utilizadas no processo de aceleração da decomposição da matéria orgânica. Dando

continuidade ao estudo, os autores concluíram que a quantidade adicional de umidade requerida para o lixo depende, em parte, do teor de umidade inicial da massa de resíduos aterrada, uma vez que baseada nela pode-se estimar a umidade requerida para alcançar a capacidade de campo do aterro.

Outra forma conhecida e já citada na literatura diz respeito à bioventilação *in situ* ou seja, à aceleração da decomposição do material via decomposição aeróbia da matéria orgânica. Conforme definição da United States Environmental Protection Agency (EPA) trata-se de um processo que consiste da introdução artificial de ar na massa de poluentes orgânicos ou inorgânicos, estando estes dispostos no solo ou subsolo, (zona vadosa ou zona saturada) objetivando estimular a atividade microbiana autóctone, promovendo reações bioquímicas capazes de remediar o sítio contaminado.

Em termos de histórico, essa técnica é mais conhecida no tratamento de solos contaminados com petróleo ou outras substâncias químicas do que no tratamento de resíduos sólidos, porém alguns trabalhos já foram citados como é o caso do desenvolvido por Osterndorf & Kampbel (1989) apud Lima (1995 a).

Pode-se dizer que o trabalho desenvolvido por Lima (1995 a) na cidade paulista de Praia Grande é o pioneiro dessa técnica no Brasil, onde foram utilizados poços abertos na massa de lixo para a injeção de ar (respirômetros). Embora o autor não dispense maiores comentários a respeito da real eficiência do sistema, os resultados práticos evidenciaram que o período de bioestabilização dos resíduos domésticos variou entre 45 a 90 dias desde o início do tratamento, em células medindo 60x60x1,8 metros (comprimento, largura e altura).

3.2.7 - Sistemas de Monitoramentos

A importância atribuída ao monitoramento de um aterro sanitário reside no fato de que ele é o responsável pelo acompanhamento das mudanças ocorridas no aterro com o passar do tempo. Vários são os tipos de monitoramento possíveis de serem adotados, entre eles, o monitoramento dos recursos naturais (águas superficiais e subterrâneas), monitoramento da operação (líquidos percolados, gases, sólidos, manta líquida, monitoramento de recalques) e

análises físico-químicas. A seguir serão comentados apenas aqueles sistemas de monitoramento que foram adotados na pesquisa.

• Monitoramento dos recalques

O controle dos recalques superficiais serve para aferir, por via indireta, a redução mássica ocorrida no interior da massa de lixo. Deformações entre 10 e 30% da altura original do aterro têm sido reportadas por diversos autores. Em geral, os recalques nos aterros municipais são normalmente irregulares, sendo no período inicial (um a dois meses após finalizada a construção), bastante intensos. Em seguida, continuam a ocorrer por um longo período, porém com velocidade menor (Sowers 1968, Edil et al. 1990, Grisolia et al 1991).

Segundo Santos & Presa, (1995) as transformações ocorridas nos depósitos de resíduos sólidos urbanos favorecem os seguintes mecanismos geradores de recalques:

- Ações mecânicas decorrentes do peso próprio e sobrecargas, conduzindo a recalques similares aos dos solos;
- Perda de massa para o exterior sobretudo pela fuga de gases, que, combinada com vibrações e ações fisico-mecânicas, geram uma correspondente redução de volume;
- Erosão interna e migração de finos para os vazios maiores, devido à percolação de água infiltrada;
- Transformações fisico-químicas causadas por processos de corrosão, oxidação etc;
- Fenômenos mistos que geram novos fatores de degradação ou decomposição.

Espinace et al, (1997), analisando o comportamento de dois reatores idênticos, apenas diferenciados pelo tipo de tratamento adotado para o lixo, no caso, a recirculação de chorume, puderam perceber o efeito causado nos recalques da massa de lixo quando se acelera a sua degradação. De acordo com os dados coletados pelo autor, a recirculação de chorume foi responsável por um aumento de mais de 50% do movimento vertical total ocorrido no reator tratado.

Nas curvas de recalque obtidas, percebe-se claramente a diferença entre os recalques ocorridos no reator sem tratamento (Lisímetro 2) e naquele submetido à recirculação de chorume (Lisímetro 1) (Figura 3.14). Esse comportamento só vem reafirmar o que já foi

levantado anteriormente, ou seja, a influência direta da degradação sobre o comportamento dos recalques no lixo.

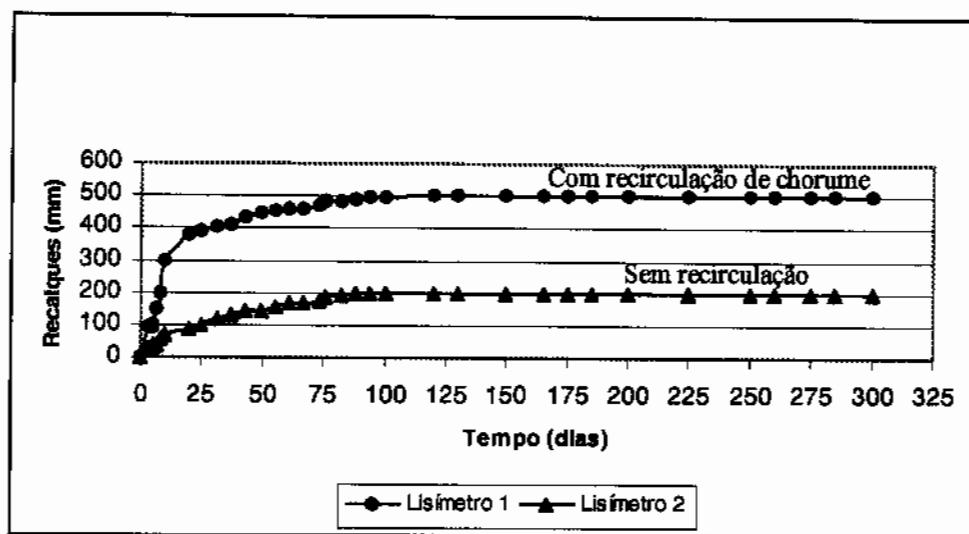


Figura 3.14 – Monitoramento de recalques em reatores com e sem recirculação de chorume, (Fonte: Espinace et al, 1997).

É fácil concluir que existem grandes diferenças no comportamento apresentado nos processos de recalque do lixo e dos solos. Observações têm mostrado que aqueles modelos que não consideram os efeitos da degradação estão longe de serem representativos. Sendo assim, na falta de modelos específicos para caracterizar esse comportamento, tem-se utilizado conceitos clássicos da Mecânica dos Solos com algumas adaptações. Dentro desses conceitos, propostas baseadas em modelos visco-elásticos, como aqueles desenvolvidos para retratar a compressão secundária de argilas e turfas, vem ganhando destaque por conseguir reproduzir com razoável fidelidade as medidas de campo. (Carvalho, 1997).

Na prática, o comportamento dos recalques em aterros sanitários pode ser efetuado por meio de nivelamento topográfico ou através de placas de recalques previamente dispostas no interior da massa de lixo.

- **Monitoramento da Resistência**

O monitoramento da resistência do maciço de lixo pode ser realizado em laboratório ou em campo, como abordado a seguir.

- a) **Laboratório**

A obtenção de informações a partir de ensaios de laboratório requer a retirada de amostras representativas (grandes dimensões), bem como ensaios em equipamentos adequados, como aqueles realizados por Landva & Clark (1990) ou Jessberger & Kockel (1993).

Nos estudos de Landva & Clark (1990), as amostras foram ensaiadas tanto em condições naturais como secas (cisalhamento direto), com as dimensões de 434 x 287 mm. A média de valores obtidos para o ângulo de atrito das amostras foi de 24° a 34° e valores de coesão entre 16 e 23 kPa.

Jessberger & Kockel (1993), através de uma célula de carga triaxial ensaiaram amostras de lixo com 30 cm de diâmetro e 60 cm de altura. No estudo foram ensaiadas amostras tratadas (lixo triturado) e não tratadas (retiradas apenas as partículas de grandes tamanhos), com resultados apresentando uma pequena diferença entre os dois tipos de amostras. Os valores finais obtidos pelos autores para o ângulo de atrito e a coesão foram respectivamente de 17° e 22 kPa, valores estes não muito diferentes dos conseguidos nos estudos de Landva & Clark (1990).

Há entre os pesquisadores uma concordância em afirmar que os ensaios envolvendo lixo em laboratório ainda estão longe de atingir a realidade, porém, os dados conseguidos até hoje nessas condições dão um indício do comportamento resistivo da massa de lixo em um aterro sanitário.

- b) **Campo (*in situ*)**

Na realização de ensaios de campo, pode-se obter dados mais próximos da realidade do aterro sanitário e estabelecer correlações com as informações obtidas no laboratório. Entre as experiências desenvolvidas “*in situ*”, as mais conhecidas são os ensaios de penetração e os ensaios de carga.

Uma característica desses ensaios é que quando realizados periodicamente, com comparações dos resultados em diferentes ocasiões, permitem analisar a variação das características resistentes do aterro ao longo do tempo. No geral a resistência à penetração dos resíduos é baixa, exceto nos casos em que há presença de zonas de alta resistência, (Palma, 1995). O trabalho publicado por Sowers (1968) é uma das primeiras referências conhecidas a respeito de ensaios de penetração em resíduos sólidos. No caso, o autor executou uma série de ensaios do tipo SPT, em aterros sanitários da Geórgia, U.S.A., obtendo valores numa média de 4 a 10 golpes/30 cm.

Inúmeras são as referências a respeito de técnicas de ensaios em aterros sanitários (*in situ*) para obtenção da resistência da massa de lixo. Um bom trabalho a ser lembrado é o de Palma, (1995), no qual se encontra uma vasta bibliografia a esse respeito.

• Monitoramento dos líquidos percolados

Tendo em vista não ser do interesse desse trabalho um maior aprofundamento a respeito do comportamento físico-químico do chorume, achou-se por bem abordá-lo de maneira superficial como poderá ser verificado a seguir.

O monitoramento do chorume é feito através das medidas do volume de líquido produzido e da coleta de amostras para avaliar a sua qualidade, o total de chorume produzido, assim como suas características físicas e químicas, que variam sazonalmente com as mudanças do total de água que infiltra no aterro. Verifica-se um aumento de concentração da Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Voláteis (SV), NH₃, Fe, Cl, Mg,Ca com o aumento da infiltração. Por outro lado, observa-se uma redução da alcalinidade e do pH. (Lima, 1988).

Inúmeros estudos foram desenvolvidos até o momento, com o intuito de controlar a produção de chorume em aterros sanitários. Um dos pioneiros talvez tenha sido o de Buivid, (1980), no qual sugere que quanto maior for a compactação do lixo, menor será a produção de chorume e a sua livre drenagem. Segundo o mesmo autor, uma compactação bem executada pode propiciar um grau de compactação bastante elevado chegando a atingir massa específica de até 950 kg/m³ nas camadas inferiores do aterro.

Lima, (1988), indica os seguintes parâmetros para uma boa avaliação da qualidade do chorume: Potencial Hidrogeniônico (pH), Potencial Redox (Eh), Alcalinidade, Série Sólidos, Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Amônio, Dureza, Condutividade, Série Nitrogênio, Fósforo Total e Metais (Série de 13).

Tchobanoglous et al, (1993), apresenta em uma tabela os valores típicos assumidos pelos principais parâmetros de avaliação da qualidade do chorume, ressaltando que a sua composição química tende a variar consideravelmente de acordo com a idade do aterro e o estado de decomposição do lixo na época da amostragem. A tabela 3.2 foi modificada, a título de simplificação, conservando-se apenas os parâmetros mais comumente avaliados no monitoramento de aterros sanitários.

Tabela 3.2 - Valores típicos da composição do chorume para aterros novos e antigos. (modificado de Tchobanoglous et al, 1993).

Parâmetros	Aterro novo (menos de 2 anos)	Aterro antigo (mais de 10 anos)
DQO	3.000 – 60.000 mg/l	100 – 500 mg/l
DBO	2.000 – 30.000 mg/l	100 – 200 mg/l
Nitrogênio	10 – 800 mg/l	80 – 120 mg/l
Amônio*	10 – 800 mg/l	20 – 40 mg/l
Sulfato	50 – 1.000 mg/l	20 – 50 mg/l
Nitrato	5 – 40 mg/l	5 – 10 mg/l
pH	4,5 – 7,5	6,6 – 8 ou mais

* Em se tratando de gás – amônia (NH_3); em se tratando de ion – amônio (NH_4^+)

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1 – INTRODUÇÃO

A pesquisa foi estruturada no projeto e construção de cinco células para disposição de resíduos sólidos situadas no Aterro do Jockey Clube de Brasília (área destinada às pesquisas da UnB). As células se diferenciam de acordo com o sistema alternativo adotado para acelerar a decomposição do lixo, ressaltando que uma delas, **Célula I (C_I)** foi executada para servir de comparação com as demais, ou seja, não dispõe de nenhum tratamento extra quanto à aceleração da biodegradação do lixo e é considerada a célula de referência.

Todas elas foram dotadas dos mesmos sistemas de impermeabilização, drenagem dos gases e drenagem e coleta de chorume. Em se tratando dos sistemas alternativos de aceleração da decomposição nas células II, III, IV e V, os mesmos foram divididos em:

Célula II (C_{II}) – Sistema de recirculação de chorume bruto;

Célula III (C_{III}) – Sistema de injeção de água proveniente do subsolo;

Célula IV (C_{IV}) – Sistema de cobertura final granular (cobertura drenante);

Célula V (C_V) – Sistema de injeção forçada de ar.

Para o acompanhamento dos processos de degradação, idealizou-se um sistema de monitoramento englobando desde as características físicas, como recalques, temperaturas e resistência da massa de resíduos até aspectos fisico-químicos da qualidade do percolado (chorume).

No capítulo presente será abordado não só a metodologia aplicada para o desenvolvimento da pesquisa como os aspectos executivos no cumprimento da mesma. A seguir apresenta-se na tabela 4.1 um escopo com todos os sistemas previstos para serem utilizados na confecção das cinco células, identificando-se quais aqueles comuns a todas elas e quais os sistemas que

caracterizam cada uma individualmente. Vale acrescentar mais uma vez que a Célula V ainda se encontra em fase construtiva, não tendo seus dados analisados nessa dissertação.

Tabela 4.1 – Resumo dos sistemas utilizados nas células

Item	Célula I	Célula II	Célula III	Célula IV	Célula V
Impermeabilização da base	X	X	X	X	X
Drenagem dos gases	X	X	X	X	X
Drenagem do chorume	X	X	X	X	X
Cobertura impermeável	X	X	X		X
Recirculação de chorume		X			
Injeção de água			X		
Cobertura granular				X	
Injeção de ar					X

4.2 – PROJETO DAS CÉLULAS

Foram incluídos nessa fase, além da definição geométrica das células, os projetos referentes ao sistema de impermeabilização do fundo e paredes, sistema de drenagem e coleta de chorume e sistema de drenagem e queima dos gases produzidos nas células. Também fez parte dessa etapa o desenvolvimento dos sistemas de tratamento alternativo adotado nas células II, III, IV e V.

Tomando como base o fator escala, decidiu-se adotar para as células dimensões compatíveis com o estudo a ser realizado. Sendo assim, optou-se por 12m x 12 m para o nível superior (superfície do terreno) e 4m x 4m no nível inferior (cota de escavação). Em termos de espessura dos resíduos sólidos, atingiu-se 2m de escavação e 2m acima do nível do terreno natural. Para os taludes laterais, foi adotado uma inclinação de 2:1.

Para essas dimensões, o volume de material escavado totalizou algo em torno de 160 m³ por célula. A altura média final das células aproxima-se de 4m, ou seja, 2m preenchidos internamente e 2m de preenchimento acima do nível do terreno. Em termos de disposição, as

células foram distribuídas em função da área disponível para a pesquisa. Nas figuras a seguir observa-se com maior precisão o que foi comentado anteriormente (Figuras 4.1 e 4.2).

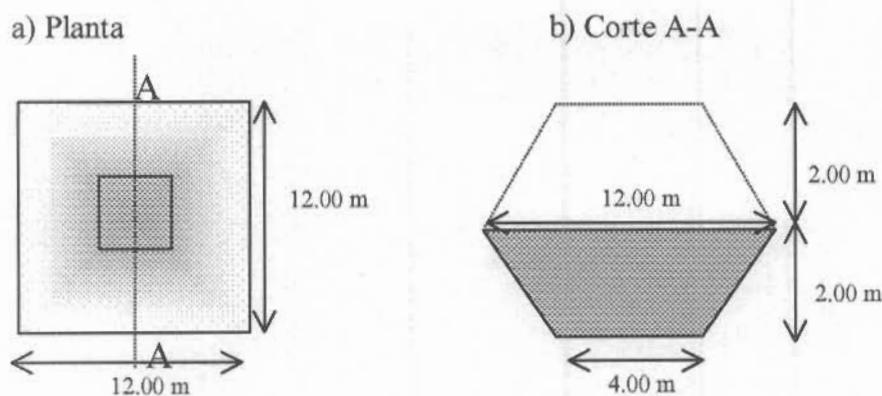


Figura 4.1 – Esquema geométrico das células, a) planta; b) corte A-A

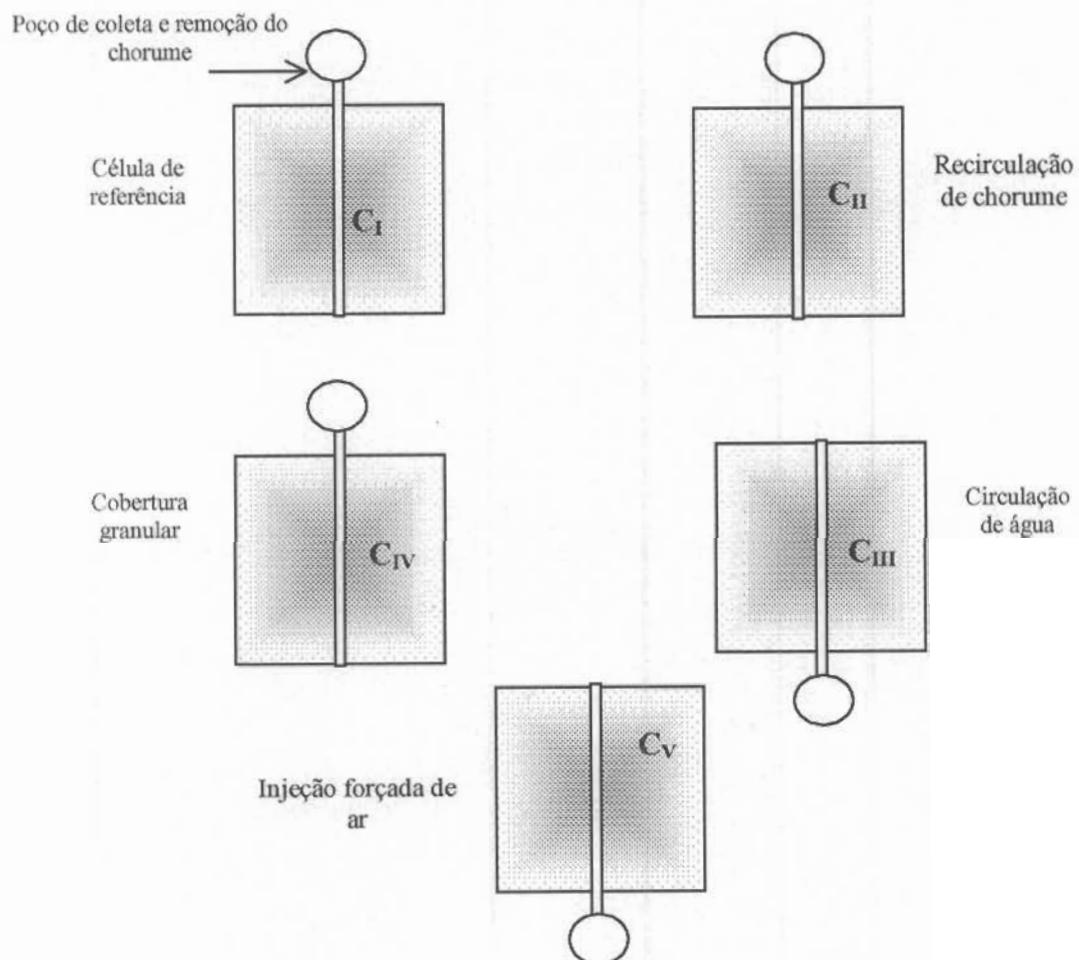


Figura 4.2 – Disposição das células na área de pesquisa

4.2.1 – Sistema de Impermeabilização das células

Conforme estudos anteriores (Pereira et al, 1997) que definem o solo da região do Aterro do Jóquei Clube com características geotécnicas favoráveis quanto à sua utilização como camada impermeabilizante, e considerando-se aspectos econômicos, decidiu-se por adotar uma camada de argila compactada para compor o sistema de impermeabilização das laterais e base das células. Sendo assim, praticamente houve um total reaproveitamento do material escavado quando da abertura das células.

A argila porosa vermelho escura, encontrada no local, pode ser classificada de acordo com o SUCS como uma argila siltosa (CL). O mesmo material, quando compactado com próctor normal, atinge $\gamma_{dmáx}$ um valor de 15,5 kN/m³ e para o w_{dt} um valor de 25,4%. (Pereira et al, 1997). Esses valores foram tomados como referência na execução da camada de argila compactada responsável pela impermeabilização das células.

Na tabela abaixo encontram-se as principais características do solo que foi utilizado na compactação (solo da região) obtidas nos ensaios de laboratório.

Tabela 4.2 – Dados característicos do solo da região do Aterro do Jockey Club (Pereira et al, 1997).

Condições do Solo	c' (kPa)	ϕ'	γ (kN/m ³)	k (cm/s)
Natural	5 – 20	16 – 26	14,13	$4,1 \times 10^{-4}$
Compactado	12	32	15,5	$5,1 \times 10^{-8}$

A espessura da camada de compactação foi definida tomando-se como referência o especificado na NBR 13896/1997, que indica, para solos com coeficiente de permeabilidade inferiores a 10^{-7} cm/s, uma camada não inferior a 60 cm de solo compactado. Na base, foi adotada uma inclinação de 1% em direção ao centro da célula para direcionar o percolado ao dreno coletor.

4.2.2 – Análise da Estabilidade dos Taludes

No estudo da estabilidade dos taludes que compõem as células, empregou-se o programa SLOPE – W, o qual utiliza o Método de Equilíbrio Limite nas análises da estabilidade dos maciços. Dentre os métodos embutidos no programa, deu-se preferência às análises utilizando-se os Métodos de Bishop, Janbu e Morgensten-Price.

Ressalta-se que em nenhum deles foram encontrados valores que tornassem o estudo da estabilidade preocupante, devido não só a boa capacidade de carga do solo da região como a baixa declividade adotada para os taludes (inclinação de 2:1), bem como a pequena altura dos mesmos.

O programa exige algumas características geotécnicas do solo a ser analisado, tentou-se então representar a situação mais desfavorável utilizando-se valores abaixo do normalmente caracterizado para o solo da região. Esses valores foram:

Características.....	Valor adotado
γ_{esp}	12,00 kN/m ³
c'	5 kPa
ϕ'	15

A seguir apresenta-se o estudo da estabilidade realizado com o programa SLOPE especificando-se, primeiramente, o traçado das prováveis superfícies de ruptura bem como os centros dos raios adotados no ato das análises. Num segundo plano, percebe-se a pior situação de instabilidade dos taludes encontrada pelo programa, juntamente com o menor valor adotado para o coeficiente de segurança quando da análise utilizando-se o Método de Bishop. Ver respectivamente as figuras 4.3 e 4.4

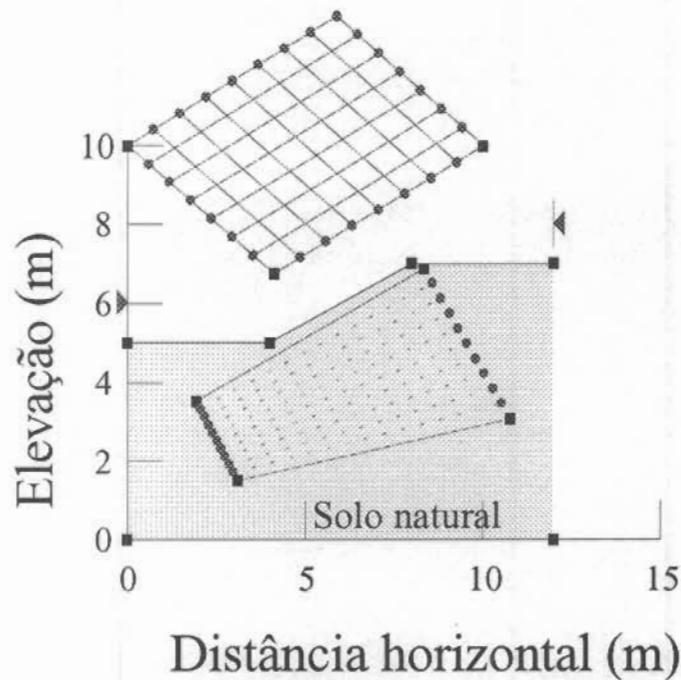


Figura 4.3 – Traçado das prováveis superfícies de ruptura de acordo com o programa SLOPE

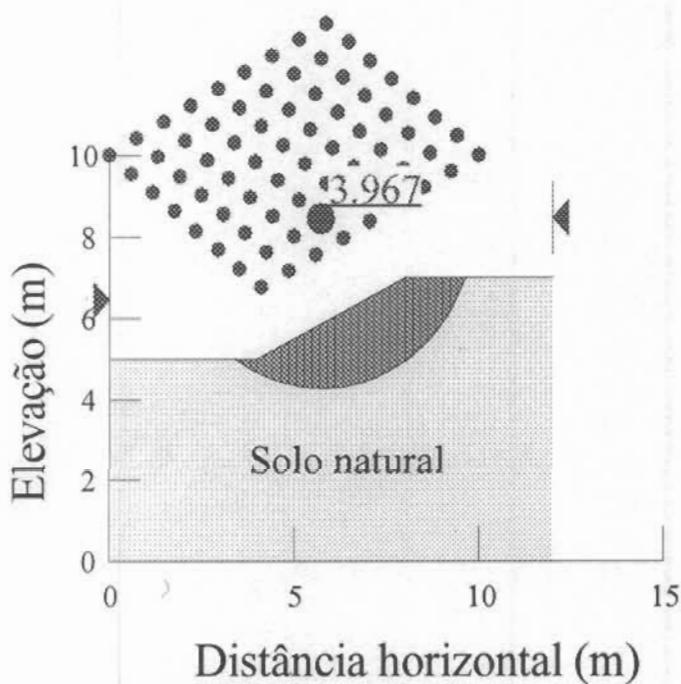


Figura 4.4 - Análise da estabilidade dos taludes das células via programa SLOPE.

Como observado, o Fator de Segurança (F.S.) mínimo encontrado no ato das análises de estabilidade do solo da região mostrou não haver maiores problemas quanto a possíveis escorregamentos, indicando uma boa segurança durante o processo executivo das células.

4.2.3 – Análise da Estabilidade do Lixo

Não foram dispensados estudos quanto à estabilidade da massa de lixo devido, principalmente, ao fato da camada de resíduos acima da superfície do terreno não atingir alturas muito elevadas (média de 2m) nem inclinações desfavoráveis para causar algum efeito na estabilidade dos resíduos, uma vez que, como citado anteriormente o comportamento da massa de lixo pode ser considerado semelhante ao de solos reforçados.

4.2.4 – Sistema de Drenagem dos Gases

O sistema de drenagem dos gases foi composto por uma tubulação única de PVC perfurado com diâmetro de 40mm, disposta no centro da célula. No intuito de facilitar ainda mais a drenagem das emissões gasosas, optou-se por envolver a tubulação com brita.

No interior da massa de lixo, o dreno se prolonga, aproximadamente, até a metade da célula e ao atingir a camada de cobertura final prolonga-se em média, 0,5 m acima do nível da célula. A título de maior detalhamento, encontra-se na figura 4.5 um esquema do sistema coletor de gás.

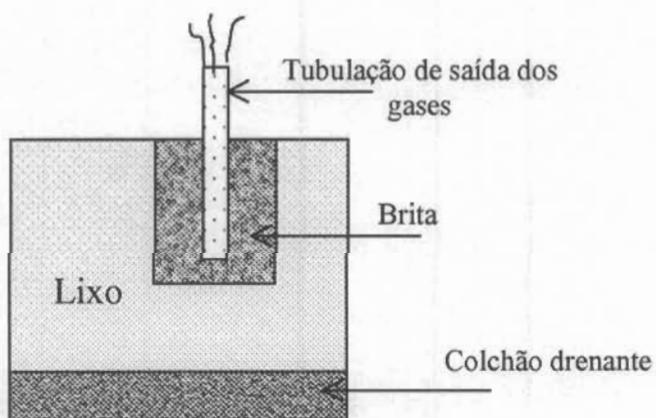


Figura 4.5 – Detalhe do sistema de drenagem de gás das células

4.2.5 – Sistema de Drenagem do Chorume

Sabendo-se que todas as células seriam dotadas do mesmo sistema de drenagem, concluiu-se que o modo mais coerente de projetar e dimensionar o canal coletor seria tomar como base a célula com cobertura granular, levando em consideração que a mesma estaria sujeita ao maior fluxo de percolado. Partindo desse princípio optou-se por realizar o cálculo da vazão contribuinte utilizando-se do Método Suíço tendo em vista a simplicidade do caso a ser projetado (célula praticamente sem cobertura).

A seguir, encontram-se os valores adotados no cálculo da vazão de chorume tomando-se como referência a Célula IV.

Dados utilizados:	Valor adotado
Precipitação média anual (P).....	1300 (mm)
Área da célula (A).....	144.00 m ²
Tempo (t).....	1 ano
Coeficiente para aterros com compactação moderada (K).....	0,35
Valor encontrado.....	65 m ³ de chorume/ano

Após a estimativa da produção de chorume e devido à escolha em um canal coletor (dreno cego) situado no centro da base das células, partiu-se para a estimativa da seção do sistema de drenagem do percolado usando o modelo de Wilkins. Dessa forma, chegou-se às dimensões de 0.30 cm por 0.30 cm. Lembrando que esses valores estão majorados.

Para compor o preenchimento do dreno cego optou-se por seixo rolado. O fato da brita encontrada na região do Distrito Federal ser calcária, poderia em muito influenciar nas análises do chorume coletado, uma vez que o mesmo durante o processo de drenagem estaria sujeito à reações com o material de preenchimento.

Outros cuidados foram dispensados ao sistema de drenagem tais como o envelopamento do seixo rolado com geossintético, no caso um geotêxtil não tecido do tipo OP-20 (BIDIM), e a confecção de um colchão drenante de areia com espessura média de 15 cm.

4.2.6 – Camada de Cobertura Final

Em se tratando das células que seriam sujeitas a um sistema de tratamento anaeróbio (C_I , C_{II} e C_{III}), adotou-se uma camada final de impermeabilização de 30 cm de argila compactada. Para tanto, fez-se uso do mesmo material utilizado na compactação do fundo e das laterais das células (solo de escavação das células).

Quanto à cobertura da célula denominada de granular (C_{IV}), a princípio, seria utilizada uma camada de material alternativo, chegando-se a imaginar compô-la com brita, rejeito de construção civil, pneu recortado ou até mesmo seixo rolado. Todavia, em se pensando numa aceleração a curto prazo da decomposição do resíduo, preferiu-se apenas cercar a área em torno da célula para evitar eventuais problemas com vetores e/ou catadores que sempre freqüentam o local. Vale salientar que, somado a isso havia o fato de uma quase inexistência de odores próximo à célula.

Em se tratando da célula destinada à injeção forçada de ar, (C_v), optou-se apenas por uma camada impermeável composta por argila compactada, uma vez que ao nível de comparação com as demais, caso fosse adotado um outro sistema, como por exemplo argila e geomembrana, estaria-se fugindo das condições padrão exigidas para as comparações entre as células.

4.2.7 – Sistema de Tratamento Diferenciado

Célula I

Como já discutido anteriormente, a célula I foi projetada para servir de comparação entre as demais, sendo assim, a mesma foi construída nos padrões de um aterro sanitário comum, ou seja, os cuidados dispensados foram aqueles tradicionais, como impermeabilização da base e laterais, drenagem dos gases, coleta e remoção do chorume.

Célula II

O sistema de tratamento alternativo adotado para a célula II diz respeito à técnica de recirculação de chorume. Embora seja um tema já bastante estudado, no caso apresentado, propõe-se uma recirculação de chorume bruto, ou seja, sem nenhum tratamento prévio e/ou

inoculação considerando-se que esse tipo de recirculação se bem aceito, simplificará em muito os métodos de recirculação normalmente utilizados.

Quanto à periodicidade e às taxas de injeções, os mesmos serão função do monitoramento, leituras de recalques e temperaturas, e das análises da qualidade do percolado. Quanto à execução do tratamento, decidiu-se por primeiramente bombear o chorume para um reservatório elevado e só então drená-lo através de mangueiras para a célula, introduzindo o chorume nos pontos de saída de gás.

Célula III

Para a Célula III optou-se pelo tratamento por meio da injeção de água proveniente do subsolo da região do Aterro do Jockey Clube. Vale ressaltar que, tendo em vista as constantes crises no abastecimento de água em algumas regiões do país, a viabilidade desse tipo de tratamento, só é justificável para regiões onde a água disponível encontra-se imprópria para a utilização humana.

Para esse tipo de tratamento a periodicidade e o volume a ser injetado na célula estarão ligados ao comportamento da massa de lixo no decorrer do tratamento. Semelhante à recirculação do chorume, o tratamento será executado a partir do bombeamento da água do subsolo para um reservatório elevado e por gravidade será introduzida na célula, nos pontos de saída de gás, via mangueiras.

Célula IV

Pode-se dizer que a Célula IV diferencia-se da Célula I apenas quanto à inexistência do sistema de cobertura final impermeabilizante e é centrado nesse ponto que se considera esse, um sistema alternativo de aceleração da decomposição do lixo.

Célula V

Como discutido anteriormente, a Célula V ainda não foi totalmente executada, porém desenvolveu-se um estudo paralelo de injeção forçada de ar em resíduos sólidos urbanos (laboratório) no intuito de servir de base para o desenvolvimento do futuro sistema aeróbio de campo. Um maior detalhamento a respeito do assunto será tratado num tópico à parte.

4.2.8 – Sistema de Monitoramento das Células

O monitoramento das células está centrado no acompanhamento dos recalques (placas de recalque), das temperaturas (termopares), das análises físico-químicas do chorume (poço de coleta) e ensaios SPT.

- **Temperaturas**

As temperaturas estão sendo monitoradas via termopares introduzidos na massa de lixo. Para a célula I foram implantados dois termopares em alturas diferentes (meio e fundo da célula), tendo em vista a igualdade dos valores coletados para a primeira célula e devido ao custo do equipamento, achou-se por bem adotar nas outras células apenas um termopar.

As leituras são efetuadas com o auxílio de um termômetro eletrônico-digital conectado aos termopares no ato das medições. Aproveitou-se os furos de sondagem SPT para a instalação dos termopares, ficando os mesmos a uma profundidade média de 2,5 metros.

- **Recalques**

O sistema de medição de recalques é formado por dois tubos concêntricos, acoplados a duas placas medindo $0,6 \times 0,6\text{m}$, ambos de aço galvanizado, como pode ser visualizado a seguir.

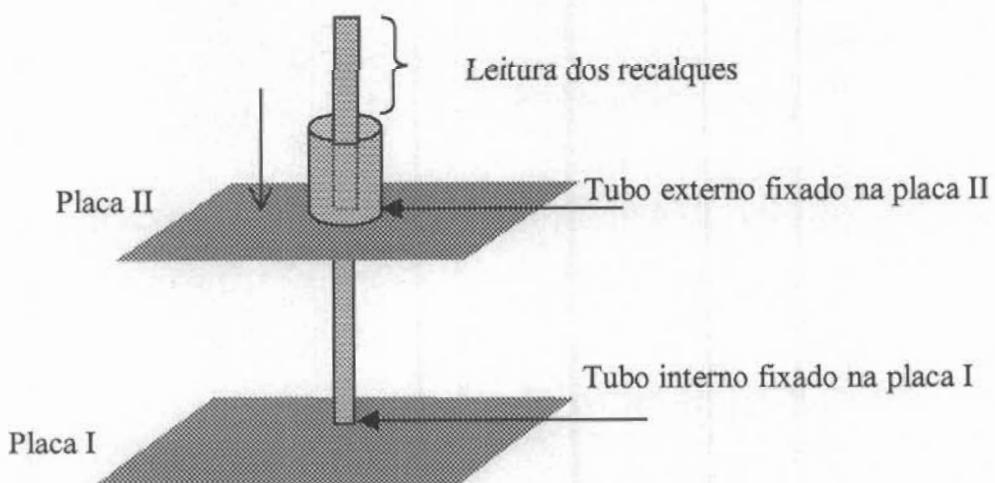


Figura 4.6 – Croqui das placas de recalques.

Como observado no esquema, o tubo de menor diâmetro foi parafusado na placa I e respectivamente serve de eixo e base para o sistema. Na placa II foi feita a soldagem do tubo de maior diâmetro, que juntamente com esta placa se movimentam no sentido vertical, de acordo com a intensidade dos recalques.

As leituras dos recalques são realizadas a partir da diferença entre os dois tubos concêntricos causada pela descida da massa de resíduos durante o processo de acomodação. Nos primeiros meses as leituras eram efetuadas semanalmente. Atualmente estão sendo realizadas em períodos de quinze dias.

- **Análises físico-químicas do chorume**

Visando caracterizar o chorume produzido nas células, escolheu-se ensaios capazes de dar diretrizes para algumas conclusões a esse respeito, principalmente pelo fato de se querer identificar o teor de contaminação do chorume produzido por cada uma das células. Os ensaios selecionados foram:

DQO (Demanda Química de Oxigênio);

Nitrogênio Amoniacal

Nitrogênio nitrato;

Cloreto e

pH (Potencial Hidrogeniônico).

- **SPT**

Adotou-se o ensaio de penetração SPT para analisar o comportamento da resistência do lixo no decorrer da sua degradação. Para tanto, foi prevista a realização de um ensaio por célula, a cada seis meses, com dois furos por célula.

4.3 – EXECUÇÃO DAS CÉLULAS E DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO

4.3.1 – Abertura das células

Inicialmente, com o auxílio de um trator de esteira tipo D6 foi feita a limpeza da área retirando-se toda a vegetação presente (árvores, arbustos e vegetação rasteira). Em seguida, iniciou-se o processo de escavação das células contando com o auxílio do trator de esteira e de uma retroescavadeira. Como não poderia deixar de ser, fez-se previamente a locação de cada uma das células visando uma maior orientação do maquinista. Nas figuras a seguir pode-se ter uma melhor visualização do que foi exposto acima (Figuras 4.7, 4.8 respectivamente)



Figura 4.7 – Limpeza da área destinada para a pesquisa.



Figura 4.8 - Detalhe da locação das células

4.3.2 – Execução do Sistema de Impermeabilização

Após a locação, foi realizado o trabalho de regularização do fundo e laterais das células para então dar início à compactação de toda a área escavada. Como dito anteriormente, tanto a umidade quanto a densidade do solo compactado foram baseados em dados anteriormente estudados (Pereira et al, 1997). O valor encontrado para a densidade, através do frasco de areia foi de $14,00 \text{ kN/cm}^3$, próximo dos $15,5 \text{ kN/cm}^3$ indicado no estudo.

Quanto à escolha dos equipamentos utilizados no processo de compactação, optou-se, para a execução do fundo, por um compactador de impulsão vulgarmente conhecido como “sapo”. Já para os taludes laterais a compactação foi realizada com o auxílio de uma placa vibratória. Um detalhamento da execução do sistema de impermeabilização das células pode ser observado na figura 4.9 a seguir.



Figura 4.9 – Detalhe da compactação no fundo e laterais das células.

4.3.3 – Execução do Sistema de Drenagem do Chorume

Com o fundo da célula previamente preparado, deu-se início à abertura do dreno central seguido da disposição do geotêxtil finalizando com o preenchimento e envelopamento total do material de preenchimento, como observado a seguir. (Figura 4.10)

Um maior detalhamento foi dispensado ao encontro entre o coletor central e a tubulação de PVC responsável em drenar o chorume para o poço de coleta e armazenagem. Visando evitar possíveis vazamentos preocupou-se em dar um bom acabamento nesse ponto. Terminada a confecção do coletor central, lançou-se o colchão drenante composto por uma camada de 15 a 20 cm de areia. Na figura 4.11 verifica-se o aspecto final do sistema de drenagem adotado na base das células.



Figura 4.10 – Execução do sistema de drenagem das células.

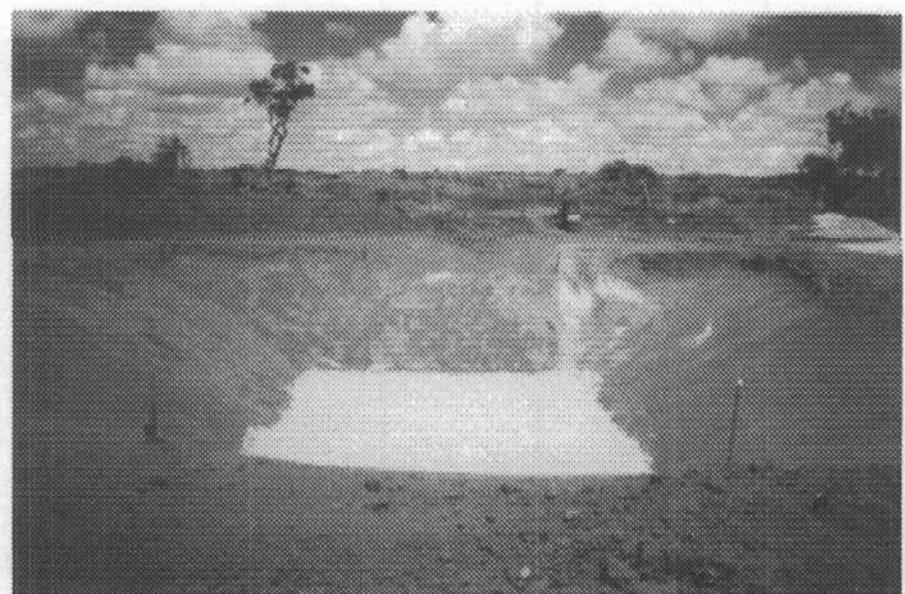


Figura 4.11 – Vista geral do sistema de drenagem do chorume

4.3.4 – Enchimento das Células

Quanto à classificação dos resíduos sólidos urbanos utilizados no preenchimento das células, realizou-se uma análise gravimétrica quanto do enchimento da Célula I o que pode ser observado na figura 4.12. Em seguida, na figura 4.13, encontra-se a classificação geral para o lixo do Distrito Federal de acordo com Junqueira, (1997)

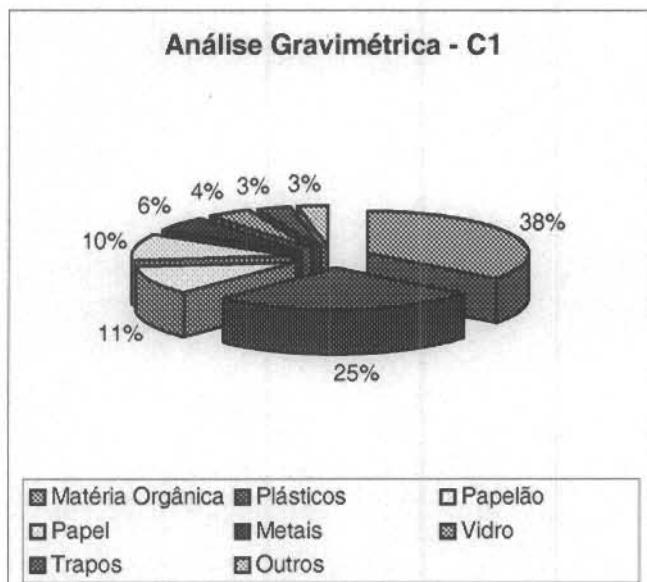


Figura 4.12 – Análise gravimétrica do lixo da Célula I

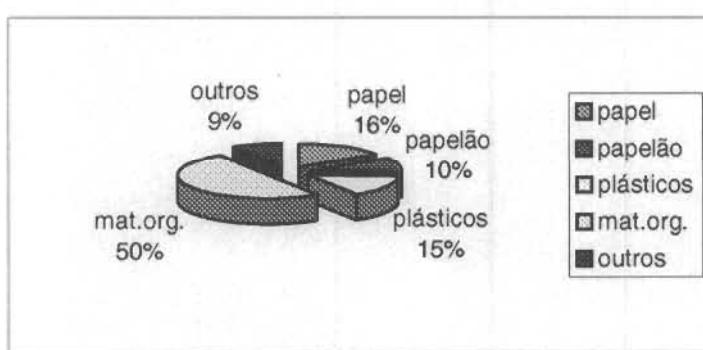


Figura 4.13 – Análise gravimétrica do lixo do Distrito Federal (Junqueira, 1997)

Por questões de ordem financeira, houve uma defasagem de tempo de aproximadamente 7 meses entre a construção e fechamento da Célula I e das Células II, III e mais um mês para a IV. Quanto à Célula V, como já comentado, a mesma encontra-se em fase deconstrução. As datas referentes aos fechamentos das células estão listadas, na tabela 4.3, a seguir.

Tabela 4.3 – Cronograma de fechamento das células

Célula	Data de fechamento	Diferença de tempo em relação à Célula I
C _I	28/03/2000	-
C _{II}	09/11/2000	7 meses
C _{III}	09/11/2000	7 meses
C _{IV}	24/12/2000	9 meses

4.3.5 – Implantação do Monitoramento

- Placas de Recalques

Quanto ao assentamento das placas de recalques o mesmo se deu antes e durante o enchimento das células como poderá ser observado na seqüência de figuras a seguir (Figuras 4.14 e 4.15 respectivamente):



Figura 4.14 – Assentamento da placa de recalque sobre o colchão drenante

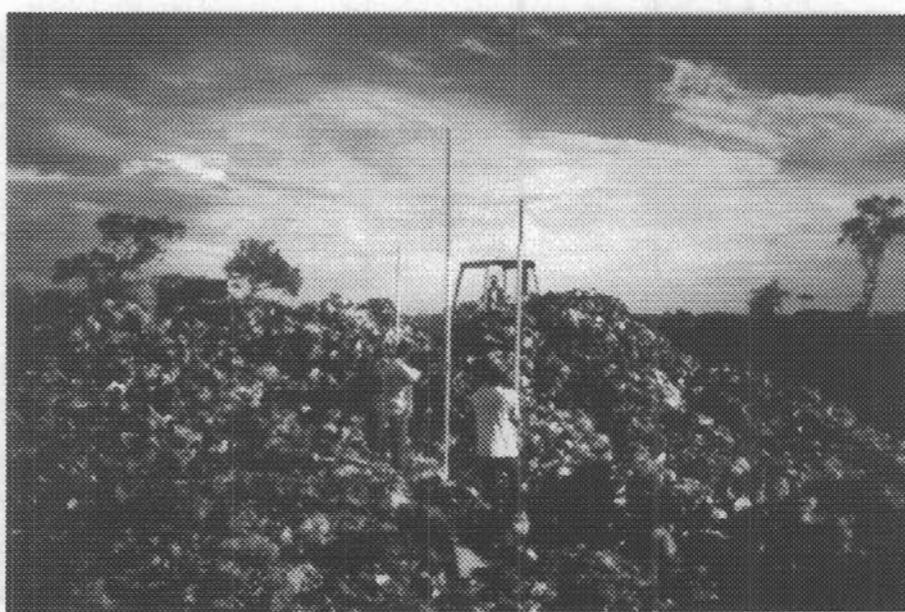


Foto 4.15 – Enchimento das células juntamente com a implantação das placas de recalques

• **Termopares**

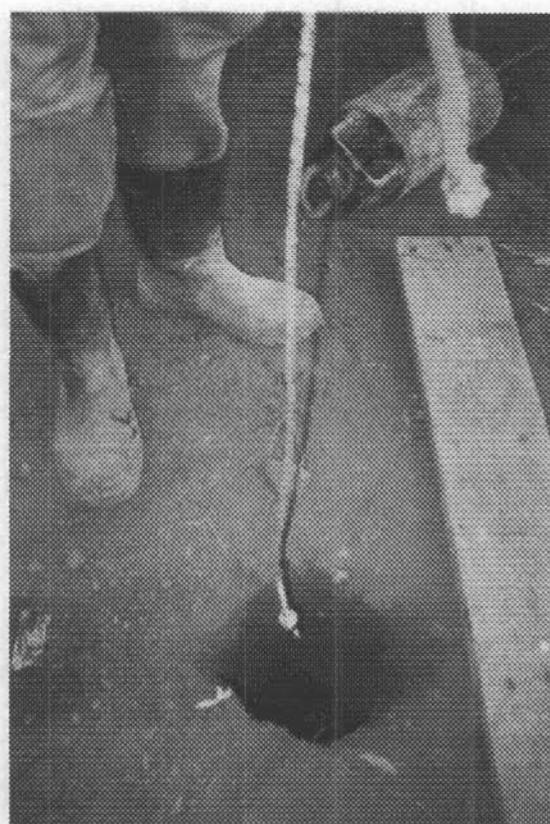


Figura 4.16 – Introdução de um termopar na massa de lixo, a partir do furo de sondagem SPT.

A introdução dos termopares na massa de resíduos só foi possível algum tempo após o fechamento das células, uma vez que, para tanto, foram aproveitadas as perfurações conseqüentes dos ensaios de SPT.

- **Análises físico-químicas**

Os ensaios referentes a DQO, Nitrogênio Amoniacal, Nitrogênio Nitrato, Cloreto e Sulfato, foram desenvolvidos no LAA (Laboratório de Análises de Água) da área de Recursos Hídricos da Universidade de Brasília. A técnica empregada nos ensaios diz respeito àquelas determinadas pela APHA (1985), mais precisamente o método das análises colorimétricas.

Nas análises colorimétricas utiliza-se substâncias previamente preparadas, que, ao entrar em contato com as amostras de chorume (diluídas), assumem uma coloração em função do grau de reação ocorrido. Para as leituras, conta-se com a fundamental ajuda de um equipamento conhecido como espectrofotômetro capaz de interpretar milimetricamente as reações ocorridas no ensaio.

- **SPT**

As sondagens foram realizadas com o equipamento do Laboratório de Solos da área de Geotecnia da Universidade de Brasília. Inicialmente com a ajuda de um trado, perfurou-se aproximadamente 0,50 m ultrapassando-se a camada de cobertura para então apoiar o amostrador e dar início à sondagem. Os ensaios foram realizados, sem maiores problemas, numa média de duas células por dia. Ressaltando-se que em nenhuma das sondagens realizadas conseguiu-se trazer amostras representativas de lixo.

4.4 – PROJETO PILOTO DO SISTEMA AERÓBIO

Como já discutido no início desse capítulo a célula aeróbia (C_V) ainda não foi totalmente executada, estando as obras em andamento. Com o intuito de contribuir um pouco mais com a pesquisa, decidiu-se explorar o tema em laboratório. Encontram-se a seguir todas as informações a respeito do desenvolvimento e execução do equipamento bem como a metodologia aplicada para a aquisição de dados durante o processo de decomposição aeróbia.

4.4.1 – Elaboração do Projeto

Embora a técnica de tratamento aeróbio já tenha sido utilizada anteriormente como citado por Lima, (1995 a), alguns pontos duvidosos quanto à injeção forçada de ar em resíduos sólidos precisavam ser sanados. Pensando nisso imaginou-se um estudo em escala de laboratório, com o intuito de diminuir algumas dúvidas quanto à real eficiência dos sistemas de injeção forçada de ar em resíduo sólido.

O sistema desenvolvido é composto por um reservatório para disposição do lixo (reator), compressor e manômetro para injeção e controle do ar finalizando com um esquema de coleta de dados.

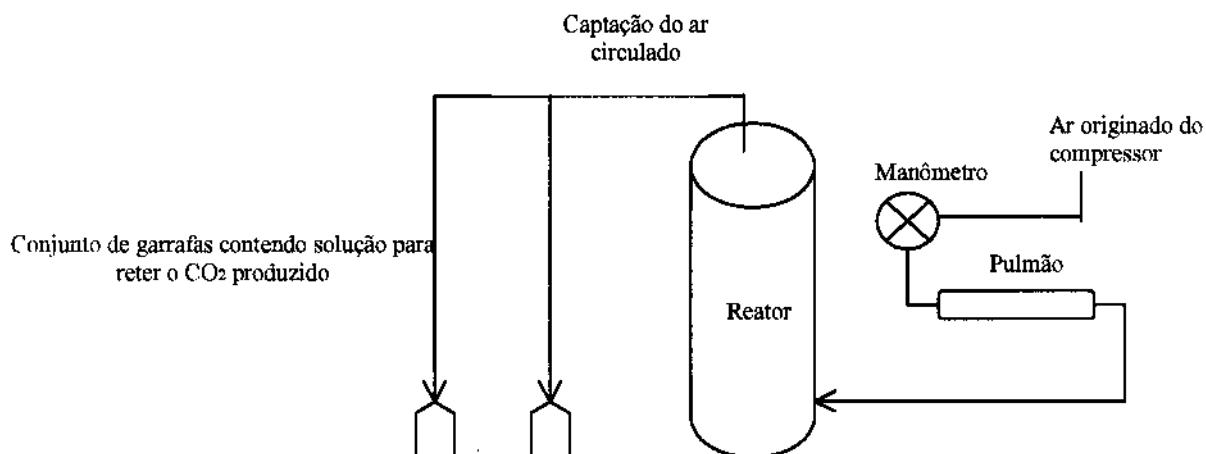


Figura 4.17 – Esquema do sistema de tratamento aeróbio desenvolvido em laboratório.

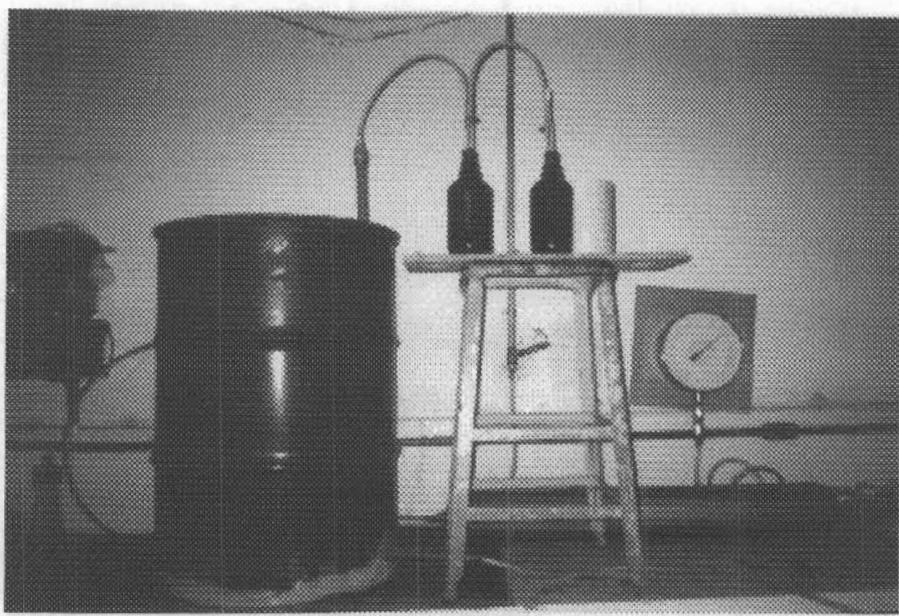


Figura 4.18 - Vista do Sistema Aeróbio desenvolvido

4.4.2 – Metodologia adotada no estudo

O ar proveniente do compressor passava por um manômetro e seguia para a base do reator via mangueiras. No ponto de entrada, a mangueira era conectada a um tubo de PVC perfurado, responsável pela distribuição do ar na massa de lixo. Essa tubulação foi recoberta por um colchão de brita, visando uma maior proteção e uma melhor distribuição do ar.

O ar circulado tinha como ponto de saída uma perfuração localizada na tampa do reator. Desse ponto o ar era captado e conduzido através de mangueiras a um conjunto de garrafas contendo uma solução de NaOH para reter o CO₂ eventualmente produzido durante o processo de decomposição aeróbia da matéria orgânica. A seguir encontra-se uma sequencia de ilustrações mostrando o desenvolvimento do estudo.

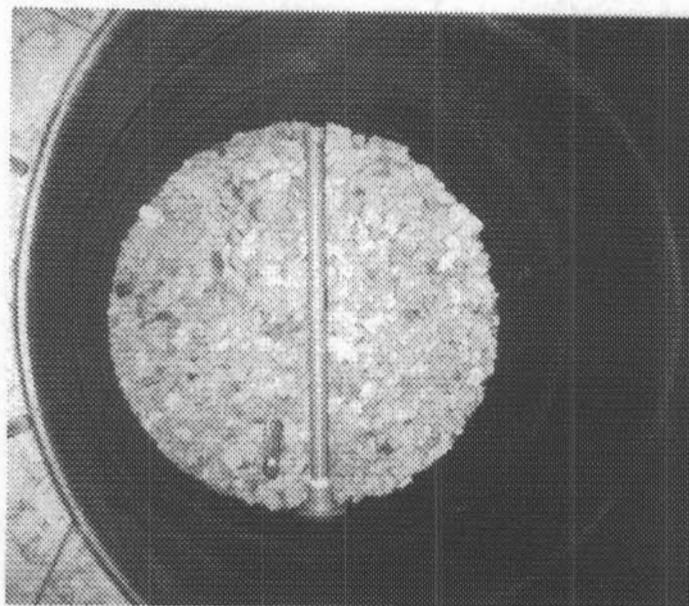


Figura 4.19 – Sistema de distribuição de ar no interior do reator.

Após o fechamento do sistema, o ar passou a ser injetado ininterruptamente durante doze dias a uma taxa média variando de 600 a 800 kPa. A cada três dias o sistema era aberto para retiradas de amostras, medidas de recalques e temperaturas. Passados os doze dias previstos para o estudo, o reator foi aberto seguindo-se com a retirada total do resíduo remanescente para a inspeção da brita que servia de drenagem do ar e proteção para a tubulação perfurada de PVC.

Pensando-se em representar ao máximo a realidade encontrada nos aterros sanitários de resíduos sólidos, preocupou-se em preencher o reator com um material o mais representativo possível. Basicamente, o mesmo foi composto por 60% de matéria orgânica e porcentagens variáveis de plástico, latas, papel e papelão. Na figura 4.20 pode-se observar um aspecto da massa de lixo utilizada no estudo.



Figura 4.20 – Características do lixo no interior do reator

Finalizado o experimento, embora tenha-se percebido alguns pontos negativos a respeito da injeção forçada de ar em resíduos sólidos, confirmou-se a eficiência do sistema de tratamento aeróbio. Os dados referentes ao estudo em laboratório, bem como àqueles obtidos nas células de campo, encontram-se no capítulo referente à análise dos resultados.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 – INTRODUÇÃO

Os resultados obtidos durante a pesquisa serão apresentados e discutidos no decorrer deste capítulo. Inicialmente, será feita uma explanação quanto aos dados adquiridos junto ao sistema de monitoramento das células (recalques, temperaturas e SPT), em seguida serão avaliados os dados referentes às características fisico-químicas do chorume coletado. Vale lembrar mais uma vez que não se tem a pretensão de analisar os processos biológicos ocorridos na massa de resíduos ou no percolado produzido nas células. Também serão apresentados e analisados os dados referentes ao estudo realizado em laboratório (estudo experimental do tratamento aeróbio).

Visando um maior entendimento em relação ao comportamento das células, primeiramente será dado um enfoque individual à Célula I (padrão) e em seguida, as análises serão feitas comparando-se os dados das demais células com a primeira e entre si.

Finalmente deve-se ressaltar que o período, relativamente curto, dispensado para a apresentação desse trabalho, impediu uma maior disponibilidade de dados que possibilitassem uma análise mais completa sobre o tema abordado. Porém, ele é apenas o início de uma série de novos trabalhos que ainda estão por vir e que certamente permitirão uma avaliação mais ampla dos dados, confirmando o objetivo dessa pesquisa.

5.2 – ANÁLISE DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DAS CÉLULAS

5.2.1 – Análise dos Recalques

• Célula I

Observando-se os dados obtidos para os recalques absolutos da Célula I verifica-se que há uma proporção entre os valores lidos na placa 1 e na placa 2. O movimento vertical ocorrido na placa apoiada no meio da massa de lixo (P2) foi praticamente metade daquele ocorrido com a placa fixada na base da célula (P1).

Em termos de recalques relativos, como não poderia deixar de ser, o comportamento entre as duas placas praticamente foi o mesmo. Baseado nesse fato, decidiu-se pela colocação de apenas uma placa nas demais células, ficando o monitoramento a cargo apenas da Placa 1 (fixada na base). As Figuras 5.1 e 5.2 mostram, respectivamente, o comportamento dos recalques absolutos e relativos observado entre as duas placas da Célula I.

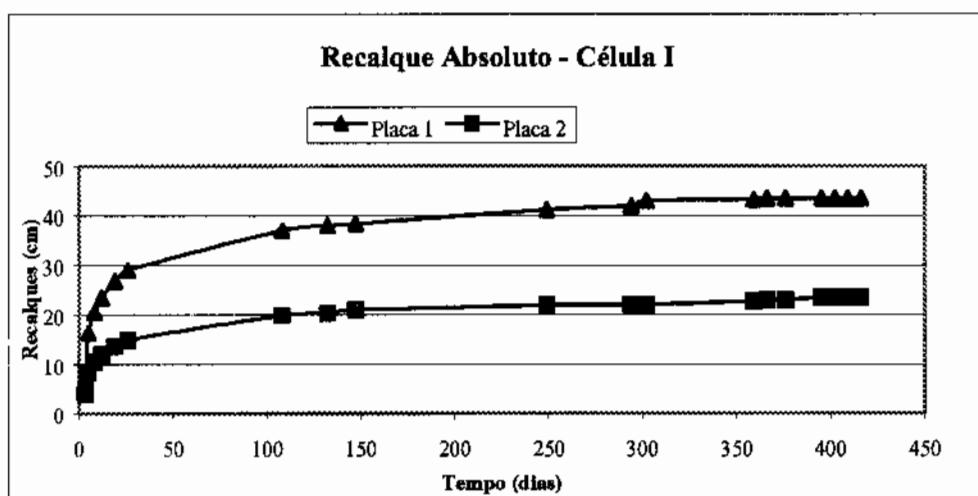


Figura 5.1 – Recalque absoluto para as placas 1 e 2, na Célula I

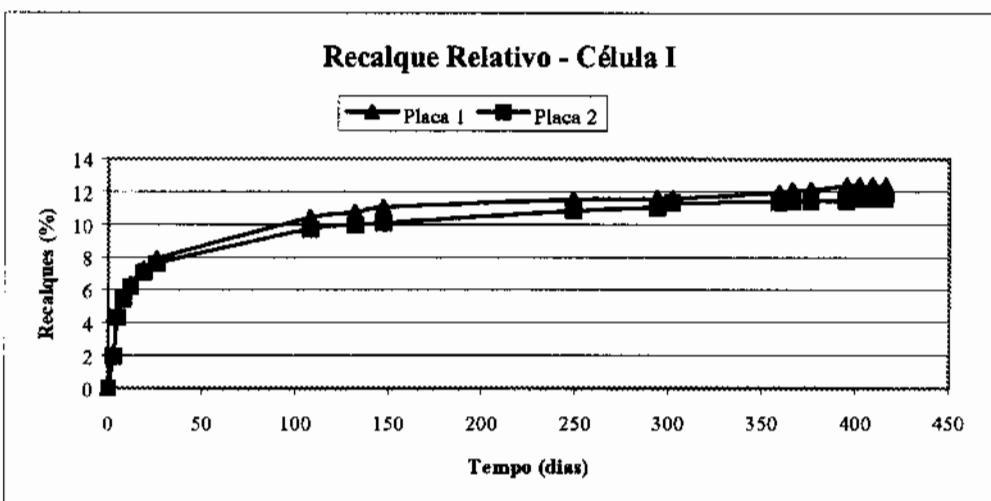


Figura 5.2 - Recalque relativo Célula I (Placas 1 e 2)

Analizando-se os recalques absolutos, percebe-se que nos primeiros 25 dias após o fechamento da célula, houve um acomodamento da massa de resíduos, resultando num deslocamento vertical de aproximadamente 29 cm, o que corresponde a mais de 1 cm por dia. Nos quatro meses seguintes os recalques continuaram acontecendo numa proporção elevada, porém num período de tempo mais longo, numa média de 2,5 cm ao mês, totalizando 10 cm de recalque. Após esse período, percebe-se uma maior uniformidade na curva de recalque, podendo-se dizer que já há uma tendência à estabilização.

A maior parcela recalcada pode ser atribuída à continuação dos recalques iniciais, causados pelo acomodamento da massa de lixo. Quanto àqueles recalques ocorridos em períodos mais extensos, pode-se atribuir esse comportamento ao processo de degradação da matéria orgânica, uma vez que os recalques iniciais já haviam cessado. O fato do fechamento da célula ter se dado num período de alta pluviosidade, pode ter influenciado nos valores dos recalques alcançados, considerando-se que o processo de degradação do material foi acelerado pela contribuição extra de água na massa de resíduos.

Completado um ano desde o fechamento da célula, os recalques começaram a estagnar, permanecendo em torno de 44 cm. O que corresponde a quase 12% da altura total da C_I, salientando que mais da metade dos recalques ocorreram nas primeiras semanas (aproximadamente 8%) o que evidencia a intensidade com que os recalques iniciais ocorreram no exemplo da célula pesquisada.

Faz-se aqui uma ressalva quanto aos tratamentos dos dados de recalques das Células II, III e IV que virão a seguir. Tendo em vista um atraso na colocação das placas de recalques nessas células, parte das leituras correspondentes aos recalques iniciais foi perdida. Achou-se por bem corrigir o problema tomando-se como base o comportamento assumido na primeira célula, baseado na semelhança entre as dimensões, material de preenchimento e grau de compactação utilizado no projeto de todas as células. Adotou-se como fator de correção o comportamento da curva de recalques relativos da Célula I.

• Células II e III

Tendo em vista a semelhança entre os dados coletados nas células C_{II} e C_{III} e optou-se por analisá-las em conjunto. Até o momento, os recalques ocorridos em ambas as células comportaram-se de maneira semelhante, haja visto o comportamento das curvas de recalques mostradas na figura 5.3 onde se percebe uma sobreposição entre as duas curvas, principalmente, após ocorridos os recalques iniciais. Tal semelhança muito provavelmente está associada ao fato das células possuírem mesmo tipo de resíduos, mesmas dimensões, mesma metodologias construtiva e mesma idade.

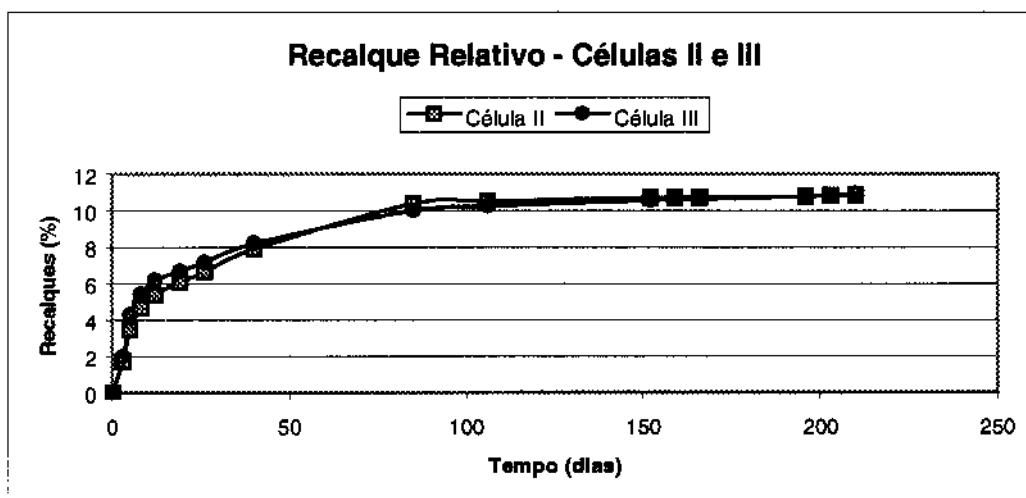


Figura 5.3 – Recalque relativo das Células II e III

Não se deve esquecer que os tratamentos adicionais para a aceleração da decomposição orgânica ainda não foram iniciados. Imagina-se que, implantados os respectivos tratamentos

(recirculação de chorume bruto e injeção de água), a tendência será cada uma das células adquirir sua individualidade. Em se tratando dos recalques absolutos, o valor total alcançado para as Células II e III, até o momento, foi respectivamente de 41,30 cm e 42,50 cm, como observado a seguir.

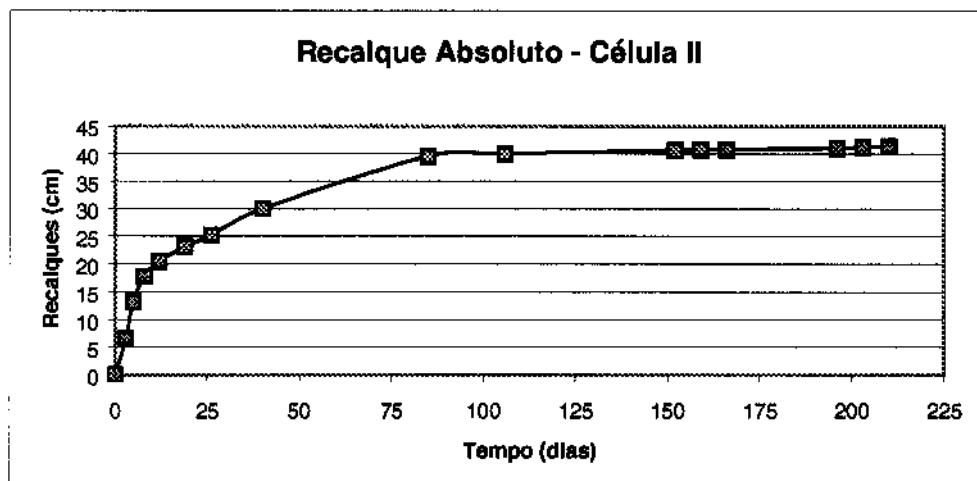


Figura 5.4 - Recalque Absoluto da Célula II

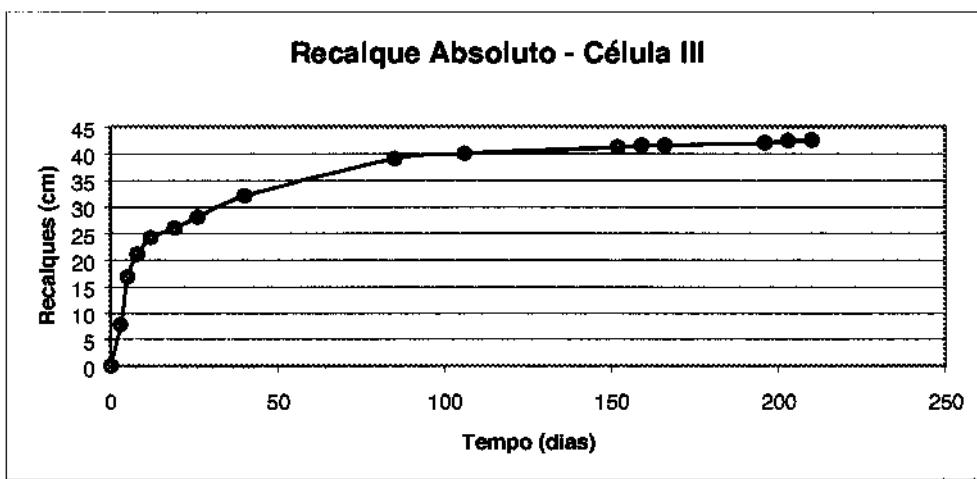


Figura 5.5 - Recalque Absoluto da Célula III

- **Célula IV**

O recalque atual da C_{IV} encontra-se em torno de 50,7 cm, correspondendo a aproximadamente 14% da altura inicial da célula, como apresentado nas figura 5.6.

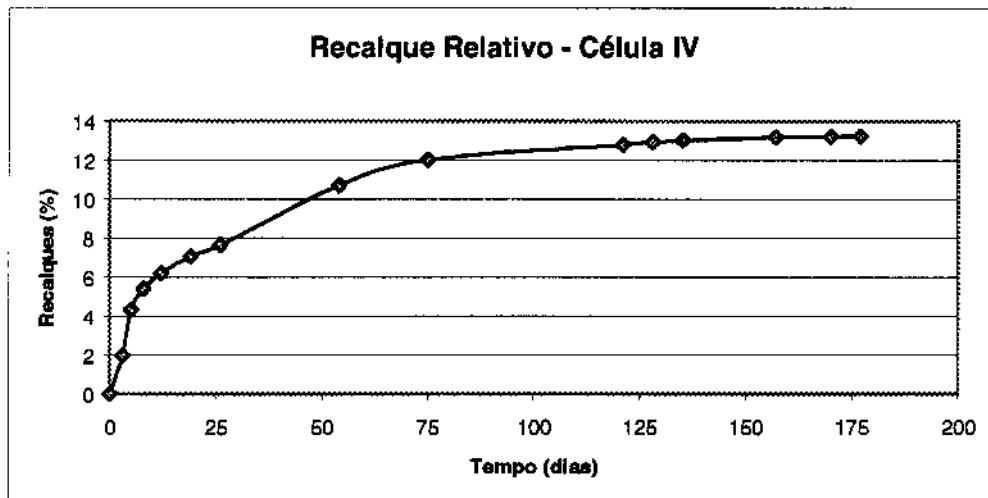


Figura 5.6 – Recalque Absoluto da Célula IV

O comportamento demonstrado até o momento pela curva de recalque pode ser atribuído à ausência de cobertura na célula. Como a massa de resíduos não contou com o acréscimo de compactação dispensado para adicionar a camada de argila compactada utilizada como cobertura nas demais células, pode-se concluir que o material da C_{IV} apresentava-se com um maior índice de vazios, acarretando em valores de recalques mais elevados.

- **Comparação entre as Células I, II, III e IV**

Ao se comparar primeiramente o comportamento relativo dos recalques ocorridos em C_I, C_{II} e C_{III}, num mesmo período de tempo, verifica-se uma grande semelhança entre eles. Pode-se dizer que muito provavelmente as curvas de C_{II} e C_{III} assumirão o mesmo comportamento final da primeira célula.

Analizando-se as curvas de recalque de todas as células percebe-se um deslocamento da curva representante da Célula IV em relação às demais. Sabendo-se que as três primeiras

células se diferenciam da C_{IV} apenas em relação ao tipo alternativo de tratamento adotado, pode-se concluir que esse foi o principal fator responsável por essa diferença.. Na figura abaixo, percebe-se com maior precisão o que se acabou de comentar.

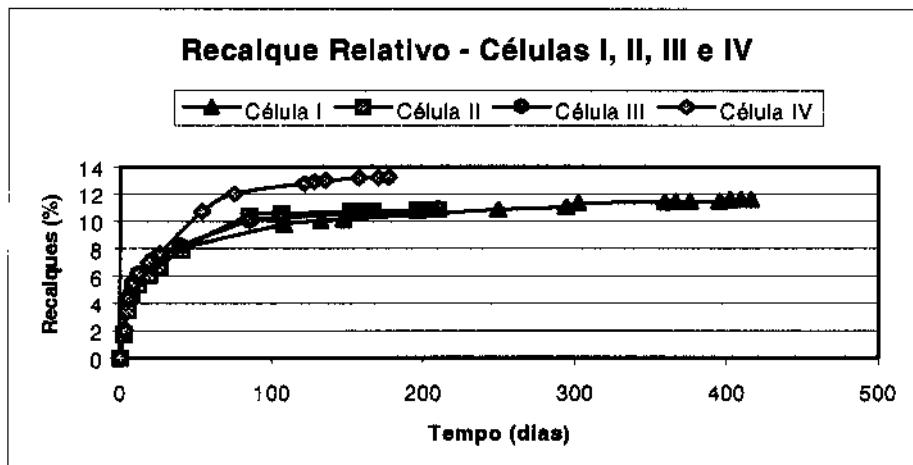


Figura 5.7 – Comparação entre as curvas de recalque das Células I, II, III e IV.

Fechando-se as análises sobre os recalques das células, pode-se dizer que a Célula IV foi a que mais recalcou desde o seu fechamento, acompanhada, igualmente, das Células II e III seguido da Célula I. O comportamento assumido na célula com ausência de cobertura confirma a eficiência do sistema alternativo de aceleração da degradação do lixo adotado.

5.2.2 – Análise dos Ensaios de SPT

A título de informação, vale lembrar que o N₀ aqui considerado, diz respeito ao comportamento dos 30 cm penetrados inicialmente, enquanto o N_f corresponde aos 30 cm finais de penetração do amostrador. Outro ponto a ser ressaltado diz respeito às profundidades inicial e final dos ensaios. No primeiro caso, escavou-se uma média de 0,5 m a partir do nível superior das células, quanto à cota de encerramento das perfurações, a mesma variou em torno 2 e 3 m.

Deve-se esclarecer que apenas os valores obtidos para os ensaios de SPT não poderão servir como fonte conclusiva na análise da resistência adquirida na massa de lixo das células, porém,

na pesquisa em questão, esses dados servirão para uma comparação superficial entre o comportamento da massa de lixo de cada uma das células.

• Célula I

Na célula I, já foram realizados dois ensaios SPT, num intervalo de tempo de aproximadamente 10 meses entre a execução dos dois ensaios. Sendo o primeiro datado de abril de 2000, praticamente um mês após o fechamento da Célula I e o segundo de fevereiro de 2001, estando a célula, próximo de completar um ano.

No primeiro ensaio realizado houve uma grande diferença entre os dados obtidos nos dois furos. O grau de penetração para o Furo 01 atingiu valores próximos de 40 golpes, enquanto para o Furo 02, na mesma profundidade (2 m) o valor atingido não chegou aos cinco golpes. Esse comportamento provavelmente se deu em função da presença de alguma camada mais resistente quando da perfuração do furo 1, fato muito comum devido à heterogeneidade do lixo, (Figuras 5.8 e 5.9).

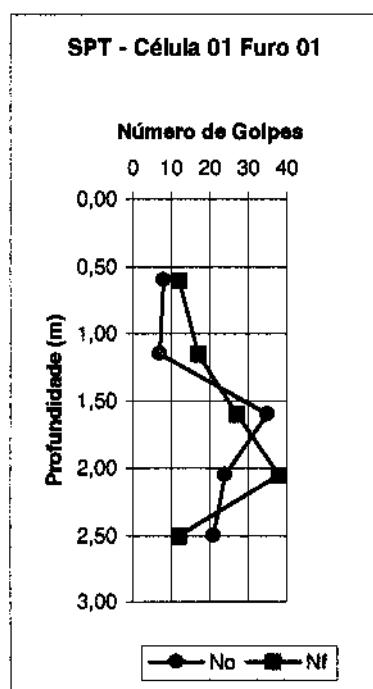


Figura 5.8 – Ensaio SPT na Célula I (Furo 01 – primeiro ensaio).

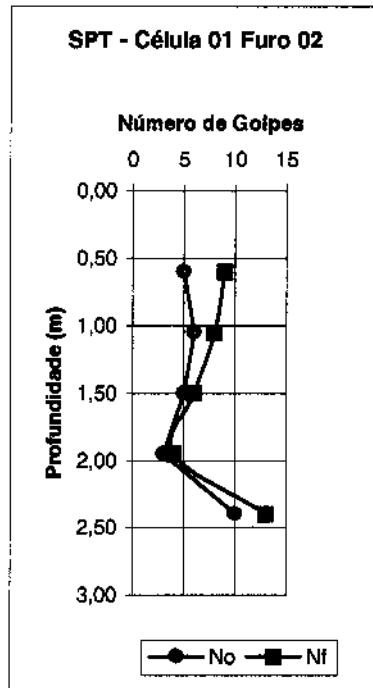


Figura 5.9 – Ensaio SPT na Célula I (Furo 02 – primeiro ensaio)

Uma comparação entre as curvas para os dois ensaios, pode ser visualizada na figura 5.10, na qual observa-se a grande variação nos valores obtidos durante o avanço do amostrador nas perfurações dos furos 1 e 2.

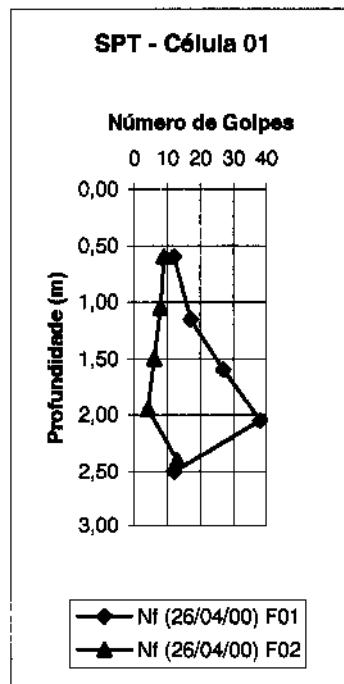


Figura 5.10 – Comparaçāo entre os dois furos realizados na Célula I (primeiro ensaio).

O comportamento do segundo ensaio, bem como uma comparação entre as duas baterias de ensaios realizados na Célula I, pode ser visto na figura 5.11 e 5.12 respectivamente.

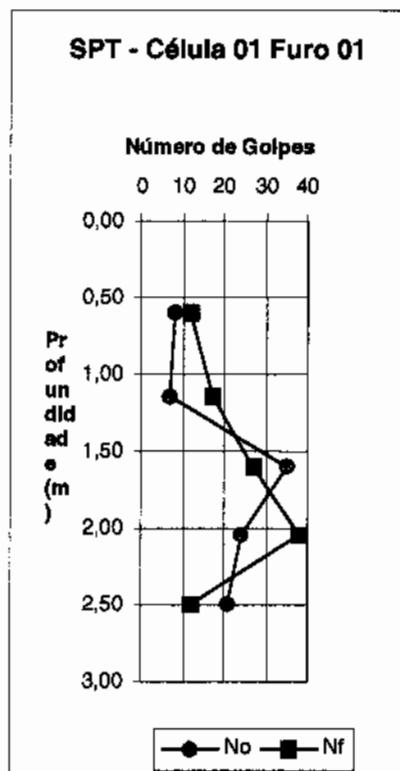


Figura 5.11 – Segundo ensaio de SPT realizado na Célula I

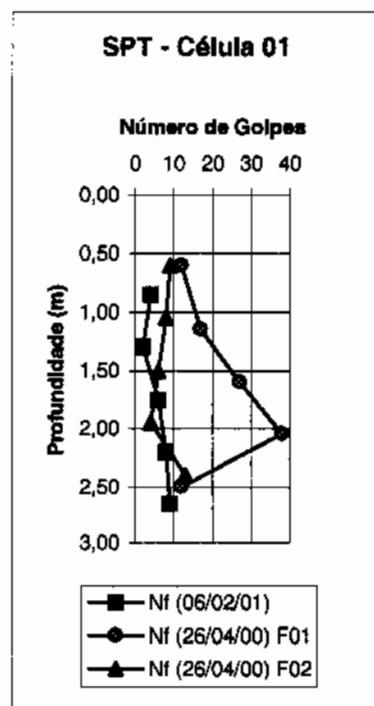


Figura 5.12 – Comparação entre os dois ensaios de SPT realizados na Célula I

Analizando-se as curvas obtidas durante o primeiro ensaio (furo 02) e a curva do último ensaio, percebe-se que não houve maiores mudanças passados os dez meses, porém, comparando-se com a curva do furo 01 (primeiro ensaio) mais uma vez comprova-se que heterogeneidade do material é um fator bastante relevante quando se estuda a resistência do lixo.

• Célula II

O comportamento observado para a Célula II, praticamente foi oposto ao da Célula I. Os primeiros 80 cm foram penetrados variando entre 9 e 2,5 golpes enquanto que os últimos os 60 cm finais foram atingidos com um valor constante de 2,5 golpes. Como já levantado anteriormente, esse comportamento pode estar ligado à variação na composição do lixo.

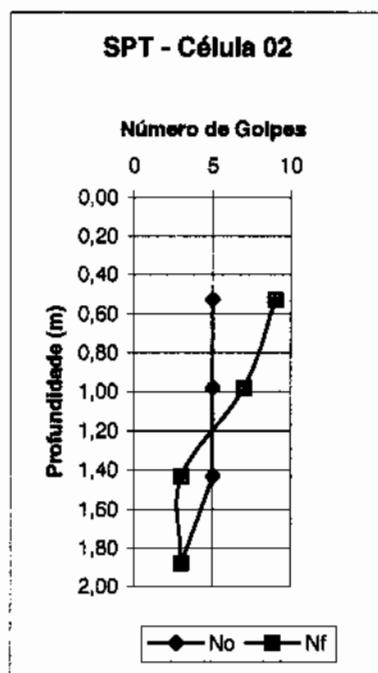


Figura 5.13 – Dados do SPT realizado na Célula II

• Célula III

Os valores de penetração obtidos para a Célula III situaram-se em torno de 4 a 8 golpes para o metro inicial seguido de 6 a 8 golpes até o final do ensaio (1,25 m), ou seja, não houveram

mudanças muito significativas durante todo o perfil atravessado. Esse comportamento evidencia uma maior homogeneidade no material aterrado na Célula.

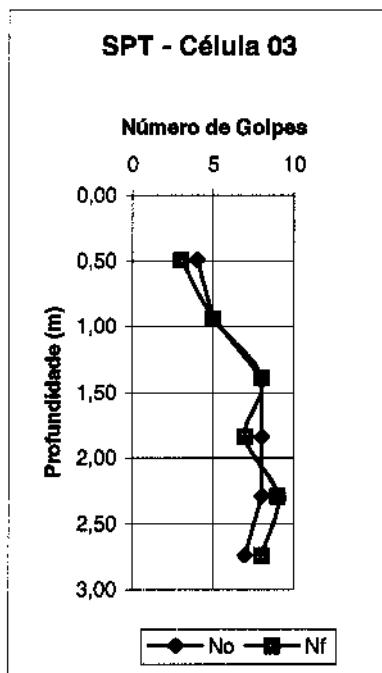


Figura 5.14 – Dados do SPT realizado na Célula III

• Célula IV

Curiosamente os valores encontrados nas penetrações executadas na Célula IV, encontraram-se abaixo da média obtida nas demais células. A média total do ensaio ficou em torno de 2,5 golpes o que pode ser explicado tomando-se como base a ausência da camada final de argila compactada, uma vez que, na falta da cobertura o acréscimo extra de compactação que seria transferido para o lixo deixou de existir. Somado a isso, pode-se também acrescentar o efeito da percolação direta da água na massa de resíduos, principalmente sabendo-se que essa célula foi preenchida no início do período de chuvas da região. Pode-se observar esse comportamento analisando-se a figura 5.16.

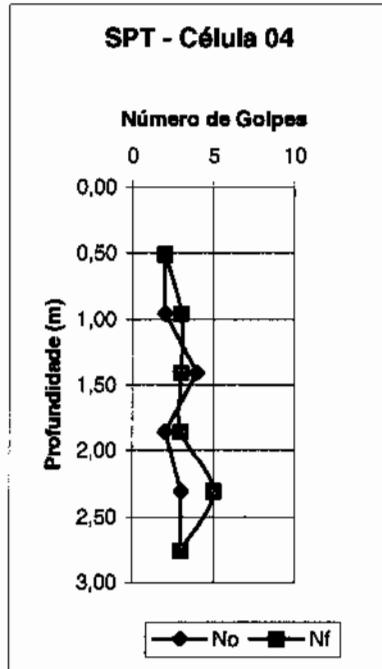


Figura 5.15 – Dados do SPT realizado na Célula IV

Análise Geral da Resistência das Células

Fazendo-se uma análise geral a respeito da resistência obtida nos ensaios de penetração nas quatro células, percebe-se que a Célula IV, como já comentado, foi a que assumiu uma resistência mais baixa, seguida da Célula II que também obteve valores baixos, da Célula III, a e da Célula I. Como se pode observar na figura 10.17, a primeira célula assumiu os valores mais resistentes quando das suas perfurações, embora, perceba-se uma diminuição de resistência nos dez meses corridos entre o primeiro e o segundo ensaio dessa célula .

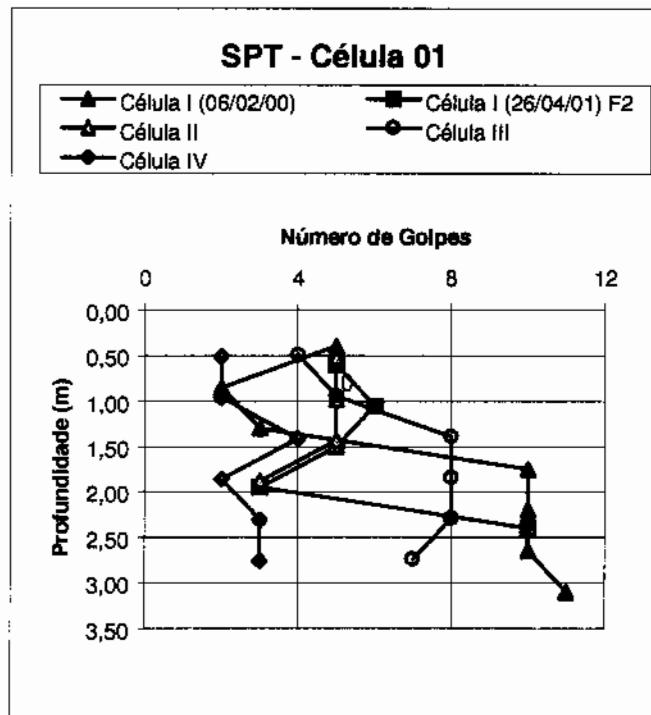


Figura 5.16 – Comparação entre os dados de SPT das quatro células

5.2.2 – Análise Físico-Química do Chorume

Até o fechamento desse trabalho não foi possível a realização de ensaios fisico-químicos nas Células II e III tendo em vista a baixa e até mesmo inexistente produção de chorume nas mesmas. Na Célula IV consegui-se duas coletas, ininterrupta, nos dias 11 e 18 de maio o que possibilitou um conhecimento prévio do nível de contaminação do chorume produzido nessa célula.

Um melhor acompanhamento vem sendo realizado na Célula I onde a produção constante de chorume, nos meses de chuva, possibilitou uma análise mais detalhada dos processos fisico-químicos nela ocorridos.

Demandânia Química de Oxigênio

Pode-se dizer que a Demanda Química de Oxigênio (DQO) é um dos principais parâmetros a ser analisado quando se deseja conhecer o grau de contaminação do chorume, uma vez que

essa substância indica a carga de matéria orgânica transportada e a quantidade de oxigênio necessário para sua estabilização.

• Célula I

A capacidade de campo da Célula I foi atingida 2 meses após o seu fechamento, datado de março de 2000. Uma maior produção de chorume é claramente observada no período de chuva, que no Distrito Federal ocorre entre dezembro e abril.

A concentração de DQO, inicialmente encontrava-se em torno de 30000 mg/l, com o passar do tempo esse valor chegou a 60000 mg/l (dados atuais). Esse crescimento pode ser atribuído ao fato que, após atingida a capacidade de campo na célula, o percolado na massa de lixo ainda se encontrava pouco concentrado, haja vista a coloração e o odor nas primeiras coletas terem sido bem mais clara do que nas atuais. Com o passar dos meses e com o aumento da atividade microbiana, consequentemente houve uma maior distribuição de nutrientes acelerando o processo de degradação da matéria orgânica.

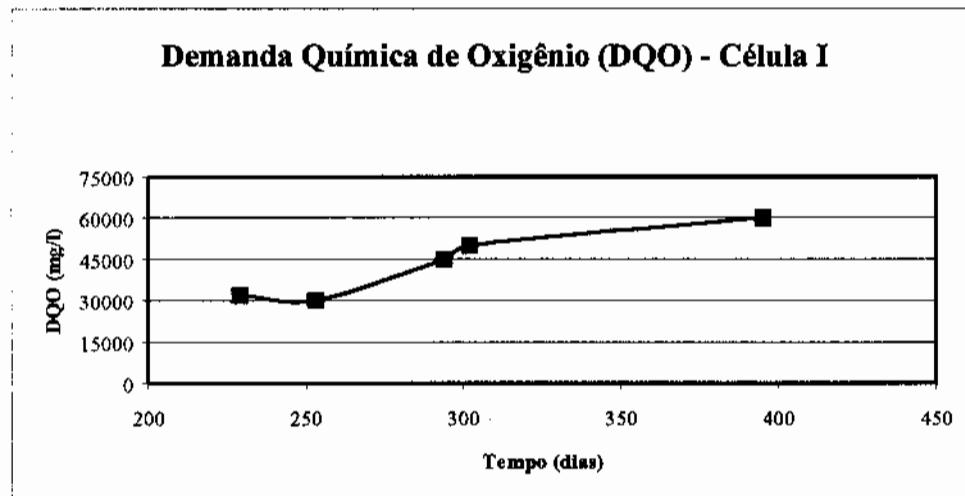


Figura 5.17 – Demanda Química de Oxigênio (DQO) na Célula I

O salto observado na curva de DQO, entre o oitavo e décimo mês de existência da célula, pode ser atribuído às reações ocorridas nesse período devido ao aumento dos processos de decomposição anaeróbia, onde parte da matéria orgânica é atacada por bactérias acetogênicas e fermentativas. Em seguida percebe-se um aumento menos significativo talvez influenciado

pelo acréscimo extra de água na célula devido ao início do período de chuva (segundo período de chuva enfrentado pela célula).

Quanto à Célula IV, devido à ausência da camada de cobertura, a sua capacidade de campo foi atingida praticamente em um mês, porém sem haver uma continuidade nessa produção, haja visto as coletas só terem sido possíveis agora no mês de maio. Os dados obtidos até agora, seis meses após seu fechamento, situam a Demanda Química de Oxigênio em torno dos 38000mg/l. Comparando-se esse valor, com os primeiros valores alcançados para a Célula I, percebe-se que a DQO da C_{IV} está um pouco acima do encontrado para a primeira célula. Esse comportamento pode estar associado ao fato da maior percolação ocorrida na Célula IV e a uma maior atividade dos microrganismos, como era esperado.

Nitrogênio Ammoniacal e Nitrato

Na presença de oxigênio, o nitrogênio amoniacal (NH_4^+ ou NH_3) pode sofrer processos de oxidação, formando nitritos que em seguida se transformam em nitrato (NO_3^-). Por outro lado, prevalecendo as condições anaeróbias, a tendência é haver uma redução do nitrato em nitrito que com o passar do tempo, mantendo-se o ambiente anaeróbio, se transforma em gás nitrogênio (N_2). Na verdade, o aumento nos teores de nitrato está associado a uma redução nos níveis de nitrogênio amoniacal, consequentemente, uma queda na concentração de nitrato quase sempre indica a presença de condições anaeróbias.

Nos dados obtidos nos ensaios observa-se uma breve relação entre essas duas substâncias indicando para uma queda na produção do amônio um eventual aumento na produção de nitrato. A curva característica da produção do nitrato indica que na maior parte do tempo essa substância permaneceu em declínio, enquanto que o nitrogênio amoniacal apresentou um aumento seguido por um declínio e um novo aumento.

A queda observada na concentração de nitrogênio amoniacal pode ter sido causada pela taxa extra de oxigênio, inserido na célula quando do segundo período de maior pluviosidade na região. Em relação à Célula IV, as concentrações atuais de nitrato e nitrogênio amoniacal são respectivamente 1200 mg/l e 1230 mg/l.

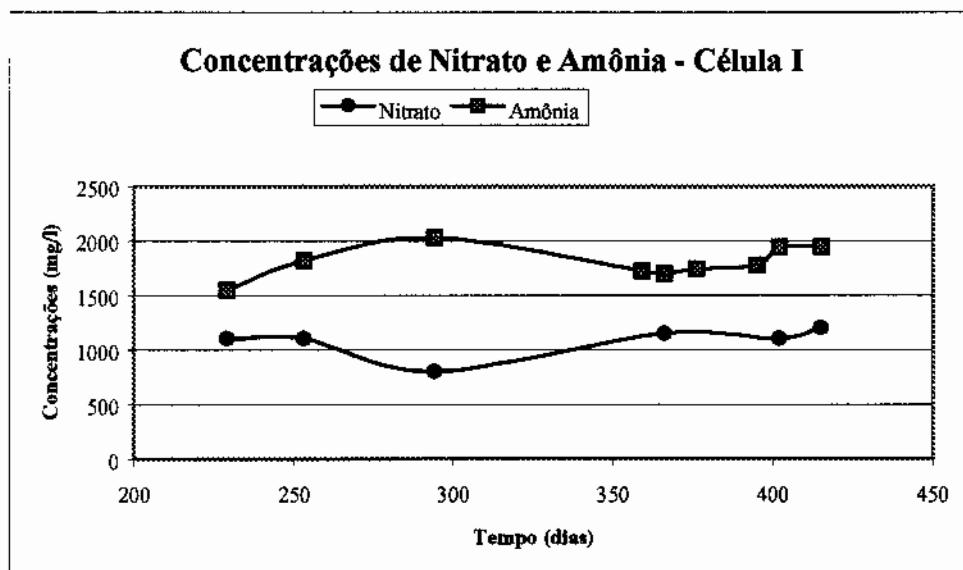


Figura 10.18 – Concentração de Nitrato e Nitrogênio Amoniacial na Célula I

Cloreto

Uma análise superficial da curva encontrada para o Cloreto produzido na Célula I, indica uma certa oscilação na sua concentração. De início percebe-se um aumento na concentração da substância, atingindo valores em torno de 2000 mg/l. Em seguida houve uma queda e novo aumento voltando ao valor anterior permanecendo nesse patamar por um certo período, após um tempo há uma nova queda e mais um aumento dessa vez para valores abaixo do anterior (torno de 1500 mg/l). Talvez esse comportamento tenha ligação com o fato do cloreto ser um íon de grande mobilidade.

A média dos valores de Cloreto encontrados no chorume produzido na Célula IV (3500 mg/l) encontra-se bem acima da concentração obtida na célula padrão (1000 mg/l), para um mesmo período de existência. Na figura 15.20 encontra-se o comportamento apresentado para o Cloreto na Célula I.

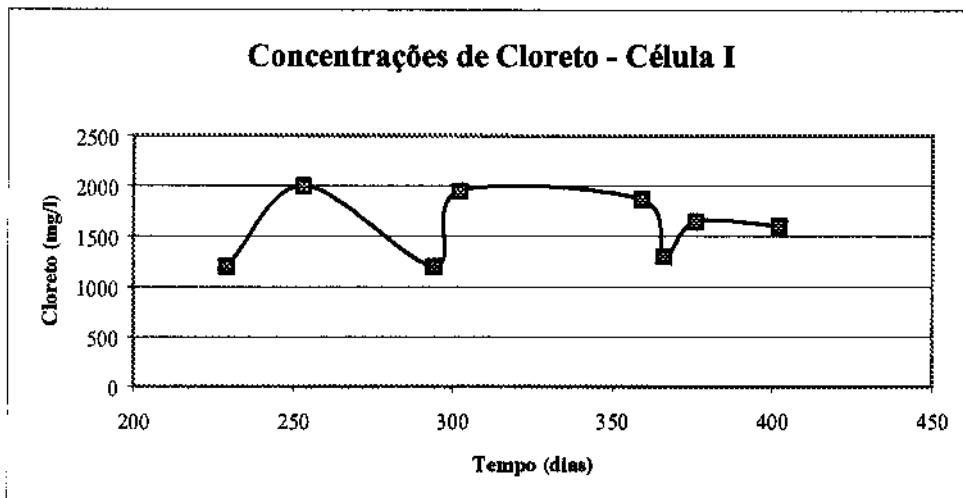


Figura 15.19 – Concentração do Cloreto na Célula I

Comparação da Qualidade do chorume das Células I e IV com os padrões de potabilidade da água

Fazendo-se um paralelo entre a qualidade atual do chorume nas Células I e IV e os valores determinados para os padrões de potabilidade da água de acordo com a NB P-PB-19, da Associação Brasileira de Normas Técnicas, pode-se dizer que o teor de poluição do chorume produzido nas células está muito acima do aceitável. Na tabela abaixo, pode-se verificar o comentado anteriormente.

Tabela 5.1 – Comparação entre os padrões de potabilidade da água e a qualidade atual do chorume produzido nas Células I e IV.

Análises	Limites Máximos Tolerados	Célula I	Célula IV
Cloreto (Cl)	250 mg/l	1500 mg/l	3500 mg/l
Nitrato (NO ₃)	45 mg/l	1400 mg/l	1230 mg/l
Amônia	-	2000 mg/l	1200 mg/l
DQO	-	60000 mg/l	38000 mg/l

5.2.3 – Temperaturas

- **Célula I**

Até o momento os dados de temperatura coletados na Célula I indicam um decréscimo em função do tempo. Inicialmente os valores situavam-se em torno dos 40°C, passados quase um ano do seu fechamento, a temperatura média ficou em torno de 28,8°C.

- **Célula II**

A temperatura no interior da massa de lixo na Célula II, mantém-se constante desde o seu fechamento, com valores próximos dos 30°C.

- **Célula III**

Como ocorrido na Célula II, a temperatura alcançada na Célula III não sofreu maiores variações estando em torno dos 28°C.

- **Célula IV**

A temperatura atingida até agora na Célula IV fica em torno dos 47°C, valor acima do encontrado para todas as outras três células. Essa diferença pode estar associada à introdução extra de oxigênio na célula devido ao tipo de tratamento dispensado, uma vez que na presença do O₂ as reações ocorrem a temperaturas mais altas.

5.3 – ANÁLISE DO SISTEMA AERÓBIO DESENVOLVIDO NO LABORATÓRIO

Tendo em vista que a abertura do tambor se dava a cada três dias, obteve-se um total, durante o período de injeção de ar, de quatro coletadas de dados. Embora esse tenha sido um acompanhamento rápido, pode-se dizer que foi o suficiente para perceber alguns detalhes inerentes do comportamento de digestão aeróbia dos resíduos sólidos. Os dados coletados nos doze dias de tratamento referentes a recalques, temperaturas, teor de umidade e teor de sólidos voláteis encontram-se detalhados a seguir.

5.3.1 – Recalques

Passados três dias, após, iniciada a injeção forçada de ar percebeu-se um comportamento quanto aos movimentos verticais acima do esperado, com recalques relativos atingindo uma média de 26%. Do sexto dia em diante a velocidade média dos recalques diminuiu, porém permaneceu crescente. Espantosamente, após os doze dias de estudos, os recalques atingiram uma média próxima a 50% da altura total de lixo analisado.

Sabendo-se que houve leve compactação da massa de lixo quando da disposição no reator, (densidade média da massa de resíduo no reator $433,3 \text{ kg/m}^3$), pode-se dizer que parte dos recalques obtidos estão associados a acomodação do material, porém não se pode atribuir que todo o movimento se deu em função disso. É indiscutível afirmar que parte dos recalques foram ocasionados devido à rápida degradação do material consequente da decomposição aeróbia.

A seguir, apresentam-se as curvas de recalques obtidos destacando-se primeiramente a semelhança entre os recalques relativos ocorridos no centro e nas bordas do reator e em seguida a média obtida para esses valores, seguido da curva de recalques absolutos no reator. (Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 respectivamente).

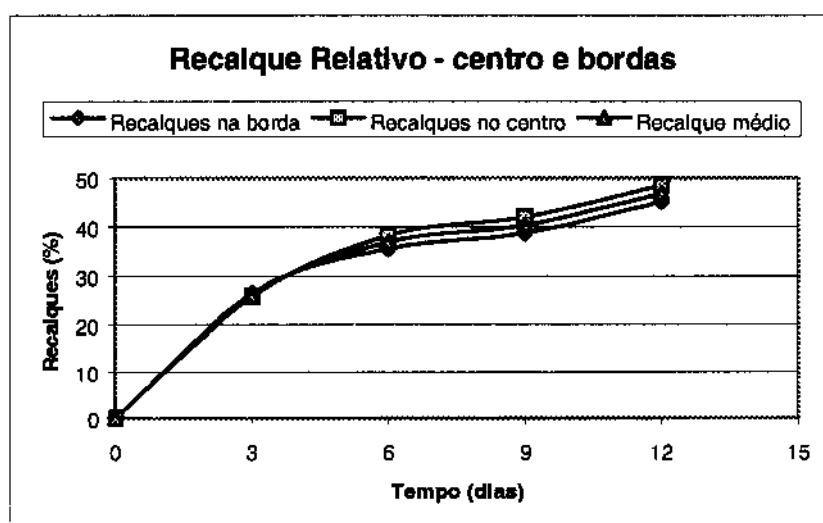


Figura 5.21 – Recalque relativo no centro e nas bordas do reator

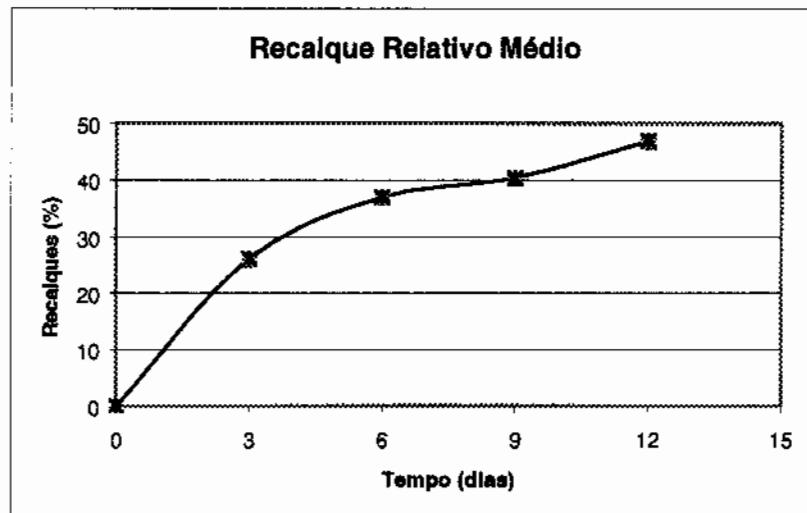


Figura 5.22 – Recalque relativo médio

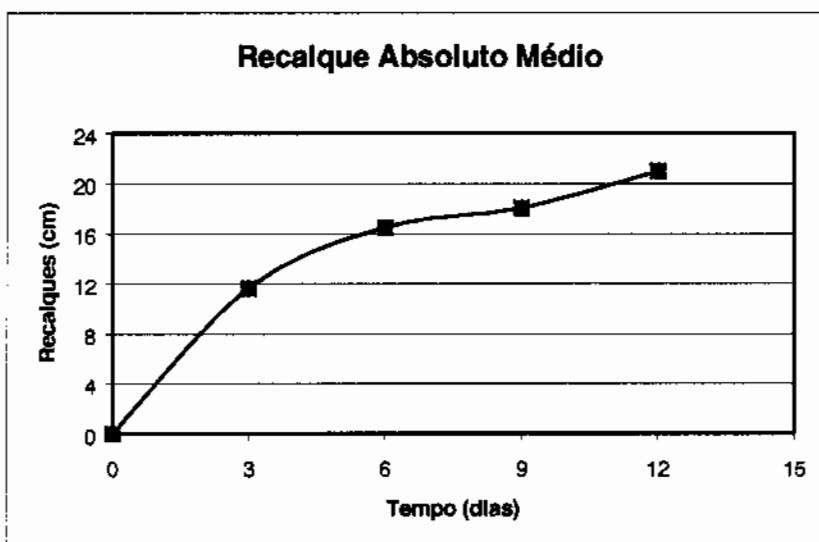


Figura 5.23 – Recalque absoluto

5.3.2 – Teor de Sólidos Totais e Sólidos Voláteis

Teor de Sólidos Totais

O comportamento do teor de sólidos totais das amostras coletadas da massa de resíduos nos doze dias de estudo condiz com o observado durante as aberturas do reator, ou seja era visível

o decréscimo da massa de lixo devido a sua degradação acelerada. No gráfico abaixo pode-se verificar o comentado até aqui.

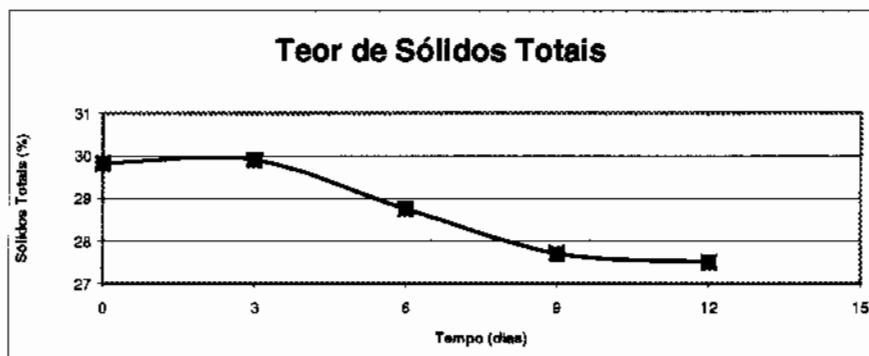


Figura 5.24 – Teor de Sólidos Totais

Pode-se dizer que continuado o experimento, a tendência seria um decréscimo ainda maior da presença dos sólidos totais no reator.

Teor de Sólidos Voláteis

Sabendo-se que o teor de sólidos voláteis indica o grau de decomposição da massa orgânica, conclui-se que as reações ocorridas no interior da massa de lixo provocaram mudanças significantes na matéria orgânica presente. Acompanhando a curva da figura 5.16 percebe-se claramente uma tendência cada vez maior da continuidade das reações aeróbias iniciadas com a injeção de ar no reator.

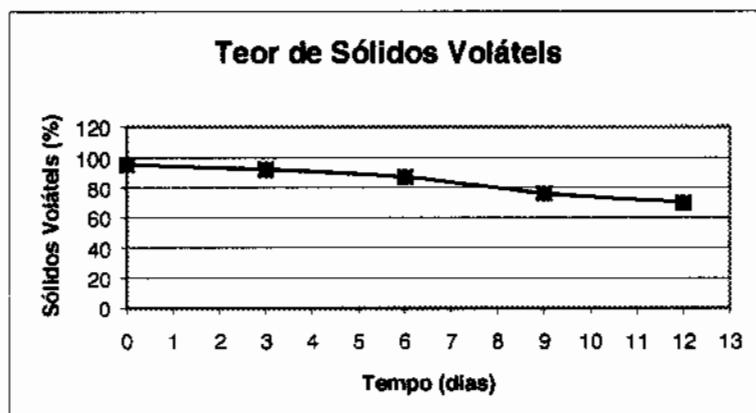


Figura 5.25 – Comportamento do Teor de Sólidos Voláteis no reator

5.3.3 - Abertura do Reator

Aberto o reator, retirou-se a massa de resíduos restante, prosseguindo com a inspeção da camada de brita responsável pela proteção e drenagem do ar injetado. O aspecto apresentado na primeira camada de material era uma massa coesa formada por diversas partículas de brita, como mostrado na figura a seguir, (Figura 5.26).



Figura 5.26 – Aspecto da camada de brita após abertura e retirada do lixo

Atribui-se essa provável colmatação da brita às substâncias geradas durante o processo de decomposição aeróbia do lixo. Tendo em vista o fato ocorrido, não se pode ignorar os possíveis problemas que poderiam acontecer caso o processo de injeção aeróbia tivesse continuado, uma vez que, confirmado a colmatação, o ar não mais encontraria caminhos preferenciais para se expandir no interior da massa de lixo, podendo gerar pressões insuportáveis no reator.

Mais uma vez esclarece-se que a pesquisa paralela desenvolvida não tinha o intuito de se aprofundar quanto aos verdadeiros fenômenos ocorridos quando da injeção de ar no interior do lixo, senão conseguir um embasamento prático a respeito desse tipo de tratamento.

5.3.4 - Verificação do Ar Circulado no Interior do Reator

A pressão de ar verificada durante todo o experimento não foi suficiente para acionar o sistema de coleta programado no estudo. Além disso, durante as aberturas do reator verificava-se uma pressão muito baixa saindo do interior da massa de resíduos. Provavelmente as barreiras encontradas pelo ar durante a sua trajetória fizeram com que o mesmo perdesse energia (pressão) dificultando a sua mobilidade.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

6.1 – CONCLUSÕES

O principal propósito da pesquisa em questão foi procurar uma forma de acelerar a degradação dos resíduos via tratamento da matéria orgânica bem como acompanhar as transformações ocorridas durante as fases de tratamento. Com isso, pode-se dizer que a pesquisa trouxe suas contribuições, dando o primeiro passo para uma série de trabalhos que ainda estão por vir e que certamente ajudarão a sanar algumas questões, que por motivos anteriormente mencionados, ainda não foram possíveis de serem solucionadas.

Dentre os questionamentos levantados no início da pesquisa alguns puderam ser respondidos e outros ficarão como sugestões para futuras pesquisas. Os resultados obtidos conduziram a algumas conclusões sobre o assunto, que encontram-se descritas a seguir:

- Os recalques medidos nas duas placas de recalques fixadas no fundo e no meio da camada de lixo da Célula I, indicaram ser totalmente proporcionais. Concluindo-se que o movimento alcançado na placa apoiada na base da célula é de aproximadamente o dobro daquele obtido para a placa fixada no meio da camada de lixo;
- Comparando-se os recalques ocorridos entre todas as células, percebe-se que aquela sem a camada final de cobertura, como era de se esperar, apresentou recalques superiores às demais, confirmando o sucesso do tratamento.
- Uma análise geral dos ensaios de SPT realizados nas Células II e III, no mesmo período de tempo, mostrou que embora a faixa de valores obtidos nas penetrações tenha sido praticamente a mesma, o comportamento em relação ao avanço da perfuração foi o inverso. Tal fato pode ser atribuído à heterogeneidade da massa de lixo.

- Quanto ao comportamento da Célula IV, o ensaio de SPT demonstrou que a massa de resíduos apresentou-se mais suceptível às penetrações do que nas demais células, provavelmente devido ao tipo de tratamento ao qual essa célula foi submetida.
- As análises de DQO (Demanda Química de Oxigênio) do chorume produzido na Célula I, como já esperado, demonstraram um aumento no teor de contaminação do mesmo. Haja visto os valores crescentes obtidos nos últimos cinco meses de análises.
- Em relação aos demais ensaios fisico-químicos (Amônio, Nitrato e Cloreto) realizados com o chorume da Célula I, os valores obtidos até agora ainda não são suficientes, porém servirão como ponto de partida para futuras conclusões a respeito do assunto.
- Em se tratando do estudo desenvolvido com o reator no laboratório, pôde-se observar a eficiência do tratamento aeróbio de resíduos sólidos, porém, a mobilidade do ar no interior da massa, devido à inevitável presença de camadas barreiras, é bastante dificultada.
- Outro ponto a ser levantado quanto ao tratamento aeróbio diz respeito ao sistema de distribuição do ar no interior da massa de lixo. Devido à colmatação observada no reator, alerta-se para esse fato, sugerindo maiores cuidados e estudos relacionados ao tema.

6.2 – SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Tendo em vista a abrangência da pesquisa aqui iniciada, inúmeros outros trabalhos estão por vir e alguns já se encontram em fase de desenvolvimento. A seguir apresenta-se algumas sugestões para futuras pesquisas que certamente ajudarão a concluir e expandir os horizontes traçados no decorrer do presente trabalho.

- Um maior aprofundamento a respeito dos recalques ocorridos nas células;
- Estudar a real eficiência das camadas de cobertura nas Células I, II, III e IV comparando-se essas células com a Célula IV (sem cobertura);

- Desenvolver um sistema de injeção de ar para a Célula V, tentando-se aprimorar aquele já estudado em laboratório;
- Realizar trabalhos, ao nível de laboratório, na tentativa de estudar o movimento dispersivo do ar no interior da massa de lixo para o tratamento aeróbio;
- Ainda em termos de laboratório, propõe-se estudar a possibilidade de um tratamento aeróbio temporário, alternando-se períodos de injeções e períodos sem injeções na massa de lixo;
- Um aprofundamento a respeito da resistência da massa de lixo com a continuação dos ensaios de SPT e outras formas de avaliação mais precisas para esse tipo de estudo;
- Análise de colmatação do sistema de drenagem das células a partir da retirada de amostras dos drenos;
- Retroanálise numérica dos dados de recalque obtidos em campo, visando uma previsão do comportamento das células a longo prazo; bem como uma avaliação do modelo adotado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT (1997), Aterros de Resíduos não-perigosos – Critérios para Projeto, Implantação e Operação. NBR 13896, Rio de Janeiro, RJ, 12p.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA) (1985) – Standard Methods for Examination of Water and Waste-Water. 13 th. ed. New York, APHA, AWWA, WPCF.

BAGCHI, A. (1994) – Design, Construction, and Monitoring of Sanitary Landfill, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY 361 Fungaroli & Steiner, 1979 p.

BENVENUTTO, C. (1995) – A Concepção e a Construção de Aterros Sanitários. III Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO'95. Ouro Preto/MG, pp. 551-561

BIDONE, F.R.A. & POVINELLI, J. (1999) – Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos. 1^ª Edição, São Carlos/SP. Publicação da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC/USP, 120 p.

BUIVID, J.R. - (1980) – Leachate and Gas Production. Under Controlled Moisture Conditions. In “Land Disposal: Municipal Solid Waste” (D.W.Shultz, ed.), 7th Annu. Res. Symp., pp. 67 – 93. U.S. Environ. Prot. Agency, Cincinnati, Ohio.

CAMPBEL, G. (1974) – A Simple Method for Determining Unsaturated Hydraulic Conductivity from Moisture Retention Data. *Soil Sci.*, 117 (6), 311–314, 1974.

CARVALHO, M.E. (1997) – Coleta e Disposição de Lixo. In: Livro Urbano: Três Estudos sobre Coleta e Tratamento. Rio de Janeiro, BNDS, Cadernos FINSOCIAL, 4, p. 45 – 85.

CONSONI, A.J., PERES, C.S. & CASTRO, A.P. (1995) – Origem e Composição do Lixo. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 1^a. Edição, São Paulo, IPT/ABGE/CEMPRE, Publicação IPT 2163, pp. 21-35.

CONSONI, A.J., BENVENUTO, C., PARZANESE, G.A.C., SILVA, I.C., ALBUQUERQUE, J.L.F., CUNHA, M.A. (1995) - Origem e Composição do Lixo. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 1^a. Edição, São Paulo, IPT/ABGE/CEMPRE, Publicação IPT 2163, pp. 75-124.

CORREA SOBRINHO, N.L.C. & AZEVEDO, R.F. (1999) – Considerações sobre o Funcionamento do Sistema de Cobertura do Balanço Hídrico de Aterros Sanitários, 4º Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental – REGEO'99, São José dos Campos – SP, pp. 441-447.

DANIEL, D.E.; KOERNER, R.M. (1995) – Waste Containment Facilities – Guidance for Construction, Quality Assurance and Quality Control of Liner and Cover Systems, ASCE, New York, USA, 354 p.

EDIL, R.E.; FRANKLIN, A.G.; WARDWELL, J.T. (1990) – Mathematical Model for Solid Waste Settlement. Proc. Conf. Geotech. Pract. Disposal Solid Waste Mater., 1990 pp. 495 – 508.

ESLINGER, E.; OKO, U.; SMITH, J.; HOLLIDAY, G.H. (1994) – Introduction to Environmental Hydrogeology. Society for Sedimentary Geology-SEPM short course n. 32.

ESPINACE. R.; PALMA, J. G.; SZANTO, M. (1997) – Assentamientos en un Vertedero Controlado a Escala com Recirculación de Liquidos Lixiviados, 4 Congresso Chileno de Ingenieria Geotecnica, Valparaiso, Chile, Vol. II, pp. 405 – 419.

FETTER, C.W. (1988) – Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company, U.S. 458 p.

FREEZY, R.A.; CHERRY, J.A. (1979) – Groundwater. Printece Hall, Englewood Cliffs, NJ.

FUNGAROLI, A. & STEINER, R. (1979) -- Investigation of Sanitary Landfill Behavior, volume I. Final Rep. EPA - 600/2 -79 - 053a, Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; SIRINI, P.; TANCREDI, G. (1991) – Geotechnical Behaviour of Sanitary Landfill Based on Laboratory and Situ Tests. XV Conference di Geotecnica de Torino, Italia.

JESSBERGER, H.L.; KOCKEL, R. (1993) – Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Material. Proc. Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium. Sardinia, Italia, pp 1383-1392.

JUNQUEIRA, F.F. (2000) – Análise do Comportamento de Resíduos Sólidos Urbanos e Sistemas Dreno-Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência ao Aterro do Jóquei Clube – DF. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, DF, 289 p.

KOERNER, R.M. (1994) – Desingning with geosynthetics. Prentice-Hall Inc., 3rd Ed., New Jersey, 783 pp.

KAVAZANJIAN, E.; MATASOVIC, N.; BONAPARTE, R.; SCHMERTMENN, G. R. (1994) – Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis. Extended manuscript of a paper submitted for publication at the ASCE Geoenvironment 2000 specialty conference, 22-24 february 1995, New Orleans, Louisiana, pp 1-16.

KÖLSCH, F. (1993) – The Bearing Behaviour of Domestic Waste and Related Consequences for Stability. Proc. Sardinia 93, Fourth Internetional Landfill Synposium. Sardinia, Italia, pp 1393-1410.

LANDVA, A.O.; CLARK, J. I. (1987) – Geotechnical Testing of Wastefill. Report submitted to the London Institute of Civil Engineers.

LIMA, L.M.Q. (1988) – Estudo da Reciclagem de Chorume na Aceleração da Metanogênese em Aterro Sanitário. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos – SP

LIMA, L.M.Q. (1995 a) – Lixo: Tratamento e Biorremediação. Hemus Editora Ltda. São Paulo, 265 p.

LIMA, L.M.Q. (1995 b) – Bio-Remediação de Áreas Degradadas por Resíduos Sólidos. III simpósio de Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO’ 95, Ouro Preto, MG. pp 577-591.

LUZ, F.X.R. (1981) – Aterro Sanitário, Características, Limitações, Tecnologia para a Implantação e a Operação – CETESB, São Paulo, S.P.

MITCHEL, R.A.; MITCHEL, J.K. (1992) – Stability Evaluation of Waste Landfills. Stability and Performance of Slope and Embankments – II ASCE Geotechnical Special Publication No. 31.

MOSHER, F., McBEAN, E., CRUTCHER, A. & MACDONALD, N. (1997) – Leachate Recirculation for Rapid Stabilization of Landfills: Theory and Practice – WQI, november/december.

NAUMOFF, A.; PERES, C.S.; TEIXEIRA, P.B.J.; SILVEIRA, P.B.M.; KIEHL, E.J. (1995) – Origem e Composição do Lixo. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 1^a. Edição, São Paulo, IPT/ABGE/CEMPRE, Publicação IPT 2163, pp. 143-171.

OGATA, A.; BANKS, R.B. (1961) – A Solution of the Differential Equation of Longitudinal Dispersion in Porous Media. US Geological Survey, Professions Paper 411-A

ORTHH, M.H.A.; ROCHA, A.A.; RUOCCHO, Jr.J. (1981) – Lixo e Demais Resíduos Sólidos, CETESB - ABES - ABLP, São Paulo, SP.

PALMA, J. G. (1995) – Comportamento Geotecnico de Vertederos Controlados de Residuos Solidos Urbanos, Tesis Doutoral, Universidad de Canabria, Santander, España.

PENMAN, H. (1963) – Vegetation and Hydrology. Tech. Comment No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England.

POHL, D.H. (1992) – Geomembranas: Aplicações e Considerações sobre Confiabilidade e Controle de Qualidade. 1º. Simpósio Sobre Aplicações de Geossintéticos-Geossintético's 92, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 140-163.

POHLAND, F.G. (1987) – Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production from Landfills, EPA/600/S2-86/073, U.S. EPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH.

PEREIRA, J.F., PASTORE, E.L., SOUZA, N.M., SILVEIRA, R.B. (1997) – Caracterização Geológico-geotécnico da Área de Disposição de Resíduos Sólidos no Aterro do Jóquei Clube no Distrito Federal. Universidade de Brasília-FINATEC-SLU. Brasília-DF

REES, J. F. (1980) – Optimization of Methane Production and Refuse Decomposition in Landfills by Temperature Control, J. Chemical Tech. Biot. Vol 30 pp. 458-465

RITCHIE, J. (1972) – Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover. Water Resour. Res., 8 (5), 1204-1212, 1972.

ROWE, R.K.; BOOKER, J.R.; FRASER, M.J. (1994) – POLLUTE V.6 User's guide. GAEA Environmental Engineering Ltda. London, Ontario.

ROWE, R.K.; BOOKER, J.R. (1987) – Superfund and Groundwater Remediation: Another Perspective, Environ. Sci. Technol., 1987, 25 (9), 370.

SANTOS, L.M.; PRESA, R.S. (1995) – Compressibilidade de Aterros Sanitários Controlados. III simpósio de Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos – REGEO' 95, Ouro Preto, MG. pp 577-591.

SCHALCH, V. (1992) – Análise Comparativa de Dois Aterros Sanitários Semelhantes e Correlações dos Parâmetros do Processo de Digestão Anaeróbia. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 220 p.

SCHOEDER, P.; LLOYD, C.; ZAPPI, P. (1994) – The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model, User's Guide for Version 3.0, U.S. Envir. Protection Agency, Cincinnati, Ohio.

SING, S.; MURPHY, B. (1990) – Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills. Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice, ASTM STP 1070, Arvid Landva, G. David Knowles, editors, ASTM, Philadelphia, pp. 240-258.

SOWERS G.F. (1968) – Foundation Problems in Sanitary Landfills. Journal of the sanitary division, ASCE, vol. 94, No. SA1, pp 103-116.

SOPHOCLEOUS M., STADNYC, N., STOTTS, M. (1996) – Modelling Impact of Small Kansas Landfills on Underlying Aquifers. Journal of Environmental Engineering. Vol. 22 No. 12, pp. 1067 – 1077.

TCHOBANOGLOUS, G., THEISEN, H. & VIGIL, S.A. (1993), Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, Macgraw Hill, Book Co., Inc., New York, 949p.

WALSH, J.J. & KINMAN, R.H. (1979) – Leachate and Gas Production under Controlled Moisture conditions in Municipal Solid Waste Land Disposal, Proc. of 5th Na. Res. Symp. Orlando, USA, EPA 600/9 – 79 – 023a.

WALTER, T. (1992) – Problemas Geotécnicos en la Construcción de Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos en Alemania. Com. III Simposio Nacional Sobre Taludes y Laderas Inestables , Vol II, La Coruña, 20 al 23 de Octubre, pp 771-780.

ZORNBERG, J.G.; JERNIGAN, B.L.; SANGERAT, T.R.; COOLEY, B.H. (1999) – Retention of Free Liquids in Landfills Undergoing Vertical Expansion – Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 125, No. 7, July, 1999, pp. 583 – 594.

APÊNDICE

APÊNDICE A:

**DADOS PARA A GERAÇÃO DOS GRÁFICOS
OBTIDOS NAS CÉLULAS CONSTRUÍDAS EM
CAMPO**

1 - RECALQUE DAS CÉLULAS

1.1 - CÉLULA I

Tempo (dias)	Recalque Absoluto (cm)		Recalque Relativo (cm)	
	Placa 1	Placa 2	Placa 1	Placa 2
0	0,00	0,00	0,00	0,00
3	7,50	4,00	1,97	2,10
5	16,40	8,40	4,31	4,42
8	20,50	10,50	5,40	5,53
12	23,50	12,00	6,18	6,31
19	26,80	13,70	7,05	7,21
26	29,00	15,00	7,63	7,89
108	37,00	19,80	9,74	10,42
132	38,00	20,40	10,00	10,74
147	38,35	21,00	10,09	11,05
249	41,20	21,90	10,84	11,53
294	42,00	22,00	11,05	11,58
302	43,00	22,00	11,31	11,58
359	43,30	22,70	11,39	11,95
366	43,50	23,00	11,45	12,11
376	43,50	23,00	11,45	12,11
395	43,50	23,50	11,45	12,37
402	43,50	23,50	11,45	12,37
409	43,50	23,50	11,45	12,37
416	43,50	23,50	11,45	12,37

Data de fechamento: 28 de março de 2000

Altura total da célula: 3,80 m

1.2 - CÉLULA II

Tempo (dias)	Recalque Absoluto (cm)		Recalque Relativo (cm)
	Placa 1	Correção	Placa (corrigido)
0	x	0,00	0,00
3	x	6,60	1,74
5	x	13,20	3,47
8	x	17,82	4,69
12	x	20,46	5,38
19	x	23,10	6,08
26	x	25,17	6,62
40	6,70	30,00	7,89
85	9,50	39,50	10,39
106	10,00	40,00	10,53
152	10,70	40,70	10,71
159	10,80	40,80	10,74
166	10,80	40,80	10,74
196	11,00	41,00	10,79
203	11,20	41,20	10,84
210	11,30	41,30	10,87

Data de fechamento: 09 de novembro de 2000

Altura total da célula: 2,95 m

1.3 - CÉLULA III

Tempo (dias)	Recalque Absoluto (cm)		Recalque Relativo (cm)
	Placa 1	Correção	Placa (corrigido)
0	0,00	0,00	0,00
3	x	7,80	2,00
5	x	16,80	4,31
8	x	21,06	5,40
12	x	24,10	6,18
19	x	26,00	6,67
26	x	28,00	7,18
40	5,00	32,00	8,21
85	9,00	39,00	10,00
106	10,00	40,00	10,26
152	11,20	41,20	10,56
159	11,50	41,50	10,64
166	11,50	41,50	10,64
196	12,00	42,00	10,77
203	12,30	42,30	10,85
210	12,50	42,50	10,90

Data de fechamento: 09 de novembro de 2000

Altura total da célula: 3,90 m

1.4 - CÉLULA IV

Tempo (dias)	Recalque Absoluto (cm)		Recalque Relativo (cm)
	Placa 1	Correção	Placa (corrigido)
0	x	0,00	0,00
3	x	7,55	1,97
5	x	16,51	4,31
8	x	20,68	5,40
12	x	23,67	6,18
19	x	27,00	7,05
26	x	29,22	7,63
54	12,00	41,00	10,70
75	14,00	46,00	12,01
121	17,00	49,00	12,79
128	17,50	49,50	12,92
135	17,80	49,80	13,00
157	18,50	50,50	13,18
170	18,60	50,60	13,21
177	18,70	50,70	13,24
210	18,70	50,70	13,24

Data de fechamento: 24 de dezembro de 2000

Altura total da célula: 3,83 m

2 - DADOS DE S.P.T.

2.1 - CÉLULA I

Prof.Inic.	Avanço	Golpes	N0	Nf
0,00	0,60	-	-	-
0,60	0,15	1	8	12
	0,15	7		
	0,15	5		
1,05	0,10	-	-	-
1,15	0,15	4	7	17
	0,15	3		
	0,15	14		
1,60	0,15	16	35	27
	0,15	19		
	0,15	8		
2,05	0,15	11	24	38
	0,15	13		
	0,15	25		
2,50	0,15	14	21	12
	0,15	7		
	0,15	5		
Final (m) = 2,95				

Data: 26 de abril de 2000 - Furo 01

Prof.Inic.	Avanço	Golpes	N0	Nf
0,00	0,60	-	-	-
0,60	0,15	1	5	9
	0,15	4		
	0,15	5		
1,05	0,00	-	-	-
1,05	0,15	3	6	8
	0,15	3		
	0,15	5		
1,50	0,15	2	5	6
	0,15	3		
	0,15	3		
1,95	0,15	1	3	4
	0,15	2		
	0,15	2		
2,40	0,15	3	10	13
	0,15	7		
	0,15	6		
Final (m) =		2,85		

Data: 26 de abril de 2000 - Furo 02

Prof.	Avanço	Golpes	Nº	Nf
0,00	0,40	-	-	-
0,40	0,15	3	5	4
	0,15	2		
	0,15	2		
0,85	0,15	1	2	2
	0,15	1		
	0,15	1		
1,30	0,15	1	3	6
	0,15	2		
	0,15	4		
1,75	0,15	6	10	8
	0,15	4		
	0,15	4		
2,20	0,15	4	10	9
	0,15	6		
	0,15	3		
2,65	0,15	4	10	13
	0,15	6		
	0,15	7		
3,10	0,05	11	11	0
	0,00			
	0,00			
Final (m) =		3,15		

Data: 06 de fevereiro de 2001 - Euro 01

2.2 - CÉLULA II

Prof.	Avanço	Golpes	Nº	Nf
0,00	0,53	-	-	-
0,53	0,15	1	5	9
	0,15	4		
	0,15	5		
0,98	0,15	2	5	7
	0,15	3		
	0,15	4		
1,43	0,15	3	5	3
	0,15	2		
	0,15	1		
1,88	0,15	2	3	3
	0,15	1		
	0,15	2		
Final (m) =		2,33		

Data: 06 de fevereiro de 2001

2.3 - CÉLULA III

Prof.	Avanço	Golpes	N0	Nf
0,00	0,49	-	-	-
0,49	0,15	2	4	3
	0,15	2		
	0,15	1		
0,94	0,15	2	5	5
	0,15	3		
	0,15	2		
1,39	0,15	4	8	8
	0,15	4		
	0,15	4		
1,84	0,15	5	8	7
	0,15	3		
	0,15	4		
2,29	0,15	4	8	9
	0,15	4		
	0,15	5		
2,74	0,15	3	7	8
	0,15	4		
	0,15	4		
Final (m) = 3,19				

Data: 07 de fevereiro de 2001 - Furo 01

2.4 - CÉLULA IV

Prof.	Avanço	Golpes	N0	Nf
0,00	0,51	-	-	-
0,51	0,15	1	2	2
	0,15	1		
	0,15	1		
0,96	0,15	1	2	3
	0,15	1		
	0,15	2		
1,41	0,15	2	4	3
	0,15	2		
	0,15	1		
1,86	0,15	1	2	3
	0,15	1		
	0,15	2		
2,31	0,15	1	3	5
	0,15	2		
	0,15	3		
2,76	0,15	2	3	3
	0,15	1		
	0,15	2		
Final (m) = 3,21				

Data: 07 de fevereiro de 2001

3 - ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA CÉLULA I

3.1 - DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)

Tempo (dias)	Concentração (mg/l)
229	32000
253	30000
294	45000
302	50000
395	60000

3.2 - NITRATO

Tempo (dias)	Concentração (mg/l)
229	1100
253	1100
294	800
359	767
366	1150
376	1400

3.3 - AMÔNIO

Tempo (dias)	Concentração (mg/l)
229	1550
253	1820
294	2030
359	1725
366	1700
376	1745
395	1780
402	1945
415	1950

3.4 - CLORETO

Tempo (dias)	Concentração (mg/l)
229	1200
253	2000
294	1200
302	1950
359	1867
366	1300
376	1650
402	1600

APÊNDICE B:

DADOS PARA GERAÇÃO DOS GRÁFICOS
OBTIDOS NA CONSTRUÇÃO DO REATOR
AERÓBIO

1 - RECALQUES

1.1 - RECALQUE ABSOLUTO

Tempo (dias)	Recalques (cm)	
	Bordas	Centro
3	11,8	11,5
6	15,9	17,1
9	17,3	18,8
12	20,02	21,7

Tempo (dias)	Média dos Recalques (cm)
3	11,65
6	16,5
9	18,05
12	20,95

1.2 - RECALQUE RELATIVO

Tempo (dias)	% Recalques	
	Bordas	Centro
3	26,4	25,73
6	35,6	38,25
9	38,7	42,05
12	45,2	48,55

Tempo (dias)	Média dos Recalques (cm)
3	26,065
6	36,925
9	40,375
12	46,875

2 - SÓLIDOS VOLÁTEIS

Peso da Tara (g)	Peso (T + Ls a 110C) (g)	Peso (T + Ls 550C) (g)	% Sólidos Voláteis
25,5800	40,0000	32,57	51,53
23,12	27,43	23,59	89,10
24,7400	29,75	25,21	90,62

Data: 10 de fevereiro de 2001 (terceiro dia)

Svm = 89,86

Peso da Tara (g)	Peso (T + Ls a 110C) (g)	Peso (T + Ls a 550C) (g)	% Sólidos Voláteis
24,3000	44,0800	27,6	83,32
23,65	32,84	24,73	88,25
22,5500	34,56	24,58	83,10

Data: 13 de fevereiro de 2001 (sexta dia)

Svm = 84,90

Peso da Tara (g)	Peso (T + Ls a 110C) (g)	Peso (T + Ls 550C) (g)	% Sólidos Voláteis
25,5800	43,6200	32,6718	60,69
24,74	47,82	30,3924	75,51
23,1200	39,62	26,952	76,78

Data: 16 de fevereiro de 2001 (nômo dia)

Svm = 76,15%

Peso da Tara (g)	Peso (T + Ls a 110C) (g)	Peso (T + Ls 550C) (g)	% Sólidos Voláteis
24,3000	44,0800	30,56	68,35
23,65	32,84	26,13	73,01
22,5500	34,56	25,58	74,77

Data: 19 de fevereiro de 2001 (décimo segundo dia)

Svm = 72,04%

3 - UMIDADE

Peso Tara (g)	Peso (T+Lu) (g)	Peso (T+Ls) (g)	Teor de H₂O%
19,7600	158,2800	51,8900	76,80
23,21	200,18	87,7	63,56

Umidade inicial = 70,18%

Data: 07 de fevereiro de 2001 (primeiro dia)

Peso Tara (g)	Peso (T+Lu) (g)	Peso (T+Ls) (g)	Teor de H₂O%
25,5800	65,9500	40,0000	64,28
23,12	38,73	27,43	72,39
24,7400	43,71	29,7500	73,59

Umidade = 70,09%

Data: 13 de fevereiro de 2001 (Sexto dia)

Peso Tara (g)	Peso (T+Lu) (g)	Peso (T+Ls) (g)	Teor de H₂O%
25,5800	112,4500	43,6200	79,23
24,74	94,33	47,82	66,83
23,1200	79,67	39,6200	70,82

Umidade = 72,30%

Data: 16 de fevereiro de 2001 (Nômo dia)

Peso Tara (g)	Peso (T+Lu) (g)	Peso (T+Ls) (g)	Teor de H₂O%
24,3000	72,2800	44,0800	58,77
23,65	91,6	32,84	86,48
22,5500	85,6	34,5600	80,95

Umidade = 75,14%

Data: 19 de fevereiro de 2001 (décimo segundo dia)