

ESTUDO DO FLUXO DE GASES ATRAVÉS DO SOLO DE COBERTURA DE  
ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Vinicius Paiva Guedes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO  
DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Cláudio Fernando Mahler, D. Sc., LD.

---

Profa. Maria Claudia Barbosa, D.Sc.

---

Prof. Sandro Lemos Machado, D.Sc.

---

Prof. Luciano Basto Oliveira, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
DEZEMBRO DE 2007

GUEDES, VINICIUS PAIVA

Estudo do Fluxo de Gases Através do Solo de Cobertura de Aterro de Resíduos [Rio de Janeiro] 2007

VIII, 117 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2007)

Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Aterro de Resíduos Sólidos
2. Estudo do Fluxo de Biogás
3. Biogás

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por mais esta benção!

Agradeço a minha família: Claudia, João Vitor e Renan. Eles têm grande participação neste trabalho!

A meus pais e a todos meus avós, por me ensinarem o caminho e me ajudarem a caminhar.

Ao Prof. Cláudio F. Mahler, meu orientador e amigo, que me incentivou de diversas maneiras...“*Que o Senhor Deus Te abençoe e te guarde.*” Números 6:24.

Um especial agradecimento a Ronaldo Izzo, Juliana Rose e Adriana Schueller, pelo apoio no desenvolvimento deste estudo.

Aos amigos Vitor e Leandro pela consultoria geológica. A amiga Ângela Tostes pelo apoio meteorológico. Aos queridos Sérvulo, Uíliam, Hélcio, Helena, Kátia, Crescêncio e Renata, porque no meio de tanta canseira nunca desistiremos!

Obrigada a família da geotecnia por estar sempre disposta a me ajudar. Um agradecimento especial ao grande Serginho pelo carinho e pela dedicação, ao amigo Carlinhos, ao Rochinha, ao amigo Bororó, ao Grande Luizão, a Glória, Sra. dos Santos, ao Álvaro, Mauro e a todas as “meninas” da secretaria.

À Prefeitura do Campus da UFRJ na pessoa do Prefeito Prof. Hélio, que também tem sua participação efetiva neste trabalho.

Ao Prof. Álvaro Cantanhede por confiar em mim àquela tão importante missão das aulas do curso da RECESA.

Aos amigos Lúcio e seu *staff* do Aterro de Gramacho e à COMLURB.

Aos grandes ICs Igor, Paola, Rafael, Carol e Mônica.

Valeu Ivete!

Aos Professores Maria Claudia, Prof. Casanova e a todo corpo docente da Geotecnia da COPPE.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ESTUDO DO FLUXO DE GASES ATRAVÉS DO SOLO DE COBERTURA DE ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Vinicius Paiva Guedes

Dezembro/2007

Orientador: Cláudio Fernando Mahler

Programa: Engenharia Civil

O objetivo deste trabalho é medir o fluxo de biogás que atravessa a camada de cobertura – emissões fugitivas, a fim de verificar a eficiência desta camada a qual tem dentre outras funções ajudar na coleta e tratamento do gás gerado no interior do RSU.

Para este estudo foi aprimorado o mecanismo de medição por placa de fluxo de alta sensibilidade, onde mede-se instantaneamente a concentração do gás e do fluxo que atravessa a camada de cobertura, utilizando-se aparelhos de precisão.

Finalmente é feito uma comparação destes resultados, analisando-os conforme as condições geotécnicas, meteorológicas e gravimétricas em um estudo de caso – Aterro Metropolitano de Gramacho / Rio de Janeiro.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## RESEARCH OF THE GAS FLOW IN THE TOP SOIL COVER IN A SANITARY LANDFILL

Vinicius Paiva Guedes

December/2007

Advisor: Cláudio Fernando Mahler

Department: Civil Engineering

The main objective of this work is the measurement of gas flux that passes through the top soil cover layer of a sanitary landfill, the fugitive emissions, trying to verify the efficiency of this layer that has, among other functions, the function avoid gas emission, helping in the landfill gas collection and treatment.

A system consisting of a high sensibility flux plate was enhanced, where the gas concentration and the flux through the soil layer were measured directly using high precision devices.

Finally a comparison between the results is made according to the geotechnical, meteorological and gravimetric conditions for a particular case study – Metropolitan Gramacho landfill / Rio de Janeiro.

## Índice

### Capítulo 1 - Introdução

1.1	O cenário atual.....	1
1.2	Objetivos desta pesquisa.....	2
1.3	O estudo .....	2

### Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1	O efeito estufa .....	4
2.2	As condições atuais do RSU no Brasil .....	7
2.3	Classificação dos resíduos .....	9
2.4	Aterro Sanitário – Componentes básicos do projeto.....	10
2.4.1	Sistema de revestimento de fundo .....	10
2.4.2	Sistema de drenagem de lixiviado .....	11
2.4.3	Encostas laterais .....	13
2.4.4	Drenagem de biogás .....	13
2.4.5	Camada de Cobertura .....	15
2.4.5.1	Camada de Cobertura para Aterros Anaeróbios .....	17
2.5	Produção e Composição do Biogás .....	18
2.6	Fatores que influenciam na produção e composição do biogás .....	20
2.6.1	Geometria e operação do aterro .....	20
2.6.2	Composição Gravimétrica dos RSUs .....	20
2.6.3	Aspectos do ambiente interno do aterro .....	21
2.6.4	Aspectos do ambiente externo .....	22
2.7	Fases na Produção de Biogás .....	23
2.8	Determinação do potencial de produção de biogás em aterros.....	26
2.9	Movimento dos gases no aterro de RSU .....	28
2.9.1	Movimento devido ao fluxo difusivo .....	28
2.9.1.1	Lei de Fick .....	32
2.9.2	Movimento devido ao fluxo advectivo .....	34
2.9.3	Gradientes de pressão .....	36
2.9.3.1	Pressão no interior da massa de RSU ( $P_{int}$ ) .....	36
2.9.3.2	Pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ) .....	36
2.9.4	Mecanismos de retardamento da percolação gasosa .....	36

2.10	Caminhos preferenciais .....	37
2.10.1	Fenômeno do ressecamento .....	39
2.11	Métodos para medição de fluxo de gás .....	40
2.11.1	Placas dinâmicas (abertas).....	40
2.11.2	Placas estáticas (fechadas) .....	41
2.11.3	Analisadores de infravermelho .....	44

### **Capítulo 3 – MATERIAIS E MÉTODOS**

3.1	Localização, pontos e materiais estudados.....	46
3.1.1	Histórico do Aterro.....	46
3.1.2	Localização dos pontos estudados.....	50
3.1.3	Dados Meteorológicos do aterro.....	54
3.1.4	Caracterização do solo de cobertura dos pontos P1 e P2.....	56
3.1.4.1	Resultados das análises no ponto P1 .....	58
3.1.4.2	Resultados das análises no ponto P2.....	63
3.2	Metodologia dos ensaios .....	66
3.2.1	Ensaio de campo.....	66
3.2.1.1	Ensaio com a placa de fluxo.....	66
3.2.1.2	Montagem do ensaio com a PFLI.....	69
3.2.1.3	Procedimentos para a leitura do fluxo e concentração.....	70
3.3	Mapeamento termal do solo de cobertura.....	74
3.4	Ensaio de laboratório .....	76
3.4.1	Ensaio de permeabilidade ao gás em solos para cobertura.....	76
3.4.2	Montagem dos corpos de prova.....	78
3.4.3	Calibração entre instrumentos (fluxímetro/ rotâmetro).....	78
3.4.4	Calibração do medidor de concentração.....	79

### **Capítulo 4 – apresentação de Resultados**

4.1	Resultados de campo .....	80
4.1.1	Resultados de campo obtido com a PFLI no ponto P1.....	80
4.1.2	Resultados de campo obtido com a PFLI no ponto P2 (A) e (B)..	82
4.1.3	Resultados de campo obtido com a PFLI no ponto P3.....	85
4.2	Ensaio de laboratório: percolação gasosa.....	88

## **Capítulo 5 - Discussão dos resultados obtidos**

5.1	Correlações entre dados obtidos no campo e laboratório.....	89
5.1.1	Correlações entre fatores geotécnicos .....	89
5.2	Correlações entre fatores geotécnicos, meteorológicos com as leituras realizadas com a PFLI .....	92
5.2.1	Efeito da temperatura.....	93
5.2.2	Efeito da pressão atmosférica.....	94
5.2.3	Efeito da umidade do solo.....	95
5.2.4	Efeito da umidade relativa do ar.....	96
5.2.5	Efeito do tempo de cobrimento.....	96
5.2.6	Retenção do ácido sulfídrico.....	97

## **Capítulo 6: Conclusões e sugestões para futuras pesquisas**

6.1	Conclusões obtidas com estudo de experimentos de laboratório.....	98
6.2	Conclusões obtidas no campo.....	98
6.3	Sugestões para futuras pesquisas.....	100

<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>102</b>
--	------------

<b>Anexos.....</b>	<b>110</b>
--------------------	------------

# Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 O cenário atual

Nos últimos anos tem-se dado muita atenção ao chamado “efeito estufa” que é o efeito natural de retenção de calor na atmosfera terrestre e suas possíveis conseqüências. Em condições de equilíbrio, este efeito é de suma importância à conservação da vida na Terra, pois mantém retida e estabilizada a temperatura atmosférica sob a incidência da radiação solar diurna e sua respectiva conservação térmica durante à noite.

A idéia de “progresso” permitiu a queima indiscriminada de florestas numa total e absoluta negligência ambiental, acrescido do uso abusivo dos combustíveis fósseis, que quando utilizados liberam para a atmosfera gases que provocam um significativo aumento na capacidade de aprisionamento de calor (aumento do efeito estufa). As emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), e em menor escala o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e os chamados clorofluorcarbonos (CFCs), provocam diversas anomalias climáticas com conseqüências até catastróficas.

A previsão do impacto da elevação da temperatura em ecossistemas naturais é bastante imprecisa e nunca favorável. Pode-se especular, contudo, que a elevação da temperatura média na superfície da Terra entre 1,8 a 6°C, nos próximos 100 anos, o que acarretaria, dentre outros fatores, na elevação do nível médio dos oceanos em até 80cm com provável desaparecimento de ilhas e cidades costeiras, alternância de excesso e déficit hídrico, alteração nas áreas com aptidão agrícola de diferentes regiões do mundo e aumento de vetores biológicos (IPCC, 2007).

Acoplado a este cenário, tem-se o problema do resíduo sólido urbano (RSU), pois ao fim do ano de 2007, a população mundial estimada será de 6,5 bilhões a complexidade do gerenciamento do problema em relação aos resíduos sólidos urbanos, gerados por essa grande massa populacional, e sua

destinação final, uma vez que as disposições dos resíduos sólidos municipais e industriais podem produzir emissões de gases que irão contribuir com o aumento do efeito estufa. Dentre os diversos gases gerados pelo RSU, o de maior destaque é o gás metano ( $\text{CH}_4$ ), não somente pela quantidade produzida no interior do aterro, mas também pela sua capacidade de retenção de calor que é de 21 vezes superior à do  $\text{CO}_2$  para um período de 100 anos (IPCC, 2007).

Destacam-se como fontes produtoras de gás metano: solos inundados dos reservatórios de usinas hidrelétricas, lavouras de arroz, fermentação entérica animal, processos agrícolas e principalmente decomposição da matéria orgânica do RSU (CICERONE & OREMLAND, 1988).

É cada vez maior o interesse dos cientistas, ambientalistas, pesquisadores e de toda a sociedade, no estudo dos problemas relacionados com o aumento do aquecimento global provocados por estas emissões de origem antropogênica.

## **1.2 Objetivos desta pesquisa**

É apresentada nesta pesquisa uma metodologia para estudar o fluxo de gases que atravessam o solo de cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos (RSUs), buscando quantificar o fluxo gasoso, as respectivas concentrações de biogás que é liberado pelos resíduos depositados, que atravessa o solo de cobertura, assim como analisar os parâmetros geotécnicos ideais para a redução destas chamadas “emissões fugitivas” de gases, contribuindo assim com a preservação do meio ambiente e, se for o caso, maximizando a captação para aproveitamento do biogás com fins comerciais.

## **1.3 O estudo**

Este trabalho faz uma abordagem no capítulo 2, sobre as questões da disposição do RSU no Brasil, os componentes do projeto de um aterro sanitário, mecanismos de geração de gases no interior do aterro, definição de biogás, fatores que afetam sua produção, transporte e percolação interna,

modelos mais utilizados para mensurar a produção gasosa em aterros e métodos para medir as chamadas emissões fugitivas com placas de fluxo.

No capítulo 3 apresenta-se o Aterro Metropolitano de Gramacho / RJ, local utilizado para pesquisas deste trabalho. Dentro do aterro, optou-se por realizar os ensaios com a placa de fluxo, desenvolvida para este trabalho em 3 pontos distintos. Apresenta-se também, a caracterização do solo dos pontos escolhidos e o acompanhamento meteorológico do local, disponibilizado por Tostes (2007).

No capítulo 4, estão apresentados os resultados dos ensaios realizados no laboratório e no campo com a placa de fluxo.

No capítulo 5 discutem-se os resultados dos ensaios de campo e de laboratório.

No capítulo 6 estão reunidas as conclusões obtidas através do estudo descrito neste trabalho, em ensaios experimentais de laboratório e ensaios de campo. Posteriormente, algumas sugestões para futuras pesquisas são apresentadas.

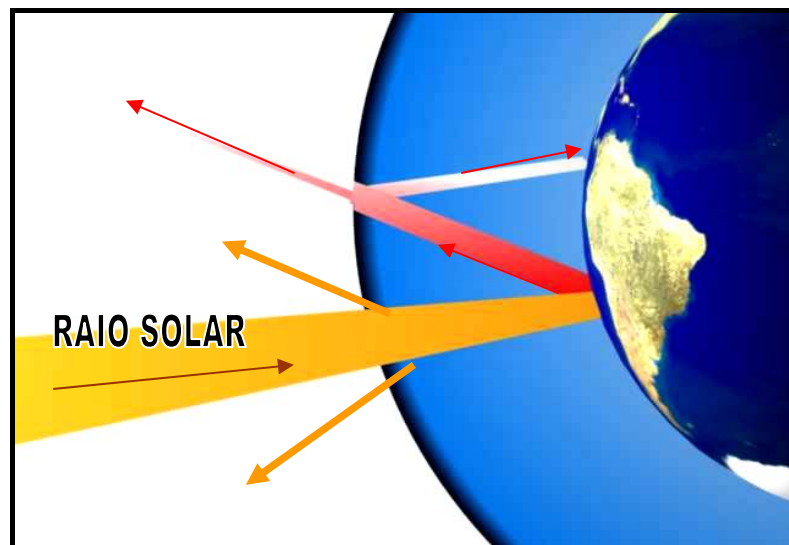
# Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

## 2.1 O efeito estufa

O chamado efeito estufa é um fenômeno natural do planeta Terra.

Alguns gases presentes naturalmente na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono, seguido do gás metano, óxido nitroso e do vapor d'água, possuem propriedade físicas de reter o calor refletido pela superfície da Terra. Estes gases redistribuem a energia térmica em todas as direções, mantendo-a na atmosfera em decorrência do alto poder de absorção de calor destes gases, acarretando um fluxo térmico à superfície da Terra, conforme a figura 2.1 abaixo. Assim há a manutenção da temperatura média do planeta, deixando a atmosfera aquecida com temperaturas equilibradas por um determinado tempo em torno de 17°C, tornando possível a existência de vida, mesmo em períodos noturnos (BRAGA et al, 2005).

Sem este efeito, a temperatura média durante o dia poderia chegar a 65°C e à noite, -15°C (PIMENTEL, 2005).



**Figura 2.1:** Condições Normais.

Como apresentado na figura 2.1, parte da radiação solar é refletida de volta ao espaço pela atmosfera. Outra parte segue pela atmosfera até a superfície da Terra aquecendo-a, pois os gases de efeito estufa são “transparentes” à irradiação solar, por conta do comprimento de onda. Posteriormente em condições normais, o calor proveniente da irradiação infravermelha não fica retido na atmosfera, irradiando-se de volta ao espaço.

Conforme representado na figura 2.2, quanto maior for à concentração de gases que podem reter calor, maior será o aumento do chamado efeito estufa. A energia térmica fica parcialmente aprisionada na atmosfera e é refletida de volta à Terra aumentando a temperatura atmosférica.

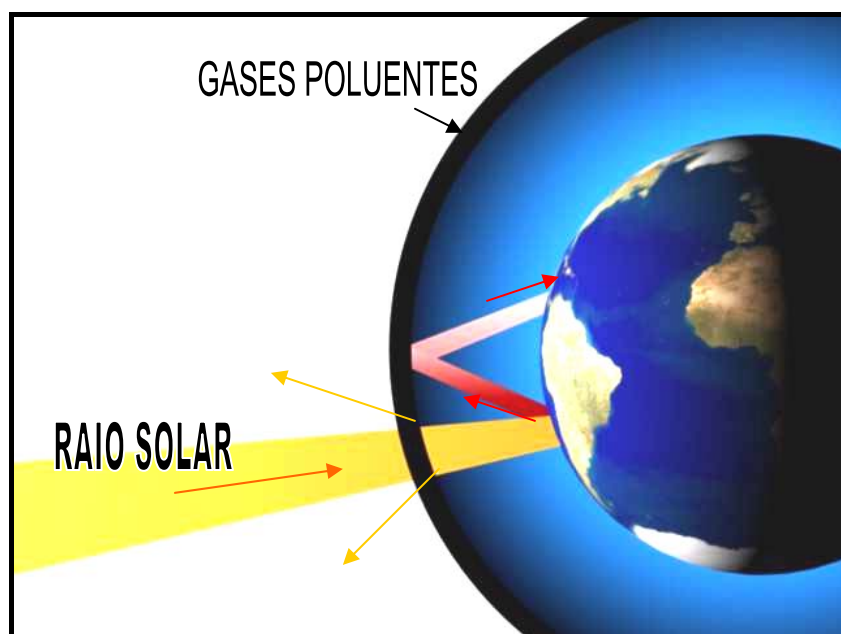


Figura 2.2: Atmosfera Poluída.

Conforme BRAGA et al (2005), desde o começo da Revolução Industrial, as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono aumentaram cerca de 25%, como apresentado na figura 2.3. Todavia, as mudanças de temperatura são de 5 à 14 vezes maiores do que seria esperado devido ao teor de dióxido de carbono e outros gases retentores de calor. Esse resultado faz supor que o efeito do aquecimento pode estar associado a maior presença do gás metano, vapor de água na atmosfera dentre outros compostos. Segundo o modelo de HANSEN et al(1993), para análise de mudanças climáticas, a concentração de

metano na atmosfera contribui 25% a mais do que a concentração do gás carbônico nas alterações da temperatura.

Se não forem tomadas medidas urgentes, a emissão de *gases estufa* para a atmosfera, principalmente o CO<sub>2</sub>, produzido na queima de combustíveis fósseis derivados do petróleo, queima de material orgânico (queimada de florestas, etc.), o metano (21 vezes mais efetivo que o CO<sub>2</sub> para o período de 100 anos), e em menores escalas os gases óxido nitroso (310 vezes mais efetivo do que o CO<sub>2</sub> para o período de 100 anos) e os CFCs (clorofluorcarbonados), podem provocar maior retenção do calor refletido pela Terra, aumentando o efeito estufa (IPCC, 2007).

Pode-se acompanhar pela figura 2.3, o aumento da temperatura média do ar desde 1880 até o ano de 2000, onde nota-se um crescimento acentuado a partir de 1920.

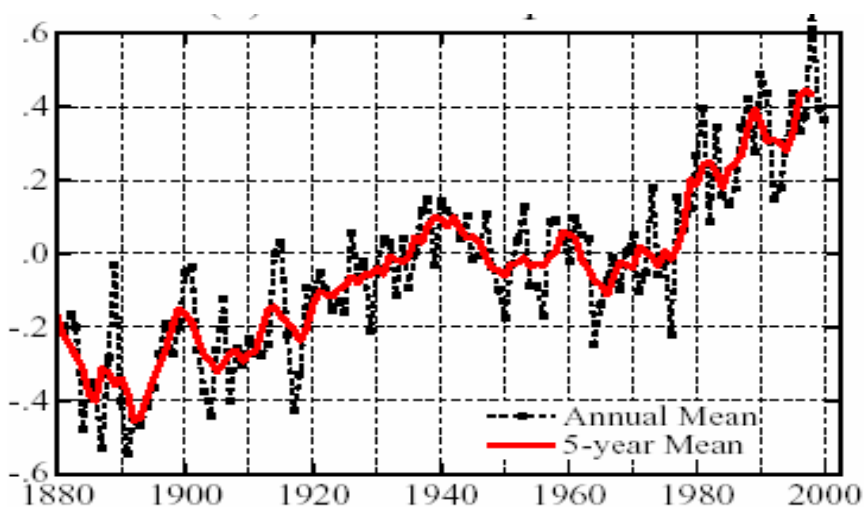


Figura 2.3: Aumento da média das temperaturas anotadas desde 1880 até 2007 (NASA, 2007).

A comunidade científica mundial ainda discute as possíveis conseqüências da elevação da temperatura ao meio ambiente, sabendo que há possibilidade da ocorrência de grandes catástrofes.

Ficou estabelecido durante a Conferência Internacional ECO-92 / Rio de Janeiro, que o assunto sobre a redução de emissão de gases estufa seria

discutido em outra conferência internacional que abordaria exclusivamente temas sobre melhorias climáticas.

No ano de 1997 em Kyoto / Japão, foram aprovados mecanismos de flexibilização, sendo um deles o chamado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), visando limitar a emissão de CO<sub>2</sub> pelos países ricos a 5,2% em média, abaixo dos níveis correspondentes aos do ano de 1990. Um primeiro momento estabelecido por este acordo vigorará entre 2008 e 2012, quando serão refeitas as próximas negociações entre os participantes. O acordo visa basicamente auxiliar financeiramente projetos de países em desenvolvimento que promovam a redução de gases estufa da atmosfera.

Segundo relatório do Banco Mundial de 2005, o Brasil não é considerado um grande emissor de gases estufa no setor energético, pois a contribuição brasileira limita-se principalmente ao grande número de queimadas e desmatamento. Isso se deve ao fato de ser o Brasil um país tropical, com invernos moderados e por ter mais de 60% de sua matriz energética suprida por fontes renováveis como as usinas hidrelétricas (85% da eletricidade brasileira é gerada por usinas hidrelétricas) e uma ampla utilização de biomassa (utilização de álcool nos veículos, uso do bagaço da cana-de-açúcar para a geração de vapor, uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica, etc). Além disso, programas de conservação de energia têm buscado, desde meados da década de 80, reduzir o aumento da demanda por energia e alterar os padrões de consumo no Brasil.

## **2.2 As condições atuais do RSU no Brasil**

Seguindo a tendência mundial de crescimento populacional, no Brasil a grande concentração demográfica e encontra-se nas em zonas urbanas (IBGE, 2000), trazendo junto a este crescimento o problema da deposição final do lixo gerado por esta população e seus danos ambientais associados: poluição do solo, do ar e dos corpos hídricos próximos.

A tabela 2.1 representa a divisão da população brasileira em macro-regiões e a quantidade de lixo produzida por região.

Tabela 2.1: Quantidade de RSU por macroregiões (IBGE,2000).

<b>Macroregião</b>	<b>Pop.(hab)</b>	<b>Lixo Residencial +comercial(t/dia)</b>	<b>Lixo Urbano</b>
Norte	12.846.017	8.310,86	10.881,82
Nordeste	47.537.445	29.581,32	38.621,09
Sudeste	72.412.411	53.721,96	69.208,05
Sul	25.051.707	15.359,95	19.836,93
Centro-Oeste	11.636.728	8.051,09	10.546,41
BRASIL	169.484.308	115.025,10	149.094,30

Não existem dados precisos sobre a quantidade de lixo gerada nos municípios brasileiros. Estima-se que a geração diária de lixo *per capita* no Brasil varie entre 0,4 a 0,7kg, com uma média de 0,52 kg/dia/habitante (CETESB / SP, 1992) em municípios de pequeno porte (até 20.000 habitantes). Verifica-se que quanto maior a população da cidade, maior a relação Kg de lixo/hab/dia, que pode ultrapassar a 1Kg nos grandes centros urbanos (IBGE, 2000).

Pode-se ressaltar ainda, que existe uma tendência da elevação da produção de lixo no Brasil para os próximos anos.

Segundo a mesma pesquisa (IBGE, 2000), cerca de 47,1% do lixo gerado é destinados a aterros sanitários<sup>1</sup>, 22,3% a aterros controlados<sup>2</sup> e

---

<sup>1</sup> **Aterros sanitário** é a técnica de disposição de resíduos sólidos no solo, sem causar danos a saúde e à segurança pública, minimizando os impactos ambientais; método este que utiliza princípios de engenharia para confinar resíduos sólidos na menor área possível e a reduzi-los a menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de solo na conclusão de cada jornada de trabalho, ou em intervalos menores se necessário. (ABNT, NBR-8419/84).

<sup>2</sup> **Aterro controlado** é o método que utiliza alguns princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho (IPT, 2000).

apenas 30,5% a lixões<sup>3</sup>. Todavia, no total de municípios, conforme a figura 2.4 abaixo, nota-se que a maioria ainda destina seus RSU aos lixões (63,6%), e apenas 32,2% das cidades depositam o RSU em aterros (13,8% sanitários e 18,4% aterros controlados); 5% não informaram para onde vão seus resíduos.

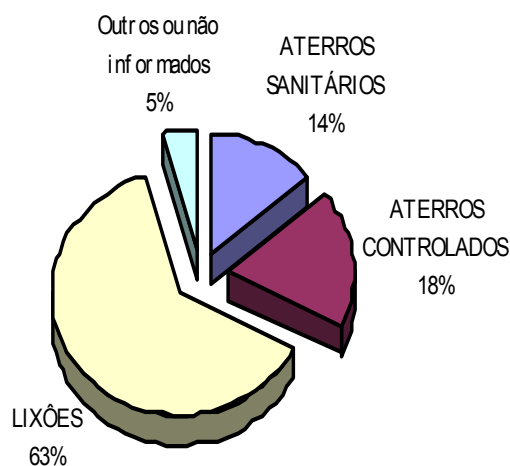


Figura 2.4: Destino Final do RSU tendo como referência o número de municípios (IBGE, 2000).

### 2.3 Classificação dos resíduos

De acordo com a definição da ABNT em sua norma NBR-10.004/2004, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

**a) Resíduos Classe I – Perigosos:** são os chamados resíduos perigosos por apresentarem periculosidade quanto à inflamabilidade, reatividade, toxicidade, patogenicidade ou corrosividade;

**b) Resíduos Classe II – Não Perigosos:**

**b1) Resíduos Classe II A – Não Inertes:** são os resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou resíduos de classe II B – Inertes. Podem ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;

<sup>3</sup> **Lixão** é uma forma inadequada de disposição de resíduos sólidos municipais, que se caracteriza pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou a saúde pública (IPT, 2000).

**b2) Resíduos Classe II B – Inertes:** são os resíduos que quando amostrados de uma forma representativa, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor.

Outra forma de classificação dos resíduos é quanto à origem: domiciliar, público, comercial, industrial, serviços de saúde e hospitalar, portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários, industriais, agrícolas e de construção civil (entulhos de obra).

## **2.4 Aterro Sanitário – Componentes básicos do projeto**

### **2.4.1 Sistema de revestimento de fundo**

Num aterro sanitário, o RSU é depositado sobre um terreno estrategicamente escolhido, onde, após análises geotécnicas do solo, normalmente executa-se um *liner* argiloso de baixa permeabilidade ( $k \leq 1 \times 10^{-7}$  cm/s), de altura variável conforme as especificações de projeto. O solo utilizado para *liner* poderá ser do próprio local ou quando possível obtido em jazidas próximas, posteriormente compactado e coberto por uma geomembrana, a fim de impermeabilizar o fundo do aterro. Sobre esta geomembrana, a qual atuará como barreira dos fluxos advectivos e difusivos de transporte de contaminantes para o solo e água subterrânea, executa-se outra camada em argila, também com a mesma finalidade, com altura de aproximadamente 50 cm, variando conforme as análises da permeabilidade, granulometria, compactação e umidade deste solo. Esta camada tem a função de proteger a geomembrana contra ações mecânicas, que poderiam levar a perda de estanqueidade da manta.

Na figura 2.5, é representado a colocação da geomembrana sobre o sobre a camada de solo compactado no fundo.



Figura 2.5: Colocação de geomembrana para revestimento de fundo – Aterro Bandeirante /SP (KAIMOTO *et al*, 2006).

Dependendo das exigências ambientais para o projeto, poderá ser necessário que este revestimento seja em camada dupla, isto é: sobre a proteção mecânica, coloca-se outra geomembrana e outra camada de proteção mecânica.

Pode-se também enriquecer este solo usando-se argilomineirais ricos em bentonita a fim de diminuir sua permeabilidade, o que acredita-se, em certos casos, ser suficiente para descartar o uso das geomembranas (COPPETEC,2006). De qualquer forma, cada projeto terá um sistema de proteção específico para o caso.

#### **2.4.2 Sistema de drenagem de lixiviado**

Ainda no fundo deverá ser instalado um sistema para coleta de lixiviado, também chamado de sistema drenante, que consiste basicamente na colocação de tubos furados revestidos por agregados graúdos em valas revestidas pela geomembrana. Este poderá ser em forma de espinha de peixe, com caimento para facilitar o escoamento e captação do chorume para posterior tratamento (figura 2.6 e 2.7). Segundo a NBR 13896, o sistema deve ser dimensionado de forma a evitar uma lâmina de líquido percolado superior a 30 cm sobre a impermeabilização de fundo.



Figura 2.6: Sistema de drenos do aterro Bandeirantes/SP (KAIMOTO *et al*, 2005).

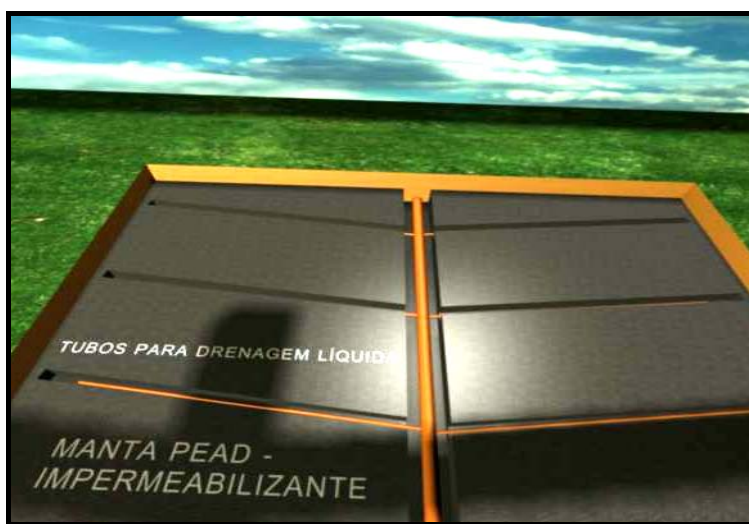


Figura 2.7: Revestimento de fundo.

Sobre a camada de argila, para proteção mecânica, adiciona-se uma camada de aproximadamente 40cm de espessura com finalidade drenante de líquidos, a fim de reduzir a carga hidráulica no contato de fundo. Nesta camada, os grãos do solo deverão ser de maior granulometria a fim de facilitar o escoamento de líquidos percolados. É comum utilizar em aterros, com este mesmo objetivo, uma camada de pneus, para exercer a devida proteção do fundo e permitir o escoamento de líquidos. Esta prática é atualmente discutida, pois a Resolução CONAMA Nº 258/99, proíbe a deposição de pneus em aterros de RSUs

Num sistema de drenagem, problemas de colmatação (obstrução dos poros do sistema drenante por motivos de passagem de partículas finas e a colmatação biológica) são freqüentes. Segundo FERRARI (2005), para minimizar esta colmatação na camada drenante, pode-se considerar as seguintes medidas:

- Maximização da velocidade do fluido percolado, aumentando as declividades;
- Maximização do volume de vazios;
- Minimização da área de superfície disponível para o crescimento de microorganismos com o uso de britas com diâmetro superior à 50 mm.

### **2.4.3 Encostas laterais**

Caso o projeto do aterro inclua a utilização de encostas escavadas em taludes naturais, deve-se levar em conta no momento do projeto a utilização dos parâmetros geotécnicos – ângulo de atrito, peso específico e coesão do solo local, a fim de determinar o equilíbrio e estabilidade da encosta, evitando o escorregamento da mesma. Sobre o solo escavado na parede lateral, faz-se um revestimento que consiste na colocação da geomembrana com a mesma finalidade descrita anteriormente para o revestimento de fundo. Neste momento é importante a interligação do revestimento lateral com o de fundo, evitando a fuga do chorume.

### **2.4.4 Drenagem de biogás**

O sistema de drenagem do biogás que é produzido no interior da massa de resíduos é importante para o alívio de pressões internas do aterro, para sua posterior queima ou reaproveitamento. Para esta drenagem, utilizam-se tubos ou manilhas de concreto com furos em toda a extensão, posicionados no sentido vertical, iniciando sempre sobre os drenos de chorume e conduzindo o biogás para o *flare* (dispositivo simples para ignição e queima do biogás, no caso de aterros que não utilizam de mecanismos para o aproveitamento do biogás como combustível visando uma produção energética). A figura 2.8 apresenta a extremidade superior do dreno de gás.

O objetivo deste sistema é de remover o biogás produzido no interior do aterro, devido seu alto poder de combustão, podendo provocar explosões combustão interna e instabilização do aterro por conta do excesso de pressão interna do gás.



Figura 2.8: Sistema de drenos do aterro Bandeirantes/SP (KAIMOTO *et al*, 2005). Queima de biogás no flare.

No caso de aterros que capturam o biogás para utilização como combustível, a coleta de gás normalmente começa após uma porção do aterro (chamada célula) ser fechada. Existem duas configurações de sistemas de coleta: poços verticais e trincheiras horizontais, sendo que os poços verticais são do tipo mais usado para coleta.

Cada uma das pontas da tubulação interna é conectada a uma rede que transporta o gás para um coletor principal. Preferencialmente, o sistema de coleta deve ser planejado para que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás alternadamente, quando necessário. Na figura 2.9 é possível observar um sistema de junção para coleta de biogás para posterior aproveitamento do biogás como combustível.



Figura 2.9: Sistema de drenos do aterro Bandeirantes/SP (KAIMOTO *et al*, 2005).

De modo geral, em aterros de RSU existe perda de biogás, fenômeno conhecido como emissão fugitiva através da camada de solo na cobertura. Isto ocorre devido à ineficiência ou inexistência do sistema de coleta de biogás (drenagem), o que pode gerar uma pressão positiva no interior do aterro, com o consequente vazamento de biogás por processos de difusão e advecção, pelo solo usado como camada de cobertura, o que será melhor abordado e referenciado no item 2.10, onde serão apresentados assuntos sobre movimentação do biogás, volume gerado, caminhos preferenciais, composição e mecanismos de transporte do biogás.

No caso de aterros sanitários, após a execução de todos os mecanismos descritos acima, pode-se depositar o RSU, conforme a NBR-8419/84, que determina também um recobrimento diário do lixo (camada de cobertura).

#### **2.4.5 Camada de Cobertura**

Na maioria dos aterros brasileiros, a camada de cobertura ou de fechamento, é executada diretamente sobre o resíduo. É um importante recurso de engenharia para o fechamento e isolamento do resíduo depositado no aterro, pois alcança o objetivo de diminuir a quantidade de emissões de gases para a atmosfera, diminuir a penetração de água da chuva para o interior do resíduo o que aumentaria significativamente a quantidade de lixiviado

produzido, e conseqüentemente uma maior contaminação de solos e águas subterrâneas no entorno, além de impedir o aparecimento de vetores nocivos à comunidade que reside no entorno do aterro.

A aplicação da camada de cobertura é importante para prever também o comportamento geotécnico, biológico e da própria operação do aterro.

No solo utilizado para cobertura podem ocorrer os fenômenos de contração que permitem a “fuga” de biogás, provocando a contaminação atmosférica.

A camada de cobertura também influencia na decomposição do resíduo: para aterros “aeróbios”, quando se deseja que o oxigênio do ar penetre para o interior da massa de resíduo, a camada deve ser permeável, a fim de permitir a percolação do ar atmosférico para dentro da massa do aterro. Esta técnica normalmente é usada em pequenos aterros. Outro caso é o uso de camada para aterros “anaeróbios”, normalmente usada para grandes aterros, nos quais há predominância de degradação anaeróbia. Sua função é de impedir a entrada de oxigênio para o interior do aterro, alterando o ambiente interno o que afeta a ação dos microorganismos que produzem o biogás e eleva a produção de lixiviado.

Este trabalho visa prever o comportamento da geração do biogás, somente em aterros “anaeróbios”.

As soluções para o fechamento de aterros sanitários variam conforme a especificação do projeto: solo compactado em camada homogênea; solo compactado acompanhado de diferentes geossintéticos; diferentes tipos de solos em graduações variadas e solo preparado com argilominerais que apresentam propriedades tixotrópicas (capacidade de expansão e contração conforme o teor de umidade).

No Brasil é predominante o uso de solo disposto em camada homogênea compactada. Usa-se também uma camada homogênea sobre

outra mais delgada de maior granulometria, conforme encontrado em 1 ponto analisado para este trabalho no Aterro Metropolitano de Gramacho / RJ, e apresentado no capítulo a seguir.

Com grande apelo estratégico e ambiental, surgem os resíduos tratados em processos mecânico-biológicos (compostagem) utilizados para o cobrimento de resíduos depositados em aterros, o que levaria a minimizar a percolação oriunda da precipitação atmosférica para o interior da massa de resíduo através de barreira capilar, que consiste na sobreposição de duas camadas, sendo que a inferior composta por grãos maiores do que a camada superior. Esta diferença de granulometria proporciona uma quebra (descontinuidade) hidráulica, o que faz com que o líquido percolado, por capilaridade, se mantenha na camada de grãos mais finos, fazendo com que esta funcione como um dreno (IZZO *et al*, 2007). A utilização de resíduos orgânicos transformados em composto utilizados na cobertura de RSU auxilia também na redução de emissão de metano para a atmosfera, uma vez que podem ocorrer as reações oxidativas, através de bactérias metanotróficas, presentes no composto colocado na cobertura. O resultado será a transformação do metano em gás carbônico e água (ROSE, 2007).

As principais razões para a procura de materiais alternativos é a possibilidade de melhorar aspectos geotécnicos de estabilidade, reduzir o material depositado no aterro, reduzir a quantidade de solo removido de seu local de origem e reduzir as emissões de gases pela cobertura do aterro, minorando impactos ambientais.

#### **2.4.5.1 Camada de Cobertura para Aterros Anaeróbios:**

Como recurso de engenharia, a camada de cobertura de aterros deve atender a requisitos necessários para o bom encapsulamento dos resíduos.

Para o caso dos aterros anaeróbios, a camada de cobertura deverá:

#### **a) Impedir a entrada do ar:**

As bactérias metanogênicas que produzem o metano são essencialmente anaeróbias, portanto, quanto menor for a presença de oxigênio no interior do aterro, maior será o rendimento metanogênico, caso contrário, a geração de CO<sub>2</sub> será maior que a do metano.

Ao ser produzido no corpo do aterro, o metano quando não captado por algum sistema de sucção forçada ou drenagem natural, tende por diferenças de concentração e/ou de pressão atingir a superfície externa passando pela camada de cobertura. A camada de cobertura, constituída de material poroso, possui microorganismos do grupo bacteriano metanotrófico. Este grupo de bactérias utiliza o gás metano como principal fonte de nutrientes. Quando se dá a percolação ascendente de metano através desta camada, estas bactérias utilizam o gás metano e liberam posteriormente, o gás carbônico e água.

#### **b) Impedir a entrada da água:**

O excesso de água no corpo do aterro, proveniente de altos índices pluviométricos, devido a uma má qualidade da camada de cobertura, influenciando a ação metanogênica, aumentando a produção de lixiviado.

#### **c) Impedir o aparecimento de vetores biológicos**

Caso a operação de cobertura não seja executada adequadamente, o depósito de RSU poderá se tornar um foco para a proliferação de vetores nocivos à saúde da população (REAL, 2005).

### **2.5 Produção e Composição do Biogás**

O biogás é uma mistura de espécies gasosas gerada pela volatilização de compostos químicos e pela digestão anaeróbia, ou seja, biodegradação exotérmica da matéria orgânica, devido a ação de bactérias, e em menor escala, de fungos e protozoários na ausência de oxigênio. Esse é um processo que ocorre em pântanos, mangues, lagos e rios, e é uma parte importante e natural do ciclo biogeoquímico do carbono. Dentre as espécies gasosas que compõem o biogás, a mais importante, segundo uma visão ambiental e comercial, é o gás metano. O biogás também apresenta uma parcela

representativa de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e em menor escala o oxigênio, ácido sulfídrico, amônia (NH<sub>3</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>), dentre outros gases traços (menores concentrações).

No Brasil cerca de 5 a 10% do total de gases nocivos presentes na atmosfera são oriundos de aterros sanitários, aterros controlados e lixões (REAL, 2005). Isso ocorre devido ao fato que nestas fontes produtoras de gases, o RSU quase sempre é depositado em condições inadequadas, ou em locais não estrategicamente escolhidos sem os devidos critérios de engenharia capazes de reduzir ou evitar não somente esta emissão, como também proteger a saúde de toda a população residente no entorno, prejudicando as condições de vida destas pessoas (REAL, 2005).

Em relação à poluição atmosférica, os efeitos provocados pela liberação destes gases (biogás), podem afetar regiões circunvizinhas, provocando diversas doenças, devido a inalação de gases tóxicos e em escala bem mais ampla, o gás metano e o dióxido de carbono por serem retentores de calor, contribuem efetivamente para o aquecimento global.

Quando a digestão anaeróbia ocorre em aterros sanitários ou em células especialmente planejadas (cavas), como pode ser o caso de biodigestores construídos ou adaptados para captação de metano (KAIMOTO *et al*, 2006), o biogás produzido pode ser usado como combustível, devido ao poder calorífico, tornando-se opção para o aproveitamento do lixo orgânico.

TCHOBANOGLUS *et al* (1994), apresenta na tabela 2.2 a composição das principais espécies gasosas presentes no RSUs e suas variáveis:

Tabela 2.2: Composição Típica do Biogás, TCHOBANOGLUS *et al* (1994).

<u>Gases</u>	<u>Porcentagem (%)</u>
<u>Metano</u>	<u>45 – 70%</u>
<u>Dióxido de carbono</u>	<u>40 – 60%</u>
<u>Nitrogênio</u>	<u>2 – 5%</u>
<u>Oxigênio</u>	<u>0,1 – 1,0%</u>
<u>Amônia</u>	<u>0,1 – 1,0%</u>
<u>Enxofre</u>	<u>0,1 – 1,0%</u>
<u>Hidrogênio</u>	<u>0 – 1%</u>
<u>Monóxido de Carbono</u>	<u>0 – 0,2%</u>
<u>Gases traços</u>	<u>0,01 – 0,6%</u>

Conforme algumas medições em poços de aterros brasileiros, os valores de metano podem superar aos 70% (REAL, 2005 e FILHO, 2005).

## **2.6 Fatores que influenciam na produção e composição do biogás**

O potencial de produção de biogás está relacionado diretamente com a fração orgânica presente no lixo, porém outros fatores têm influência significativa na composição e produção do biogás: geometria de operação do aterro, características dos resíduos, ambiente interno, ambiente externo (MACIEL, 2003).

### **2.6.1 Geometria e operação do aterro**

A compactação dos resíduos também é fator importante, pois quanto maior for a densidade alcançada, maior será a produção de biogás por unidade de volume. Além disso, a compactação auxilia no processo anaeróbio.

### **2.6.2 Composição Gravimétrica dos RSUs**

A maioria dos RSU é biodegradável. No Brasil a quantidade de matéria orgânica chega a 67% em Belo Horizonte/ MG, Salvador/ BA 60%, Brasília/DF 49% (MANASSERO *et. al.*, 1996, e BORGATTO, 2006) e no Rio de Janeiro em 2005, 60,74 % segundo BORGATTO (2006), o restante do lixo consiste em

materiais inertes como cinzas, metais, plásticos, tecidos, madeiras, vidros, resíduos da construção civil, dentre outros. Esta quantidade de material orgânico afeta diretamente o potencial de produção de biogás.

A composição do material orgânico presente no lixo pode influenciar nesta produção do biogás. Alguns compostos ricos em carbono, como por exemplo os que contém celulose, sofrem ação rápida dos microorganismos, por outro lado os compostos ricos em lignina (componente do papel de jornal), por exemplo, são degradados mais lentamente.

Segundo HAANDEL (1994), a produção do biogás é acelerada com o aumento de nutrientes de origem orgânica como a relação entre o carbono, nitrogênio e sais orgânicos. Uma combinação ideal de carbono: nitrogênio (C:N) deve ser mantida entre 20:1 a 30:1.

A principal fonte de carbono são os restos de culturas vegetais. O principal fornecedor de nitrogênio é parte dos resíduos alimentares e de origem animal, dentre outros. A produção de biogás não é bem sucedida se apenas uma destas fontes de nutrientes for utilizada.

Um aterro sanitário é um depósito de materiais diversos. A quantidade de material orgânico presente no lixo irá conseqüentemente determinar o potencial de produção de biogás.

### **2.6.3 Aspectos do ambiente interno do aterro.**

Algumas características físicas e químicas dos resíduos podem favorecer ou inibir a atividade dos microorganismos. Dentre elas:

a) Umidade – A presença de líquidos no interior do aterro pode prejudicar ou ser fator importante na produção do biogás. Tanto o excesso, como a ausência, prejudica as reações metanogênicas. O intervalo ideal para a uma maior eficiência para na produção de biogás é de 20 a 40% no resíduo (JUCÁ *et al.*, 1999).

Esta umidade no interior do aterro depende de diversos fatores: impermeabilização do solo usado na camada de cobertura, pluviosidade da região, umidade natural do resíduo, prática, ou não, de sistema de recirculação de lixiviado.

b) pH – Varia conforme a idade e tipo de resíduo depositado. Uma maior eficiência na produção de metano ocorre quando o pH é neutro (QIAN *et al.*, 2002).

c) Temperatura – Os microorganismos aumentam seu rendimento quando a temperatura está entre 35 e 45°C. Temperaturas fora desta faixa observada podem matar os organismos metanogênicos (QIAN *et al.*, 2002).

d) Agentes inibidores presentes nos resíduos – A presença de metais pesados (Cu, Zn, Ni e Cr) e ácidos em altas concentrações (Na>5500mg/l e Ca>4500mg/l - QIAN *et al.*, 2002), prejudicam na produção de metano.

#### **2.6.4 Aspectos do ambiente externo**

As mudanças de alguns condicionantes atmosféricos provocam alterações expressivas no potencial de produção do biogás no interior do aterro. Um dos condicionantes mais importantes é a pressão atmosférica. Esta varia conforme o deslocamento das massas de ar, e num mesmo dia pode estar positiva (alta pressão - valor acima de 1016 milibar) ou negativa (baixa pressão - valor abaixo de 1016 milibar). Isto influencia no mecanismo físico de advecção, assunto a ser abordado no item 2.9, no qual estima-se que o fluxo de gás se desloca de região de maior pressão para região de menor pressão. Neste caso, quando a alta pressão atmosférica é elevada, tem-se percolação gasosa para o interior do solo. É importante notar que o gás oxigênio presente na atmosfera é encaminhado para o interior do aterro, uma vez que a permeabilidade aos gases do solo de cobertura (em geral não saturado) é elevada. A condição oposta na pressão atmosférica tende a aumentar o fluxo ascendente.

Outro aspecto importante, segundo JUCÁ *et. al* (1999), é a temperatura externa superficial (temperatura atmosférica). Este autor afirma que para climas tropicais, a variação da temperatura atmosférica externa somente poderá afetar os 2,5m iniciais do aterro. Considera-se, então, que os valores no interior da massa do aterro, inferiores a 2,5m, não são influenciados pela temperatura externa.

## 2.7 Fases na Produção de Biogás

A influência do fator tempo de cobrimento do RSU, determina as fases de decomposição do material orgânico, conforme demonstrado na figura 2.9:

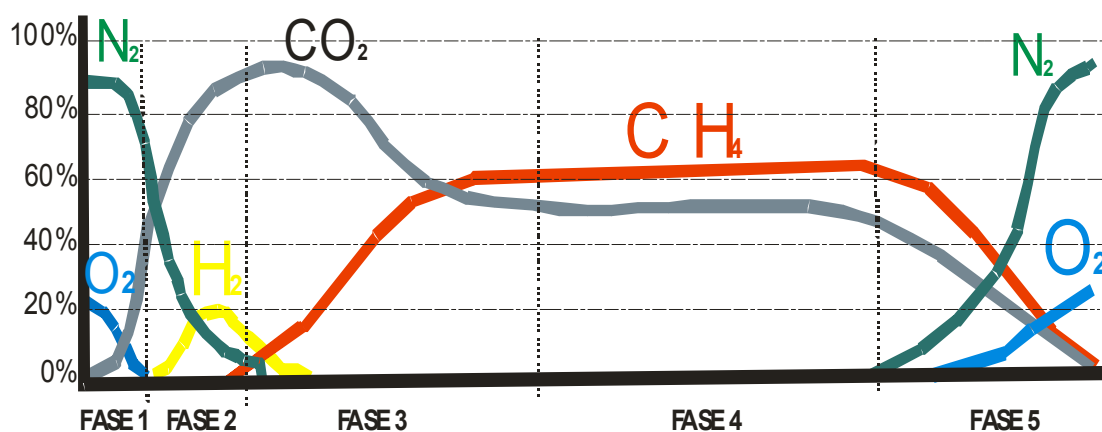


Figura 2.10: Diferentes fases na produção de gases em aterros sanitários. A abscissa do gráfico refere-se ao tempo e a ordenada a concentração da espécie gasosa (TCHOBANOGLIOUS *et al.*,1994).

VEEKEN *et al.*(2000) comenta que o processo de digestão de matéria orgânica do resíduo é dividido resumidamente em 5 fases distintas (figura 2.11):

**Fase 1:** Hidrólise

**Fase 2:** Transição

**Fase 3:** Acidogênese

**Fase 4:** Metanogênese

**Fase 5:** Maturação

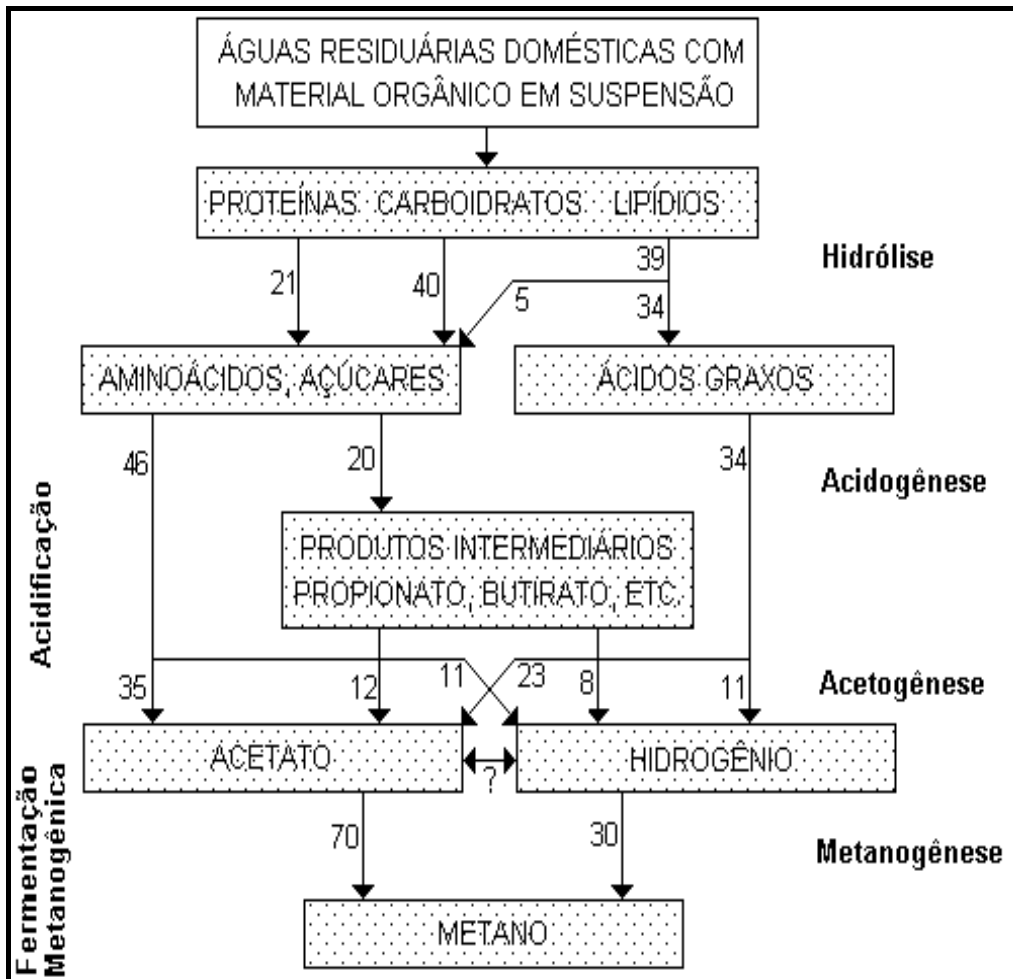


Figura 2.11: Fases na produção de biogás e respectivos % de contribuição de cada componente (VEEKEN *et al.*,2000).

### FASE 1) Hidrólise – Decomposição aeróbia:

Inicia-se no momento da disposição do resíduo até cerca de 7 dias do término dos serviços de cobertura, quando ainda há algum oxigênio livre no interior do aterro recém fechado. A matéria orgânica é convertida em moléculas menores pela ação de bactérias hidrolíticas. A matéria orgânica original é solubilizada por enzimas produzidas por microorganismos hidrolíticos. Este processo pode durar alguns anos, pois depende do ingresso do oxigênio pela camada de cobertura.

O pH inicial do lixo é aproximadamente 7 e decresce a medida que a decomposição aumenta.

Nesta primeira fase ocorre o início de liberação de CO<sub>2</sub>.

## **FASE 2) Transição:**

Fase de estabilização, iniciando fase anaeróbia. Nesta fase, o pH do lixiviado continua a decrescer, devido a conversão do material orgânico em ácidos orgânicos. Acentua-se a formação de CO<sub>2</sub>.

## **FASE 3) Acidogênese:**

O produto da fase anterior é agora convertido em ácido acético, H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. Bactérias acetogênicas agem simultaneamente com o início da atuação metanogênica. BARLAZ *et al* (1989) salienta que ao fim desta fase ocorre o início da formação de metano.

## **FASE 4) Metanogênese:**

Nesta etapa da produção do biogás é que ocorre a formação de metano. É a fase mais longa. Inicia-se aproximadamente após o fechamento e pode manter-se constante durante mais de quarenta anos, quando inicia a queda acentuada na produção de gás metano e CO<sub>2</sub>.

As bactérias metanogênicas, as que produzem o metano, transformam o hidrogênio, o dióxido de carbono e o ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) em metano, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e NH<sub>3</sub>, estas reações são exotérmicas e podem chegar a temperaturas de 70°C.

Com a queda da população de bactérias acidogênicas há a queda na temperatura, na presença de ácidos, levando o pH voltar a neutralidade.

## **FASE 5) Maturação:**

Nesta fase ocorre uma tendência de encerramento da produção de gás metano e CO<sub>2</sub>, iniciando a produção de gás nitrogênio.

Quando o pH é maior do que 7 pode-se dizer que a matéria orgânica está em processo final de degradação e conseqüentemente há evidente redução na produção de metano.

Em um processo de digestão anaeróbia bem balanceado, todos os produtos da etapa metabólica anterior são convertidos para a etapa seguinte.

Uma vez que a produção de biogás é toda feita por microorganismos, qualquer fator que afete a atividade dos mesmos, estará afetando diretamente a formação do biogás.

## **2.8 Determinação do potencial de produção de biogás em aterros sanitários**

A produção de biogás produzido em um aterro sanitário pode ser prevista por modelos numéricos, intuitivos e reduzidos.

### **a) Modelos Reduzidos**

Consiste de uma célula fechada construída no campo, a qual servirá para representar as condições do aterro, para posterior análises do biogás. O cálculo do total da emissão é baseado na quantidade de gás produzido pelo volume de lixo utilizado.

### **b) Métodos intuitivos**

Para estimar o volume de metano que é emitido em aterros, é comum adotar parâmetros pré-definidos. Sabe-se que este recurso pode tornar o cálculo bastante impreciso devido à sazonalidade climática, ao conteúdo de matéria orgânica, tipo de resíduo disposto, operação do aterro, dentre outras, ou seja, a imprecisão decorre a má adoção de parâmetros.

### **c) Modelos numéricos para o cálculo da geração do gás**

Segundo BORBA (2006), dentre os mais utilizados modelos numéricos para se estimar o potencial de produção de gás destacam-se:

- Modelos de estimativa de tempo discreto, proposto nas diretrizes do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006)

O IPCC apresenta 2 modelos para estimar as emissões de metano procedentes de RSU: o método simplificado, que tem

como base a suposição da média total de metano liberado durante um período, em um modelo que gera um perfil de emissões que dependem do tempo transcorrido após fechamento, refletindo mais detalhadamente as fases do processo de degradação.

- Metodologia de Cálculo da EPA (US Environmental Protection Agency)

A US EPA apresenta duas metodologias para calcular os gases emitidos de degradação de RSU dependendo do tipo de exposição: a primeira para deposição sem controle, ou seja, lixões e a segunda, para disposição de RSU controladas em aterros sanitários.

- Metodologia utilizada pelo Banco Mundial – Scholl Canyon (2003)

O Banco mundial apresenta uma metodologia para o cálculo de gás gerado por RSU para projetos na América Latina e Caribe. Este modelo apresenta uma equação de primeira ordem, que leva em consideração valores pré-definidos de degradação constante no material biodegradável, por unidade de tempo.

- Metodologia de modelagem empregando o MODUELO (2002)

MODUELO é um programa para simulação dinâmica de situações reais em aterros de RSU – Elaborado pelo Grupo de Engenharia Ambiental da universidade de Cantabria/ Espanha. Este modelo baseia-se numa representação tridimensional do aterro, em células sobre as quais se desenvolve o histórico do lixo. O resultado apresenta o volume e concentração do lixiviado e do biogás gerado diariamente.

## **2.9 Movimento dos gases no aterro de RSU**

O transporte de massa do solo de cobertura de um aterro envolve o meio poroso (o próprio solo), os gases metano, dióxido de carbono, oxigênio e ácido sulfídrico e a água que irá determinar a condição de saturação do solo.

Os mecanismos que regem o transporte de gás no solo de aterros são: advecção e difusão (IGNATIUS,1999 e XU *et al*, 1992,).

Para o caso de aterros de RSU, além de gradientes de concentração de gases presentes na massa do aterro, que provoca uma percolação das espécies gasosas por difusão, há também uma parcela atuante no transporte de gases, devido às diferentes pressões totais entre o meio interno e o atmosférico, denominada advecção. Desta forma pode-se estudar um transporte de gases em solos de cobertura como transporte advectivo-difusivo. No processo de advecção, a frente de contaminação formada avança com a mesma velocidade do fluido percolante, sem alterar a sua concentração da espécie gasosa.

Quando no processo de transporte ocorre um movimento natural de íons e/ou moléculas em solução, o mecanismo é a difusão, resultando modificação dos gradientes de concentração existentes entre as regiões afetadas.

Esta relação varia consideravelmente, segundo ELSBURY *et al*, (1990), conforme algumas características: tipo de solo, permeabilidade, compactação dos resíduos no estágio da construção, umidade e saturação, contração da cobertura, granulometria, espessura da camada de cobertura, temperatura interna e externa e pressão atmosférica.

### **2.9.1 Movimento devido ao fluxo difusivo**

É a forma mais importante de transporte de massa gasosa por solos não arenosos, como é o caso de cobertura de aterros XU *et al* (1992), KUO & RITCHIE (1999) ,WEERTS *et al*. (2000) E MENDONÇA, 2007).

Quando o gradiente de pressão entre diferentes regiões (interna – interna ou interna - atmosfera) for nulo, a difusão prevalece em relação à advecção. O fluxo difusivo será anulado quando a concentração do gás se tornar equivalente entre os diferentes meios (MACIEL, 2003).

Esta movimentação de massa baseia-se principalmente no gradiente de concentração gasosa entre diferentes locais em uma pilha de RSU. Se no solo utilizado para cobertura estuda-se, por exemplo, uma superfície AA (figura 2.12) localizada em uma determinada profundidade, onde a pressão do gás é igual na face inferior e superior desta superfície, e há uma maior concentração de moléculas de um determinado gás na parte inferior da região, logo a tendência será de um fluxo ascendente das moléculas, movimentando-se da região de maior concentração para a de menor concentração, equilibrando o processo. Então, se a concentração total de uma espécie química gasosa for maior no interior da massa do aterro, a tendência será a saída desta espécie para a atmosfera.

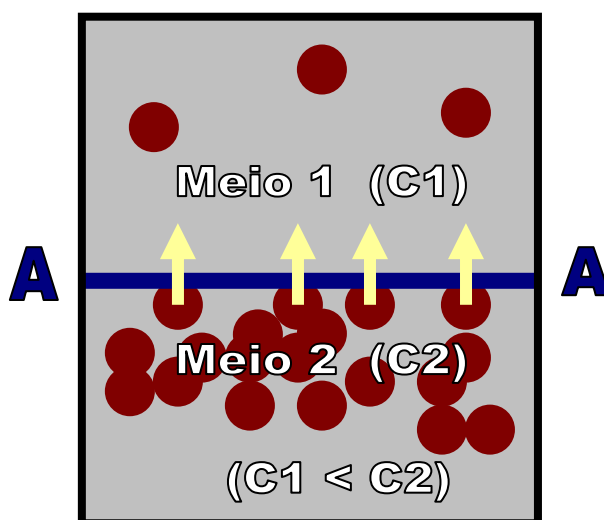


Figura 2.12: Representação de fluxo difusivo.

A atmosfera logo acima do solo apresenta uma regularidade de gases: 79% de Nitrogênio, 21% de Oxigênio, 0,03% de Gás Carbônico, dentre outros em menor concentração (BRADY,1989). Um aterro de RSU gera aproximadamente 60% de metano, 30% gás carbônico, dentre outros gases em

menor escala. Portanto, o processo difusivo de metano e gás carbônico, neste caso, evidencia a migração gasosa para o exterior do aterro, pois estes gases produzidos por processos internos no RSU estão em maior concentração no interior do aterro do que na atmosfera, ainda que a pressão interna sob solo, seja igual à pressão atmosférica. Desta mesma forma os gases oxigênio e o nitrogênio, tendem a migrar para o interior da massa do aterro.

Essa difusão por diferença de concentração também é chamada de difusão ordinária. Existem outros processos de transporte difusivo, que não serão enfocados neste trabalho, como a difusão térmica, provocada por gradientes de temperatura e da difusão forçada, provocada por gradientes de forças externas aplicadas, como campos elétricos, por exemplo (IGNATIUS, 1999).

A movimentação difusiva de gases e vapores em regiões não saturadas de solo é mais rápida que as de líquidos, dessa forma, a dispersão da contaminação por gases acontece com mais rapidez quando comparada com uma contaminação por líquido (IGNATIUS, 1999).

Em termos gerais, a difusão de qualquer substância na fase gasosa é muito mais significativa do que na fase líquida (o coeficiente de difusão na fase gasosa é aproximadamente  $1 \times 10^4$  vezes maior do que o mesmo coeficiente na solução), portanto, a difusão na fase gasosa pode ser importante mesmo para substâncias que têm baixa pressão de vapor.

A espessura do solo utilizado como camada de cobertura de aterros influencia, também, no tempo de transporte dos gases. Quanto mais espessa for a camada de cobertura, mais lenta será a percolação do gás por difusão, maior será a possibilidade do gás ficar retido nos poros do solo, podendo ocorrer também uma retenção física, química ou biológica (ação de microorganismos metanotróficos).

Sabe-se também que, quanto maior a permeabilidade do solo, maior a capacidade dele permitir a difusão de massa gasosa ocorra pelos poros do

solo. Em solos saturados o gás pode ficar ocluso e o fluxo gasoso reduzir e passar a depender de sua dissolução na água, principalmente quando se trata de solos argilosos, o que provoca um grande retardamento nesta percolação, devido a presença dos líquidos (CAMPOS *et al*, 1999).

O aumento da temperatura acentua a difusão no solo devido ao aumento dos coeficientes de difusão em ambas as fases líquida e gasosa, assim como a taxa de variação da densidade de vapor em função da concentração. A temperatura afeta também a interação entre a substância e o solo, alterando da mesma forma o coeficiente de difusão. Este efeito pode ser explicado pela maior possibilidade do gás se solubilizar junto à parte líquida facilitando a dessorção da substância (CAMPOS *et al*, 1999).

Segundo TINDALL *et al*, 1999, e MENDONÇA, 2007, o fluxo mássico de gás é calculado usualmente pelas Leis de Fick. Nesta teoria, os efeitos paralelos são incorporados ao valor final do coeficiente de difusão, deixando certo grau de variabilidades. Porém, sabe-se atualmente que podem ocorrer simultaneamente 4 tipos de difusão para meios porosos:, Knudsen, não equimolar, de fluxo de superfície, Ordinária ou de Fick .

Quando o diâmetro das moléculas for igual, na média, ao diâmetro dos poros do solo ocorre a difusão Knudsen.

Outro tipo de difusão é a equimolar, baseada na movimentação de moléculas menos densas na direção das mais densas.

Finalmente a difusão de fluxo de superfície, a qual refere-se ao momento em que os gases atingem a superfície do solo e tendem a se difundir, sendo adsorvida pelo gradiente de concentração atmosférico.

A difusão proporcionada pela interação entre moléculas menores que os poros do solo, é regida pela Lei de Fick, sendo a mais intensa e a mais estudada.

### 2.9.1.1 Lei de Fick

Os processos que envolvem o transporte de contaminantes em meios porosos podem ser representados matematicamente através de equações diferenciais desenvolvidas com base na conservação da massa da substância percolante. A Lei de Fick é usualmente empregada para movimentos de líquidos (dissolvidos na água).

A análise da variação da concentração da substância é feita considerando-se o fluxo de massa do soluto através de um volume elementar de solo.

A equação do transporte é obtida, então, a partir do balanço de massa, conforme representado nas figuras 2.13 e 2.14.



Figura 2.13: Balanço de massa no solo.

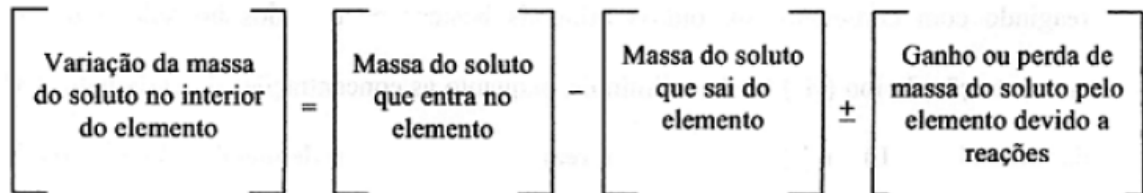


Figura 2.14: Lei da conservação de massa para a amostra de solo

O fluxo mássico de uma espécie gasosa pode ser dado pela Primeira Lei de Fick:

$$\Delta = -D \cdot C \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

$\Delta$  é o fluxo de uma espécie gasosa ( $ML T^{-1}$ );

$D$  é o coeficiente de difusão da espécie química no meio ( $ML^{-2}T^{-1}$ );

$C$ , o gradiente de concentração igual a  $(\gamma_{C_i} / \gamma_x)$ , sendo  $C_i$  concentração do gás  $i$  no meio ( $ML^{-3}$ );  
 $x$  a profundidade do ponto estudado no solo ( $M$ ).

O sinal negativo indica que há fluxo no sentido da região de alta para região de baixa concentração.

A lei de Fick descreve a taxa de transferência de matéria por unidade de área de uma secção transversal ao fluxo.

Portanto:

$$F = - D (\gamma_{C_i} / \gamma_x) \quad (\text{Equação 2.2})$$

O termo  $F$  é portanto, o valor do fluxo gasoso unidimensional e proporcional ao gradiente de concentração  $(\gamma_{C_i} / \gamma_x)$ .

FETTER (1994) descreve a primeira Lei de Fick como sendo o fluxo de massa de um fluido sob condições que tendem ao equilíbrio.

O coeficiente de difusão calculado na equação 2.2 acima, obedece à primeira lei de Fick para o regime estacionário (TINDALL *et al* 1999, e MENDONÇA, 2007).

No caso de uma percolação gasosa em solo, a equação 2.2 poderá ser reescrita, levando-se em consideração o fator porosidade ( $\theta_{eq}$ ) do solo, relativo a parcela de fluxo de gás em poros preenchidos por ar (AUBERTIN *et al.*, 1999 e MENDONÇA, 2007).

$$F = - D \theta_{eq} (\gamma_{C_i} / \gamma_x) \quad (\text{Equação 2.3})$$

$$\text{Onde: } \theta_{eq} = \theta_a + H \theta_w, \quad (\text{Equação 2.4})$$

Sendo:

$\theta_{eq}$  = porosidade de ar equivalente ( $L^3.L^{-3}$ );

$\theta_a$  = teor de ar volumétrico;

$H$  = Constante de equilíbrio de Henry, sendo igual a 0,03 a 20°C.

De acordo com MACIEL (2003), através do coeficiente de difusão observa-se a facilidade ou a dificuldade do fluido atravessar o solo. Dessa forma pode-se concluir que quanto maior a permeabilidade do solo, maior a capacidade dele permitir que um fluxo difusivo de massa ocorra através de seus poros. Assim o coeficiente de difusão desse solo será maior quanto maior for a sua permeabilidade.

O fluxo difusivo também é proporcional ao gradiente de concentração. Quanto maior o gradiente de concentração, maior será a parcela de difusão em um transporte de gás.

Portanto, conclui-se que a difusão de gases no solo varia em função da característica física do solo, onde destacam-se a presença de argila; do arranjo dos grãos que refletem na porosidade e distribuição dos poros; tamanho dos poros, porosidade ocupada por líquidos intersticiais; contração, que se relaciona à presença de trincas; das propriedades químicas; propriedades físicas do gás (temperatura, viscosidade, gradiente de pressão); concentração da espécie gasosa entre regiões do solo e finalmente o consumo ou geração de gases por parte dos microorganismos presentes no solo.

### **2.9.2 Movimento devido ao fluxo advectivo**

É considerado como um movimento físico da massa gasosa, sendo impulsionado por diferenças de pressão total entre duas ou mais regiões distintas. (SEELY E HUNT, 1994 e MENDONÇA, 2007)

Uma variação do nível do lixiviado no fundo do aterro, fortes correntes de vento, nascentes de água sob o aterro, variação do nível das marés (caso o aterro for construído próximo ao mar), temperaturas externas, temperaturas

internas (reações exotérmicas), variação da pressão atmosférica e índice pluviométrico, podem interferir na pressão interna do gás em relação à pressão atmosférica, provocando o movimento ascendente ou descendente do biogás.

A magnitude do fluxo advectivo está associada à sua velocidade; características gravimétricas particulares do material que influem na permeabilidade; ou do meio físico que ele está sendo transportado (vazios preenchidos pelo ar ou líquidos), pois o gás pode dissolver-se em um líquido e ser transportado por ele. Portanto, para solos pouco permeáveis, sem caminhos preferenciais, este tipo de transporte pode ser desconsiderado. Para solos permeáveis, pode-se considerar que a taxa de infiltração é significativa para o cálculo de fluxo gasoso (MORIN et al, 1991 e MENDONÇA, 2007).

Então, considerar que:

$$F = C \cdot V_a \quad (\text{equação 2.5})$$

Onde:

$F$  = Fluxo da espécie química ( $ML^2T^{-1}$ )

$C$  = Concentração da espécie química por unidade de volume ( $ML^{-3}$ )

$V_a$  = Velocidade de advecção ( $LT^{-1}$ )

Duas são as diferenças entre o fluxo advectivo de gases e o fluxo advectivo de líquidos (IGNATIUS,1999): Primeiro a compressibilidade dos gases nem sempre é desprezível, fazendo com que a vazão seja, ou não, constante ao longo dos canais de fluxo, como é o caso dos líquidos. Segundo a velocidade de fluxo junto à parede dos poros conectados não pode ser zero, o que caracteriza um fluxo viscoso descrita pela Lei de Darcy. Esta segunda característica do fluxo gasoso é chamada de “*slip flow*” (deslizamento do fluxo junto as paredes). Isto faz com que a vazão gasosa real seja maior do que a prevista na Lei de Darcy. Este efeito irá influenciar diretamente o coeficiente de permeabilidade do meio poroso, e está relacionado com o comprimento livre médio dos poros conectados, caminhos pelos quais, se dará o deslocamento das moléculas de gás.

### **2.9.3 Gradientes de pressão**

Para estudos de fluxo de gases em aterros de RSU, deve-se levar em conta gradientes de pressão, que por advecção, interferem no sentido da movimentação de gases. Diz-se que o gradiente é positivo quando a pressão interna é maior do que a pressão atmosférica ( $P_{int} > P_{atm}$ ). O gradiente é nulo quando há a igualdade entre pressões ( $P_{int} = P_{atm}$ ) e negativo quando a pressão interna é menor do que a pressão atmosférica ( $P_{int} < P_{atm}$ ) (MACIEL, 2003).

#### **2.9.3.1 Pressão no interior da massa de RSU ( $P_{int}$ )**

Para este trabalho buscou-se na literatura, valores da pressão interna em aterros de RSU logo abaixo da camada de cobertura. JUCÁ (2006), menciona valores próximos a zero, medidos por dispositivos manométricos de precisão. Este valor pode chegar até 7,0kPa dependendo da profundidade e do tempo de disposição do resíduo (MACIEL, 2003).

#### **2.9.3.2 Pressão atmosférica ( $P_{atm}$ )**

A pressão atmosférica, por sua vez, varia conforme as condições meteorológicas e da altitude do local. Esta variação tem grande envolvimento na movimentação de gases no aterro e pode ser evidenciado no ensaio com placas de fluxo, como será apresentado no item 5.2.2 deste trabalho.

### **2.9.4 Mecanismos de retardamento da percolação gasosa**

Há dois principais mecanismos que interferem diretamente na percolação gasosa em aterros: a sorção e a ação microbiológica.

#### **a) Sorção**

Fenômeno químico que envolve a partição do gás através de reações químicas em outros sub-compostos. Serve para retardar o transporte de gases traços quando difundidos em meios porosos (LANG ET AL, 1989 *apud* MACIEL, 2003).

## **b) Ação microbiológica**

É um processo que atenua a percolação gasosa em meios porosos, como é o caso de aterro de RSU. Esta atenuação pode, conforme exposto no item 2.4.5.1, reduzir a quantidade de metano para a atmosfera.

### **2.10 Caminhos preferenciais**

Dentro do aterro, o biogás poderá ter movimentos em direções verticais ou horizontais, diferentes intensidades, variando conforme a composição do RSU, permeabilidade do RSU ( $k_{RSU}$ ), contração do solo de cobertura e variações de pressões atmosféricas e pressões internas .

Segundo LANG *et al* (1989) o caminho preferencial será aquele que oferecer menor resistência à passagem ao fluxo gasoso, que tenderá em sua grande parte movimentar-se para fora do aterro, devido, principalmente, aos fatores apresentados no item 2.9.2.

Pesquisas efetuadas comprovam uma similaridade na percolação do gás entre solos granulares e resíduos. Esta permeabilidade ( $k_{RSU}$ ) poderá ser modificada caso o percentual de material plástico presente no resíduo for elevado. Ocorrendo isto, o comportamento na percolação será mais aproximado ao comportamento da percolação em solos com maiores teores de argila (JUCA *et al*, 1999).

No interior do aterro a presença de plásticos ou outros materiais similares poderá levar o fluxo a ter movimentos horizontais, para posterior ascensão.

Outro fator relevante no que tange a determinação do fluxo gasoso por caminhos preferenciais em solos de cobertura, é o fenômeno de contração da argila que compõe o solo da camada de cobertura. Nas figuras 2.15 e 2.16 abaixo, são apresentadas possibilidades de caminhos preferenciais no solo de cobertura na região do ponto P1 (um dos locais escolhidos para realização de ensaios de campo, conforme item 3.1.2)



Figura 2.15 – A: Solo de Cobertura do aterro de Gramacho /RJ. Detalhes das trincas – contração da argila. Foto de 28 de agosto de 2007.



Figura 2.16: Camada de cobertura do aterro Metropolitano de Gramacho. Ponto P1. Foto feita em 28 de agosto de 2007.

Neste caso, a formação de fissuras (gretas de ressecamento) decorrentes do mecanismo de expansão e contração de argilominerais na fração argilosa presente nesta camada, pode formar os caminhos preferenciais de percolação gasosa ascendente ou descendente e entrada de água para o interior do aterro.

### **2.10.1 Fenômeno do ressecamento**

O fenômeno do ressecamento é típico de solos finos e consiste na contração do solo devido à perda d'água por meio da evaporação (superfície) e/ou drenagem (base). Esse processo ocorre em dois estágios: unidimensional, quando ocorre apenas contração vertical (recalque); e tridimensional, quando surgem descontinuidades no solo, chamadas trincas de ressecamento, e a redução de volume é resultado tanto de recalques quanto das contrações laterais livres. A incapacidade do solo em não suportar as tensões de tração existentes nessa fase é a responsável pela abertura das trincas. Devido à evaporação e/ou drenagem e a conseqüente contração do solo, surgem as trincas. A morfologia dessas trincas ou gretas de ressecamento é dependente da mineralogia (presença de argilominerais expansíveis) e das condições climáticas (calor, vento e umidade do ar).

As primeiras trincas formadas são chamadas primárias, com orientação paralela, e depois surgem as secundárias, que, por sua vez, são aproximadamente normais às primárias, e o conjunto forma colunas de solo com seções quadrangulares ou hexagonais na superfície.

A contração do solo devido à perda de água (*shrinkage*) é um dos fenômenos importantes do solo e ocorre em solos coesivos, como solo de cobertura de RSU. Os estágios em que esse processo ocorre são: normal, residual e zero (OLIVEIRA FILHO, 1998). Na fase de contração normal, a redução de volume é igual à perda de água. Na fase residual, a redução volumétrica é menor do que o volume de água perdido, surgindo ar nos vazios. A fase de contração zero ocorre quando as partículas do solo atingem sua configuração mais densa e não há mais redução volumétrica

## **2.11 Métodos para medição de fluxo de gás**

Os principais métodos para medir as emissões de gás que atravessam a camada de cobertura de aterros de RSU são: placa de fluxo dinâmico, placa de fluxo estático e análises por sistema infravermelho. Estes métodos têm o objetivo de avaliar a eficiência dos sistemas de fechamento destes aterros com relação ao fluxo de biogás.

A placa é uma câmara fechada, que restringe a passagem de ar liberado pelo solo para a atmosfera, de modo que as mudanças de concentração do gás dentro da câmara possam ser medidas. Para isso, amostras de ar do interior da câmara são coletadas em intervalos de tempo previamente determinados, sendo a variação na concentração dos gases quantificadas *in situ*, quando do uso de sistemas automatizados, ou posteriormente, no laboratório, por infravermelho ou cromatografia gasosa.

A partir da variação da concentração dos gases no tempo, estima-se o fluxo ou influxo de gases no sistema solo-atmosfera (HUTCHINSON *et. al.*, 1993; COSSU *et. al* 1997 e MACIEL, 2003).

### **2.11.1 Placas dinâmicas (abertas).**

Neste sistema, é mantido um fluxo contínuo de um gás inerte entrando na câmara, a fim de aumentar a pressão interna e com isso aumentar o fluxo na saída.

Com a leitura da concentração de saída atingindo uma diferença constante em relação à concentração do ar atmosférico, faz-se as leituras da composição do gás liberado, conforme o esquema gráfico na figura 2.17.

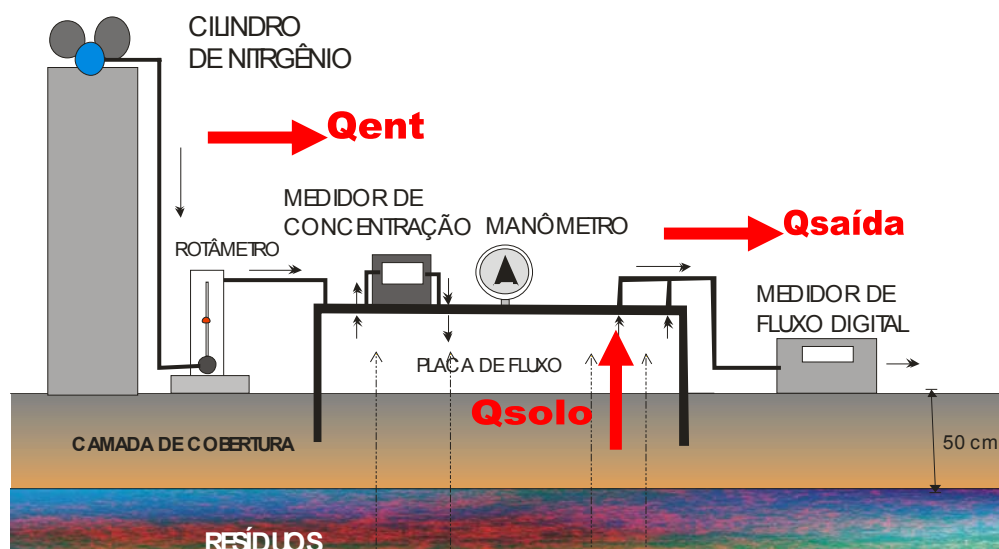


Figura 2.17: Esquema gráfico da placa de fluxo dinâmica.

Controla-se a vazão de entrada de um gás inerte com um rotâmetro de precisão, instalado na entrada do sistema ( $Q_{ent}$ ). Outro aparelho de precisão para leitura de fluxo é instalado para fazer a leitura na saída ( $Q_{saída}$ ). Sabendo-se o valor do fluxo na entrada e saída, tem-se o valor advindo do solo ( $Q_{solo}$ ):

$$Q_{solo} = Q_{saída} - Q_{ent} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Um medidor de concentração é instalado na placa para acompanhar as variações de concentração dos gases no interior da placa (figura 2.17).

FÉCIL *et. al.*, 2003 descreve detalhadamente o procedimento deste ensaio.

### 2.11.2 Placas estáticas (fechadas)

Nas câmaras fechadas não há renovação do ar, sendo contínuas as mudanças de concentração do gás no ambiente interno (MATTHIAS *et al.*, 1980; DENMEAD *et. al.*, 1993 e MACIEL, 2003), conforme figuras 2.18 e 2.19.

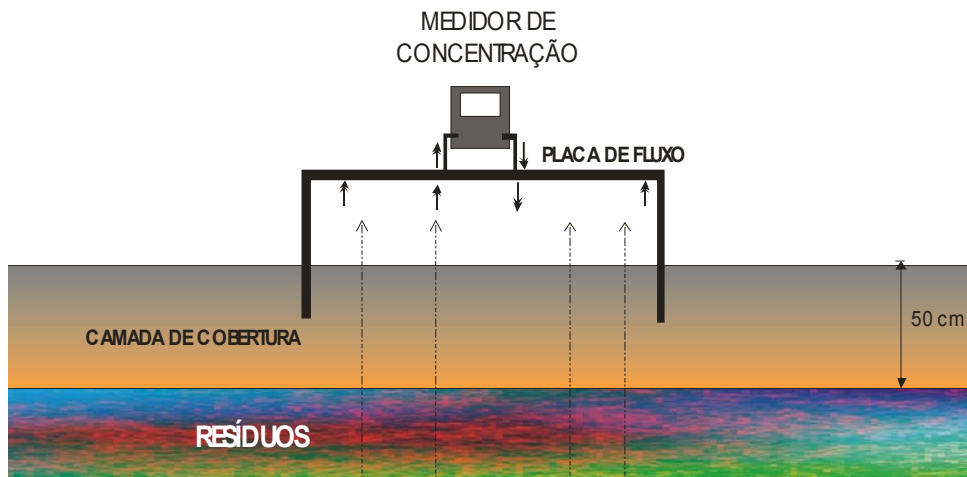


Figura 2.18: Ilustração esquemática da placa de fluxo estática.

Após sua instalação no solo, executa-se a leitura no medidor de concentração em intervalos de tempo determinados (normalmente de 10 em 10 minutos), até que haja uma estabilização nas leituras. Deve-se ter cuidado para que a temperatura interna não seja afetada pelo aprisionamento do calor, por isso o ensaio deve ser feito mantendo a placa à sombra.



Figura 2.19: Placa de fluxo estática (MACIEL, 2003).

O fluxo de gás, ou taxa de emissão superficial, determinada pelo método estático, pode ser calculada através da seguinte expressão (CZEPIEL *et.al.*, 1996):

$$J = (V_p \times \rho_{gás}) / A \times \Delta C / \Delta t \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde:

$J$  = fluxo de massa ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );

$\rho_{\text{gás}}$  = densidade do gás à determinada temperatura ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$V_p$  = volume do ar no interior da placa ( $\text{m}^3$ );

$A$  = área do solo coberto com a placa ( $\text{m}^2$ );

$\Delta C / \Delta t$  = Variação da concentração do gás (% volume) com o tempo.

A utilização de câmaras estáticas é mais comum e mais simples, de menor custo, sendo a mais indicada quando se necessita de uma série de leituras em menor tempo (COSSU *et al.* 1997). Contudo as alterações promovidas por elas no micro-ambiente a partir de sua instalação, devem ser consideradas para a adequada interpretação dos resultados (DENMEAD, 1993). As prováveis causas de erros nas estimativas de fluxo com a utilização de câmaras fechadas são as perturbações físicas no ambiente, das quais se destacam as variações na temperatura, pressão e concentração dos gases dentro da câmara e modificações na estrutura do solo. Em adição, COSTA *et al.* (2005), destaca que o manuseio, a análise das amostras, aplicação de métodos inadequados para o cálculo do fluxo, e erros humanos de amostragem se feitos por diferentes pessoas prejudicam os resultados.

As dimensões e o material de construção das câmaras utilizadas para coleta das amostras de ar liberado do solo não são padronizados (FAO, 2001). Todavia, é de senso geral que elas devem ser fabricadas com materiais que não sofram degradação no campo, que apresentem bom isolamento térmico e que causem o mínimo possível de perturbações no local de instalação. Um material freqüentemente utilizado na construção de câmaras é o cloreto de polivinil (PVC), devido ao seu baixo custo de aquisição em relação a outros materiais, facilidade de trabalho na construção das câmaras, coloração branca (menor aquecimento), além da sua adequada durabilidade no campo. Também o acrílico é usado para este fim.

Embora as câmaras apresentem certas limitações relacionadas à alteração da condição natural entre o solo e a atmosfera, são ferramentas de

fácil construção e podem ser utilizadas em diferentes condições de local e clima. Conforme o equipamento disponibilizado, permitem-se ainda a detecção de fluxos de baixa magnitude que proporcionam informações sobre a variabilidade espacial das emissões.

A área de solo sob as câmaras utilizadas atualmente é geralmente inferior a 1m<sup>2</sup> (MATTHIAS *et al.*, 1980; DENMEAD *et al.*, 1993; COSSU *et al.*, 1997). Câmaras maiores tornariam mais representativas as estimativas dos fluxos, entretanto, podem ocasionar problemas de operacionalidade, além de serem de custo de construção elevado e grande disponibilidade de tempo para o ensaio.

Diversos autores como ROLSTON (1986), COSSU *et al.* (1997), FÉCIL *et al.* (2003), SMITH (2003), MATTHIAS *et al.*(1980), DENMEAD (1993) e MACIEL (2003), apresentam estudos com placas de fluxo de diferentes dimensões, diferentes formas (circular ou retangular), diversas alturas, saídas e dispositivos, permitindo afirmar que não existe um consenso no meio científico sobre a forma e o tamanho ideal das mesmas (MACIEL, 2003).

As amostras do ar incubado em câmaras fechadas podem ser coletadas manualmente, utilizando-se seringa. Muitos trabalhos são realizados utilizando a seringa para armazenamento da amostra até a realização da análise em laboratório. Neste caso, é importante que o material da seringa seja impermeável ao gás a ser analisado.

### **2.11.3 Analisadores de infravermelho**

O princípio da quantificação utilizando detectores de infravermelho é baseada na capacidade que os gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O possuem de absorver a radiação eletromagnética na faixa do infravermelho.

Trabalhos recentes mostram a possibilidade da utilização de espectrômetros de Infravermelho por Transformada de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FTIR) para quantificação dos gases de efeito estufa - GEE (GRIFFITH, 2000; GRIFFITH *et al.*, 2002; HEDGE *et al.*,

2003). A quantificação dos gases por analisadores de infravermelho é obtida relacionando a concentração com os valores da absorvância nos seguintes comprimentos de onda: 2239 e 2393  $\text{cm}^{-1}$  para o  $\text{CO}_2$ , 2999  $\text{cm}^{-1}$  para o  $\text{CH}_4$  e entre 2214 a 2236  $\text{cm}^{-1}$  para o  $\text{N}_2\text{O}$  (HEGDE et al., 2003).

A quantificação dos GEE em amostras de ar por infravermelho pode ser realizada em laboratório, utilizando aparelho de bancada, ou ainda *in situ* (HEDGE et al., 2003). Para o caso de ser realizada a quantificação em laboratório, a amostragem é realizada empregando o método da câmara fechada, conforme descrito anteriormente. Segundo GRIFFITH (2000), a utilização do infravermelho para quantificação é uma técnica muito prática para as estimativas de fluxos dos GEE, pois é possível quantificar os três gases em uma única amostragem. Devido à alta precisão analítica e sensibilidade exigidas para os gases  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ , o que requer o desenvolvimento de aparelhos mais estáveis e com melhor controle de pressão e temperatura, o emprego mais comum de detectores de infravermelho é para quantificação do fluxo de metano e  $\text{CO}_2$ .

Uma das principais características e vantagens quando do analisador automático é quanto a sua aquisição de dados. As medidas de concentração de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  emitido pelo solo são obtidas *in situ*, em frações de segundos, originando um contínuo monitoramento do aumento da concentração deste gás. Desta maneira, é possível obter um bom ajuste de regressão entre as variáveis concentração e tempo, resultando em uma avaliação de fluxo bastante precisa e adequada para avaliações em curtos períodos de tempo (DAVIDSON et al., 2002).

# Capítulo **3** – MATERIAIS E MÉTODOS

## 3.1 Localização, pontos e materiais estudados

O local escolhido para realização deste trabalho foi o Aterro Metropolitano de Gramacho, devido a sua importância para diversas cidades, pois é o maior receptor de RSUs do Estado do Rio de Janeiro.

Recentemente foi autorizado pela COMLURB (Companhia Municipal de Limpeza Urbana) a realização de diversas pesquisas do Grupo de Tratamento de Resíduos (GETRES) da COPPE/ UFRJ, em virtude de um convênio (Nº15564/07), firmado entre a COPPE e a COMLURB. Neste capítulo também são apresentadas a análise do solo de cobertura e o acompanhamento meteorológico do local.

### 3.1.1 Histórico do Aterro

O Aterro Metropolitano de Gramacho está localizado no município de Duque de Caxias, Estado do Rio de Janeiro, às margens da Baía de Guanabara, junto ao estuário dos rios Sarapuí e Iguaçú.



**Figura 3.1:** Localização do aterro. Foto Google Earth (2007).

São observadas nas figuras 3.1 e 3.2 visões globais da Baía de Guanabara e a localização do Aterro de Gramacho em relação às cidades de Duque de Caxias e Rio de Janeiro.



**Figura 3.2:** Vista do Aterro de Gramacho em relação a Baía de Guanabara e estuário do rio Iguaçu e Sarapuí. Foto Google Earth (2007).

O aterro de Gramacho entrou em operação no ano de 1978. Embora houvesse um projeto para construção e operação (Cordeiro, 1979 *apud* Barbosa, 1994), este nunca foi seguido. Os resíduos eram depositados diretamente sobre o solo, sem maiores preocupações ambientais, operacionais ou quanto à segurança, o que caracteriza uma forma inadequada de disposição de RSU (lixão).

Posteriormente em 1991, devido à pressões da sociedade e da FEEMA (Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente), órgão responsável pela

fiscalização ambiental do Governo do Estado do Rio de Janeiro, foi assinado um convênio entre a COPPE/UFRJ e a COMLURB, para estudar soluções para o aterro, elaborando projeto completo de operação e recuperação da área, incluindo inclinações de talude, drenagens de percolado e de gases, altura máxima e vida útil provável do aterro, tendo em vista as precárias condições de suporte do solo de fundação. Este projeto está relatado no Relatório COPPETEC ET-150470, de novembro de 1992 e também em EHRlich *et al.* (1994) *apud* BARBOSA (1994). Posteriormente em 1995 (COMLURB, 2007), iniciou-se a obra para recuperação da área, gerenciada pela Prefeitura do Rio de Janeiro (COMLURB).



**Figura 3.3:** Aterro de Gramacho antes do processo de recuperação de 1995. (Painel exposto no Auditório da COMLURB em Gramacho, 2007).

Antes considerado como ponto crítico ambiental, o aterro pode ser classificado hoje como aterro controlado, devido aos esforços e investimentos da prefeitura carioca, através da COMLURB, que providenciou uma recuperação ambiental da área de entorno com o replantio de 110 hectares de manguezal, criando condições naturais para o restabelecimento da fauna e flora originais, tratamento de parte significativa do lixiviado, através da

construção de um sistema de drenagem e tratamento do lixiviado, valas em todo perímetro do aterro para coleta de águas pluviais, início de captação de gás para uso energético, construção de vias e principalmente a cobertura diária do resíduo depositado com solo, com uma espessura de aproximadamente 60cm (COMLURB,2007). Apesar disto ainda há uma intensa presença de catadores que fazem a comercialização dos produtos potencialmente recicláveis, conduzindo-os às cooperativas próximas.

Atualmente este aterro cobre uma área de 1,3 Km<sup>2</sup>, recebendo 7.200 toneladas de resíduos por dia oriundo dos municípios de Duque de Caxias, São João do Meriti, Belford Roxo, Queimados, Mesquita, além do município Rio de Janeiro (COMLURB, 2007), despejados em 2 frentes, escolhidas conforme a necessidade operacional. Existe também no aterro, um local especial para depósito de resíduos hospitalares. Seu ponto mais alto está na cota de 41m acima do nível do mar.



**Figura 3.4:** Foto aérea do aterro. Setembro de 2007. COMLURB (2007).

### 3.1.2 Localização dos pontos estudados

Para o estudo das emissões de biogás pela camada de cobertura do aterro, optou-se pela escolha de 3 pontos distintos, na sua superfície, para a realização dos ensaios com placa de fluxo e caracterização dos solos nestes pontos.

Para a localização dos pontos de estudo, foram levados em conta aspectos que poderiam influenciar na percolação de biogás e na operacionalidade do ensaio. Por isso decidiu-se posicionar a placa em locais planos, longe de taludes, distantes de *flare*, vias internas, praças de despejo, movimentação de catadores e de pontos com diferentes tempos de fechamento de cobertura (6 meses, 2 anos e 4 anos).

Na figura 3.5 a seguir, apresenta-se a localização dos pontos **P1**, **P2** e **P3** escolhidos para esta pesquisa, além da vala de drenagem circundando todo o aterro, área para despejo de resíduos hospitalares, lagoa para tratamento de parte do chorume, limites do terreno, áreas interditadas para despejo de resíduos com suas respectivas datas de impedimento e a área da gerência operacional.

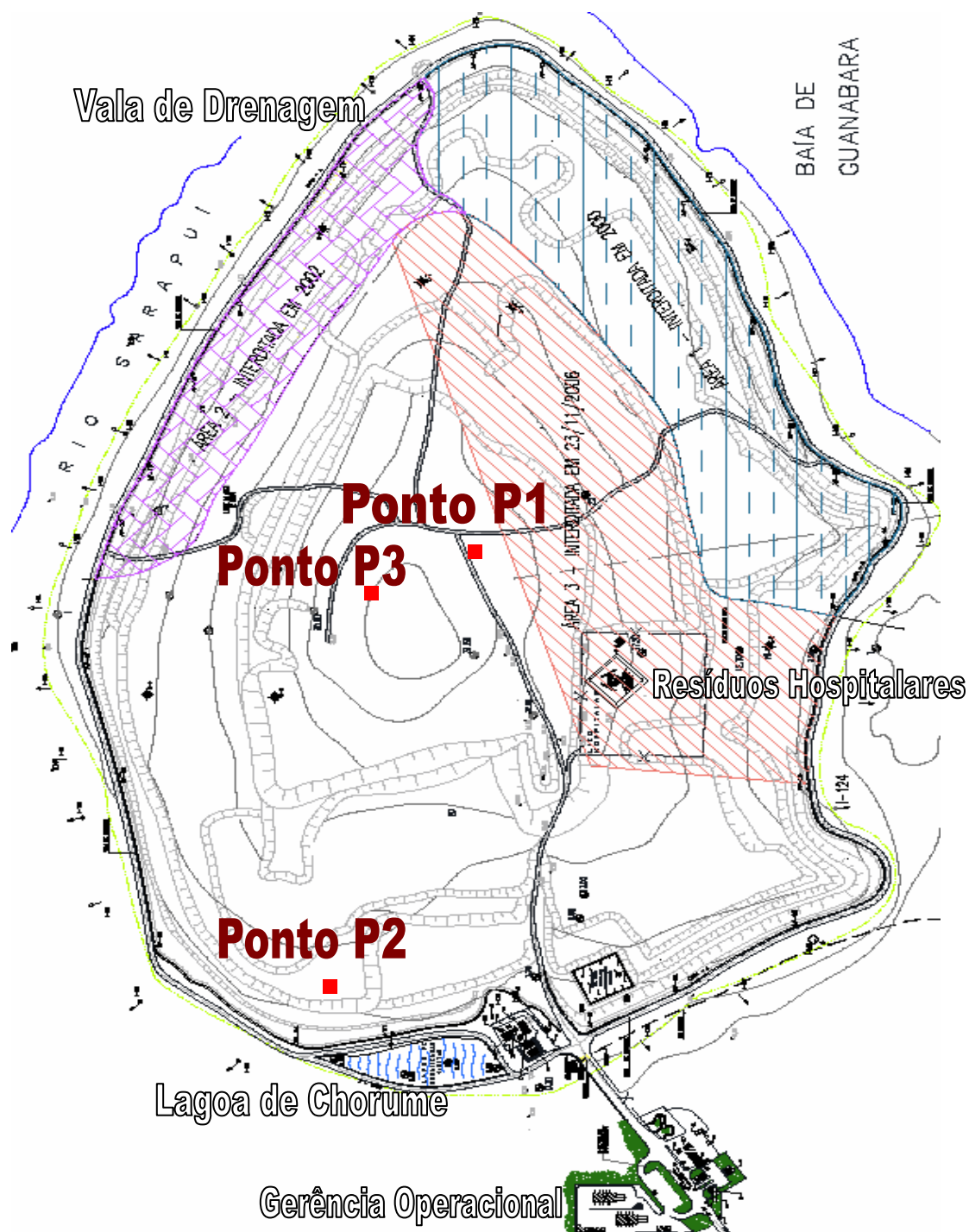


Figura 3.5: Planta do Aterro Metropolitano de Gramacho e os pontos estudados.

A descrição e localização dos pontos P1, P2 e P3, onde foram feitos ensaios para a verificação de fluxo de gases através da camada de cobertura no Aterro Metropolitano de Gramacho, é apresentada a seguir:

**a) Ponto P1** (figura 3.6)

Referência geográfica: 22° 44' 53,10"S e 43° 15' 34,40" W

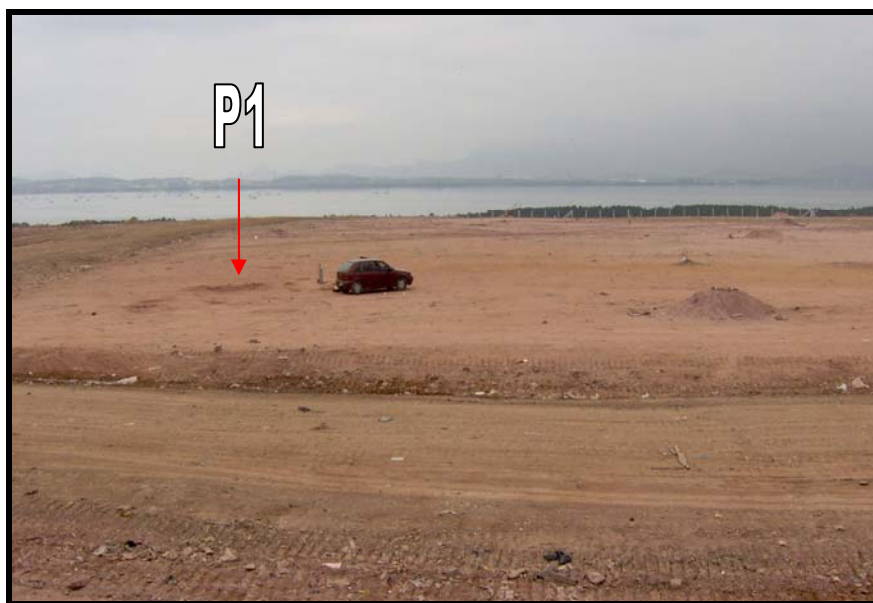
Cota: 35 m (em relação ao nível do mar)

Tempo de execução da camada de cobertura: 4 anos

Espessura da camada de cobertura: 55 cm

Número de ensaios com placa de fluxo no ponto: 5

Data dos ensaios realizados no ponto: 9 de agosto, 22 de agosto, 25 de agosto, 28 de agosto e 24 de setembro de 2007.



**Figura 3.6:** Ponto P1 – Local da realização de ensaios.

**b) Ponto P2** (figura 3.7)

Referência geográfica: 22° 44' 46,20"S e 43° 15' 54,80"W

Cota: 17 m (referente ao nível do mar).

Tempo de execução da camada de cobertura: 6 meses

Espessura da camada de cobertura: 60 cm

Número de ensaios com placa de fluxo no ponto: 2

Data dos ensaios realizados no ponto: 6 de setembro (ponto P2(A) e P2 (B)). A explicação para a realização do ensaio nestes dois pontos é apresentada no item 4.1.2.



**Figura 3.7:** Ponto P2 – Realização de ensaios P2A (à esquerda) e P2B (à direita).

**c) Ponto P3** (figura 3.8)

Referência geográfica: 22° 44' 45,40"S e 43° 15' 35,70"W

Cota: 40 m (referente ao nível do mar) - Ponto mais alto do aterro.

Tempo de execução da cobertura: 2 anos

Espessura da camada de cobertura: 45 cm.

Número de ensaios com placa de fluxo no ponto: 1

Data do ensaio realizado no ponto: 11 de setembro de 2007.



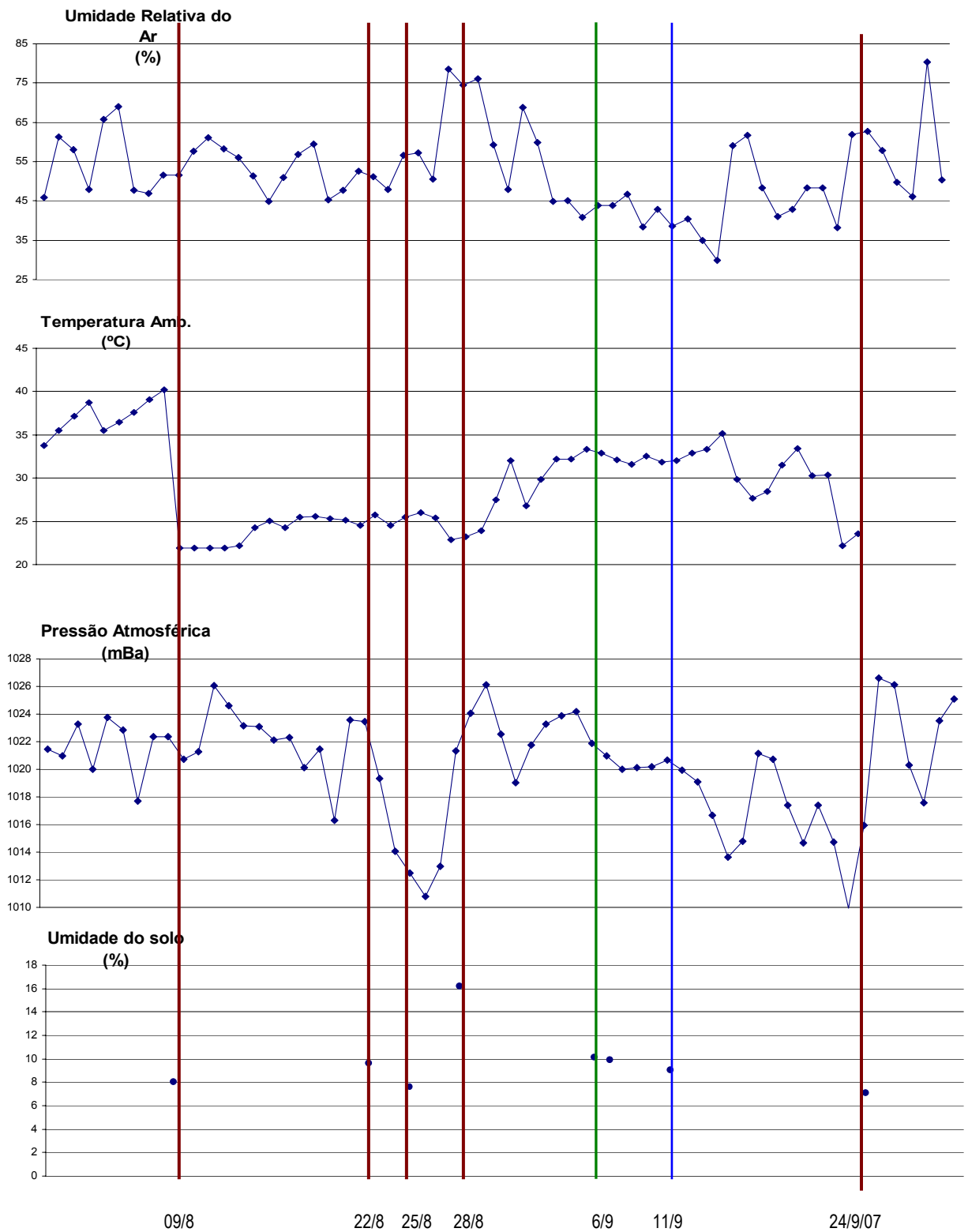
**Figura 3.8:** Ponto P3 – Local da realização de ensaio.

Para análise da eficiência da camada de cobertura do aterro, coletou-se amostras de 50Kg de solo das regiões P1 e P2. Este material foi levado para o Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, para ensaios de caracterização, (análise granulométrica, teor de umidade, densidade, Limites de Atterberg, permeabilidade ar e água, compactação e contração) visto que os dois pontos apresentam valores acentuadamente diferentes na eficiência quanto à percolação de gases. Uma simples análise visual do solo do ponto P3 não justificava uma avaliação deste solo, conforme apresentado nas figura 3.10(a) e 3.10(b).

### **3.1.3 Dados Meteorológicos do aterro**

De acordo com a classificação de GEO-RIO, 2007 (Fundação Instituto de Geotécnica do Município do RJ), a região do município de Duque de Caxias, apresenta clima tropical, com temperatura média anual de 27,5°C, com Inverno seco com precipitações pluviométricas médias de 51,4mm em julho e verão quente com precipitações médias de 229mm em janeiro.

Os dados meteorológicos importantes para este estudo, referentes aos meses de agosto e setembro de 2007, foram coletados por uma estação meteorológica automática (MAWS), de propriedade do CEFET-RJ (Centro Federal de Educação Tecnológica) montada dentro do terreno do aterro, na região próxima à lagoa de chorume. Esta estação foi montada para a análise do balanço hídrico do aterro, tema da dissertação de mestrado de TOSTES (2007), pesquisa em andamento na COPPE/UFRJ, cujos resultados são apresentados a seguir:



**Figura 3.9:** Acompanhamento da variação da pressão atmosférica, temperatura, umidade do ar (TOSTES, 2007) e teor de umidade do solo, em relação às datas dos ensaios realizados.

Na figura 3.9 representa-se a expressiva variação diária de fatores meteorológicos. A interferência destes fatores no fluxo do biogás que atravessa a camada de cobertura é nítida e é apresentada nos itens do capítulo 5.

Os valores anotados na figura 3.9 se referem à pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade do ar e teor de umidade do solo, medidos nos dias dos ensaios de campo no ponto P1, marcados com linhas verticais vermelhas, ensaios no ponto P2(A) e (B) marcados com linha verde e linha azul para o ponto P3. Os dados meteorológicos completos encontram-se em planilha anexa.

#### **3.1.4 Caracterização do solo de cobertura dos pontos P1 e P2**

Este item apresenta a metodologia dos ensaios experimentais realizados com o solo dos pontos P1 e P2 do Aterro de Gramacho, realizado no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ e no Laboratório da Geologia/UFRJ.

As coletas de amostras nestes pontos foram feitas visando à caracterização do solo, para posterior correlação com as variações do fluxo de biogás observadas no ensaio com a placa de fluxo desenvolvida para obter os dados a serem examinados para este trabalho.

Quanto ao ponto P3, conforme comentado anteriormente, esta mesma análise não pode ser executada devido às condições do solo encontradas no local (camada de cobertura com materiais de grandes dimensões, como entulhos, ferros, peças de madeira, plásticos, borrachas, misturadas ao solo de cobertura), como na figura 3.10 (a) e (b).



**Figura 3.10(a):** Solo encontrado na região do ponto 3.



**Figura 3.10(b):** Solo encontrado na região do ponto 3.

Os parâmetros de caracterização física dos solos estudados referentes aos pontos P1 e P2, foram obtidos segundo metodologias da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e, para o ensaio de contração, a metodologia proposta pelo DNER (Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1983). As metodologias foram:

- NBR – 7181/84: Análise granulométrica;
- NBR – 6459/84: Limite de Liquidez;
- NBR – 7180/88: Limite de Plasticidade;

- NBR – 6508/84: Peso específico dos grãos;
- NBR – 6457/84: Teor de umidade dos solos;
- DNER – DPT M 87-64: Contração do solo.

#### 3.1.4.1 Resultados das análises no ponto P1

O teor de umidade de solo do ponto P1, foi determinado a partir de amostras retiradas da camada de cobertura, numa profundidade de 5 cm da superfície, no local e no momento em que a placa de fluxo era instalada. Posteriormente a amostra de solo era guardada em recipiente próprio para análise no laboratório. Os resultados encontrados estão apresentados na tabela 3.1 abaixo.

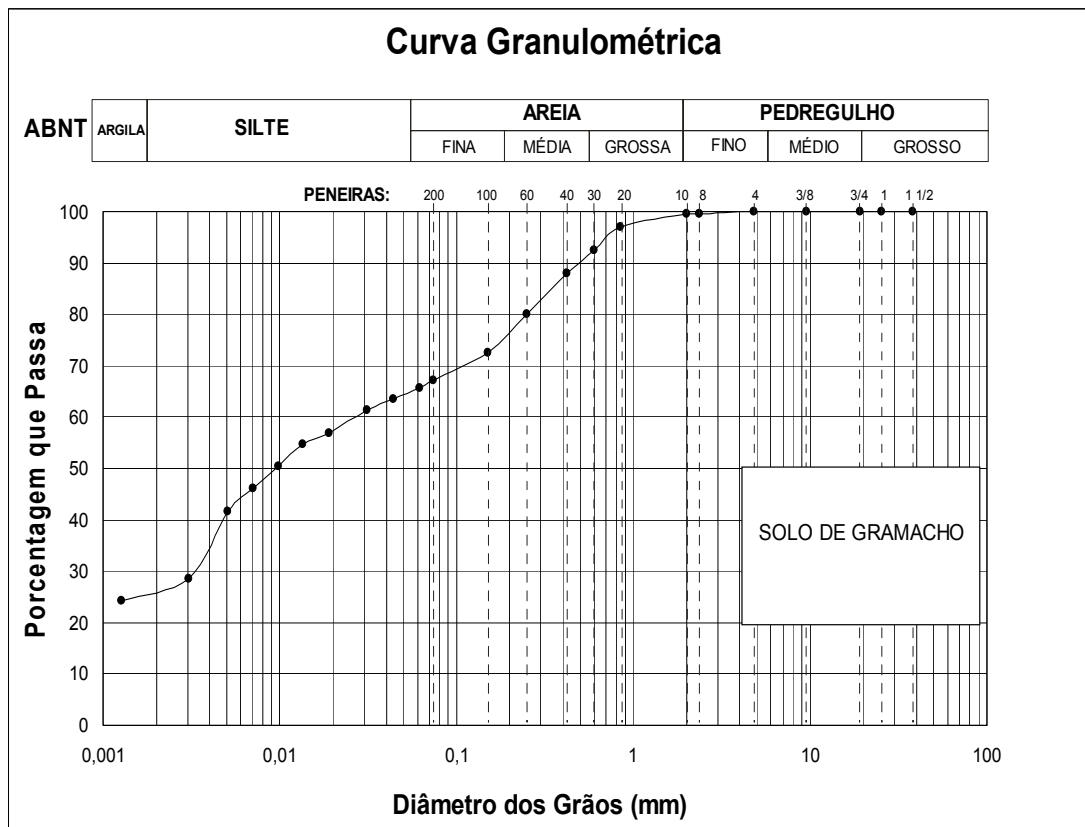
**Tabela 3.1:** Umidade das amostras de solo do ponto P1.

<u>Ponto 1</u>	<u>W(%)</u>
<u>9/8/2007</u>	<u>8,03%</u>
<u>22/8/2007</u>	<u>9,63%</u>
<u>25/8/2007</u>	<u>9,98%</u>
<u>28/8/2007(*)</u>	<u>16,18%</u>
<u>24/9/2007</u>	<u>7,31%</u>

(\*)28/8/2007, foi em função da chuva no momento do ensaio.

A influência da umidade sobre a percolação gasosa em um solo, pode ser notada na apresentação dos resultados do ensaio com a placa de fluxo, conforme o item 4.1.

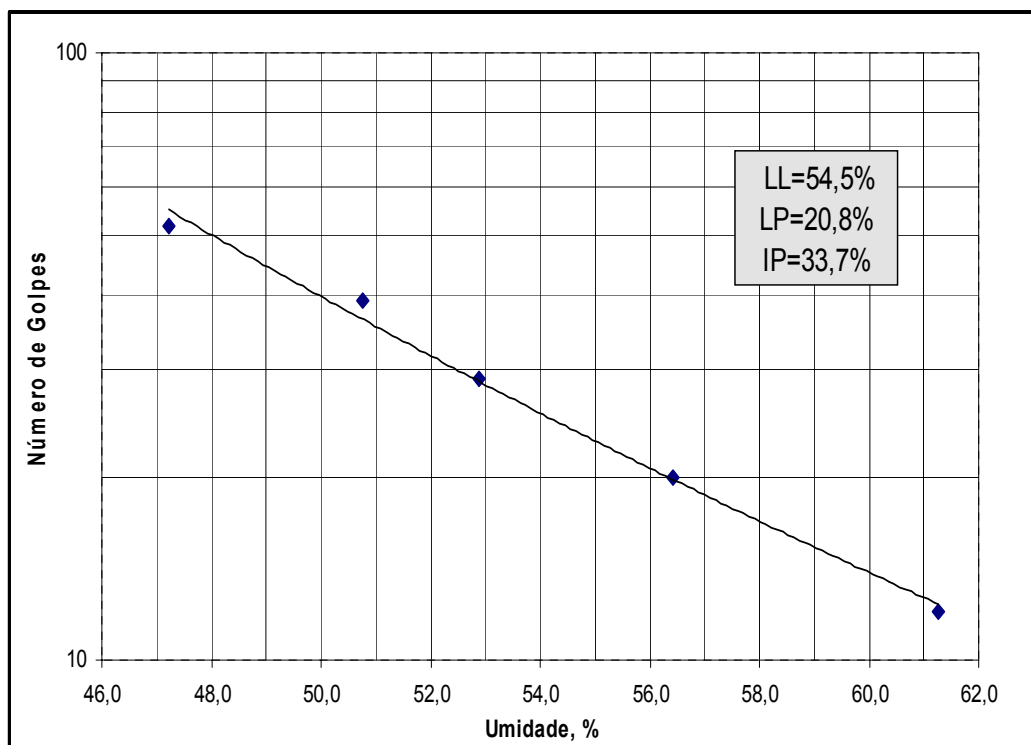
Pode-se observar no relatório do ensaio de granulometria (figura 3.11) que o solo do ponto P1 apresenta 66% de finos, sendo 27% de argila e 39% de silte. Este teor sugere que a permeabilidade deste solo, poderá ser baixa, podendo ocorrer o fenômeno de contração, dependendo da composição dos argilominerais constituintes deste solo, conforme verificações apresentadas a seguir.



**Figura 3.11:** Curva granulométrica para o solo do ponto P1.

No Laboratório de Geotecnia da COPPE, foram realizados o ensaio de permeabilidade do solo, que obteve-se coeficiente de permeabilidade igual a  **$1,6 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$** . Somente o parâmetro de permeabilidade, não indica a total eficiência do solo utilizado como camada de cobertura. Faz-se necessário uma análise completa de outras características geotécnicas, como será apresentada neste estudo.

Os limites de Atterberg determinados para este solo são: **Limite de Liquidez** é de **54,5%** e **Limite de Plasticidade** é de **20,8%**. O **índice de plasticidade** é de **33,7%**, sendo considerado material altamente plástico de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de solos (USCS - Unified Soil Classification System).



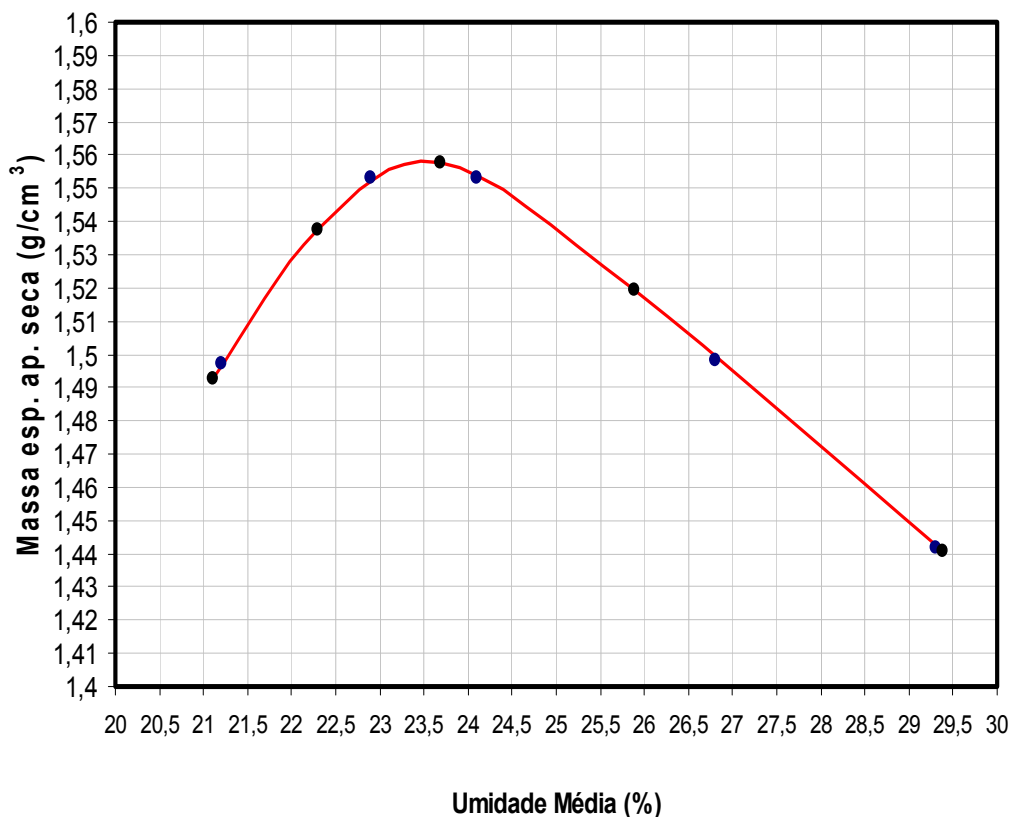
**Figura 3.12:** Valores de  $W_L$  e limites de Atterberg de P1.

Na figura 3.13 é apresentado o resultado do ensaio de compactação. Com a compactação pretende-se obter parâmetros ideais que proporcionarão ao solo uma redução do seu índice de vazios, conferindo maior densidade ao solo, aumentando, por sua vez, sua resistência ao cisalhamento. No ensaio busca-se obter a curva de compactação, onde são representadas as condições de umidade ótima e massa específica aparente seca ótima.

No ensaio de compactação realizado com o solo de P1, obteve-se: Umidade ótima ( $W_{ot}$ )= **23,5%** e massa específica ( $\sigma_{dmax}$ )= **1,56 g/cm<sup>3</sup>**. Estes valores provavelmente não serão os mesmos do que os encontrados no campo.

A condição ideal poderá ser reproduzida no campo, através de sistemas construtivos eficientes, visando uma melhor eficiência deste solo quanto à permeabilidade e resistência mecânica. Sabe-se que um solo compactado na densidade e umidade ótimas, pela conseqüente redução de vazios, deverá dificultar o transporte de substâncias, tanto por processos advectivos como os

difusivos o que pode, por exemplo, render uma melhor eficiência para o sistema de cobertura.



**Figura 3.13:** Gráfico resultante do ensaio de compactação do solo em P1.

No laboratório da Geologia da UFRJ, foi realizado o ensaio de contração. Nesse ensaio, parte-se de uma amostra na condição saturada, próxima ao limite de liquidez, onde se permite que o solo perca água por evaporação, controlando-se a redução de seu volume total e determinando-se o teor de umidade.

Nota-se na figura 3.14 uma visível contração do solo, comprovando a contração do solo de toda a região do ponto P1. Devido a este comportamento, decidiu-se analisar e comparar a composição mineralógica das duas amostras de solo (ponto P1 e ponto P2), tentando buscar os componentes minerais responsáveis por este fenômeno.

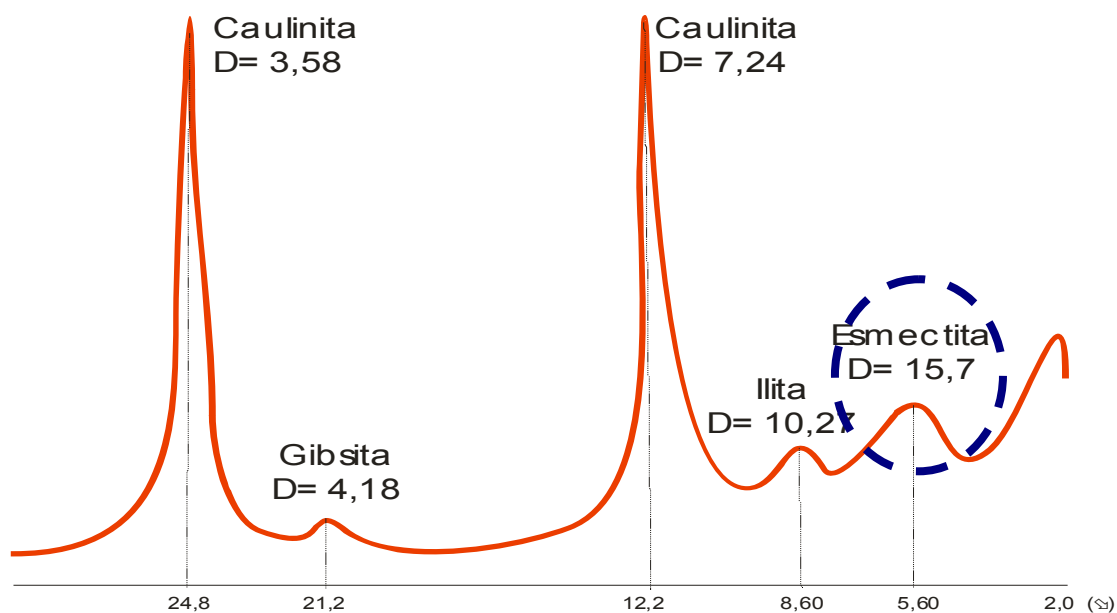


**Figura 3.14:** Contração do solo do ponto P1.

**Tabela 3.2:** Resultados do ensaio de contração para P1.

<b>Valores médios</b>	
Limite de Contração	36,78 %
Mudança volumétrica	53,06

Para a análise da composição mineralógica destes solos, executou-se o ensaio de difratometria de raio "X", também realizado no laboratório da Geologia da UFRJ. O resultado comprova a hipótese de que no solo de P1, há ocorrência de esmectita, que é um argilomineral expansível na presença da água. Na figura 3.15 é apresentado o resultado da análise deste ensaio. A confirmação da presença de esmectita, foi possível através do difratograma da amostra saturada com Etileno glicol e aquecida em mufla à 550° C.



**Figura 3.15:** Resultado gráfico de difratometria de raio “X” para solo de P1. Presença da esmectita e outros constituintes em amostra de P1.

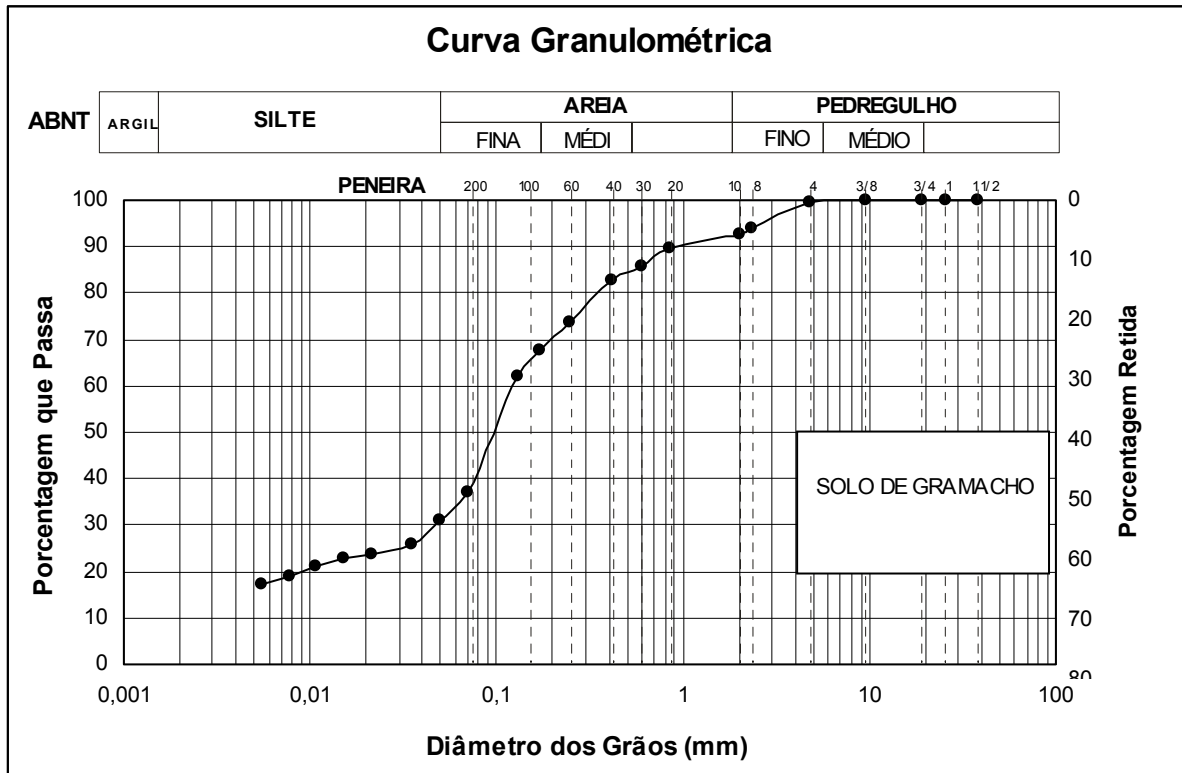
### 3.1.4.2 Resultados das análises no ponto P2

O teor de umidade das amostras de solo do ponto P2, foram retiradas da camada de cobertura, numa profundidade de 5 cm da superfície, no local e no momento em que a placa de fluxo era instalada. Posteriormente a amostra de solo foi guardada em recipiente próprio para análise no laboratório da Geotecnia da COPPE. Os resultados encontrados estão apresentados na tabela 3.3 abaixo.

**Tabela 3.3:** Umidade das amostras de solo do ponto P2.

<u>Ponto</u>	<u>W(%)</u>
<u>6/9/2007</u>	<u>8,03%</u>
<u>6/9/2007</u>	<u>10,10%</u>

Pode-se observar na figura 3.16, que o solo do ponto P2 apresenta uma porcentagem de finos inferior ao do solo P1, sendo 30% de material siltoso. Este teor sugere que a permeabilidade deste solo, deverá ser maior, reduzindo a possibilidade da contração conforme solo de P1.

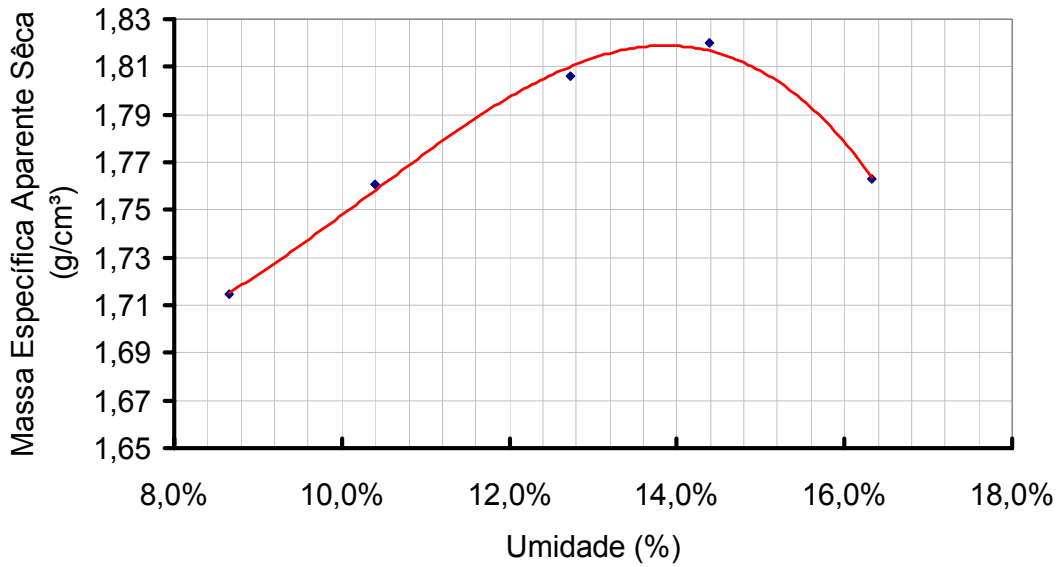


**Figura 3.16:** Curva granulométrica para o solo do ponto P2.

Não foi possível a obtenção dos Limites de Atterberg, pois o solo não é plástico não apresentando trabalhabilidade que permitisse a moldagem dos ensaios.

No ensaio de permeabilidade do solo do ponto P2, obteve-se coeficiente de permeabilidade igual a  $9,1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ .

No ensaio de compactação, figura 3.17, a massa específica ( $\sigma_{dmax}$ ) é de  $1,82 \text{ g/cm}^3$  e o valor da umidade ótima ( $W_{ot}$ ) é de **13,8%**.



**Figura 3.17:** Ensaio de compactação para P2.

Neste ponto, o solo de cobertura não apresentava o mesmo aspecto (trincas de ressecamento) conforme observado no ponto P1. Abaixo, na figura 3.18, o resultado do ensaio de contração com o solo coletado neste ponto.

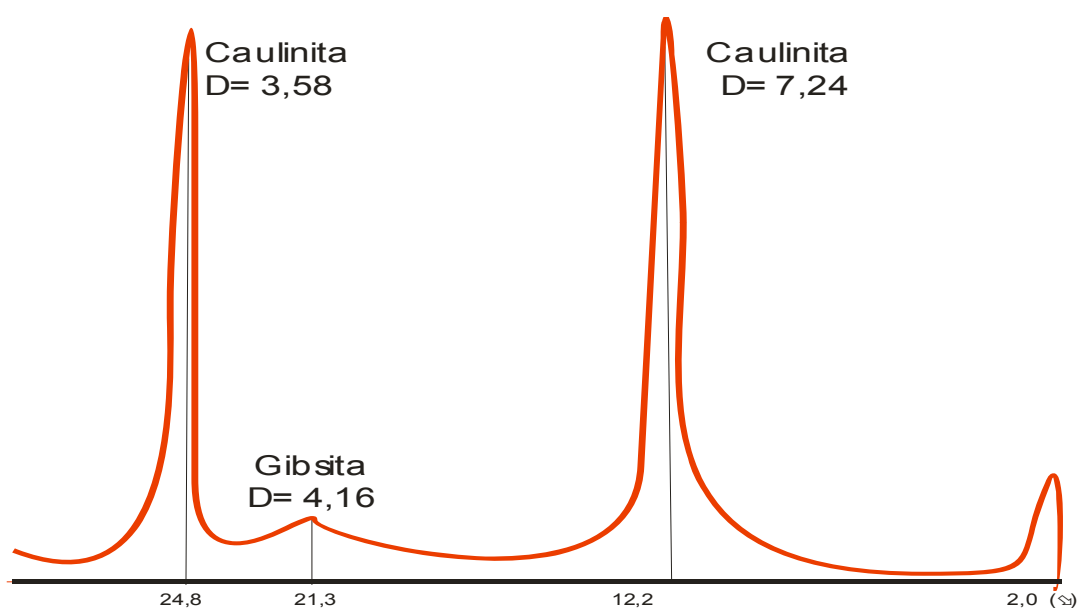


**Figura 3.18:** Ensaio de contração do solo de P2.

**Tabela 3.4:** Resultados do ensaio de contração para P2.

Valores médios	
Limite de Contração	24,10 %
Mudança volumétrica	42,04

Posteriormente, realizou-se também o ensaio de difratometria de raio “X” para a amostra do solo do ponto P2, conforme figura 3.19. Este valor foi confirmado refazendo-se o procedimento com a amostra glicolada e aquecida.



**Figura 3.19:** Resultado gráfico de difratometria de raio “X” para solo de P2. Ausência de argilominerais expansíveis.

No resultado de ensaio de difratometria de raio “X” para P2, não foi observado a presença de argilominerais expansíveis, conforme caso de P1.

## 3.2 Metodologia dos ensaios

### 3.2.1 Ensaio de campo

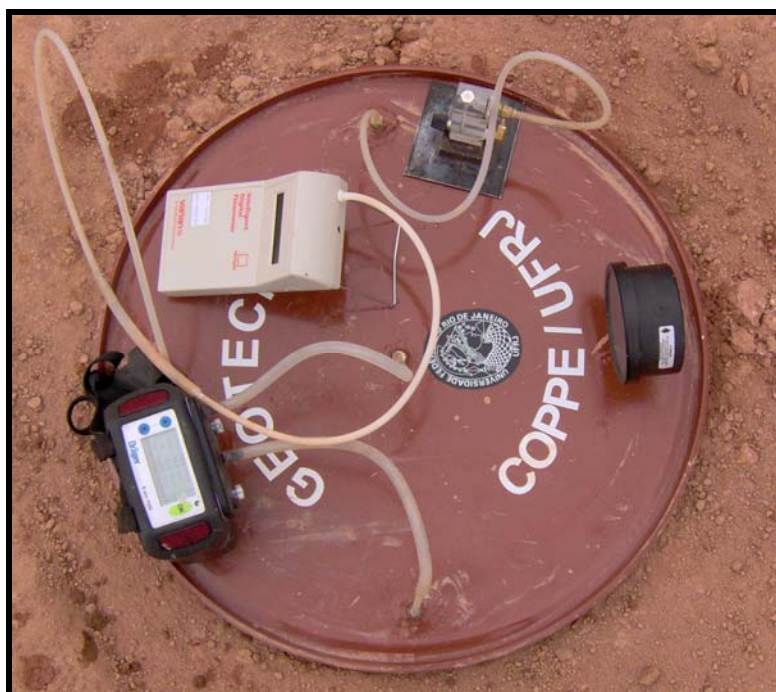
#### 3.2.1.1 Ensaio com a placa de fluxo

Como detalhado na bibliografia, (item 2.11) as placas de fluxo são equipamentos capazes de medir, *in situ*, a concentração e o fluxo de espécies gasosas no sistema solo-atmosfera. A placa restringe a passagem dos gases liberados pela superfície do solo, conduzindo-os a equipamentos capazes de fazer as medições. Após coleta de dados em campo, é necessária a aplicação

de equação matemática para o cálculo final da vazão média de espécies gasosas em um determinado intervalo de tempo.

Para este estudo projetou-se um equipamento destinado a medir um baixo fluxo gasoso e as respectivas leituras de concentração. Para tal, foi elaborado um mecanismo inédito para este fim, de alta sensibilidade nas leituras, e que pudesse acompanhar as variações instantâneas de vazão e das concentrações dos principais gases liberados pelo RSU: metano, gás carbônico, oxigênio e ácido sulfídrico. Estes resultados são apresentados na forma de gráficos no capítulo 4 deste trabalho, nos quais se pode observar a irregularidade no fluxo de biogás, o tempo para o equilíbrio de concentrações e a influência de fatores externos.

Construiu-se uma placa de fluxo de leituras instantâneas (PFLI) que pudesse ser cravada no solo de cobertura de aterros de RSU, interligada a equipamentos de monitoramento de alta sensibilidade, possibilitasse o acompanhamento com leituras instantâneas da vazão e concentração do biogás. A PFLI é apresentada na figura 3.20.



**Figura 3.20:** Placa de fluxo com leitura instantânea (PFLI). Desenvolvida na Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Esta placa de fluxo foi construída na forma cilíndrica com diâmetro de 57cm e altura de 8 cm em aço galvanizado. Nela foram acoplados 2 aparelhos: um com a finalidade de medir a concentração (% volume) dos gases: metano, gás carbônico, oxigênio e ácido sulfídrico, da marca *DRÄGER* modelo *XAM-7000* e um fluxímetro digital de alta sensibilidade e precisão para medição de fluxo de gases (ml/min), da marca *VARIAN*, modelo *Digital FlowMeter*. Para medir pequenas variações de pressão, garantindo que a pressão interna fosse igual à pressão atmosférica, também foi instalado na PFLI um manômetro analógico de boa precisão. A figura 3.21 representa um esquema da PFLI e nas figuras 3.22 e 3.23, os equipamentos acoplados.

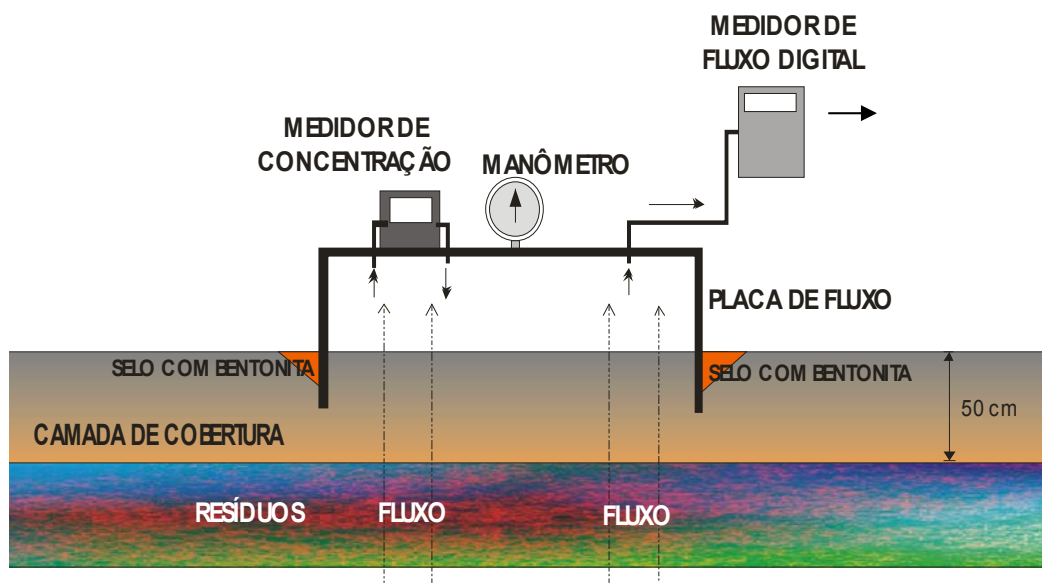


Figura 3.21: Esquema gráfico de montagem da placa de fluxo (PFLI).



Figura 3.22: Manômetro instalado na placa.



**Figura 3.23:** Medidor de concentração (primeiro plano) e o medidor de fluxo (segundo plano).

### 3.2.1.2 Montagem do ensaio com a PFLI

No campo, após a escolha dos pontos a serem analisados (P1, P2 e P3), realizou-se uma escavação de aproximadamente 5 cm de profundidade, necessário para cravação da placa no solo. Neste ponto foi coletada amostras do solo para análise do teor de umidade. Esta escavação é importante para garantir uma perfeita estanqueidade entre placa e solo. É necessário deixar folgas laterais de 5cm para posterior preenchimento.



**Figuras 3.24 e 3.25:** Escavação superficial para montagem do ensaio.

Após escavado com cuidado, regularizou-se o solo de fundo desfazendo-se possíveis estruturas do solo, compactadas pela simples atuação das ferramentas durante a escavação.

Instalou-se a PFLI no vão escavado com o auxílio de uma marreta de borracha para fazer uma melhor cravação. Posteriormente aplicou-se uma massa plástica de solo com bentonita, em todo vão aberto na circunferência para a cravação da PFLI (mistura com 50% de bentonita e 50% de solo local). Finalmente compactou-se o local do preenchimento, a fim de prevenir possíveis vazamentos de biogás.

Em seguida conectou-se o medidor de concentração (*DRÄGER XAM-7000*) conforme a figura 3.23. Este aparelho foi ligado à placa por dois tubos: um para a sucção dos gases, através de uma bomba interna, e outro tubo para a devolução do gás para o interior da placa. Durante esta operação não há perda de gás do interior da PFLI para a atmosfera, o que comprometeria o valor final da leitura.

Na parte superior da placa, deixou-se um orifício com uma conexão para instalação do fluxímetro digital (figura 3.23). Este aparelho é dotado de um sistema aberto, onde após ser medido, o gás é liberado para atmosfera. Assim, criou-se um ambiente interno que não está isolado do externo (atmosfera), pois a saída de biogás é sempre livre. Para a garantia desta condição, acompanha-se a pressão interna na placa através do manômetro (figura 3.22).

### **3.2.1.3 Procedimentos para a leitura do fluxo e da concentração**

Logo após a montagem do equipamento, faz-se a primeira leitura da concentração e do fluxo de gases. Existe a tendência de que os valores iniciais sejam os mesmos da atmosfera (21% de oxigênio, 0% de metano, 0,1% de gás carbônico e 0% de ácido sulfídrico). O fluxo gasoso medido no fluxímetro é baixo e tende a aumentar logo na próxima leitura.

O intervalo adotado para a realização das leituras do ensaio é de 5 minutos, quando, simultaneamente, anota-se o valor das concentrações gasosas e do fluxo. Durante a realização do ensaio pode-se observar o crescimento das concentrações de metano e gás carbônico, oriundos do RSU; redução dos valores do oxigênio e uma ausência de ácido sulfídrico, conforme

tabelas de resultados apresentadas no capítulo 4. Durante a realização deste ensaio, mediu-se a temperatura do solo ao redor da placa com um termômetro digital, cravado na superfície do solo, para posterior análise e correlações. Coletou-se também amostra de solo para verificação em laboratório do teor de umidade.

Para não interferir nas leituras, modificando as densidades naturais dos gases que passam pelo solo, procura-se sempre cobrir a placa, deixando-a à sombra.

Depois de realizadas as leituras no campo com a PFLI, é necessário utilizar os fatores de conversão e de correção ( $FC$ ), para adequar as leituras. Este procedimento é importante, pois pela saída da placa, onde é instalado o fluxímetro, passa o biogás que é, como apresentado neste trabalho, uma mistura de gases, cada um com características físico-químicas diferentes. Este trabalho visa acompanhar o fluxo e a concentração de cada espécie gasosa (metano, gás carbônico, oxigênio e ácido sulfídrico), independentemente.

O gás nitrogênio é usado como padrão “*baseline*”, ( $FC=1$ ) e é usado normalmente para calibrar aparelhos que executam leituras de precisão.

O cálculo do  $FC$  é baseado na equação 3.1. As equações 3.1, 3.2 e 3.3 foram retiradas do manual do equipamento Mass Flow, 2003. Este cálculo é obtido para vazões de massa. Como o equipamento utilizado (Fluxímetro digital) fornece leituras em volume (ml/minuto), deve-se multiplicar o resultado da equação 3.1 pelo valor  $\Omega$  de cada gás estudado separadamente, adequando unidades de leitura.

$$FC_x = [ (0,3106 \times S) / (d_x \times c_x) ] \cdot \Omega \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

$FC_x$  = Fator de correção da espécie gasosa  $X$ ;

$0,3106$  = (densidade do nitrogênio à 273,15 K) (calor específico do Nitrogênio);

$S$  = fator de correção da estrutura molecular. Equivale a:

1,030 para gases monoatômicos;

1,000 para gases diatômicos;

0,941 para gases triatômicos;

0,880 para gases poliatômicos;

$d_x$  = densidade do gás  $X$  (à 273,15 K e a 1 atm);

$c_x$  = calor específico do gás  $X$  (cal/g°C);

$\Omega$  = 22,4litros / massa molecular do gás medido.

Para adequar a situações de campo, a temperatura atmosférica deve ser incorporada nesta relação na equação 3.2:

$$FC \text{ com Temperatura Corrigida} = FC \times (T_x / T_s) \quad \text{Equação 3.2}$$

Sendo:

$FC$  = Fator de correção obtido com a equação 3.1;

$T_x$  = temperatura de referência em K;

$T_s$  = 273,15 K (equivalente à 0°C).

Lembrando-se que para a troca de unidade:

$$T^\circ\text{C} = T\text{K} - 273,15 \quad \text{Equação 3.3}$$

Este cálculo é empregado em todas as leituras efetuadas com o fluxímetro no campo e em laboratório.

Características físico-químicas dos gases estudados:

a) Metano

O gás metano é o principal constituinte do gás natural e um dos principais componentes do gás produzido na decomposição da matéria orgânica de aterros de RSU, o biogás.

O metano é um gás inodoro e incolor, sua molécula é tetraédrica e apolar ( $\text{CH}_4$ ), de pouca solubilidade na água. Quando exposto ao oxigênio

presente na atmosfera, se transforma em mistura de alto teor de explosividade. É o mais simples dos hidrocarbonetos.

Propriedades:

- Estrutura cristalina: tetraédrica
- Ponto de fusão: 96,6 K
- Ponto de ebulição: 111,55 K
- Densidade: 0,72 g/l (gás a 273,15 K)
- Calor específico: 0,5328 cal/°g
- $\Omega = 1,4$

b) Dióxido de carbono

O dióxido de carbono é constituído por moléculas de geometria linear e de carácter apolar. Por isso as atrações intermoleculares são muito fracas, tornando-o, nas condições ambientais, um gás.

O dióxido de carbono é o segundo principal componente do gás de aterros de RSU, sendo tão tóxico quanto o metano. É um gás muito pesquisado por ser um gás poluente, globalmente monitorado.

Propriedades:

- Massa molecular: 44,0 um
- Ponto de fusão: 216 K
- Ponto de ebulição: 195 K
- Densidade: 1,964 kg/m<sup>3</sup> (gás a 273,15 K)
- Calor específico: 0,2016 cal/°g
- $\Omega = 0,51$

c) Oxigênio

O oxigênio (O<sub>2</sub>) na sua forma molecular, é um gás que em condições normais de pressão e temperatura se encontra no estado gasoso, além de ser, incolor, insípido, inodoro, mas não combustível e pouco solúvel em água. O

gás oxigênio é um dos principais componentes do ar atmosférico, representando aproximadamente 20% da composição da atmosfera terrestre.

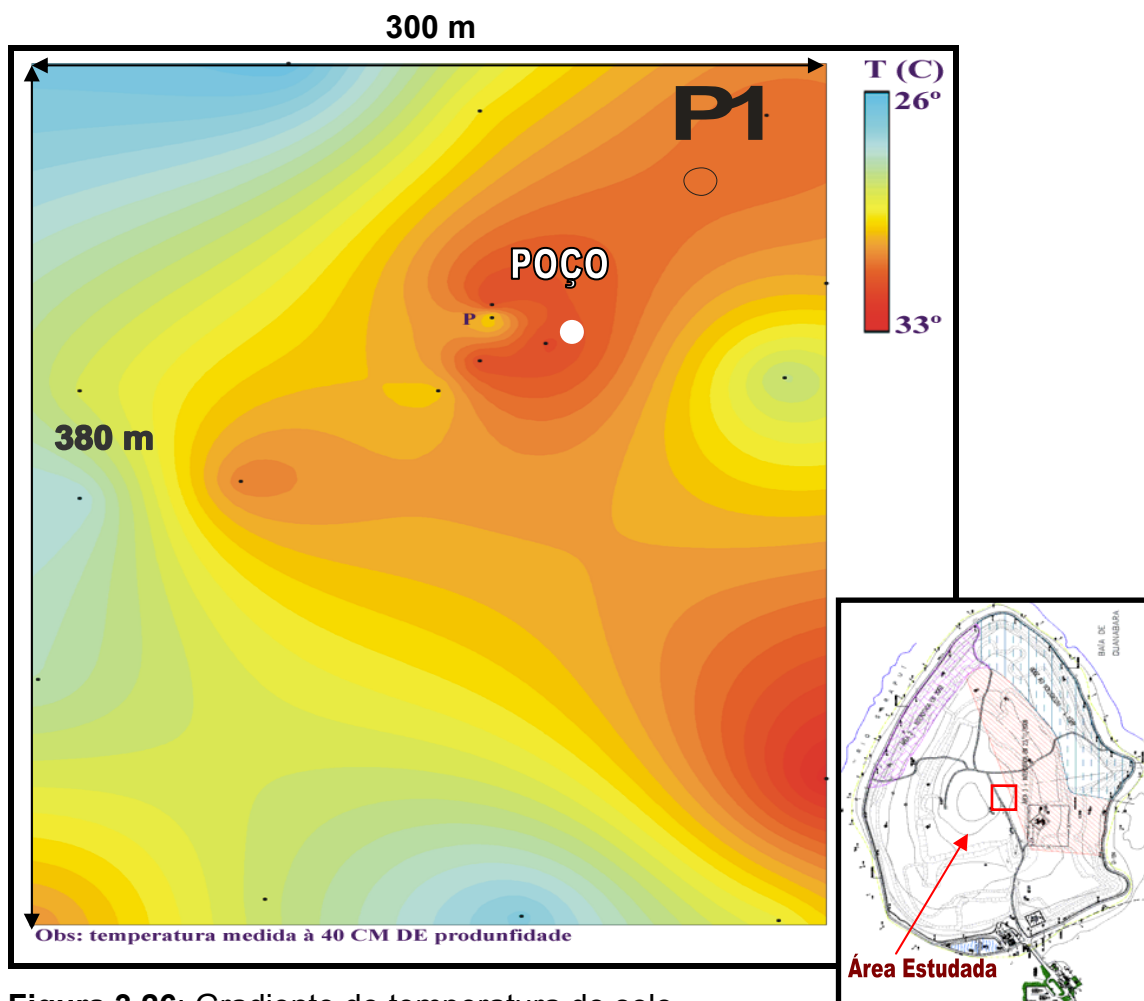
Propriedades:

- Massa atômica: 16 u m
- Estrutura cristalina: cúbica
- Ponto de fusão: 50,35 K
- Ponto de ebulição: 90,18 K
- Densidade: 1,427 g/l (gás a 273,15 K)
- Calor específico: 0,2193 cal/°g
- $\Omega = 0,7$

### 3.3 Mapeamento termal do solo de cobertura

Para um estudo sobre medições de fluxo de metano no solo de cobertura, se propõe inicialmente uma análise termal deste solo, a fim de se produzir uma planta da área estudada (figura 3.26), onde seria fácil distinguir a localização exata dos pontos ou regiões de maior, ou menor, temperatura do solo, onde teoricamente diferentes vazões, ou concentrações, de metano estariam demonstradas através de cores, para posterior análise e comparações.

Considerando que a reação para a formação do gás metano é exotérmica, ou seja, libera calor, e que o metano ainda no interior do aterro pode apresentar temperaturas elevadas superiores a 65°C à 10m de profundidade e a 30°C, logo abaixo da camada de cobertura (JUCÁ, 2005), pode-se admitir que a temperatura medida no solo de cobertura (40 cm de profundidade), em dias secos e de baixas temperaturas atmosféricas, é influenciada pela presença deste gás quente, evidenciando as emissões fugitivas num ponto ou região (figura 3.26).



**Figura 3.26:** Gradiente de temperatura do solo.

Pode-se desta forma mapear a ocorrência destas “fugas” através das diferentes temperaturas medidas no solo (figura 3.26) através de uma planta, onde a diferente tonalidade de cores demonstra regiões equivalentes às emissões que chegam ao solo de cobertura.

Para garantir a precisão de uma planta termal de uma área, deve-se fazer um acompanhamento periódico da temperatura do solo, fazendo o máximo de leituras no campo com menores distâncias entre os pontos de leitura, a fim de buscar uma melhor precisão para o resultado final.

Com um dispositivo de cravação (figura 3.27) executou-se a perfuração de 40cm na camada de cobertura em diversos pontos na região próximas ao ponto P1 (figura 3.26). Após esta perfuração foi colocada a haste do termômetro digital para a leitura da temperatura do solo. Com os dados coletados foi traçado um gráfico que reflete as condições de temperatura no solo no dia 28 de agosto de 2007, dia em que a temperatura ambiente era de 23°C (TOSTES, 2007).



**Figura 3.27:** Termômetro e furadeira com broca de 40 cm de extensão.

Neste trabalho não foi utilizada a análise termal do solo como indicadora dos pontos a serem ensaiados com a placa de fluxo.

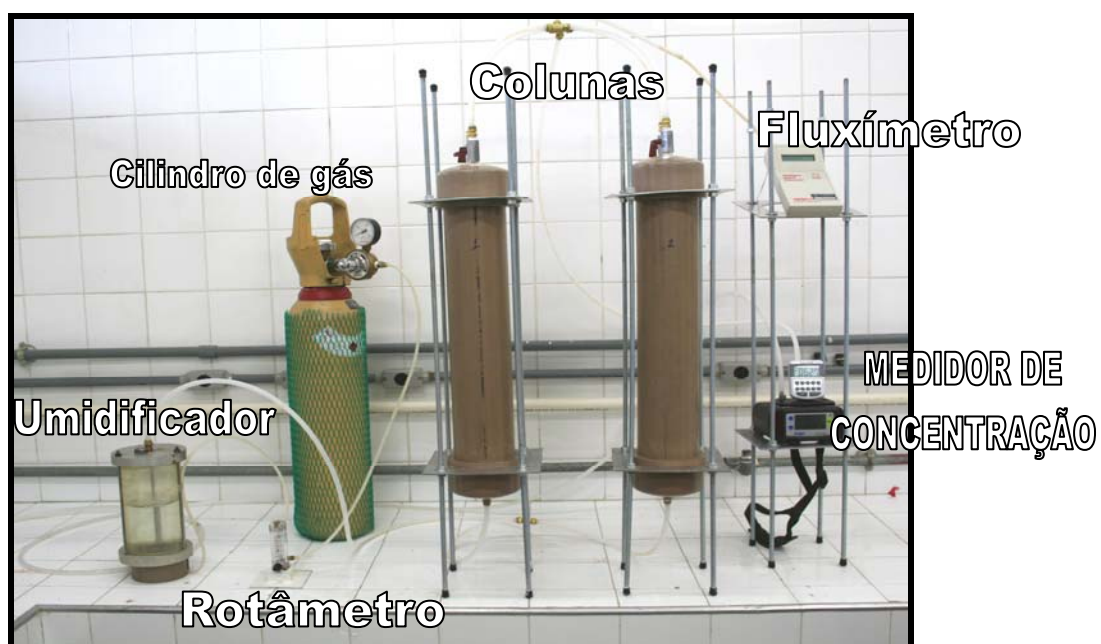
### **3.4 Ensaios de laboratório**

#### **3.4.1 Ensaio de permeabilidade ao gás em solos para cobertura**

No intuito de estudar algumas variantes geotécnicas que interferem no fluxo do biogás no solo de cobertura, desenvolveu-se um equipamento capaz de simular as condições de campo em laboratório, de uma amostra de solo de cobertura do aterro de Gramacho, analisando a interferência da umidade, densidade e compactação do solo.

Este ensaio consiste em compactar corpos de prova em tubos de PVC com diâmetro de 100mm, de paredes reforçadas, com altura de 60cm. O fechamento das extremidades é feito com caps também em PVC para

possibilitar o acesso ao interior do tubo. Buscou-se garantir durante a montagem que não houvessem pontos de vazamento (figura 3.28).



**Figura 3.28:** Ensaio de permeabilidade ao gás em solos de cobertura.

Colocou-se areia grossa colada nas paredes internas para tentar evitar a ocorrência de caminhos preferenciais no contato entre os grãos do solo e parede lisa do PVC.

Na saída do cilindro de gás há um rotâmetro, o que, possibilitou controlar a passagem de gás em uma baixa vazão de entrada. Esta vazão foi definida no valor de  $0,4 \text{ ft}^3/\text{h}$ , equivalente a  $188,78 \text{ ml}/\text{minuto}$ . Este fluxo será repartido igualmente entre as duas colunas, portanto considera-se que o valor de entrada do fluxo seja de  $94,4 \text{ ml}/\text{minuto}$ , para cada coluna. O controle da vazão foi feito regulado para não haver pressurização dentro do cilindro. Posteriormente o fluxo é conduzido a um umidificador. Posteriormente, faz-se a ligação da tubulação de gás na parte inferior das colunas de PVC (Figura 3.30).

Na parte interior das colunas, colocou-se britas “zero” para fins de distribuição do fluxo gasoso. Sobre esta camada de distribuição é colocada uma tela de geotextil. Sobre o geotextil compactou-se o solo a ser estudado em

uma camada com altura pré-definida, não superior a 30 cm seguindo as recomendações de DE PAULA et al (2006).

O fluxo ascendente e a concentração são medidos através de equipamentos conectados nos *caps* de fechamento superior das colunas, conforme figura 3.28.

### 3.4.2 Montagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram reconstituídos cuidadosamente, com o solo do ponto P1 de Gramacho e colocados nas colunas de PVC e compactados dinamicamente, com altura de 8cm. Foram feitas três simulações com o mesmo solo. A primeira na umidade ótima  $\rightarrow$  23,5% e massa específica aparente seca máxima  $\rightarrow$  1,55 g/cm<sup>3</sup>. A segunda com umidade  $\rightarrow$  15% e a terceira simulando uma precipitação pluviométrica no solo característica da região, formando uma lâmina de água sobre o solo de 3 mm.

### 3.4.3 Calibração entre instrumentos (fluxímetro/ rotâmetro)

Para a garantia da equiparação entre as leituras do fluxímetro e do rotâmetro, fez-se uma calibração no laboratório. Nesta calibração, conectou-se na saída de uma garrafa contendo gás nitrogênio sob pressão, um tubo de silicone ligado à entrada de um rotâmetro analógico, de escala entre 0 a 1 f<sup>3</sup>/h correspondendo a 0 a 472 ml/min. Com o rotâmetro fez-se a leitura, mantendo o fluxo de gás constante no valor pré-determinado de 0,95 f<sup>3</sup>/h. Posteriormente, em linha, conectou-se um tubo na saída do rotâmetro ligado na entrada do fluxímetro digital (figura 3.29).



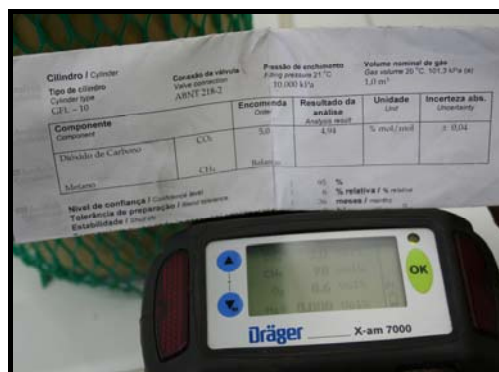
**Figura 3.29:** Calibração entre equipamentos de leitura.

Após iniciada a calibração com uma vazão constante de 0,95 f<sup>3</sup>/h, observou-se uma leitura no fluxímetro de 444ml/min (figura 3.29). Fazendo-se os cálculos de mudança de unidade matemática, acha-se um valor de 446 ml/min, ou seja uma diferença de leitura entre aparelhos de 0,5%, comprovando a semelhança entre as leituras, uma vez que a diferença é desprezível.

### 3.4.4 Calibração do medidor de concentração

Para este estudo utilizou-se o medidor de concentração de gases DRÄGER modelo XAM-7000 e um cilindro contendo uma mistura gasosa 95% de volume de metano e 4,94% de gás carbônico (Fabricante marca AGA). Com o medidor de concentração pode-se medir o volume (percentual de volume) das principais espécies gasosas que compõe o biogás, como metano, gás carbono, oxigênio e o gás sulfídrico. Para este estudo adotou-se leituras em percentual volumétrico (%vol). A escala de leitura no *display* digital do equipamento, varia entre 0 e 100%vol, tendo uma precisão, segundo o fabricante, variável de 5% para mais ou para menos.

Para garantir a aferição deste equipamento, fez-se leituras com o DRÄGER na mistura gasosa do cilindro de aferição. O resultado da calibração feita com o medidor de concentração foi satisfatório, onde verificou-se diferenças menores de 3%. Na figura 3.30, o certificado de calibração do gás no cilindro, para calibração do aparelho.



**Figura 3.30:** Leitura das concentrações no cilindro de aferição.

# Capítulo 4 – APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados dos ensaios realizados no laboratório e no campo com a PFLI. Todos os procedimentos de execução e determinação de resultados a seguir foram descritos no capítulo 3 deste trabalho.

## 4.1 Resultados de campo

### 4.1.1 Resultados de campo obtido com a PFLI no ponto P1

O ponto P1 está localizado numa região plana e extensa na cota 35m (em relação ao nível do mar), com aproximadamente 4 anos de fechamento da camada de cobertura. O solo, na maioria da região próxima a P1, tem aspecto semelhante e é possível observar muitas fissuras, indicando a ocorrência de contração, o que acredita-se facilitar a percolação de gases e líquidos.

Segue abaixo os resultados obtidos com a PFLI feitos em P1:

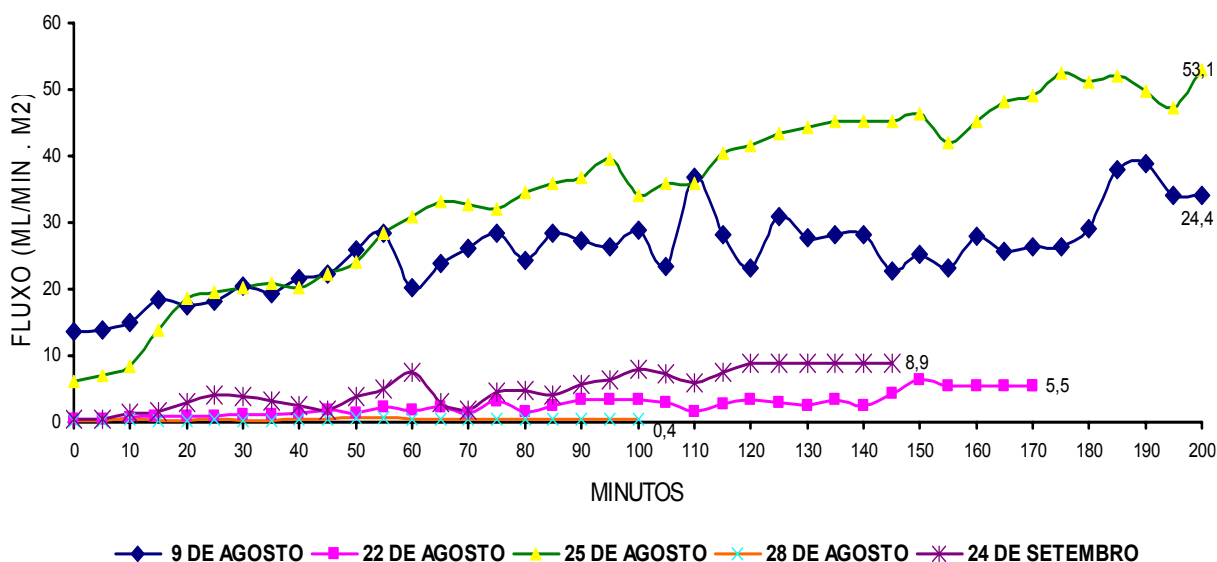


Figura 4.1: Fluxo de metano no ponto P1

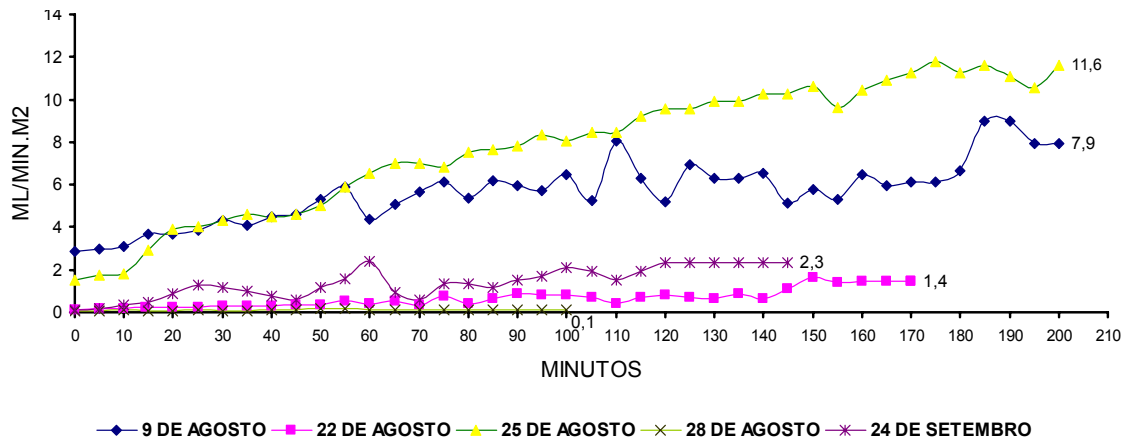


Figura 4.2: Fluxo de gás carbônico no ponto P1.

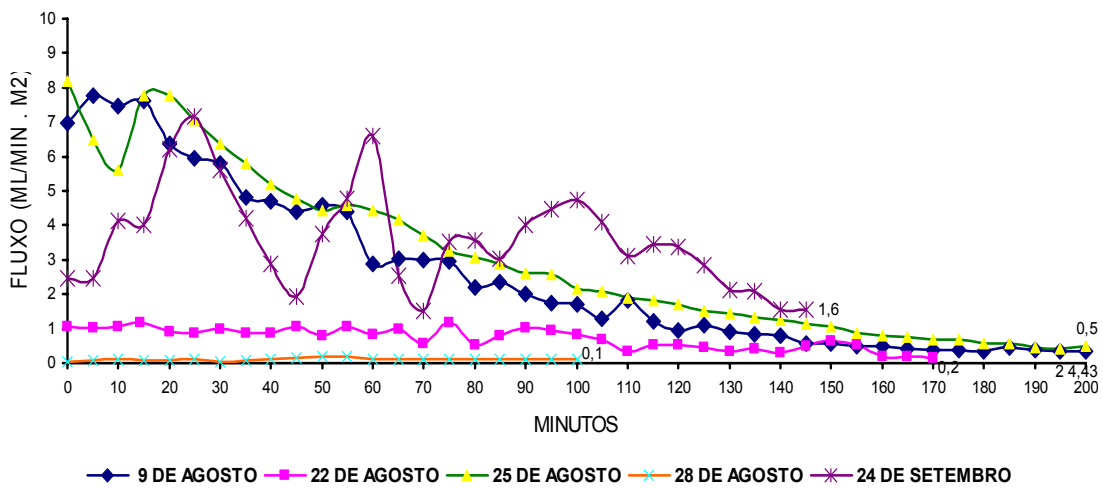


Figura 4.3: Fluxo de oxigênio no ponto P1.

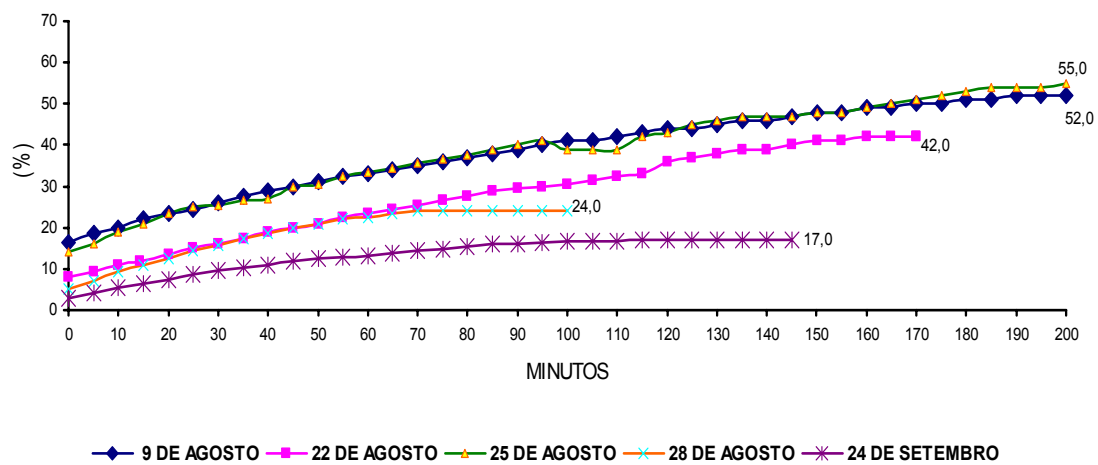


Figura 4.4: Concentração de metano no ponto P1.

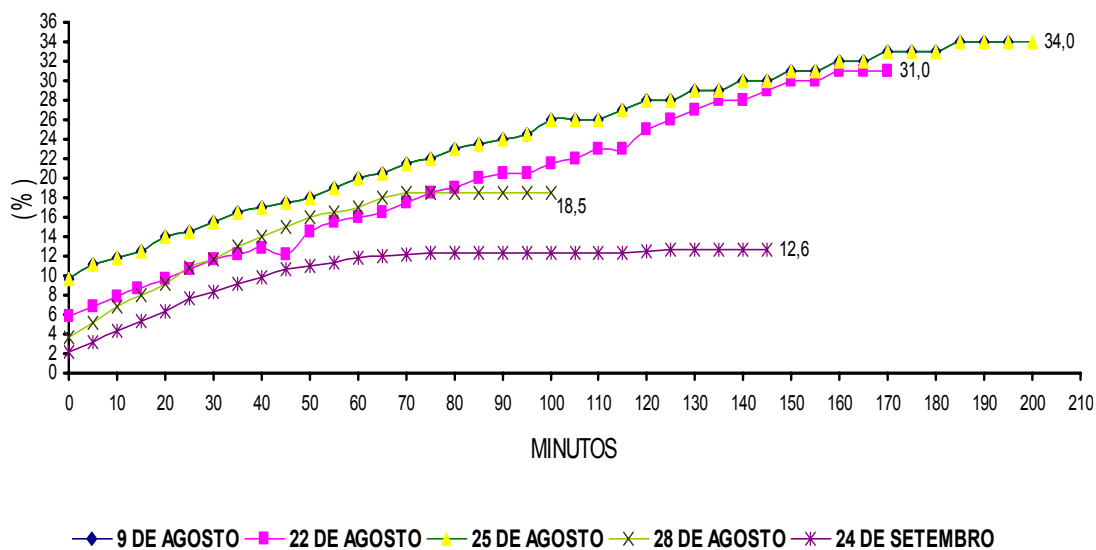


Figura 4.5: Concentração de gás carbônico no ponto P1.

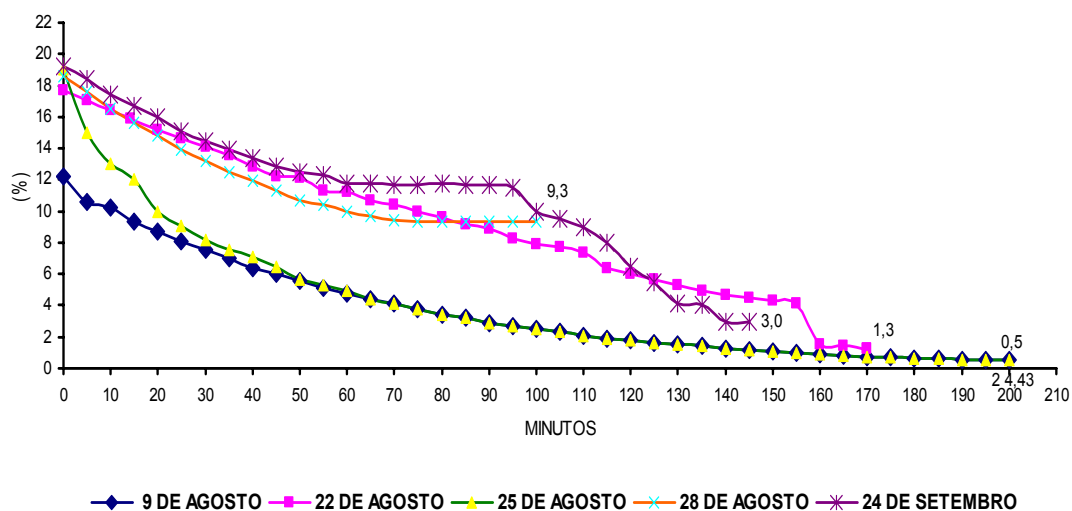


Figura 4.6: Concentração de oxigênio no ponto P1.

#### 4.1.2 Resultados de campo obtido com a PFLI no ponto P2 (A) e (B)

Esta é uma área baixa (cota 17m) localizada logo à entrada do aterro. Foi recentemente coberta (aproximadamente 6 meses) e não apresenta trincas visíveis em camada de solo de cobertura.

O ponto P2 foi separado em P2(A) e P2(B), pois no momento do primeiro ensaio, a ausência de metano e baixo fluxo de biogás, conforme figura

4.7 e 4.8 neste ponto, obrigou a cravação de PFLI num outro ponto situado a cerca de 6m do primeiro, para confirmar estas leituras.

Para testar a eficiência da camada de cobertura, este ensaio teve o mesmo procedimento de montagem que o ensaio montado na superfície. Este novo local teve a profundidade de 55cm, medido da superfície até o momento em que se encontrava o início da deposição do lixo, onde cravou-se a PFLI, para o acompanhamento das leituras. Este ponto, denominou-se P2(B), conforme figura 4.7.

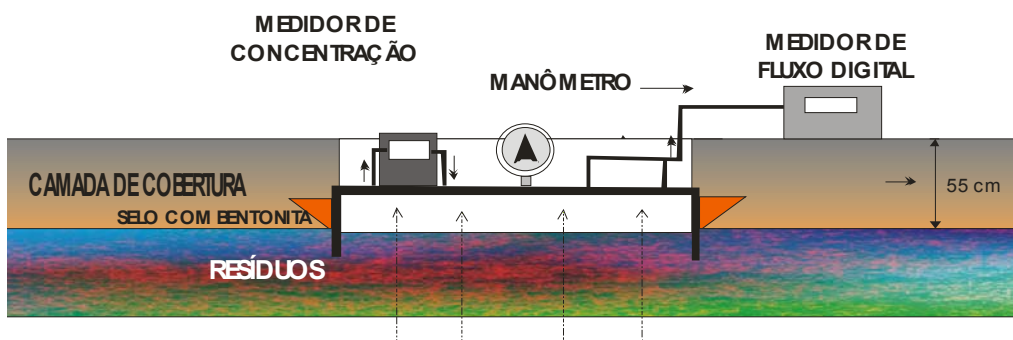


Figura 4.7: Cravação da placa em P2(B).

Os resultados obtidos com a PFLI em P2(B), ainda apresentaram concentrações e fluxo muito baixo em relação aos demais pontos examinados neste trabalho. Os motivos e possíveis conclusões encontram-se relacionadas no capítulo 5.

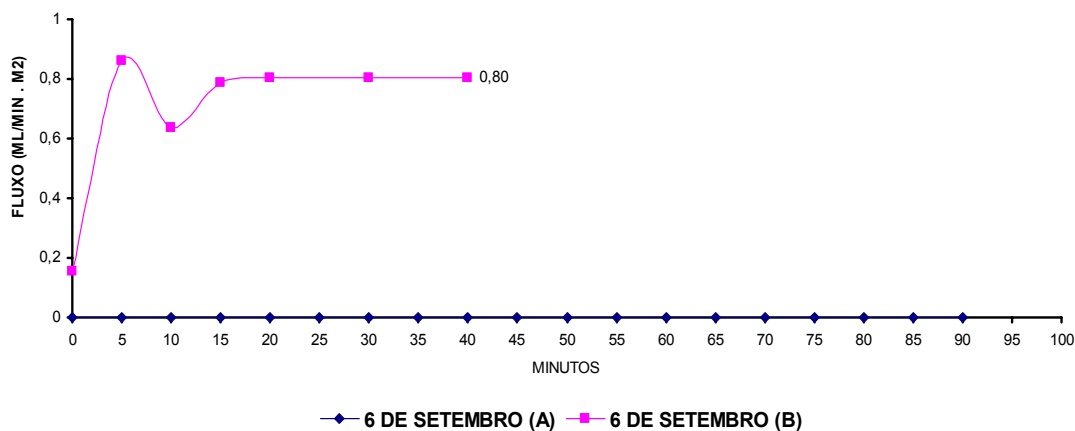


Figura 4.8: Fluxo de metano nos pontos P2(A) e P2(B).

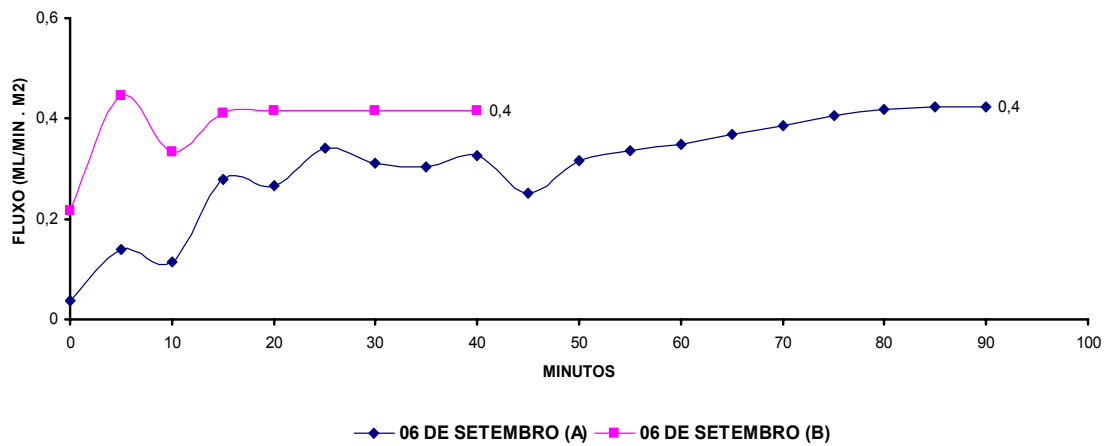


Figura 4.9: Fluxo de gás carbônico nos pontos P2(A) e P2(B).

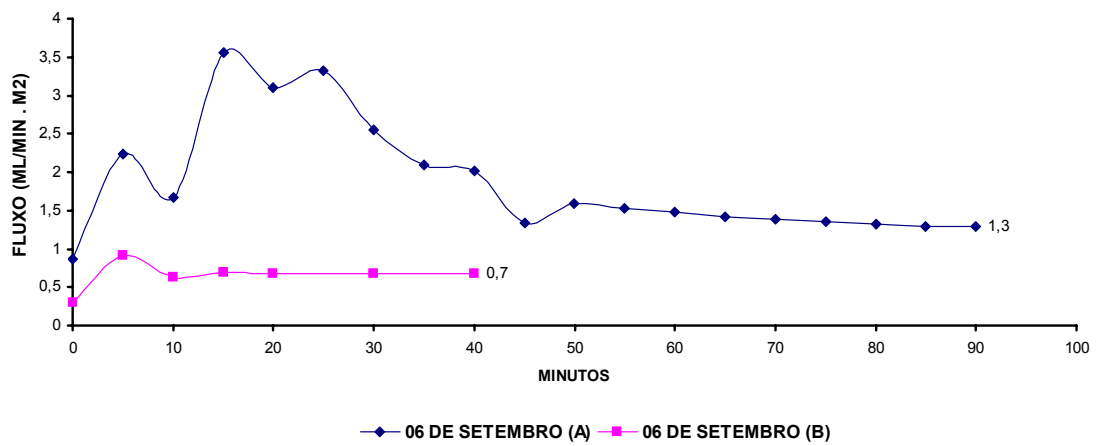


Figura 4.10: Fluxo de oxigênio nos pontos P2(A) e P2(B).

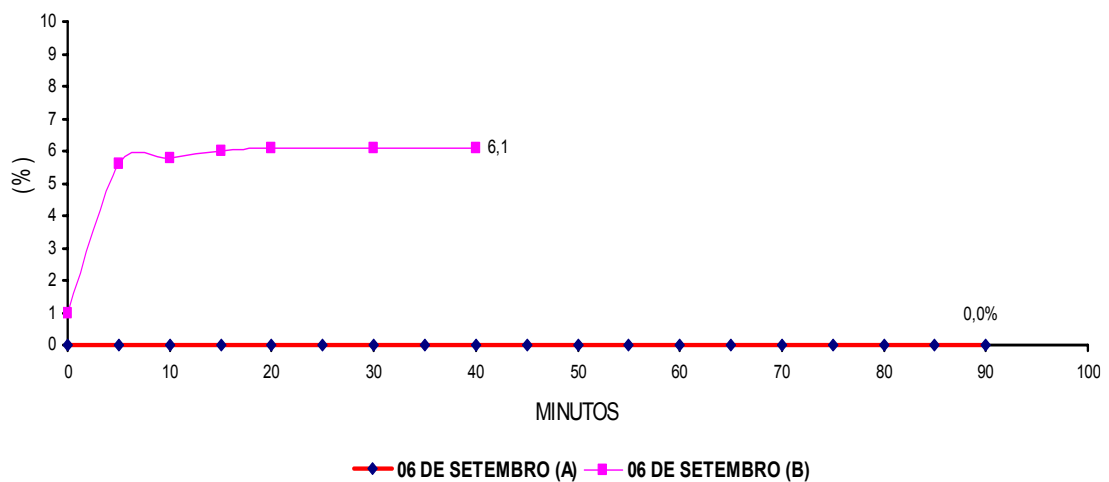
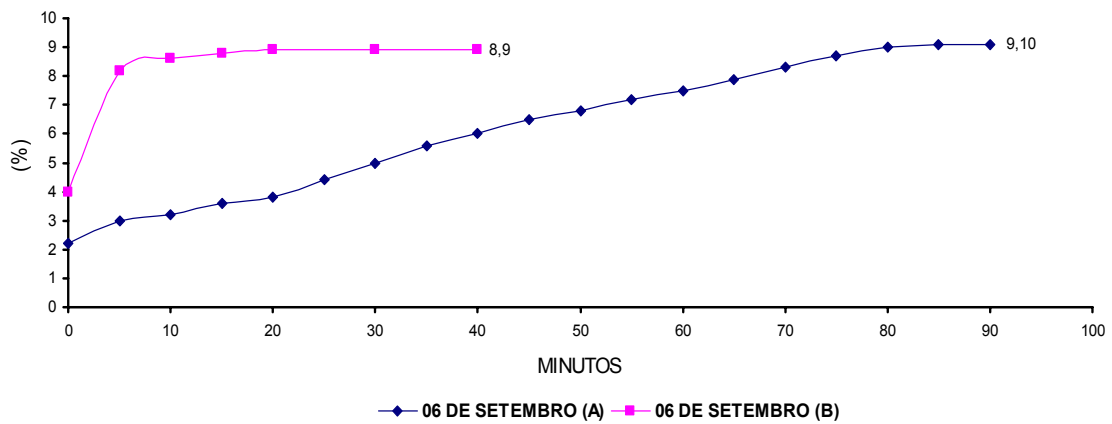
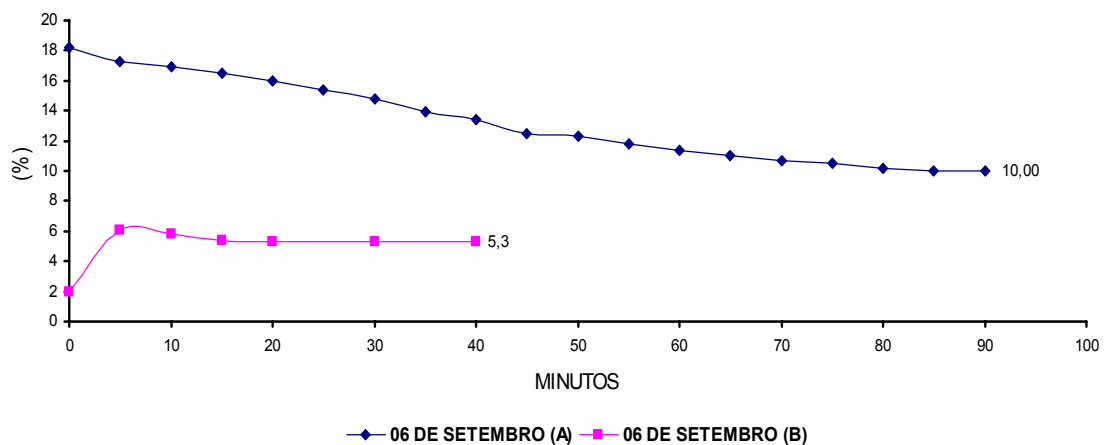


Figura 4.11: Concentração de metano nos pontos P2(A) e P2(B).



**Figura 4.12:** Concentração de gás carbônico nos pontos P2(A) e P2(B).



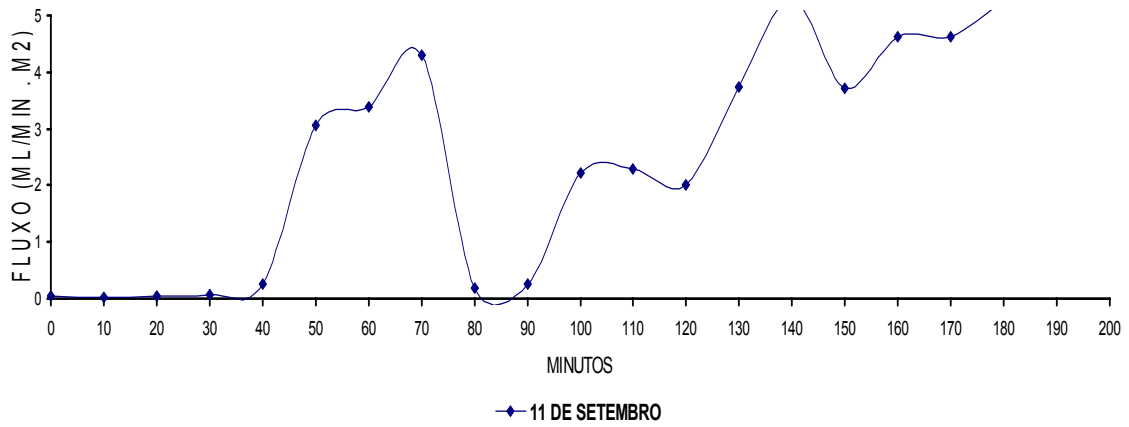
**Figura 4.13:** Concentração de oxigênio nos pontos P2(A) e P2(B).

#### 4.1.3 Resultados de campo obtido com a PFLI no ponto P3

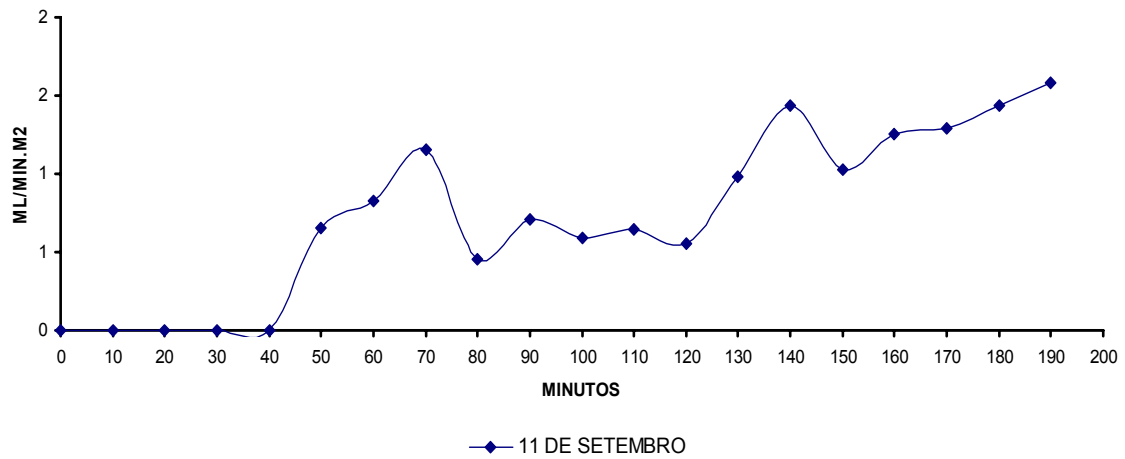
No ponto mais alto do aterro (cota 40m - em relação ao nível do mar) realizou-se somente um ensaio. Este local foi coberto a cerca de 1 ano e meio e tem uma área de aproximadamente 300 mil metros quadrados. A montagem do ensaio com a PFLI seguiu conforme o descrito no Capítulo 3.

É possível observar as variações do fluxo, como nas figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 em que o fluxo de metano e gás carbônico eram nulos. Cerca de 40 minutos após o início do ensaio, houve uma grande ascensão gasosa (“pico”) de metano e gás carbônico, apresentada nitidamente nas leituras

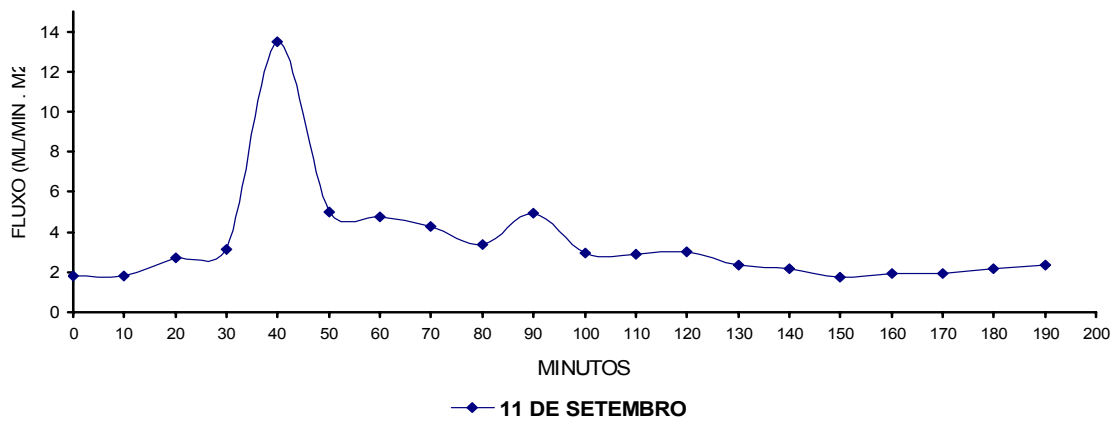
gráficas. Posteriormente este “pico” reduziu-se a níveis iniciais, para posteriormente voltar a subir.



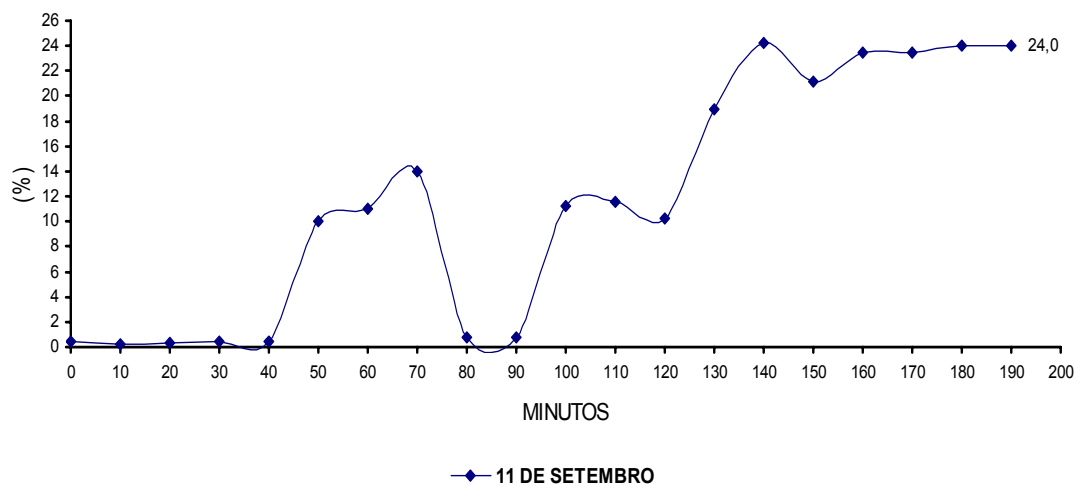
**Figura 4.14:** Fluxo de metano no ponto P3.



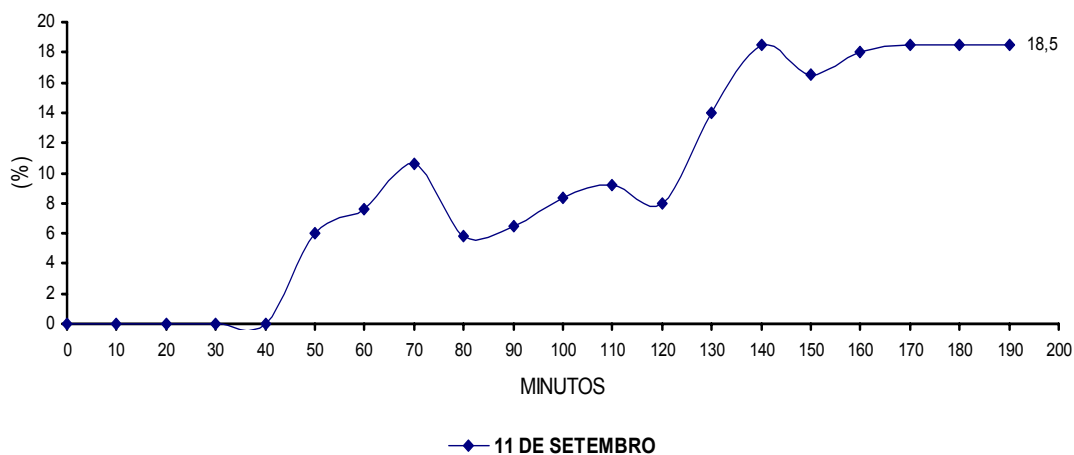
**Figura 4.15:** Fluxo de gás carbônico no ponto P3.



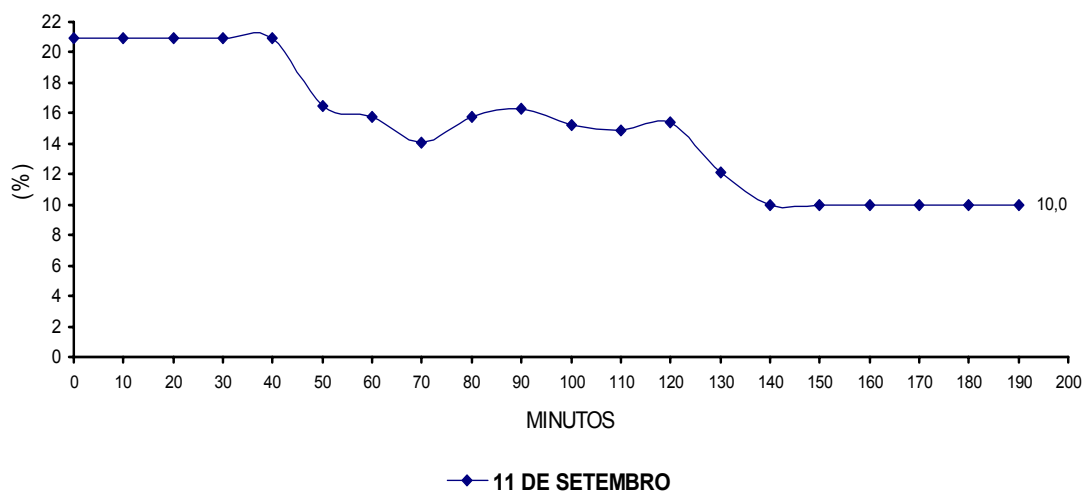
**Figura 4.16:** Fluxo de oxigênio no ponto P3.



**Figura 4.17:** Concentração de metano no ponto P3.



**Figura 4.18:** Concentração de gás carbônico no ponto P3.



**Figura 4.19:** Concentração oxigênio no ponto P3.

## 4.2 Ensaio de percolação gasosa com solo de P1 - Laboratório

O ensaio consiste em acompanhar o tempo para que as concentrações de gás metano e gás carbônico atinjam na saída, o mesmo valor de entrada (aproximadamente, 95% e 5% respectivamente). Com isso, pode-se comparar os resultados que influenciarão na eficiência da cobertura, os quais poderão ser especificados para cada tipo de solo.

O objetivo deste ensaio foi de analisar a condição de umidade, e densidade obtida pela compactação da amostra, que mais retenha o fluxo. Este ensaio determinar ou comprovar as melhores condições que um solo pode ter para que sua performance como cobertura de aterro, seja a melhor possível.

Resultados do ensaio:

### Caso 1)

Altura do corpo de prova: 8 cm

Massa específica ap. seca máxima → 1,55 g/cm<sup>2</sup>

Umidade ótima → 23,5%

Tempo de equilíbrio na vazão: 85 minutos

Velocidade do fluxo:  $1,6 \times 10^{-5}$  m/seg

### Caso 2)

Altura do corpo de prova: 8 cm

Massa específica ap. seca máxima → 1,55 g/cm<sup>2</sup>

Umidade → 15%

Tempo de equilíbrio na vazão: 25 minutos

Velocidade do fluxo:  $5,3 \times 10^{-5}$  m/seg

### Caso 3)

Altura do corpo de prova: 8 cm

Massa específica ap. seca máxima → 1,55 g/cm<sup>2</sup>

Solo Saturado (simulação de precipitação pluviométrica)

Tempo de equilíbrio na vazão: 350 minutos (ensaio interrompido sem fluxo equilibrado).

Velocidade do Fluxo: Não determinada

## **Capítulo 5 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS**

Este capítulo tem como objetivo, inicialmente, correlacionar os fatores geotécnicos e meteorológicos apresentados anteriormente, visando entender os principais mecanismos de percolação gasosa, buscando a melhor situação dentre as estudadas, quanto a eficiência do solo de cobertura de RSUs. Posteriormente foi feita uma análise das leituras de fluxo de biogás nos pontos estudados neste trabalho.

### **5.1 Correlações entre dados obtidos no campo e no laboratório**

#### **5.1.1 Correlações entre fatores geotécnicos**

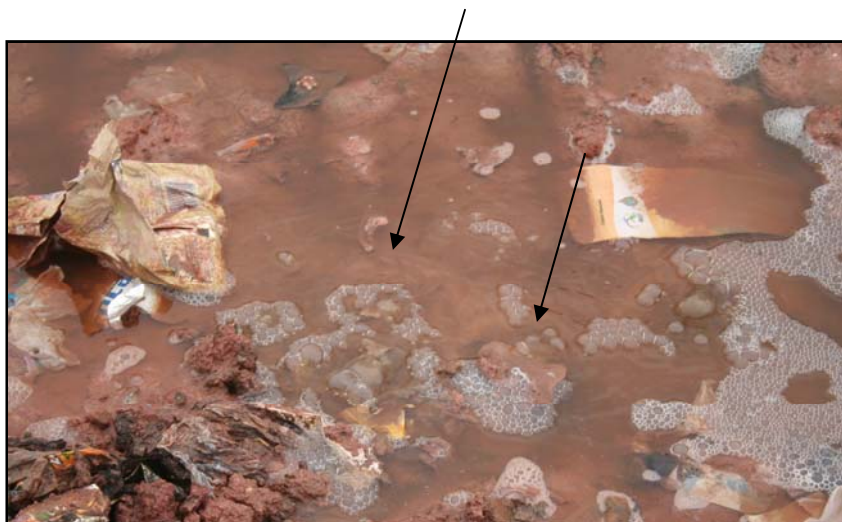
Pelo aspecto da granulometria, solos mais finos (solos argilosos) são comprovadamente mais eficientes na retenção de gases do que os solos com granulometria mais grossas – maiores teores de areias e siltes (DE PAULA *et al*, 2005). Normalmente, os projetos para cobertura de aterros de RSU, privilegiam solos bem compactados (IGNATIUS, 2005) e de menor granulometria, buscando ganhar melhores condições de eficiência para a camada de cobertura do aterro de RSU.

Nota-se, porém, que no campo e na situação estudada, a camada de cobertura da região do ponto P1, apresentou inúmeras fissuras (figuras 2.14 e 2.15) em decorrência do fenômeno de contração, devido não só a parte considerada fina deste solo, bem como a presença da esmectita (argilomineral expansivo) na composição mineralógica deste solo, como analisado no item 3.1.4.1.

Objetivando-se investigar o aparecimento destas fissuras, algumas de largura de 5 mm e profundidades estimadas de 15 cm, em um solo que pode ser considerado “bom”, ou seja, com alto teor de finos (66% de argila e siltes) e boa permeabilidade ( $k=1,6 \times 10^{-6}$  cm/s), conforme relatado nos itens 3.4.1.1, o qual esperava-se atender todas as condições para um bom solo de cobertura. A eficiência da camada de cobertura é prejudicada pela fenômeno da

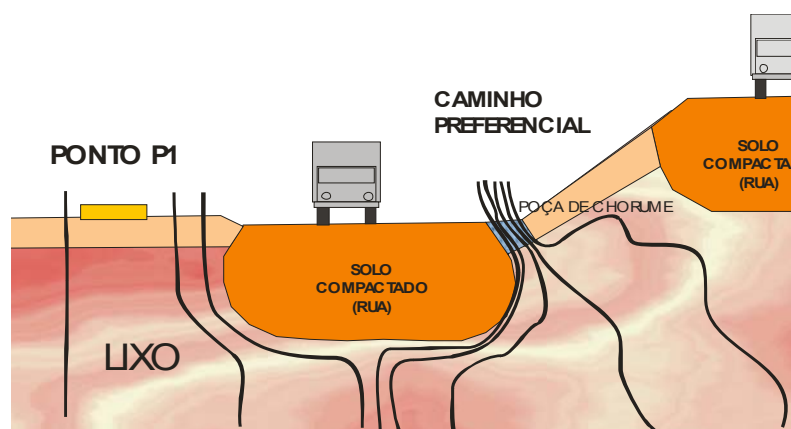
contração, pois possibilita a fácil percolação de líquidos para dentro e gases para fora do aterro.

O fenômeno da contração explica o surgimento de bolhas numa poça próxima ao ponto P1, como se observa na figura 5.1 abaixo, onde a camada de cobertura apresentava inúmeras trincas.



**Figura 5.1:** Fluxo de gás - bolhas. Foto do solo de cobertura do aterro de Gramacho /RJ, em 28 de agosto de 2007.

O fenômeno de contração pode dar ao biogás caminhos de mais fácil percolação. Estes caminhos são os caminhos preferenciais citados no item 2.10. Certamente no caso das bolhas da figuras 5.1, o solo das regiões laterais estão compactados pela passagem constante de carretas (figura 5.2), o que acredita-se deixa-las quase impermeáveis ao fluxo advectivo.



**Figura 5.2** Caminho preferencial do gás.

Isto deve ocorrer também, em outras áreas do aterro, que devido a ausência do acúmulo de líquidos, não apresentam o mesmo surgimento de bolhas. Porém, a saída do gás pelas trincas (gretas de ressecamento) deve ser intensa, provando que o transporte gasoso pelo solo de cobertura de aterros de RSUs deve ser explicado como provavelmente sendo fenômeno advectivo, que em alguns casos pode ser maior do que os difusivos.

O ensaio de percolação gasosa comprovou o que é apresentado na literatura (DE PAULA, 2005 e IGNATIUS, 2005 e MENDONÇA, 2007). Para uma otimização da eficiência do solo separado para cobertura de RSU, análises de sua granulometria, grau de compactação e presença de argilominerais é importante para o projeto.

Uma comparação entre amostras coletadas nos pontos P1 e P2, prova a heterogeneidade dos solos e suas diferentes eficiências. O ensaio de contração comprova a importância da pesquisa mineralógica e suas possíveis conseqüências negativas para a cobertura de um aterro de RSU. Como apresentado na figura 5.3, a maior contração do solo da amostra de P1 é nítida em relação a P2.



**Figura 5.3:** Comparação entre amostras de solo P1 e P2.

Isto sugere que a amostra coletada no ponto P1, após processos de ressecamento natural, irá apresentar fissuras ou gretas por ressecamento, como foi encontrado na área do ponto P1 (figuras 2.14 e 2.15), o que não ocorreu com o solo do de P2.

No ponto P2(a), após a montagem do ensaio, verificou-se a ausência de um fluxo significativo de biogás, apresentado nas figuras 4.8 a 4.13. Acredita-se que mesmo com o pequeno período de fechamento deste local (1 ano e meio), deveria haver um fluxo de biogás mais representativo.

No ponto P3, foi possível notar uma concentração equilibrada de oxigênio em torno de 10% ao final do ensaio, conforme apresentado na figura 4.19. Pode-se admitir que a heterogeneidade de materiais na camada de cobertura e problemas na compactação produziu uma série de vazios que façam ligações entre o sistema solo/ atmosfera.

## **5.2 Correlações entre fatores geotécnicos, meteorológicos com as leituras realizadas com a PFLI**

Os resultados obtidos com a PFLI das leituras de volume e da concentração de biogás, que estão apresentados no capítulo 4, representam o que de fato é liberado para a atmosfera. O valor final que é usado neste trabalho, tanto para a concentração quanto para o fluxo, é obtido após haver uma continuidade de valor nas leituras dos instrumentos no campo. Neste estudo observou-se esta continuidade de leituras variando entre 100 minutos (28 de agosto) a 200 minutos (caso do ensaio de 9 e 25 de agosto).

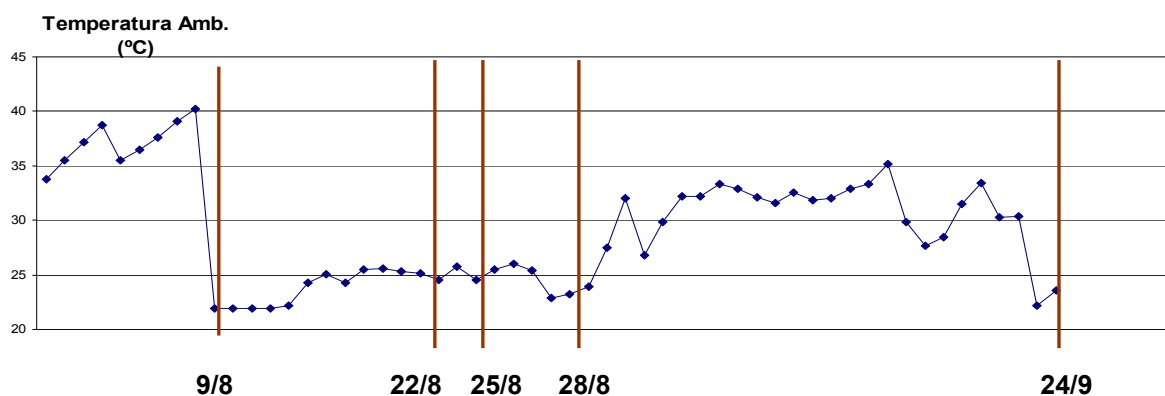
Conforme apresentado no item 3.2 as constantes oscilações meteorológicas influenciam no fluxo de biogás a ser liberado para a atmosfera através do solo de cobertura de aterros de RSUs. Seguem abaixo dados meteorológicos a serem confrontados com os dados coletados pela PFLI nos pontos estudados (TOSTES 2007).

Optou-se em resumir os principais dados coletados pela estação meteorológica, PFLI e resultados de ensaios laboratoriais, apresentados na tabela 5.1:

**Tabela 5.1:** Quadro resumo de dados coletados nos pontos P1, P2 e P3.

Ponto	Data	Espessura Camada (m)	Tempo de fechado (anos)	W Solo (%)	Temp atm (°C)	Pressão Atmosf. (mBar)	CH <sub>4</sub>		CO <sub>2</sub>		O <sub>2</sub>	
							(ml/min .m2)	(%)	(ml/min. m2)	(%)	(ml/min. m2)	(%)
P1	09/8	0,55	4	8,03	22,3	1022	24,4	52	15	34	0,3	0,5
P1	22/8	0,55	4	9,63	24,5	1023	3,95	42	2,8	31	0,2	1,3
P1	25/8	0,55	4	9,98	25,5	1012	37,9	55	28,8	34	0,5	0,5
P1	28/8	0,55	4	16,18	22,9	1021	0,3	24	0,2	18	9,3	0,2
P1	24/9	0,55	4	8,31	30,2	1023	6,4	17	4,6	13	3,0	1,6
P2A	6/9	0,60	0,5	10,10	33,3	1021	0	0	0,8	9	1,3	10
P3	11/9	0,45	2	9,22	31,8	1020	4,1	24	3,1	19	2,4	10

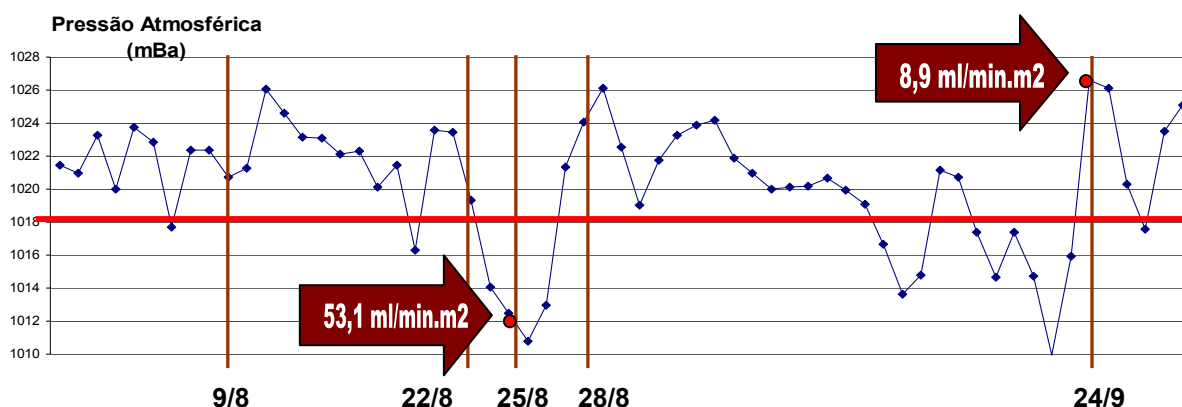
### 5.2.1 Efeito da temperatura



**Figura 5.4:** Gráfico da temperatura ambiente para análise do fluxo em P1.

Segundo MACIEL(2003) as temperaturas altas influenciam no movimento do biogás. A temperatura influencia diretamente na densidade de gases que têm seu transporte determinados por movimento advectivo ou difusivo. No caso dos ensaios com a PFLI realizados em Gramacho, todos os dias tiveram temperaturas variando entre 23 e 25°C (figura 5.4), tornando impossível analisar as variações de fluxo e concentração por este parâmetro.

## 5.2.2 Efeito da pressão atmosférica

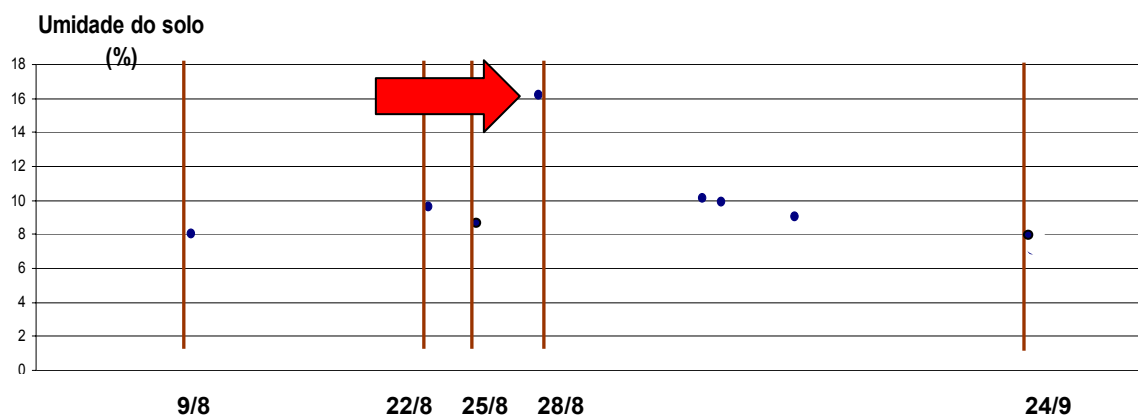


**Figura 5.5:** Gráfico da pressão atmosférica para análise do fluxo em P1.

Das condições meteorológicas, a mais importante é a pressão atmosférica (MACIEL, 2003 e COSSU *et al*,1997). Esta varia conforme o movimento das massas de ar atmosférico, e pode ser responsável pela entrada de oxigênio para dentro do aterro, impedir a saída do fluxo ou atrair para fora maiores vazões de biogás, principalmente se existirem caminhos preferenciais representativos. De acordo com os autores citados acima, a pressão do ar no interior do solo de cobertura é aproximadamente de 1016 mBar ou 1ATM.

No caso do ponto P1, no dia 25 de agosto, conforme figura 5.5, quando foi registrada uma baixa pressão atmosférica (1011mBar), o fluxo anotado pela PFLI foi o mais intenso (53,1 ml/min.m<sup>2</sup>) e com maior concentração de metano (55%). Em comparação com o dia 24 de setembro, a alta pressão (1026 mBar) o fluxo medido foi de apenas 8,90ml/min.m<sup>2</sup>, bem inferior ao do dia 25 de agosto. Assim neste caso, a alta pressão atmosférica é o único parâmetro a ser considerado que poderá alterar estas leituras, no qual pode-se embasar esta afirmação, confirmando dados da literatura.

### 5.2.3 Efeito da umidade do solo

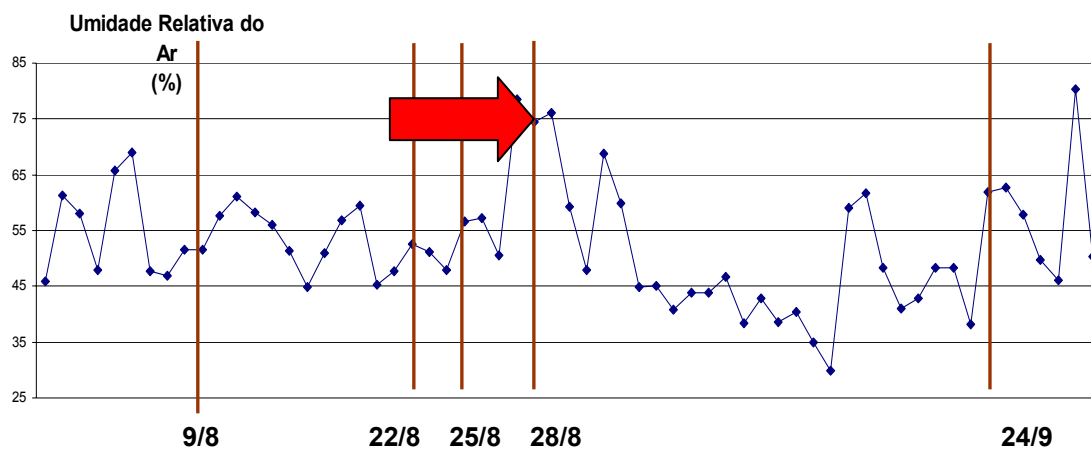


**Figura 5.6:** Gráfico do teor de umidade do solo para análise do fluxo em P1.

O teor de umidade do solo provocado, neste caso, pela precipitação pluviométrica e/ou da umidade do ar, apresenta-se como outro fator importante para minorar o transporte de biogás através do solo. Pode-se observar que no dia 28 de agosto de 2007, no momento em que o teor de umidade chegava a 16,18% o fluxo observado era o mais baixo identificado neste estudo, chegando a 0,40 de metano e 0,1 ml/min.m<sup>2</sup> para o gás carbônico. A observação deste fato é comprovada no ensaio de laboratório, quando há aumento no teor de umidade no solo, preenchendo os vazios com água, e diminuição na permeabilidade gasosa.

Segundo IGNATIUS (2005), em corpos de prova submetidos a uma saturação a partir de 80%, há uma continuidade de água e o fluxo advectivo do ar no solo se anula, dificultando também o difusivo pois este deve ser dissolvido no líquido.

## 5.2.4 Efeito da umidade relativa do ar



**Figura 5.7:** Gráfico da umidade relativa do ar para análise do fluxo em P1.

A umidade relativa do ar representa a quantidade de vapor d'água na atmosfera. Este teor é influenciado por outros fatores meteorológicos como a precipitação pluviométrica, pressão atmosférica e temperatura. Em dias de alta umidade relativa do ar, este fator interfere na condensação da água sobre o solo de cobertura de aterros, o que aumenta consequentemente, o teor de umidade do solo. Pode-se observar também que a presença acentuada de umidade relativa do ar torna maior a percolação de oxigênio para o interior do solo (figura 4.6) por processo de difusão.

## 5.2.5 Efeito do tempo de cobrimento

A partir do item 2.7 e figura 2.10, observa-se que, as reações metanogênicas ocorridas no interior de um aterro de RSU, têm seu maior desenvolvimento a partir do cobrimento do resíduo. Pode-se observar que já ocorre um início na formação de metano ainda na fase II (seis meses). Portanto, isso pode explicar o fato de que o ponto P2, recentemente coberto (seis meses), apresentar uma concentração e um fluxo de metano na cobertura igual a zero.

### **5.2.6 Retenção do ácido sulfídrico**

Este gás é o que caracteriza o odor do RSU. Sua presença causa um grande impacto na poluição local do aterro, devido ao mau cheiro e quanto a sua elevada toxicidade ao ser humano (gás cancerígeno).

Na parte superior da camada de cobertura, onde foram feitas as análises com a PFLI, em nenhum local estudado observou-se a presença deste gás, embora o mesmo seja notado quando se faz uma leitura na saída de dreno (*flare*). A explicação para este fato está em MACIEL, 2003 e IGNATIUS, 2005. O ácido sulfídrico é altamente solúvel na água devido ao seu coeficiente de solubilidade (3,846 g/l), portanto mesmo num solo não saturado, como o caso de coberturas de aterro, são necessários apenas 25 cm de espessura na camada para uma completa retenção deste gás.

## **Capítulo 6: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.**

Neste capítulo estão reunidas as conclusões obtidas através do estudo descrito neste trabalho, verificadas no próprio aterro, em ensaios experimentais de laboratório e ensaios de campo. A seguir são apresentadas algumas sugestões para a continuação desta pesquisa.

### **6.1 Conclusões obtidas com estudo de experimentos de laboratório.**

- A simples caracterização geotécnica não deve ser a única informação para indicar o melhor solo a ser utilizado na camada de cobertura de RSU. Recomenda-se adicionar a esta análise, ensaios de limite de contração e, posteriormente, para explicar a origem dos valores encontrados, um ensaio de difratometria de raio “X”, que irá apresentar o percentual de argilominerais, co-responsáveis pelo fenômeno da contração consequentemente ao aparecimento de trincas, tão indesejadas e comprometedoras para fins de eficiência da cobertura de aterros. Por mais que o limite de contração seja um dos Limites de Atterberg, este ensaio não é usual, devido ao uso do mercúrio no ensaio.
- Para corpos de prova moldados com o solo do ponto P1 do Aterro de Gramacho, o ensaio de percolação gasosa permitiu que fossem observados diferentes teores de umidade para uma mesma densidade no corpo de prova. Observou-se que a permeabilidade se reduz com o aumento da saturação. Esta diferença é mais significativa quando a saturação de um corpo de prova supera os 80%.

- Quanto às condições de compactação, conclui-se que a densidade ótima (Umidade ótima → 23,5% e massa específica ap. seca → 1,56 g/cm<sup>3</sup>) é a que melhor se apresentou quanto a retenção de gases, sendo a recomendada para a execução de camadas de cobertura de aterros de RSU, confirmando o esperado;
- Solos arenosos permitem uma fácil percolação do biogás e entrada de fluidos para o interior do aterro;
- O equipamento montado no laboratório apresentou-se como uma ferramenta eficaz para simular as condições de campo de um determinado solo, onde pode-se analisar o efeito da umidade ideal como parâmetro auxiliar na retenção de fluxo gasoso, em determinadas condições de compactação.

## **6.2 Conclusões obtidas no campo**

- Em aterros de RSUs os efeitos da contração, má compactação, uso de solos porosos (como no ponto P3), menor espessura da cobertura, podem transformar esta camada num sistema ineficiente quanto à retenção de gases. Os mecanismos de transporte de massa variam conforme as condições operacionais do aterro e do solo aplicado, sendo possível considerar que os processos de advecção se sobrepõem aos da difusão.
- Com a PFLI, foi possível observar o comportamento do biogás no interior do aterro, quando este se acumula numa região interna, formando um “bolsão”, até o momento em que o aumento de pressão interna rompe a superfície que o mantém confinado. Foi possível acompanhar este efeito na superfície, através dos picos nas leituras conforme apresentado neste trabalho, nas figuras 4.14 a 4.19 de P3.

- Neste estudo observou-se que a variação do metano e gás carbônico é sempre crescente nas leituras de fluxo e de concentração nos ensaios com a PFLI e a concentração e fluxo de oxigênio sempre reduz-se, tendendo a valores próximos de zero, por motivos relatados no item 5.2.4.
- Com o ensaio realizado com PFLI foi possível estimar o total das emissões que contribuem para o aumento do efeito estufa de uma certa área. Considerando que o Aterro Metropolitano de Gramacho tem 1.300.000 m<sup>2</sup> de área total, se apenas 50% desta área liberasse biogás como em P1 no dia 25 de agosto, isto equivaleria, fazendo-se as respectivas correlações conforme apresentado em planilhas em anexo, um total de 744 toneladas de carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) por dia, equivalente a emissão de 172.000 veículos (8,4% do total de veículos do município do Rio de Janeiro ou 93,0% do Município de Duque de Caxias). Esta emissão representa aproximadamente 5,5 MW (Anexo 1).
- A técnica para medição de fluxo em volume e concentração de espécies gasosas do biogás com a PFLI, se mostrou eficiente, de simples entendimento e fácil aplicação. O alto custo do equipamento para medida de concentração é o único fator negativo deste ensaio.

### **6.3 Sugestões para futuras pesquisas**

- Monitorar a temperatura do solo de cobertura de aterros de RSU, a fim de estudar as variações de temperatura na profundidade de 40 cm e correlacionar matematicamente com as leituras de fluxo e concentração a ser obtido com a PFLI instalada nos mesmos locais a fim de verificar a eficiência da cobertura simplesmente com dados térmicos.

- Aumentar o número de pontos a serem analisados com a placa PFLI, melhorando a representatividade dos resultados;
- Relacionar o tipo de solo de cobertura com o localização e o número de ensaios para a área;
- Desenvolver mecanismos de monitoração contínua de fluxo, temperatura, pressão e concentração gasosa, de tempo integral, para avaliar a eficiência do solo de cobertura.
- Estudar o mecanismo de percolação horizontal do gás dentro de aterros de RSU e seus caminhos preferenciais.
- Mensurar a chamada “emissão fugitiva” (biogás que não é retido pelo sistema de cobertura), com valores obtidos na saída de tubulação de drenagem, para verificar uma possível “perda” e/ou condição de contaminação atmosférica
- Desenvolver sistemas de cobertura mais eficientes para a retenção de biogás ou transformação biológica do biogás (camada oxidativa).
- Analisar o fluxo de biogás através do solo de cobertura em outros aterros, para fins comparativos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Associação Brasileira de normas técnicas – ABNT, 1984. Apresentação de Projetos de Aterros Sanitários de Resíduos Urbanos – NBR 8.419/1984. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de normas técnicas – ABNT, 1997. Aterro de Resíduos Não Perigosos Sólidos – Critérios para projeto, implantação e operação – NBR 13.896/1997. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de normas técnicas – ABNT, 2004. Resíduos Sólidos - Classificação – NBR 10.004/2004. Rio de Janeiro.

AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., JOANES, A.M., GAGNON, D., BARBERA, J. M., AACHIB, M., BÈDARD, C., CHAPUIS, R.P., BERN, L., (1999), Étude sur les Barrières Sèches Construites à Partir des Résidus Miniers – Phase II: Essais em Place. In: MEND Project 2.22.2c, CANMET, Ottawa, Canada.

BARBOSA, M.C. (1994). Investigação Geoambiental do Depósito de Argila sob o Aterro de Resíduos Urbanos de Gramacho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BARLAZ, M.A., HAM, R.K. e SHAEFER, D.M.(1989), Mass Balance, Journal of Environmental Engineering, ASCE, vol115, nº 6, pp.1088-1102.

BORBA, S.M. (2006). Monitoramento e Modelagem da Produção de Gases em Aterros de Nova Iguaçu. Dissertação M. Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BRADY, (1989), Natureza e Propriedades dos Solos. 7ª ed. Rio de Janeiro, Ed. Freitas Bastos.

BRAGA, B. N., HESPANHOL, I, CONEJO, J.G., BARROS, T, SPENCER, M.,(2003).Introdução à Engenharia Ambiental, SP, São Paulo: Prentice Hall.

BORGATTO, A.V.A. (2006). Estudo do Efeito Fibra e da Morfologia na Estabilidade de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de M. Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

CAMPOS, J. R. (1999). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo, PROSAB, Abes, Rio de Janeiro, 435p.

Companhia Municipal de Limpeza Urbana – COMLURB (2007), folheto promocional: “Biogás – Contra o aquecimento global”.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (1999). CONAMA n° 258/99.

COPPE - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. (2006). Projeto PEC – 7611: Estudos Técnico-Científico do PERMAGEL, 1° Relatório Técnico.

COSSU, R., A. MUNTONI (1997), Biogás Emission Measurements Using Static and Dynamic Flux Chambers and Infrared Methods. Proceedings Sardinia 97, Sixth International Landfill Symposium, CISA Publisher, Cagliari, vol. 4, 103-114.

COSTA, F. (2005). Estoques de carbono orgânico e fluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtropical brasileiro. 145f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Curso de Pós-Graduação em solos, Universidade do Rio Grande do Sul.

CZEPIEL, P.M., MOSHER, B., HARIS, R.C., SHORTER, J.H. KOLB,C.E.e LAMB, B.K. (1996). Landfill methane emissions Measured by Enclosure and atmospheric trace Methods , Journal of Geophysical Research, Vol.101, n° D11, pp.16,711-16,729.

DAVIDSON, E.A.(2002).Minimizing artifacts and bases in chamber-based measurement of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, V.113, p.21-37.

DE PAULA, F.R. A.; TIBANA, S.; ALMEIDA, F.T.; JÚNIOR, R.T.F.; SHEL M.S.;SILVA, M.G. & VARGAS, H. (2005). Estudo das Propriedades do Fluxo de Gases em meios Porosos. XIII COBRANSEG, Curitiba/ PR.

DENMEAD, O.T., RAUPACH, M.R. (1993). Methods for measuring atmospheric gas transport in agricultural and forest systems. In: HARPER, L.A. *et al.* (ed). *Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change*. Madison: ASA, CSSA e SSSA, p. 19-43. (ASA Spec. Publ. 55)

FAO. (2001). Global estimates of gaseous emission of NH<sub>3</sub>, NO and N<sub>2</sub>O from agricultural land. Rome. 106p.

EHRlich, M., ALMEIDA, M.S.S. e BARBOSA, M.C. (1994). "Pollution control of Gramcho Municipal Landfill" First International Congresso on Environmental Geotechnics, Edmonton, Canada.

ELSBURY, B.R., DANIEL, D.E., SRADERS, G.A., ANDERSON, D.C.(1990). "Lessons Learned from compacted Clay Liners". *Journal of Geotechnical Engineering*, V. 166, n° 11, pp. 1641-1660.

FÉCIL, B.; HÉROUX, M. & GUY, C. (2003). Development of a Method for the Measurement of Net Methane Emissions From MSW Landfills. Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia, Italy.

FERRARI, A.A.P. (2005). Viabilidade da utilização de silte compactado com o material de impermeabilidade em aterros de resíduos. Tese M. Sc., Escola Politécnica da Universidade da São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, São Paulo, SP, 118p.

FILHO, L.F. (2005). “Estudo de gases em aterros. Casos: Nova Iguaçu e Terra Brava”, Dissertação de M. Sc., Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

GEORIO. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/georio/alerta/tempo.htm>. Acessado: 20 de Outubro de 2007.

GRIFFITH, D.W.T., GALLE, B. (2000). Flux measurements of NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> by dual-beam FTIR spectroscopy and flux-gradient technique. *Atmospheric & Environment*, V.34, p. 1087-1098.

GRIFFITH, D.W.T., DAVID, D. J, ESPINOSA, D.M.S (2002). Air-land use exchanges of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O measured by dual-beam FTIR spectroscopy and micrometeorological techniques. *Atmospheric & Environment*, V.34, p. 1833-1842.

HANSEN, S., GARDNER, G. H, GIL, H.G. (1993). N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic. *Soil Biology and Biochemistry*, V.25, p. 621-630.

HEGDE, U., PENMAN, A.V., FISCHER, G.C. (2003). Methane and carbon dioxide emissions from Shan-Chu-Ku landfill site in northern Taiwan. *Chemosphere*, V. 52, p. 1275-1285.

HUTCHINSON, G.L., LIVINGSTON, G.P. (1993). Use of chamber systems to measure trace gas fluxes. In: HARPER, L.A. *et al.* (ed). *Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change*. Madison: ASA, CSSA e SSSA, p. 63-78. (ASA Spec. Publ. 55).

IGNÁTIUS, S.G. (1999). Fluxo unidirecional de gás através de solo compactado – Determinação laboratorial dos Parâmetros, Tese D. Sc., EPUSP, 337p.

IGNATIUS, S. G. (2005). Fluxo advectivo de Gás em Solos – Determinação dos parâmetros em Laboratório. XIII COBRANSEG, Curitiba/ PR.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change.

Disponível em: [http://www.natbrasil.org.br/Docs/ipcc\\_2007.pdf](http://www.natbrasil.org.br/Docs/ipcc_2007.pdf). Acessado em: 28 de Outubro de 2007.

IPT. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo S.A. Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE, publicação IPT 2622, 2ed., 370p, São Paulo.(2000).

IZZO, R.L.S. (2007). Classificação de Resíduos Sólidos Urbanos da Cidade do Rio de Janeiro Utilizando a Norma Alemã E1-7 GDA. 9º Simpósio Internacional de Gerenciamento de Lixo e Aterros Sanitários/Sardenha, Itália.

JUCÁ, J.F.T., MONTEIRO, V.E.D., OLIVEIRA, F.J.S., MACIEL, F.J., (1999). “Monitoramento Ambiental do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos, Toledo, Paraná.

JUCÁ, J.F.T.; MARIANO, M.O.H.; ALVES, M.C.M.; MACIEL, F.J. & BRITO, A. (2005). Disponibilidade do Biogás em uma Célula do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca. 23º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental Campo Grande / MS.

JUCÁ, J.F.T., *et. al.* (2006). Disponibilidade do Biogás em uma Célula do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

KAIMOTO, L.S.A.(2005). Simpósio Internacional de Tecnologias e tratamento de Resíduos Sólidos, RJ, Rio de Janeiro.

KUO, E.Y., RITCHIE, A.IM., (1999). “The Impact of Convection on the Overall Oxidation Rate in Sulfidic Waste Rock Dumps”. In: Proceedings of Sudbury’ 99 Mining and Environment, vol.2, pp.211-220, Sudbury, Ontario.

LANG, R.J., STALLARD, W.M., STIEGLER, L.C., HERRERA, T.A., CHANG, D.P.E., TCHOBANOGLOUS, G. (1989). Movement of gases in municipal solid waste landfills, report prepared for the California Waste Management Board, USA.

MACIEL, F.J. (2003). Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE. Tese M. Sc., Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

MACIEL, F.J., JUCÁ, J.F.T. (2000). Laboratory and field test for studying gás flow through MSW landfill cover soil, ASCE Geotechnical Special Publication (Denver-USA), n° 99, pp.569-585.

MATTHIAS, A.D., RAUL, A.D, TRASDUCHY, M (1980). A simple chamber technique for field measurement of emissions of nitrous oxide from soils. Journal of Environmental Quality, V.9, p.251-256.

MANASSERO,M., VAN IMPE,W.F. & BOUAZZA,A. (1996). Waste Disposal and Containment. Technical Committee on Environmental Geotechnics, ISSMFE, Preprint of Special Seminar, ENEL-CRIS, Milan, Italy.

MENDONÇA, R.M.G. (2007). Estudo da difusão de oxigênio em materiais de cobertura. Tese D. Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MONTEIRO, V.E.D, MELO, M.C. e JUCÁ, J.F.T. (2002). Biological degradation analysis in Muribeca Solid Waste Landfill associated with local climate, Proceedings of The Fourth International Congress of Environmental Geotechnics (ICEG), Rio de Janeiro, Brasil, vol. 2, pp. 799-803.

MORIN, K.A., GERENCHER, E., JONES,C.E., KONASEWICH,D.E., (1991). Critical Literature Review of Acid Drainage from Waste Rock. In: MEND Project 1.11.1, Ottawa, O.N. Canada.

NASA. Disponível em: <http://science.nasa.gov/headlines/>. Acessado em: 03 de Novembro de 2007.

OLIVEIRA FILHO, W.L. *Verification of a Desiccation Theory for Soft Soils*. Boulder: Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, 1998. (Tese de Doutorado).

PIMENTEL, V.E.(2006). "Landfill Covers with Geosynthetics". Simpósio Internacional de Tecnologia de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, Brasil,24-27.

PNSB (2000). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Programa GOOGLE EARTH (2007), acessado em 10 novembro de 2007.

QIAN, X., KOERNER, R.M. (2002). "Gas collection and control Systems". Geotechnical Aspect of Landfill Design and Construction, New Jersey, Prentice Hall.

REAL, J.L.G. (2005). Riscos Ambientais em Aterros de Resíduos Sólidos com Ênfase nas Emissões de Gases, Dissertação M. Sc. Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

RENAULT, P., STENGEL,P. (1994). "Modeling Oxygen Diffusion in Aggregated Soil: I. Anaerobiosos inside Aggregates", Soil Science Society of América Journal, V.58, pp.1017-1023.

RENAULT, P E SIERRA (2001) Waste Disposal and Containment. Technical Committee on Environmental Geotechnics, ISSMFE, Preprint of Special Seminar, ENEL-CRIS, Milan, Italy.

ROSE, J.L., (2007). Estudo da Oxidação do Metano em uma camada de Cobertura. Qualificação de D. Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROLSTON, D.E. (1986). Gás Flux, American Society of Agronomy, Soil Science Society of América, pp. 1103-1119.

SEELY, G.E e HUNT, J. (1994). Buoyant Advection of Gases in Unsaturated Soil, J. Env. Eng. ASCE, Vol. 120. nº 5, p. 1230-1247.

TCHOBANOGLIOUS, G., THESSSEN, H., VIGIL, S.A. (1994). "Composicion Y Características, Generacion, Movimento y Control de los Gases de Vertedoro". Gestion Integral de Resíduos Sólidos, V. 1 MC Graw Hill.

TINDALL, J.A., KUNKEL, J.R., ANDERSON, D.E. (1999). Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers. New Jersey, Prentice Hall, 624p.

TOSTES, Ângela (2007). Informações pessoais sobre o monitoramento meteorológico do aterro de Gramacho RJ.

WASTE MANAGEMENT PAPER Nº 27 (1989). The Control of Landfill fluxes over soil, Her Majesty's of Pollution, London, UK.

WEERTS, A.H., FREIJER, J.I., BOUSTEN, W. (2000). "Modelling the Gas Diffusion Coefficient in Analogy to Electrical Conductivity Using a Capillary Model", Soil Science Society of América Journal, V. 64, pp. 527-537.

XU, X., NIEBER, J.L, GUPTA, S.C. (1992). "Compaction Effect On The Gás Diffusion Coefficient In Soils", Soil Science Society of América Journal, V. 56, nº 6. p. 1743-1753.

## ANEXO 1

### CÁLCULO DA EMISSÃO DE GASES

#### ENSAIO COM PFLI

Data: 25 de agosto de 2007

#### DADOS DO EQUIPAMENTO

Diâmetro da Placa D= 0,570 m

Área da Placa: A= 0,255 m<sup>2</sup>

#### DADOS COLETADOS EM CAMPO

Concentração Estabilizada de CH<sub>4</sub> C<sub>CH<sub>4</sub></sub> = 55,00 %

Q<sub>CH<sub>4</sub></sub> = 53,06ml/min.m<sup>2</sup>

Concentração Estabilizada de CO<sub>2</sub> C<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 34,00 %

Q<sub>CO<sub>2</sub></sub> = 11,62 ml/min.m<sup>2</sup>

Concentração Estabilizada de O<sub>2</sub> C<sub>O<sub>2</sub></sub> = 0,50 %

Q<sub>O<sub>2</sub></sub> = 0,47ml/min.m<sup>2</sup>

Área do Aterro : 650.000 m<sup>2</sup>

#### CÁLCULO DA ESTIMATIVA DE EMISSÕES

##### Gás Metano (CH<sub>4</sub>)

Emissão de CH<sub>4</sub> (ml/min.m<sup>2</sup>) → Q<sub>CH<sub>4</sub></sub> = (Q/A)\*C<sub>CH<sub>4</sub></sub> = 53,06 ml/min.m<sup>2</sup>

Emissão de CH<sub>4</sub> (l/min.m<sup>2</sup>) → Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>(ml/min.m<sup>2</sup>)/1000(ml/l) = 0,0531 l/min.m<sup>2</sup>

Emissão de CH<sub>4</sub> (l/dia.m<sup>2</sup>) → Q<sub>CH<sub>4</sub></sub> (l/min.m<sup>2</sup>)\*60\*24 (min/dia) = 76,40 l/dia.m<sup>2</sup>

Emissão de CH<sub>4</sub> (t/dia) → 1mol = 22,4 l = 16g/mol (CH<sub>4</sub>)

Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>(g/dia.m<sup>2</sup>) → [ Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>(l/dia.m<sup>2</sup>) \* 16 (g/mol) ] / 22,4 (mol/l) = 54,57 g/dia.m<sup>2</sup>

Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>(kg/dia.m<sup>2</sup>) → Q<sub>CH<sub>4</sub></sub>(g/dia.m<sup>2</sup>) / 1000(g/kg) = 0,055 kg/dia.m<sup>2</sup>

##### TOTAIS

Total CH<sub>4</sub> ( kg/dia.m<sup>2</sup> ) = 0,055 kg/dia.m<sup>2</sup>

Total CH<sub>4</sub> do aterro ( kg/dia )

Total CH<sub>4</sub>(kg/dia.m<sup>2</sup>)xÁrea do aterro (m<sup>2</sup>) = 35.472,76 kg/dia → 5,5 MW

(adotando-se  $\eta=22\%$  e  $FC=90\%$ )

### Gás Carbônico (CO<sub>2</sub>)

Emissão de CO<sub>2</sub> (ml/min.m<sup>2</sup>) →  $Q_{CO_2} = (Q/A) \cdot C_{CO_2} = 11,62 \text{ ml/min.m}^2$

Emissão de CO<sub>2</sub> (l/min.m<sup>2</sup>) →  $Q_{CO_2}(\text{ml/min.m}^2)/1000(\text{ml/l}) = 0,0116 \text{ l/min.m}^2$

Emissão de CO<sub>2</sub> (l/dia.m<sup>2</sup>) →  $Q_{CO_2}(\text{l/min.m}^2) \cdot 60 \cdot 24 (\text{min/dia}) = 16,73 \text{ l/dia.m}^2$

Emissão de CO<sub>2</sub> (t/dia) →  $1 \text{ mol} = 22,4 \text{ l} = 46 \text{ g/mol} (\text{CO}_2)$

$Q_{CO_2}(\text{g/dia.m}^2)$  →  $[ Q_{CO_2}(\text{l/dia.m}^2) \cdot 46 (\text{g/mol}) ] / 22,4 (\text{mol/l}) = 34,35 \text{ g/dia.m}^2$

$Q_{CO_2}(\text{kg/dia.m}^2)$  →  $Q_{CO_2}(\text{g/dia.m}^2) / 1000(\text{g/kg}) = 0,034 \text{ kg/dia.m}^2$

TOTAIS

Total CO<sub>2</sub> ( kg/dia.m<sup>2</sup> ) = 0,034 kg/dia.m<sup>2</sup>

Total CO<sub>2</sub> do aterro ( kg/dia ) →

Total CO<sub>2</sub>(kg/dia.m<sup>2</sup>) X Área do aterro (m<sup>2</sup>) = 22.328,35 kg/dia

### Gás Oxigênio (O<sub>2</sub>)

Emissão de O<sub>2</sub> (ml/min.m<sup>2</sup>) →  $Q_{O_2} = (Q/A) \cdot C_{CO_2} = 0,47 \text{ ml/min.m}^2$

Emissão de O<sub>2</sub> (l/min.m<sup>2</sup>) →  $Q_{O_2} (\text{ml/min.m}^2) / 1000(\text{ml/l}) = 0,0005 \text{ l/min.m}^2$

Emissão de O<sub>2</sub> (l/dia.m<sup>2</sup>) →  $Q_{O_2} (\text{l/min.m}^2) \cdot 60 \cdot 24 \text{ min/dia} = 0,68 \text{ l/dia.m}^2$

Emissão de O<sub>2</sub> (t/dia) →  $1 \text{ mol} = 22,4 \text{ l} = 32 \text{ g/mol} (\text{O}_2)$

$Q_{O_2}(\text{g/dia.m}^2)$  →  $[ Q_{O_2}(\text{l/dia.m}^2) \cdot 32 (\text{g/mol}) ] / 22,4 (\text{mol/l}) = 0,97 \text{ g/dia.m}^2$

$Q_{O_2}(\text{kg/dia.m}^2)$  →  $Q_{O_2}(\text{g/dia.m}^2) / 1000(\text{g/kg}) = 0,001 \text{ kg/dia.m}^2$

TOTAIS

Total O<sub>2</sub> ( kg/dia.m<sup>2</sup> ) = 0,001 kg/dia.m<sup>2</sup>

Total O<sub>2</sub> do aterro ( kg/dia ) →

Total O<sub>2</sub>(kg/dia.m<sup>2</sup>) \* Área do aterro (m<sup>2</sup>) = 633,44 kg/dia

## COMPARATIVO DE EMISSÕES PARA O MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Veículos automotores \* = 2.033.085 veículos automotores (RJ)

Emissão média veicular de CO<sub>2</sub> # = 3.219.546,56 t/ano de CO<sub>2</sub>

Emissão média de CO<sub>2</sub> de um veículo = 1,58 t/ano.veículo de CO<sub>2</sub>

### UM AUTOMÓVEL

Emissão de CO<sub>2</sub> (kg/ano) = 1.583,58 kg/ano.veículo de CO<sub>2</sub>

Emissão de CO<sub>2</sub> (kg/dia) = 4,34 kg/dia.veículo de CO<sub>2</sub>

## ATERRO

Emissão de CO<sub>2</sub> EQ(kg/dia)\*\* = 744,9 t /dia CO<sub>2</sub> EQ

NÚMERO DE AUTOMÓVEIS EQUIVALENTES = 176.845,55 veículos automotores

## FROTA DO MUNICÍPIO

ISTO CORRESPONDE A 8,70% RIO DE JANEIRO OU 93,26% DUQUE DE CAXIAS

\* Detran - RJ. Estatística - Frota por tipo de veículo - Ago 2007. Disponível em: <[http://www.detran.rj.gov.br/\\_estatisticas.veiculos/02.asp](http://www.detran.rj.gov.br/_estatisticas.veiculos/02.asp)>. Acessado em 17/09/2007).

→ VEÍCULOS AUTOMOTORES = Automóvel, Motocicleta, Motoneta, Ciclomotor, Triciclo, Quadriciclo, Ônibus, Microônibus, Caminhonete, Caminhoneta, Caminhão, Caminhão Trator, Trator de Rodas, Trator de Esteiras, Trator Mixto, Reboque, Semi-reboque, Side car, Utilitário

# "O Globo" de 2 setembro de 2007 pág19

\*\*21 kg CH<sub>4</sub> = 1kg CO<sub>2</sub>


**ANEXO 2**  
**DADOS METEOROLÓGICOS DO ATERRO METROPOLITANO DE GRAMACHO**

<b>Dia</b>	<b>UR</b>	<b>Dia</b>	<b>TA</b>	<b>Dia</b>	<b>PA</b>
1/8/2007	45,80283	1/8/2007	33,80143	1/8/2007	1021,483
2/8/2007	61,33042	2/8/2007	35,49741	2/8/2007	1020,993
3/8/2007	58,05698	3/8/2007	37,1934	3/8/2007	1023,263
4/8/2007	47,83245	4/8/2007	38,72628	4/8/2007	1019,983
5/8/2007	65,8042	5/8/2007	35,51165	5/8/2007	1023,763
6/8/2007	68,91438	6/8/2007	36,4968	6/8/2007	1022,833
7/8/2007	47,80005	7/8/2007	37,57013	7/8/2007	1017,68
8/8/2007	46,98233	8/8/2007	39,03793	8/8/2007	1022,363
9/8/2007	51,5923	9/8/2007	22,1942	9/8/2007	1022,355
10/8/2007	51,50563	10/8/2007	21,9324	10/8/2007	1020,705
11/8/2007	57,69328	11/8/2007	21,9	11/8/2007	1021,258
12/8/2007	61,08845	12/8/2007	21,89845	12/8/2007	1026,033
13/8/2007	58,26358	13/8/2007	21,92598	13/8/2007	1024,598
14/8/2007	55,91745	14/8/2007	22,18402	14/8/2007	1023,133
15/8/2007	51,3664	15/8/2007	24,28803	15/8/2007	1023,11
16/8/2007	44,8965	16/8/2007	25,0806	16/8/2007	1022,115
17/8/2007	50,9811	17/8/2007	24,28673	17/8/2007	1022,333
18/8/2007	56,83303	18/8/2007	25,46715	18/8/2007	1020,13
19/8/2007	59,51675	19/8/2007	25,57905	19/8/2007	1021,448
20/8/2007	45,33135	20/8/2007	25,2731	20/8/2007	1016,285
21/8/2007	47,78235	21/8/2007	25,18163	21/8/2007	1023,555
22/8/2007	52,6634	22/8/2007	24,50435	22/8/2007	1023,475
23/8/2007	51,1165	23/8/2007	25,78213	23/8/2007	1019,33
24/8/2007	47,8396	24/8/2007	24,49493	24/8/2007	1014,09
25/8/2007	56,66518	25/8/2007	25,51138	25/8/2007	1011,455
26/8/2007	57,12868	26/8/2007	26,02465	26/8/2007	1010,783
27/8/2007	50,5195	27/8/2007	25,42378	27/8/2007	1012,985
28/8/2007	78,50308	28/8/2007	22,89275	28/8/2007	1021,338
29/8/2007	74,51088	29/8/2007	23,18763	29/8/2007	1024,043
30/8/2007	75,9891	30/8/2007	23,91398	30/8/2007	1026,11
31/8/2007	59,29165	31/8/2007	27,4993	31/8/2007	1022,573
1/9/2007	47,8663	1/9/2007	32,01955	1/9/2007	1019,015
2/9/2007	68,71998	2/9/2007	26,77515	2/9/2007	1021,735
3/9/2007	59,86008	3/9/2007	29,80183	3/9/2007	1023,278
4/9/2007	44,92318	4/9/2007	32,22383	4/9/2007	1023,878
5/9/2007	45,14253	5/9/2007	32,2349	5/9/2007	1024,16
6/9/2007	40,82605	6/9/2007	33,33483	6/9/2007	1021,86
7/9/2007	43,8226	7/9/2007	32,9278	7/9/2007	1020,973
8/9/2007	43,94278	8/9/2007	32,0888	8/9/2007	1020,01
9/9/2007	46,67418	9/9/2007	31,5607	9/9/2007	1020,095
10/9/2007	38,35978	10/9/2007	32,5007	10/9/2007	1020,153
11/9/2007	42,91468	11/9/2007	31,84228	11/9/2007	1020,638
12/9/2007	38,644	12/9/2007	32,02238	12/9/2007	1019,93
13/9/2007	40,4217	13/9/2007	32,91295	13/9/2007	1019,098

<b>Dia</b>	<b>UR</b>	<b>Dia</b>	<b>TA</b>	<b>Dia</b>	<b>PA</b>
14/9/2007	34,85968	14/9/2007	33,29538	14/9/2007	1016,695
15/9/2007	29,8718	15/9/2007	35,1189	15/9/2007	1013,635
16/9/2007	59,00745	16/9/2007	29,85003	16/9/2007	1014,815
17/9/2007	61,60153	17/9/2007	27,63698	17/9/2007	1021,173
18/9/2007	48,3603	18/9/2007	28,4701	18/9/2007	1020,738
19/9/2007	41,01873	19/9/2007	31,47255	19/9/2007	1017,388
20/9/2007	42,85938	20/9/2007	33,37233	20/9/2007	1014,663
21/9/2007	48,39655	21/9/2007	30,25083	21/9/2007	1017,418
22/9/2007	48,31073	22/9/2007	30,33383	22/9/2007	1014,74
23/9/2007	38,10038	23/9/2007	22,1443	23/9/2007	1026,955
24/9/2007	61,82853	24/9/2007	23,547	24/9/2007	1015,953
25/9/2007	62,65443	25/9/2007		25/9/2007	1026,63
26/9/2007	57,89163	26/9/2007		26/9/2007	1026,138
27/9/2007	49,65353	27/9/2007		27/9/2007	1020,313
28/9/2007	46,10195	28/9/2007		28/9/2007	1017,6
29/9/2007	80,3418	29/9/2007		29/9/2007	1023,543
30/9/2007	50,4127	30/9/2007		30/9/2007	1025,12

## ANEXO 3

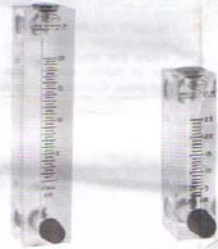
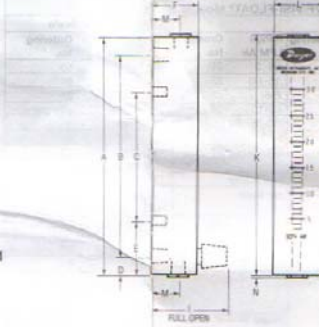
### Certificados de Calibração de equipamentos utilizados neste trabalho



**Series VF Visi-Float® Flowmeter**

**Specifications - Installation and Operating Instructions**

Bulletin F-33

**Fig. 1**

DIMENSION-IN INCHES		
	Model VFA	Model VFB
A	4	6 1/4
B	3 (1/2 NPT(F))	5 1/2 (1/2 NPT(F))*
C	1 1/2 (10-32 Thread)	3 1/2 (10-32 thread)
D	1/2	1/2
E	1 1/4	1 1/4
F	1 1/4	1 1/4
I	2 1/4 (BV or SSV)	2 1/4 (BV or SSV)
K	4 1/2	6 3/4
L	1	1 1/4
M	1/2 (EC)	1/2 (EC)
N	1/2 (EC)	1/2 (EC)

\*VFB ranges 85 and 86 have 1/2" NPT back connections or 1/4" NPT end connections.

**Dwyer Visi-Float® Series Flowmeters** are furnished in two models (see Figure 1) each available in a broad choice of flow ranges with direct reading scales for air, gas or water. Installation, operation and maintenance are very simple and only a few common sense precautions must be observed to assure long, trouble-free service.

**CALIBRATION**  
Each Dwyer flowmeter is calibrated at the factory. If at any time during the meter's life, you wish to recheck its calibration, do so only with devices of certified accuracy. DO NOT attempt to check the Dwyer Visi-Float® Flowmeter with a similar flowmeter as seemingly unimportant variations in piping and back pressure may cause noticeable differences in the indicated reading. If in doubt, return your Dwyer flowmeter to the factory. It will be checked for conformance at no charge. Before proceeding with the installation of your Dwyer Visi-Float® Flowmeter, check to be sure you have the model and flow range you require.

**LOCATION**  
**Temperature, Pressure, Atmosphere, and Vibration:**  
Visi-Float® Acrylic Flowmeters are exceptionally tough and strong. They are designed for use at pressures up to 100 PSI (7 bar) and temperatures up to 150°F (66°C). DO NOT EXCEED THESE LIMITS! The installation should not be exposed to strong chlorine atmospheres or solvents such as benzene, acetone, carbon tetrachloride, etc. The mounting panel should be free of excessive vibration since it may prevent the unit from operating properly.

**PHYSICAL DATA**  
**Meter Body:** Acrylic plastic. Metering tube machined into body.  
**Wetted Metal Parts:** Brass std. Stainless Steel optional.  
**Floats:** Stainless Steel, Black Glass, Nylon, & Aluminum.  
**Float Stops:** Stainless Steel Springs.  
**Pipe Connections:** 1/2" NPT horizontal or vertical".  
**"O" Rings:** Buna-N.  
**Mounting Inserts:** 10-32 x 1/4" Deep.  
**Scale:** Not pressed into acrylic body, or silkscreened.  
**Knobs:** ABS Plastic.  
**Pressure Rating:** To 100 P.S.I. (7 bar) maximum.  
**Temperature Rating:** To 150°F (66°C) maximum.  
**Accuracy:** Model VFA, 5%; Model VFB, 3% of full scale.  
\*VFB ordering numbers 85 and 86 have 1/2" NPT back connections or 1/4" NPT end connections.

**Inlet Piping Run:** It is good practice to approach the flowmeter inlet with as few elbows and restrictions as possible. In every case the inlet piping should be at least as large as the connection to the flowmeter i.e. 1/4" Iron Pipe Size. Length of inlet piping makes little difference for normal pressure fed flowmeters.

For flow meters on vacuum air service the inlet piping should be as short and open as possible. This will allow operation near atmospheric pressure and thereby insure the accuracy of the device. (Note that for vacuum air service the flow control valve if any, should be on the discharge side of the flowmeter. Either the TMV unit or a separate in line valve may be applied.)

**Discharge Piping:** As on the inlet, discharge piping should be at least as large as the flowmeter connection. In addition, for pressure fed flowmeters on air or gas service the discharge piping should be as short and open as possible. This will allow operation of the flow tube at near atmospheric pressure and insure the accuracy of the device. This is of less importance on water or liquid flowmeters since the flowing medium is generally incompressible and moderate back pressure will not affect the accuracy of the instrument as calibrated.

**DWYER INSTRUMENTS, INC.**  
P.O. BOX 373 • MICHIGAN CITY, INDIANA 46361 U.S.A.

Phone: 219/879-8000  
 Fax: 219/872-9057  
 Lit-by-Fax: 888/891-4963

www.dwyer-inst.com  
 e-mail: info@dwyer-inst.com

# Certificate of Calibration

**Varian Analytical Instruments**  
2700 Mitchell Dr., Walnut Creek, CA 94598

**Model:** 1000-series  
**Serial:** US07D32445

**Calib Date:** Apr 04, 2007  
**ReCal Date:** July 04, 2008

**Calibrated by:** Gail *Gail*

**Test Station:** 100-27

**Work Order:** 1000-299

**Traceable Standards:** Teledyne 1477, 1556, 1560

**Test Environment:** 22.0-deg. Celsius

28.18-inches HgA ( 95.4-KPa)

**Instrument Maintenance Prior to Calibration:** Installed New Battery

As per Varian procedure PC090301, ANSI/NCSL Z-540-1-1994, the above designated flow meter was calibrated to within an absolute accuracy of 3-percent to NIST traceable flow rate standards manufactured by Cincinnati Test Systems Inc. These flow rate standards are periodically verified to the above listed NIST traceable standards which have a reported absolute accuracy of 0.5-percent.

## Calibration Results

Flow Rates (ml/min)		%Diff	Result
Actual	Measured		
5.08	5.08	0.00	PASS
51.11	51.56	0.88	PASS
100.4	101.0	0.60	PASS
504.9	500.5	-0.87	PASS
774.0	778.2	0.54	PASS
981.7	994.0	1.25	PASS

Calibrated by California Integration Coordinators, Inc.  
2929 Grandview, Placerville, CA 95667-4635  
Phone:(530)626-6168 Fax:(530)626-7740 www.cic-inc.com

Reproduction prohibited, request an original copy from Varian Analytical Instruments



**União Certificadora**

# Certificado de Conformidade

*Certificate of Compliance • Certificado de Conformidad*

**Certificado nº: MC, AEX-7883-X**

*Certificate #/Certificado nº*

**Válido até: 11/12/2008\***

*Validity Term/Fecha de Vencimiento*

**Efetivado em 11/12/2006**

*Effecto/Efectivado*

**Produto:**

*Product/Producto*

**DETECTOR PORTÁTIL DE GASES**

**Tipo / Modelo:**

*Type - Model/Tipos - Modelo*

**X-am 7000**

**Solicitante:**

*Applicant/Solicitante*

**DRÄGER SAFETY DO BRASIL EQUIPAMENTOS DE SEGURANÇA LTDA.  
Alameda Pucuruí, 61 – Centro Empresarial Tamboré – Tamboré  
06460-100 – Barueri – SP  
CNPJ nº 07.857.433/0001-07**

**Fabricante:**

*Manufacturer/Fabricante*

**DRÄGER SAFETY AG & Co. KGaA  
Revalstrasse, 1  
D-23560, Lübeck, Germany**

**Normas Técnicas:**

*Standards/Normas*

**IEC 60079-0/00, IEC 60079-1/01 e IEC 60079-11/99.**

**Laboratório de Ensaio:**

*Testing Laboratory/Laboratorio de Ensayo*

**DMT – Deutsche Montan Technologie GmbH**

**Nº do Relatório de Ensaio:**

*Test Report Number/Nº del informe de Ensayo*

**DMT nº BVS PP 03.2255EG de 17/10/2003**

**Observações:**

*Notes/Observaciones*

1. Certificado emitido com base no Modelo com Avaliação do Sistema de Gestão da Qualidade do Fabricante e Ensaio no Produto, conforme Cláusula 6.1 do Regulamento de Avaliação da Conformidade, anexo à Portaria nº 83 do INMETRO, publicada em 03 de abril de 2006.
2. Este Certificado só é válido acompanhado de seu respectivo anexo.
3. Marcação do Produto: BR-Ex ia d I/IIC T4

**Portaria:**

*Governmental Regulation/Regulación Oficial*

**INMETRO nº 83 de 03/04/2006.**

**Data de Emissão:**

*Date of issue/Fecha de Otorgamiento*

**São Paulo, 14 de Dezembro de 2006.**

**Representante(s) Legal(is)**

*Legal Representative(s)/Representante(s) Legal(es)*

**Coordenador de Certificação**

*Certification Coordinator/Coordinador de Certificación*

\* Não sendo suspensão ou revogação prevista em legislação, o presente Certificado não sofrerá, em nenhuma hipótese, o controle assessorado entre o Solicitante e a UCIEE, desde que não haja alteração de dados cadastrais no sistema. Este presente Certificado deve ser usado, em todo caso, de acordo com as normas aprovadas pelo Apoiador e a UCIEE, quando houver o envio de documentação. Se não houver, o usuário deve seguir as normas aprovadas pelo Apoiador e a UCIEE, que as mesmas são de natureza legal.

UCIEE - União Certificadora para o Controle de Conformidade de Produtos, Processos ou Serviços  
Rua dos Comerciantes, 225 - 11 Andar - 04320-030 - São Paulo/SP - CNPJ 06.867.046/0001-76 - Tel 55 11 5536.6100 - Fax 55 11 5530.8150 - uciee@uciee.org - www.uciee.org

**Acreditado desde 1993**