



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**  
Centro de Tecnologia e Ciências  
Faculdade de Engenharia

Eduardo Gaiotto Marques da Silva

**Estudo experimental de gases em camadas de cobertura  
no Aterro de Nova Iguaçu - RJ**

Rio de Janeiro

2011

Eduardo Gaiotto Marques da Silva

**Estudo experimental de gases em camadas de cobertura no  
Aterro de Nova Iguaçu - RJ**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos.



Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elisabeth Ritter

Rio de Janeiro

2011

**CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC**

S586 SILVA, Eduardo Gaiotto Marques da.  
Estudo experimental de gases em camadas de cobertura no  
Aterro de Nova Iguaçu – RJ / Eduardo Gaiotto Marques da Silva.  
2011.  
109f.

Orientadora: Elisabeth Ritter.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de engenharia  
Referências: f. 96-102.

1. Engenharia Ambiental. 2. Nova Iguaçu, Aterro (RJ). –  
Dissertação. 3. Metano - Dissertações. 4. Aterro sanitário –  
Dissertações. I. Ritter, Elisabeth. II. Universidade do Estado do Rio  
de Janeiro. III. Título.

CDU 628.472.3

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Eduardo Gaiotto Marques da Silva

**Estudo experimental de gases em camadas de cobertura no  
Aterro de Nova Iguaçu - RJ**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos.

Aprovado em: 05 de Abril de 2011.

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elisabeth Ritter  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. João Alberto Ferreira  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. José Fernando Thomé Jucá  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE  
Faculdade de Engenharia

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>. Maria Cristina Moreira Alves  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ  
Faculdade de Engenharia

Rio de Janeiro

2011

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa, minha querida Nãna, seu amor tem sido minha motivação, confortando-me nas horas difíceis e apoiando quando mais precisei.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela vida maravilhosa, saúde e caminhos que tem-me feito percorrer. A minha família que me apoia, e me dá forças para sempre crescer e serve de apoio nos momentos de fraqueza.. A empresa Haztec Tecnologia e Planejamento Ambiental S.A., pela confiança no trabalho. À Professora Beth pela orientação e paciência na elaboração desta dissertação. A FAPERJ pelos recursos que possibilitaram a compra da instrumentação utilizada nas medições de umidade e temperatura.

"Pequeno planeta redondo, em um grande universo, as vezes parece abençoado, as vezes parece maldito, depende obviamente do que você olha, mas depende sobretudo da maneira como você o vê."

*Bruce Cockburn, Chind of the Wild*

"... este excelente véu que nos protege, o ar, vejam só, este bravo firmamento, teto majestoso riscado pela luz dourada, não me parece mais do que uma congregação de vapores pestilentos..."

*William Shakespere, Hamlet, 2º ato, cena 2*

## RESUMO

SILVA, Eduardo Gaiotto Marques da. **Estudo Experimental de Gases em Camadas de Cobertura no Aterro de Nova Iguaçu - RJ**. 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

Esta pesquisa apresenta uma revisão bibliográfica sobre as emissões de metano em aterros sanitários, os conceitos de geração de gases em aterros sanitários, movimentações de gases em aterro, apresenta os métodos de medição de gases “in situ”, tipos de cobertura finais para aterros e a oxidação do metano na camada de cobertura. A pesquisa também tem como objetivo medir as emissões de gases e avaliar a infiltração das águas pluviais através da camada de cobertura do aterro sanitário da CTR Nova Iguaçu. As medições foram realizadas nos meses de julho a novembro de 2010, na camada de cobertura monolítica existente e em outra construída sobre uma barreira capilar. Sensores para medir temperatura e umidade foram instalados em profundidade nas duas camadas. Foram realizados ensaios de placa de fluxo para medir a composição dos gases e o fluxo através dos dois tipos de camadas, e avaliadas duas situações: com os poços de extração de gás ativos e desligados. Os sensores indicaram que em período de baixa pluviosidade, a barreira capilar apresenta uma eficácia superior à camada monolítica, e com a intensificação das chuvas, as umidades medidas nos dois tipos de camadas aumentam, e na barreira capilar o gradiente estabelecido entre os sensores diminui, indicando uma possível tendência à saturação desta barreira capilar. Porém, com a paralisação das chuvas, recupera e retoma sua condição inicial. Os resultados de medidas dos gases demonstraram a eficiência do sistema de extração de gás quando ativado, resultando em emissões quase nulas de metano e gás carbônico nos dois tipos de camadas. No entanto, quando o sistema está desativado, as emissões através da camada monolítica são cerca de 3 vezes maiores do que através da barreira capilar.

Palavras-chave: Aterro sanitário; CTR Nova Iguaçu; Emissões de biogás; Fluxo de gases; Camada de cobertura de aterros; Medições de temperatura e umidade.



## ABSTRACT

This research presents a literature review on methane emissions from landfills, the concepts of landfill gas generation, the landfill internal gas flow, introduces the methods of measurement of gases "in situ", types of final landfill coverage and the methane oxidation in the cover layer. The research also purposes to measure greenhouse gas emissions and to evaluate the infiltration of rainwater through the landfill cover layer of the CTR Nova Iguaçu. Measurements were made in the months from July to November 2010, the existing monolithic cover layer and another built on a capillary barrier. Sensors to measure temperature and humidity were installed in two layers in depth. Plate assays were performed to measure the flow of the gas composition and flow through the two types of layers, and evaluated two situations with the gas extraction wells active and off. The sensors have indicated that in times of low rainfall, the capillary barrier has superior efficacy to the monolithic layer, and with the intensification of rain, the moisture content measured on two types of layers increase, the capillary barrier and the gradient established between sensors decreases, indicating a possible trend to saturation of capillary barrier. However, with the stoppage of rain, recovers and returns to its initial condition. The results of measurements of gases demonstrated the efficiency of extraction of gas when activated, resulting in near zero emissions of methane and carbon dioxide in the two types of layers. However, when the system is off, the emissions through the monolithic layer is about three times larger than through the capillary barrier.

Keywords: Landfill; CTR Nova Iguaçu; Biogas emissions; Biogas flow; Landfill cover and final layer; Temperature and moisture measurements.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fontes de GEE resultantes do tratamento e disposição dos RSU.....	20
Figura 2 – Fases de geração de gases em aterros sanitários.....	26
Figura 3 - Medições de Umidade em Camada Convencional .....	39
Figura 4 - Modelo Capilar de retenção de água no solo.....	40
Figura 5 - Vista aérea da área selecionada para a implantação do Aterro Sanitário.	44
Figura 6 – Situação atual de operação da CTR Nova Iguaçu em 2011. ....	45
Figura 7 – Comportamento hídrico referente as médias históricas de precipitação e evapotranspiração da estação meteorológica Ecologia Agrícola (1961 – 1990).....	48
Figura 8 – Detalhes do conjunto do sistema de drenagem de percolados da fundação do sub-aterro 1. ....	49
Figura 9 – Detalhe de poço do tipo Vertical junto a redes de drenagem de chorume transversais e longitudinais.....	50
Figura 10 – Esquema descarga de resíduos e compactação em talude e cobertura diário .....	50
Figura 11 – Poço de Drenagem Vertical do tipo Razine.....	51
Figura 12 - Detalhe da execução de trincheira para a implantação de drenos transversais e longitudinais.....	52
Figura 13 – Poço do tipo Razine Típico .....	54
Figura 14 – Primeira etapa de adaptação do poço tipo Razine.....	55
Figura 15 – Segunda etapa de adaptação do poço tipo Razine.....	56
Figura 16 – Terceira etapa de adaptação do poço tipo Razine.....	56
Figura 17 – Poços verticais perfurados de extração do biogás.....	57
Figura 18 – Poço de Extração de biogás e bombeamento de lixiviado .....	58
Figura 19 – Perfil típico de um poço horizontal instalado no sub vale 1.....	59
Figura 20 – Localização dos pontos de medição no sub-aterro1 .....	61
Figura 21 - Escavação da barreira capilar.....	63
Figura 22 - Detalhe do fundo da barreira capilar. ....	63
Figura 23 - Instalação da manta geotextil não tecido na camada capilar .....	64

Figura 24 – Local BC, Camada Capilar e Posicionamentos dos sensores de umidade e temperatura.....	65
Figura 25 - Nivelamento do terreno e a compactação superior da barreira capilar. ...	65
Figura 26 – Local CM, Camada monolítica e posicionamentos dos sensores de umidade e temperatura .....	66
Figura 27 - Analisador e o respectivo sensor de umidade e temperatura. ....	68
Figura 28.– Esquema da placa de fluxo utilizada na investigação (Maciel, 2003).....	69
Figura 29 – Detalhes da placa de fluxo .....	70
Figura 30 - Medições diretamente na Placa de Fluxo .....	71
Figura 31 - Placa de fluxo montada sobre o solo de cobertura .....	72
Figura 32 - Marcação e escavação manual para montagem da placa .....	72
Figura 33 - Assentamento da placa e colocação de bentonita .....	72
Figura 34 - Recomposição, compactação e umedecimento do solo de cobertura ....	72
Figura 35 – Situação final da placa no solo.....	72
Figura 36 – Detalhes de operação do analisador GEM 2000.....	74
Figura 37 - Curva granulométrica do solo de cobertura do sub-aterro 1 .....	75
Figura 38 – Ensaio de compactação do solo de cobertura do sub-aterro 1 .....	76
Figura 39 - Medições Consolidadas de Temperatura na Camada Monolítica .....	77
Figura 40 – Medições Consolidadas de Temperatura na Barreira Capilar.....	78
Figura 41 – Medições Consolidadas de Temperatura no Sensor “A” da Barreira Capilar e Camada Monolítica .....	79
Figura 42 – Medições Consolidadas de Temperatura no Sensor “B” da Barreira Capilar e Camada Monolítica .....	80
Figura 43 – Medições Consolidadas de Temperatura no Sensor “C” da Barreira Capilar e Camada Monolítica .....	81
Figura 44 Medições de umidade consolidadas na camada monolítica .....	82
Figura 45 - Medições de umidade consolidadas na Barreira Capilar .....	83
Figura 46 – Medições Consolidadas de Umidade no Sensor “A” da Barreira Capilar e Camada Monolítica .....	85
Figura 47 – Medições de Umidade no Sensor B da Barreira Capilar e Camada Monolítica.....	86
Figura 48 – Medições Consolidadas de Umidade no Sensor “C” da Barreira Capilar e Camada Monolítica .....	87
Figura 49 – Perfil de umidade na Barreira Capilar.....	88

Figura 50 – Perfil de umidade na Camada Monolítica.....	89
Figura 51 – Resultados das medições de emissões fugitivas na camada monolítica e poço de extração de biogás ligado. ....	91
Figura 52 – Resultados das medições de emissões fugitivas na camada monolítica e poço de extração de biogás desligado.....	92
Figura 53 – Medições de fluxo de gases na camada monolítica e poço de extração de biogás desligado .....	92
Figura 54 – Resultados das medições de emissões fugitivas no Local CM-DH e poço de extração de biogás ligado. ....	93
Figura 55 – Resultados das medições de emissões fugitivas no Local CM-DH e poço horizontal de extração de biogás desligado. ....	94
Figura 56 – Medições de fluxo de gases no local 3 e poço horizontal de extração de biogás desligado .....	95
Figura 57 – Resultados das medições de emissões fugitivas no Local CM-TAL e poço de extração de biogás ligado. ....	96
Figura 58 – Resultados das medições de emissões fugitivas no Local CM-TAL e poço de extração de biogás desligado.....	97
Figura 59 – Medições de fluxo de gases no local 4 e poço de extração .....	97
Figura 60 – Resultados das medições de emissões fugitivas na barreira Capilar e poço de extração de biogás ligado. ....	98
Figura 61 – Resultados das medições de emissões fugitivas na barreira capilar e poço de extração de biogás desligado.....	99
Figura 62 – Medições de fluxo de gases na barreira capilar e poço de extração de biogás desligado .....	100
Figura 63 – Comparação nas Medições dos fluxos de Metano.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantificação da emissão de metano em aterros .....	24
Tabela 2 - Origem da produção do Biogás em Aterros .....	25
Tabela 3 – Duração de cada fase na decomposição de resíduos.....	28
Tabela 4 - Composição básica do biogás de aterro .....	29
Tabela 5 - Princípios básicos dos métodos das avaliações de emissões de biogás.	33
Tabela 6 – Métodos para análise das emissões fugitivas de aterros .....	34
Tabela 7 - Quantitativo de resíduos por origem no sub-aterro 1 nos anos.....	46
Tabela 8 - Principais resíduos Classe IIA e IIB recebidos no sub-aterro 1.....	47

## LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

A	Área de solo coberta pela placa
BC	Barreira Capilar
C°	Temperatura em grau Celsius
CH <sub>4</sub>	Gás Metano
CM	Camada Monolítica
cm	Centímetros
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
CM-DH	Camada Monolítica com instalada sob o Dreno Horizontal
CM-TAL	Camada Monolítica com instalada sob o Talude
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CTR	Central de Tratamento de Resíduos
d	Diâmetro
DH	Dreno Horizontal
di	diâmetro do poro
Emlurb	Empresa Municipal de Limpeza Urbana
FAPERJ	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro.
Ft	Pés
g	Gramas
GEE	Gás de Efeito Estufa
h	Horas
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
ha	Hectare
hi	Altura de ascensão capilar
IPCC	Painel Intergovernamental para Mudança do Clima
J	Fluxo de gás (kg/m <sup>2</sup> s)
l	Litros
Liner	Camada de solo compactado
LL	Limite de Liquidez
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro Quadrado

m <sup>3</sup>	Metro Cúbico
MBA	Tratamento Mecânico e Biológico Associado
min	Minutos
ml	Mililitros
mm	Milímetros
N <sup>2</sup>	Nitrogênio
NO <sup>2</sup>	Óxido Nítrico
O <sub>2</sub>	Oxigênio
ONU	Organização das Nações Unidas
PDR	Poço de Drenagem Ranzini
PEAD	Poli Etileno de Alta Densidade
Pol	Polegadas
PVC	Policloreto de Vinila
q	Leituras de Umidade
RPVC	Plástico reforçado com fibra de vidro
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SCH	Schedule
Seg	Segundos
TAL	Talude da área frontal do aterro
TDR	Frequência de Domínio no Tempo
Telcon	Tela metálica de malha quadrangular
Ton	Toneladas
USCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
USEPA	Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
V <sub>p</sub>	Volume útil da placa de fluxo
ΔC	Variação da concentração de gases
Δt	Variação do tempo
ρ	Densidade do gás

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	19
1.1	<b>Objetivo Principal</b> .....	19
1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	19
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	20
2.1	<b>Geração de Gases em Aterros Sanitários</b> .....	23
2.2	<b>Movimentação de gases no solo</b> .....	30
2.3	<b>Método para medição de gases em aterros</b> .....	33
2.4	<b>Coberturas finais de Aterros Sanitários</b> .....	36
2.5	<b>Oxidação do metano na camada de cobertura</b> .....	41
3	<b>ESTUDO DE CASO: CTR NOVA IGUAÇU</b> .....	43
3.1	<b>A Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu</b> .....	43
3.2	<b>Descrição da área selecionada para a pesquisa</b> .....	45
3.3	<b>Informações sobre pluviometria na área</b> .....	47
3.3.1	Detalhes do projeto construtivo e de implantação .....	48
3.3.2	Poços Verticais de Drenagem de Chorume e Gás .....	51
3.3.3	Poços Horizontais de Drenagem de Chorume e Gás .....	52
3.4.	<b>Sistema de Ativo de Extração do Biogás</b> .....	53
3.4.1	Adaptações nos Poços Ranzine (PDR) .....	54
3.4.2	Poços verticais perfurados de extração do biogás.....	56
3.4.3	Poços verticais perfurados com bombeamento de lixiviado e extração do biogás.....	58
3.4.4	Poços Horizontais de extração do biogás .....	58
4	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	60
4.1	<b>Materiais</b> .....	60
4.1.1	Barreira Capilar .....	62
4.1.2	Camada Monolítica .....	66
4.2	<b>Metodologia</b> .....	66
4.2.1	Caracterização do solo .....	67



4.2.2.	Equipamentos utilizados nas medições de umidade, temperatura e Pluviometria .....	67
4.2.3	Placa de Fluxo .....	68
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	75
5.1	<b>Solo utilizado nas camadas de cobertura</b> .....	75
5.2	<b>Resultados de campo para as Medições de Temperatura</b> .....	76
5.2.1	Medições de Temperatura .....	76
5.2.2	Comparação entre as Medições de Temperatura na Barreira Capilar e Camada Monolítica. ....	78
5.3	<b>Resultados de campo para as Medições de Umidade</b> .....	81
5.3.1	Medições de Umidade .....	82
5.3.2	Comparação entre as Medições de Umidade na Barreira Capilar e Camada Monolítica. ....	84
5.3.3	Perfil de Umidade em função da profundidade de Instalação. ....	87
5.4	<b>Resultados de campo para medições de Biogás</b> .....	89
5.4.1	Medições na Camada Monolítica (Local CM) .....	90
5.4.2	Medições na camada monolítica (Local CM-DH), em dreno horizontal de extração do biogás. ....	92
5.4.3	Medições na camada monolítica em Talude (Local CM-TAL) .....	95
5.4.4	Medições na Barreira Capilar .....	97
5.4.5	Comparação nas Medições dos fluxos de Metano .....	100
6	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b> .....	103
6.1	Conclusões .....	103
6.2	Sugestões para pesquisas futuras .....	105
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	106

## INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº. 12.305/10 regulamentada pelo Decreto nº 7.404/10) estipula a erradicação dos antigos vazadouros e lixões e dá impulso ao recebimento de resíduos nos modernos aterros sanitários. Porém, dado uma mesma quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), é conhecido que a quantidade (em volume) e percentual de gás metano ( $\text{CH}_4$ ) gerado em aterros sanitários é superior a quantidade (em volume) e percentual de gás metano ( $\text{CH}_4$ ) gerado em lixões, com isso o Plano Nacional de Resíduos Sólidos indiretamente provocará um aumento nas emissões de gases agente do efeito estufa do Brasil. Assim o correto conhecimento das emissões fugitivas em aterros que possuem um sistema ativo de captação do biogás é fundamental para evitar o agravamento deste problema.

Ao longo dos últimos anos, a produção e concentração de gases de efeito estufa vêm aumentando significativamente, principalmente pelas atividades humanas no setor industrial, na produção e consumo de energia, transportes e geração de eletricidade devido à queima de combustíveis fósseis. O aumento da concentração de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), em menor escala o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e os halocarbonos (HFC) provocam a retenção de calor na atmosfera, impedindo que a radiação solar próxima à superfície terrestre seja liberada de volta ao espaço. A principal consequência é o processo de aquecimento global (aumento da temperatura média da Terra), colocando em perigo o balanço térmico terrestre, que torna o nosso meio um ambiente habitável para a vida humana.

Devido a grande heterogeneidade dos RSU, há uma grande incerteza ligada com o espaçamento dos poços de captação do biogás e a eficiência de captação dos sistemas de extração ativa do biogás nos aterros sanitários. A falta de informações desta natureza com parâmetros representativos e confiáveis acabam gerando práticas de concepção de projetos de aterros não eficazes.

Além disso, apresenta-se o problema dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), cuja complexidade de gerenciamento, devido ao aumento da população mundial e da produção per capita de resíduos, pode produzir emissões significativas de gases que irão contribuir com o aumento do efeito estufa. Dentre os diversos gases gerados pelos RSU, o de maior destaque é o gás metano ( $\text{CH}_4$ ), não somente pela quantidade deste gás que é produzida, mas também pela sua capacidade de retenção de calor, maior do que a do  $\text{CO}_2$ .

Também é conhecido que um dos maiores custos operacionais de aterros está relacionado com a coleta e principalmente com o tratamento do lixiviado. Neste sentido uma avaliação do desempenho das camadas de cobertura, de modo a minimizar a formação de lixiviado passou a ter interesse.

Além da camada monolítica geralmente utilizada, a barreira capilar vem sendo estudada como uma alternativa para minimizar a infiltração de água de chuva no maciço de resíduos e a geração de lixiviado e por isso as camadas de cobertura passam a ter uma função importante na minimização da saída de gás.

## **1 OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo Principal**

A pesquisa tem como objetivo geral avaliar a emissão de biogás, enfocando o metano, e a infiltração das águas pluviais, em camadas de cobertura do tipo monolítica e barreira capilar implantadas no sub-aterro 1 da Central de tratamento de Resíduos Nova Iguaçu.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar o comportamento das camadas, através de medições de umidade e temperatura nas camadas de cobertura e também no maciço de resíduos, em relação a entrada de água pluvial.
- Determinar experimentalmente o fluxo de gases pelo solo da camada de cobertura final por meio de ensaios de campo (placa de fluxo);
- Avaliar a influência de diferentes tipos de poços de extração do biogás e locais diferentes como bermas e platôs do sub-aterro 1 com as emissões fugitivas;
- Estimar as emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura de um aterro que possui um sistema ativo de captação do biogás.

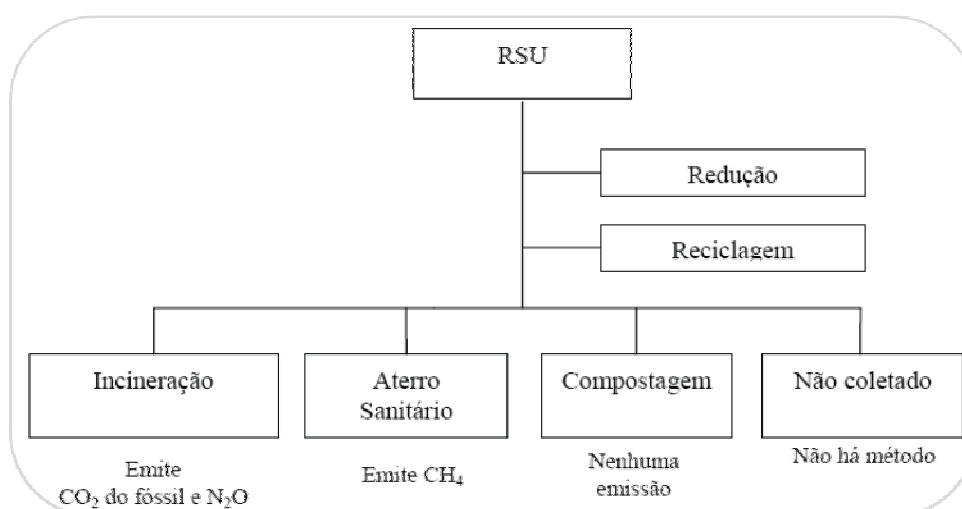
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em Lopes (2011) é mencionado em sua pesquisa que os aterros sanitários podem ser considerados reatores onde a fração sólida biodegradável se transforma em líquidos e gases que representam fontes potenciais de poluição ambiental, quando não são coletados e/ou tratados adequadamente.

Desta forma os aterros sanitários seriam similares a grandes reatores biológicos, que apresentam como insumo e entrada principal do processo de decomposição da matéria orgânica, o resíduo sólido urbano, tendo como principais produtos e saídas deste processo, o biogás e o chorume.

### Métodos de manejo e emissões dos Resíduos Sólidos

De acordo com Gouvello (2010) as principais formas de manejo dos resíduos sólidos urbanos, e também as respectivas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) de cada tipo de manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), estão exemplificados pela figura 1.



**Figura 1** - Fontes de GEE resultantes do tratamento e disposição dos RSU.  
Fonte: Gouvello (2010)

### Aterros Sanitários

Os modernos aterros sanitários se constituem de uma peça fundamental em um sistema de gerenciamento de resíduos, pois indiferente ao tipo de tratamento que é dado aos resíduos, seja através de incineração ou até mesmo a compostagem, sempre haverá a necessidade de disposição final de algum tipo de rejeito, como as cinzas de incineração ou rejeito da compostagem.

Segundo o Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (2001), essencialmente um aterro sanitário visa promover condições ambientalmente adequadas de disposição através dos seguintes elementos:

➤ Unidades operacionais:

- células de lixo domiciliar;
- células de lixo hospitalar (caso o Município não disponha de processo mais efetivo para dar destino final a esse tipo de lixo);
- impermeabilização de fundo (obrigatória) e superior (opcional);
- sistema de coleta e tratamento dos líquidos percolados (chorume);
- sistema de coleta e queima (ou beneficiamento) do biogás;
- sistema de drenagem e afastamento das águas pluviais;
- sistemas de monitoramento ambiental, topográfico e geotécnico;
- pátio de estocagem de materiais.

➤ Unidades de apoio:

- cerca e barreira vegetal;
- estradas de acesso e de serviço;
- balança rodoviária e sistema de controle de resíduos;
- guarita de entrada e prédio administrativo;
- oficina e borracharia.

Conforme discutido e apresentado, os modernos aterros sanitários podem ser comparados a e então fazer uma analogia com um reator bioquímico, que apresenta os resíduos sólidos e águas de chuva como principais entradas e o chorume e gases provenientes da decomposição dos resíduos como principais saídas. A composição típica do biogás em aterros, através de sistemas passivos de exaustão

de gases, segundo o Manual da SWANA (2010) indica que valores de 30% a 60% de CH<sub>4</sub>, sendo o restante das outras partes sendo composta de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, além de vapor de água e alguns traços de outros gases.

### **Compostagem**

A Compostagem é um processo aeróbio (presença de oxigênio) que remove a matéria orgânica dos resíduos, para a produção de um composto orgânico de alta qualidade. Não há a produção de GEE, ficando assim evitada a emissão de metano de CH<sub>4</sub>. Ainda que a compostagem não seja incluída entre os métodos para estimar as emissões, a adoção mais ampla desta prática poderia resultar em potenciais reduções das quantidades de resíduos dispostos em aterros.

### **Incineração**

A incineração é um método de tratamento baseado na decomposição térmica através da oxidação, o que torna os resíduos menos volumosos, menos tóxicos, e em alguns casos eliminá-los completamente (CETESB, 1999). O tratamento dos resíduos por incineração exige o emprego de sistema de tratamento dos gases poluentes gerados pelo processo de combustão de determinados compostos dos resíduos sólidos. Na maioria dos casos são usados filtros eletrostáticos ou de tecido.

No Brasil, é insignificante o nível de tratamento de resíduos através da incineração, e a queima de lixo que ocorre a liberação de calor, pode ou não ser acompanhada de tecnologias de recuperação térmica e geração de energia.

### **Reciclagem**

A redução do lixo, a reutilização e a reciclagem do lixo, além da modificação dos padrões de consumo, podem contribuir significativamente para reduzir a necessidade de energia, matérias primas, e recursos naturais, tendo como consequência a redução nas emissões dos GEEs.

## 2.1 Geração de Gases em Aterros Sanitários

A metodologia e modelos de cálculo das emissões provenientes de aterros sanitários desenvolvida pela Organização das Nações Unidas (ONU), estabelece que a disposição em aterros urbanos pode ser classificada como:

- Aterros sanitários, com fator de emissão de metano igual a 1.
- Aterros não gerenciados (lixões) com mais de 5 metros de profundidade, com fator de emissão de metano igual a 0,8.
- Aterros não gerenciados (lixões) com menos de 5 metros de profundidade, com fator de emissão de metano igual a 0,4.

Desta forma a ONU estabeleceu critérios que indicam que a quantidade de gás gerado em aterros sanitários apresenta quantidades maiores se comparado com a geração de gases em lixões. Nestes locais a matéria orgânica contida nos resíduos libera o metano durante períodos de 30 a 50 anos; assim, é preciso conhecer o histórico da disposição de resíduos em um aterro para se poder estimar as emissões futuras. É bom observar que a melhoria na operação dos aterros sanitários irá resultar no aumento das emissões dos GEE. De acordo com o IPCC (2000), a concentração de GEEs gerados pela mesma quantidade de resíduos em um aterro seria reduzida em 80% em um aterro sem manejo de 5 metros de profundidade e em 40% em outro, de menos de 5 metros de profundidade.

Segundo Gouvello (2010), o tratamento de resíduos sólidos em aterros baseia-se na digestão anaeróbia (ausência de oxigênio) da matéria orgânica descartada, através da ação bacteriana e até que a matéria seja estabilizada ou seja transformada em matéria inerte. O biogás produto do processo de digestão anaeróbia, é uma mistura de gases, principalmente o metano ( $\text{CH}_4$ ), o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e o ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). O  $\text{CH}_4$  representa em média 50-90% do volume total desta mistura, enquanto o  $\text{CO}_2$  corresponde a 5-10% da mistura. A composição do biogás é semelhante ao gás natural e no Brasil são poucos os aterros sanitários que usam o biogás para queima ou a geração de energia, sendo a prática mais comum é permitir que o gás escape diretamente para a atmosfera,



Dentre as principais emissões antropogênicas de metano geradas no mundo, as emissões geradas e que tem origem em aterros sanitários ficam em segundo lugar. Para Gouvello (2010) os aterros geram de 160 a 250 m<sup>3</sup> de biogás, representando no Brasil aproximadamente 6% de emissões de metano e 4% de óxido nitroso. Estes gases são os principais agentes do efeito estufa que são gerados pelo manejo e tratamento dos resíduos.

Considerando que em média o biogás tem 50% de gás metano, nesta condição proposta por Gouvello (2010), os aterros geram para cada tonelada de resíduo disposto, o valor estimado de 80 a 125 m<sup>3</sup> de metano.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, CETESB (1999) indica que as emissões provenientes de aterros entre 10 a 15 anos podem chegar aproximadamente 125 metros cúbicos de gás metano e que a totalidade da geração brasileira é de 677 toneladas por ano.

A tabela 1 apresenta algumas estimativas das emissões de metano pela disposição final de resíduos urbanos.

Tabela 1 – Quantificação da emissão de metano em aterros

Fonte de metano	Carga por área (l CH <sub>4</sub> / m <sup>2</sup> .d)	Referência
Aterro em funcionamento nos primeiros 10 anos, 20 m de profundidade	340	Hummer e Lechner, (1997)
Resíduo restante após a separação do resíduo orgânico, nos primeiros 10-15 anos, 20 m de profundidade	120-160	Hummer e Lechner, (1997)
Resíduo tratado através de processo mecânico e biológico, 20 m de profundidade	< 25	Hummer e Lechner, (1997)
Resíduo tratado através de processo mecânico e biológico	72	Fricke <i>et al.</i> (1997)
Áreas abandonadas, após 10-15 anos	90-110	Hummer e Lechner, (1997)
Lixão doméstico	400	Kightley e Nedwell (1994)

Fonte: Bahr et al (2006)

Nos estudos de Hummer e Lechner (1990) foi indicado que para um moderno aterro, que recebe resíduos urbanos e que possui altura superior a 20 metros a emissão de metano pode chegar a 340 l CH<sub>4</sub>/ m<sup>2</sup>. dia. Isso representa valores entre 40 a 60 milhões de toneladas de metano geradas anualmente por aterros espalhados pelo Mundo.

Na pesquisa de Bahr et al.(2006) é apontado que somente a disposição de resíduos urbanos na china chega a gerar até 15% das emissões de metano no mundo. E que a totalidade das emissões de metano é de 60 milhões de toneladas por ano em todo mundo.

Valores próximos a 11 milhões de toneladas de metano por ano são encontrados nos estudos sobre aterros de resíduos nos Estados Unidos, e que foram desenvolvidos por Reinhart e Cooper (1992).

As interações dos mecanismos biológicos aliados aos processos físico-químicos ocasionam a degradação da matéria orgânica presente nos resíduos que são dispostos em aterros. Segundo Castilhos et al. (2003) estas interações são acelerados através da unidade que inicialmente está contida nos próprios resíduos e que vem também pelas águas das chuvas que penetram no maciço de resíduos.

A produção do biogás gerado em aterros, de acordo com a USEPA (1991) pode ser dividida em três categorias conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 2 - Origem da produção do Biogás em Aterros

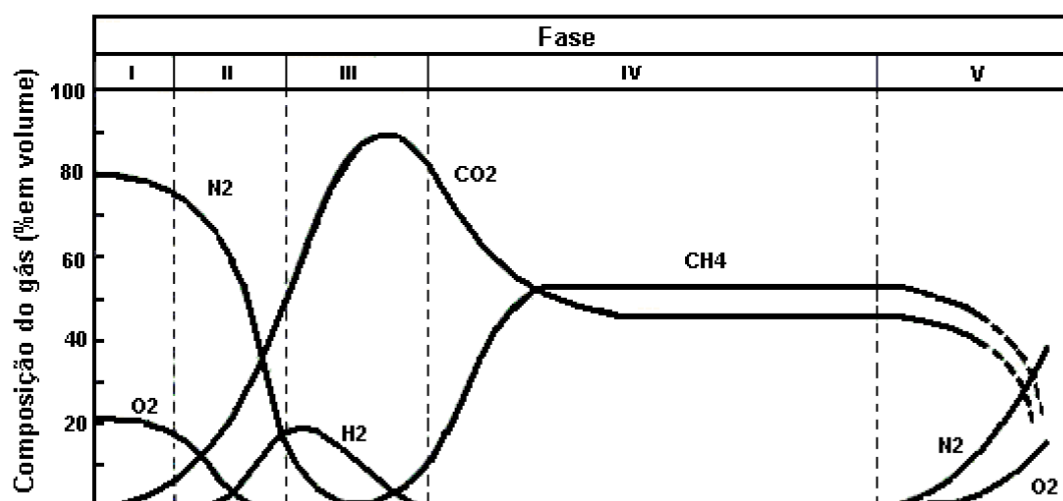
Origem da Produção do Biogás	Descrição
VAPORIZAÇÃO	A vaporização é a mudança de estado líquido para gasoso que ocorre até que sejam atingidas concentrações de equilíbrio nos gases do aterro
DECOMPOSIÇÃO BIOLÓGICA	A decomposição biológica ocorre quando compostos orgânicos de grande massa molecular são decompostos por bactérias, gerando compostos voláteis.
REAÇÃO QUÍMICA	A reação química ocorre como resultado do contato entre o resíduo e os gases reativos gerados no aterro.

Fonte: USEPA (1991)

Diversos tipos de microrganismos são os responsáveis pela degradação da matéria orgânica presentes nos resíduos, sendo as bactérias consideradas as principais, através dos grupos de bactérias fermentativas, acetogênicas produtoras e consumidoras de  $H_2$  e as bactérias metanogênicas. Também responsáveis pela degradação da matéria orgânica, porém em pequena escala podem ser considerados os fungos e protozoários (Tarazona, 2010).

As principais formas de biodegradação da matéria orgânica presente nos resíduos é através de decomposição aeróbia (com a presença de oxigênio) e também pela decomposição anaeróbia (sem a presença de oxigênio). A decomposição aeróbia acontece primeiro, de forma imediata logo após a disposição e cobertura dos resíduos, através do oxigênio presente no ar atmosférico e que fica entre os espaços vazios no maciço de resíduos. Logo após esta etapa onde o oxigênio é totalmente consumido, tem início a degradação anaeróbia.

A geração do biogás está intimamente ligada a decomposição dos resíduos, que segundo Tchobanoglous et al.(1993) e Bidone (1999), a geração do biogás ocorre em cinco fases, como ilustrado na Figura 2.



**Figura 2** – Fases de geração de gases em aterros sanitários.

Fonte: Tchobanoglous, Theisen & Vigil (1993)

Fase I: Esta é a fase de ajuste inicial. Onde os resíduos são dispostos, compactados e cobertos no aterro, e por isso ainda é encontrado o ar atmosférico e tem o início do processo de degradação aeróbio.

Fase II: Esta é a fase de transição, também denominada acidogênica. O ar atmosférico é consumido por micro-organismos aeróbios, facultativos e anaeróbios. Dependendo também do projeto do aterro, o próprio biogás formado nas células e camadas inferiores do maciço de resíduos, expulsa o ar atmosférico e o oxigênio e nitrogênio presente nos vazios e espaços dos resíduos e promove a aceleração do processo de degradação e passagem desta fase.

Fase III: Esta é a Fase ácida e também é conhecida como acetogênica,. Nesta fase tem como principal característica o rápido crescimento da produção do dióxido de carbono pelos micro-organismos conhecidos como metanogênicos,. Também apresenta concentrações significativas de hidrogênio. Esta fase também pode ser fortemente influenciada pelo projeto do aterro e o biogás gerado nas células e camadas inferiores do maciço de resíduos.

Fase IV: Esta é a Plena e também conhecida como Fase metanogênica. Onde a concentração de  $\text{CO}_2$  tem um acentuado decaimento de 80% chegando até 40% na composição do biogás e o  $\text{CH}_4$  tem um rápido crescimento de 15% chegando até 60% na composição do biogás. O início desta fase é o momento ideal para início do processo de instalação do sistema de captação do biogás para fins comerciais.

Fase V: Esta é a Fase de maturação ou Fase final. Nesta fase tem início o processo de decaimento das concentrações dos gases  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  devido principalmente pela escassez de matéria orgânica disponível para degradação. A Falta de matéria orgânica ocorre pelo consumo dos micro-organismos nas fases anteriores. Também devido a baixa pressão interna promovida pela pouca geração de gases, a pressão atmosférica apresenta tendência de promover novamente a entrada de ar no maciço de resíduos e por isso são encontradas pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio, promovendo novamente o processo aeróbio.

Segundo Monteiro (2003) também é necessário avaliar o comportamento ao longo do tempo de fatores químicos, físicos e biológicos que interagem no processo de degradação da matéria orgânica presente nos resíduos dos países subdesenvolvidos que possuem uma grande fração de matéria orgânica.

Conforme dito anteriormente a duração de cada etapa pode variar em função principalmente das características dos resíduos, quantidades de matéria orgânica, projeto do aterro e umidade interna. Segundo o Banco Mundial (2003) a duração de cada etapa está descrita na Tabela 3.

Tabela 3 – Duração de cada fase na decomposição de resíduos

<b>FASES</b>	<b>CONDIÇÃO</b>	<b>PERÍODO TÍPICO</b>
I	AERÓBICA	ALGUMAS HORAS A 1 SEMANA
II	ANÓXICA	1 A 6 MESES
III	ANAERÓBICA, METANOGÊNICA INSTÁVEL	3 MESES A 3 ANOS
IV	ANAERÓBICA, METANOGÊNICA ESTÁVEL	8 A 40 ANOS
V	ANAERÓBICA, METANOGÊNICA DECLINANTE	1 ANO A MAIS DE 40 ANOS

Fonte: Banco Mundial (2003)

Na pesquisa realizada por Maciel (2003) no aterro da Muribeca/PE o biogás encontrado apresenta diversos valores diversos para os furos de sondagem que foram realizados em um aterro experimental. Mas de forma resumida as concentrações do dióxido de carbono apresentou variação de 20% a 42%, e a variação encontrada para os valores do gás metano foi de 30% a 58%.

Cabe ressaltar que a composição típica do biogás também está ligada a existência ou não existência de sistemas de drenagem, poços de alívio e fuga de gases e até mesmo sistemas de captação ativos, ou seja sistemas que tem a extração forçada do biogás.

Na pesquisa de Tchobanoglous (1993) em um aterro na California, USA, a composição típica para o biogás encontrado está ilustrado na figura 4 a baixo. Onde pode verificar que a composição típica do biogás apresentava metano (45% a 60%) e o dióxido de carbono (40% a 60%) e traços de outros gases inferiores a 4% no

total. Já nas pesquisas realizadas no aterro de Nova Iguaçu/RJ apresentaram valores de metano variando entre 44% e 76% (BORBA, 2006).

Tabela 4 - Composição básica do biogás de aterro

<b>Gás Gerado</b>	<b>Porcentagem (base seca)</b>
Metano	45% - 60%
Dióxido de Carbono	40% - 60%
Nitrogênio	2% - 5%
Oxigênio	0,1% - 1,0%
Enxofre, Mercaptanas	0 – 1,0%
Amônia	0,1% a 1,0%
Hidrogênio	0 – 0,2%
Monóxido de Carbono	0 – 0,2%
Gases em menor concentração	0,01% - 0,6%

Fonte: Tchobanoglous (1993)

Segundo o Manual de Gás de Aterros, desenvolvido pela SWANA- Solid Waste Association of North America (2010), os fatores que podem influenciar a composição do biogás são os seguintes:

- Composição física dos Resíduos
- Composição química dos Resíduos
- Umidade dos Resíduos
- Índices pluviométricos regionais
- Temperatura interna dos Resíduos
- Temperatura externa
- Potencial hidrogeniônico (pH)
- Potencial de óxido-redução
- Nutrientes químicos
- Produtos tóxicos

Segundo Maciel (2003) existe quatro fatores fundamentais para o processo de geração do biogás em aterros: geometria e operação do aterro, características iniciais dos resíduos, ambiente interno da massa de lixo e ambiente externo da

massa de lixo. O processo de geração do biogás precisa ser avaliado em um contexto de múltiplas variáveis, onde a conversão da matéria orgânica em biogás nos aterros envolve um complexo sistema de interações físico-químicas e biológicas.

Os principais fatores que afetam a geração de gases em aterros sanitários, que foram identificados na pesquisa de Brito Filho (2005), foram os seguintes:

- Composição do resíduo
- Umidade dos resíduos
- Tamanho das partículas
- Idade do resíduo
- pH
- Temperatura
- Projeto do aterro
- Operação o aterro

## **2.2 Movimentação de gases no solo**

Em Ignatius, (1999) foi relacionada que as formas tradicionais de transporte de gás em solos, são a advecção, difusão. Porém foi destacada que a difusão por diferença de concentração é considerada como mais importante, pois a corresponde somente a menos de 10% do fluxo total de massa gasosa.

As bactérias e outros micro-organismos também podem causar uma diminuição e redução do total de gases emitidos pelo aterro através da transformação de compostos ou gases com estrutura complexa em substâncias mais simples. Este processo foi chamado por Maciel (2009) de atenuação biológica.

Os aterros sanitários apresentam, ao longo do tempo, geração de biogás, com aumento das pressões internas, na medida em que haja aprisionamento ou dificuldade do mesmo ser drenado. Esta pressão se dissipa à medida que o biogás percola pelos vazios dos sólidos, sendo drenado pelo sistema de drenagem ou percolado pela camada de cobertura do aterro. Esse fenômeno se apresenta de

forma intermitente, com intervalos de tempo irregulares, com oclusões dos líquidos, que se rearranjam por forças de campo (Benvenuto, 2009).

Em condições normais, os gases produzidos no solo são emitidos para a atmosfera mediante a difusão molecular. No caso de um aterro em atividade, a pressão interna é normalmente maior que a pressão atmosférica, e os gases de aterro saíram mediante difusão e fluxo convectivo (Brito Filho, 2005).

A movimentação dos gases poderá ser diminuída através do fenômeno de sorção que causa a diminuição dos movimentos de gases através da separação de alguns contaminantes em outros sub-compostos (Maciel, 2003).

Segundo Tarazona (2010) a migração dos gases no aterro segue a trajetória de menor resistência. Um exemplo disso são os caminhos preferências, tais como: trincas, fissuras no solo de cobertura que facilitam a passagem do gás para a atmosfera. Porém, a facilidade com que o gás se movimenta verticalmente ou horizontalmente dentro do aterro de RSU depende de vários fatores, tais como: as características do tipo de aterro, do tipo de solos próximos ao aterro, do tipo de resíduo, da compactação dos resíduos, do tipo de cobertura final e diária utilizada, entre outros. Se o aterro tem um sistema de impermeabilização de fundo, como um liner de argila ou geomembrana, e a cobertura dos resíduos é feita com solos arenosos, o gás tenderá a migrar verticalmente.

A difusão pode ser considerada o principal meio de transporte de gases em aterros de resíduos e é ocasionada pelos gradientes de pressões gerados pela formação de gases e também pela influência de pressão atmosférica no maciço de resíduos.

Para Ignatius (1999) o processo de transporte dos gases gerados em aterros é constituído pelo movimento de íons e moléculas em solução visando a diminuição das diferenças de pressões e da concentração dos gases existentes.

Na pesquisa de Brito Filho (2005) foi identificado que a Difusão de gases pode ser com fluxo ascendente e descendente em um aterro de resíduos.



Alguns mecanismos advectivos podem ser localmente importantes em algumas situações. Os mecanismos indutores de movimento advectivo de gás nos solos podem ser: variações na pressão atmosférica, temperatura ou vento à superfície, deslocamento provocado por água que se infiltra, diferenças de densidade, além de diferenças de pressão na amostragem de gás ou na aplicação de técnicas de remediação de terrenos contaminados, por ventilação dos solos. O gás metano, por exemplo, é menos denso que o ar atmosférico tendendo, portanto, a subir enquanto dióxido de carbono e a quase totalidade dos vapores produzidos por líquidos orgânicos voláteis são mais densos que o ar, tendendo a decrescer, quando liberado na atmosfera gasosa do solo (Fernandes, 2009).

Aumentos de temperaturas estimulam o movimento da partícula de gás, tendendo também a aumentar a difusão do gás, desta forma, o gás pode se dispersar mais rápido em condições de temperatura mais elevada causada por diversos fatores internos e externos de aterros (Brito Filho, 2005).

O transporte de massa por dispersão mecânica ocorre devido à interação entre o gás que se move e as irregularidades e interferências existentes no interior dos poros do solo (Fernandes, 2009).

Para Ignatius (1999) os principais componentes da dispersão são causados pelos choques e mudanças de direção e também na sua pesquisa é indicado que a dispersão longitudinal é maior que a transversal. É relatado que existe uma dificuldade em identificar e separar os fenômenos de difusão e dispersão e que os fluxos devem somados para facilitar a análise.

Huber (2009) faz referencia a compostos orgânicos e produtos similares proveniente de tratamento mecânico biológico de resíduos (MBA) como possíveis solução para oxidação de gases de aterros em coberturas denominadas metanotróficas, oxidativas ou também biocoberturas.

### 2.3 Método para medição de gases em aterros

A migração dos gases no aterro segue a trajetória de menor resistência. Um exemplo disso são os caminhos preferências, tais como: trincas, fissuras no solo de cobertura que facilitam a passagem do gás para a atmosfera (Tarazona, 2009). O princípio de medição e a resolução de alguns métodos avaliados por Maciel (2003) estão ilustrados na Tabela 5 a baixo.

Tabela 5 - Princípios básicos dos métodos das avaliações de emissões de biogás

Método	Princípio	Abrangência	
		Espacial	Temporal
<b>Placas de Fluxo</b>	Avaliação da concentração dos gases com o tempo em caixas fechadas (estática) ou semi-abertas (dinâmica) cravadas no solo de cobertura.	m <sup>2</sup>	horária
<b>Análise por infravermelho</b>	Detecta a concentração do biogás acima da superfície do aterro por processos óticos e/ou térmicos através da passagem de luz infravermelha.	ha	horária ou contínua

Fonte: Maciel (2003).

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 (Guedes, 2007). O objetivo destes métodos é avaliar e quantificar o fluxo de gases pelas diversos tipos de camadas de cobertura de aterros de resíduos.

As placas de fluxo consistem em uma câmara, que em contato com a camada de cobertura dos aterros, cria um ambiente fechado, restringindo saída dos gases que passam pela camada de cobertura, e também a entrada do ar atmosférico, promovendo um ambiente controlado onde possa ser realizada diversas medições e análises do gás confinado internamente nesta câmara.

É necessário avaliar as vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas disponíveis para escolha da forma mais adequada para cada o propósito de cada pesquisa (Maciel 2003).

Como as emissões são confinadas na câmara da placa de fluxo é possível determinar pequenos fluxos de emissões, porém com o acúmulo de gases na câmara incremento na concentração diminui a taxa de fluxo (Maciel 2003).

A migração dos gases no aterro segue a trajetória de menor resistência. Um exemplo disso são os caminhos preferências, tais como: trincas, fissuras no solo de cobertura que facilitam a passagem do gás para a atmosfera (Tarazona, 2009)

No trabalho proposto por Fernandes (2009) foram resumidas as vantagens e desvantagens para os principais tipos de análises de emissões gasosas pela camada de cobertura, e estão relacionadas na tabela 6.

Tabela 6 – Métodos para análise das emissões fugitivas de aterros

Tipo de Análises	Vantagens	Desvantagens
Placas estática e dinâmica	Método mais preciso na determinação de emissão pontual, larga experiência prática, baixo custo, simples instalação, necessita mão-de-obra pouco especializada, possibilidade de determinar parâmetros do solo da camada de cobertura, permite avaliação simultânea de vários gases.	Necessita de inúmeros ensaios para obtenção da emissão total do aterro, duração do ensaio prolongada a depender das dimensões da placa e possibilidade de modificação das características da cobertura na cravação
Análises por infravermelho	Mais preciso na obtenção da emissão total do aterro cobrindo rapidamente vários hectares e passível de localizar a dispersão da pluma de contaminação.	Alto custo, tecnologia nem sempre disponível, necessita mão-de-obra qualificada, não identifica as causas reais da emissão, maior susceptibilidade a condições meteorológicas, número de gases analisados limitado.

Fonte : Fernandes (2009)

No trabalho de Tréggourés.(1999) foi comparado os métodos atmosféricos com a placa de fluxo do tipo estática e dinâmica. Diferentemente dos outros métodos já comentados neste trabalho, o método atmosférico é executado através de um analisador de biogás que é passado pela superfície do aterro, identificando os pontos onde apresenta emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura.

No trabalho de Reinhart e Cooper (1992) a placa de fluxo estática tinha o objetivo de medir o fluxo das emissões fugitivas de aterros em pontos específicos da camada de cobertura. A medição do fluxo foi determinada após a passagem do do gás na camada de cobertura .

Em Fernandes (2009) é apresentada a Equação 2.1, que pode ser aplicada para medições de fluxo dinâmico, e que tem a função de mensurar as emissões fugitivas de gases, através da variável de fluxo de gás (J).

$$J = \frac{V_p \times \rho}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde

J = fluxo de gás (kg/m<sup>2</sup>s);

V<sub>p</sub> = volume útil da placa de fluxo (m<sup>3</sup>);

A = área de solo coberta pela placa (m<sup>2</sup>);

ρ = densidade do gás a determinada temperatura (kg/m<sup>3</sup>);

ΔC /Δt= variação da concentração do gás (% vol) com o tempo (s).

O tempo de realização do ensaio é uma variável fundamental para o cálculo do fluxo de gás (J). Após certo intervalo de tempo, a pressão, temperatura e concentração dos gases no interior da placa aumentam e o fluxo tende a decrescer até a estabilização em valores próximos a zero. Mudanças nas características geotécnicas do solo de cobertura também podem ocorrer após um longo período de ensaio (Maciel, 2003).

Existem diversos trabalhos e pesquisas com o uso de placas de fluxo para medições de emissões fugitivas de aterros. Nestes trabalhos são sugeridos diversas formas e tamanhos para as placas, desta forma, é possível afirmar que não existe consenso sobre este tema.

Também não existe consenso sobre o tempo de medição das emissões de gases pela camada de cobertura, como exemplo é possível citar Maciel (2003) que na sua pesquisa realizada no aterro da Muribeca realizou as medições em intervalos de 25 minutos. Na pesquisa de Borba (2006), no aterro de Nova Iguaçu, as medições

foram realizadas entre 20 a 40 minutos. E na pesquisa de Tarazona (2010) as medições foram realizadas em até 60 minutos.

## **2.4 Coberturas finais de Aterros Sanitários**

O trabalho de Tarazona (2010) define que o sistema de cobertura final é constituído de camadas de drenagem e camadas de impermeabilização. Os objetivos principais deste sistema são de minimizar a infiltração de águas para reduzir a geração de lixiviado, controlar a saída de gases para a atmosfera e isolar os resíduos ao exterior.

Em Felipetto (2005) é ressaltado que a cobertura final é um dos principais pontos a serem avaliados em projetos de aterros pois visam a diminuição da entrada de água de chuvas e proliferação de vetores e também de odores, controle do fluxo de gases para a atmosfera.

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) (Guedes, 2007).

Na pesquisa de Simões (2007) foi destacado que o projeto de um sistema de cobertura de um aterro sanitário não pode simplesmente ser usado em um outro, devido aos fatores e condições do clima de cada região. Por isso é importante estudar previamente os materiais disponíveis e as condições climatológicas do local e que coberturas são mais complexas em climas que apresentam estações predominantemente secas e chuvosas.

Na grande maioria dos aterros de pequeno e médio porte são utilizadas camadas de coberturas denominadas convencionais ou monolíticas, que sofrem modificação nas suas propriedades ao longo do tempo, devido as variações climáticas e ambientais.

Em regiões úmidas, os altos índices pluviométricos diminuem a capacidade de evapotranspiração das plantas, podendo esta capacidade não ser suficientes para eliminar a umidade armazenada no interior da camada, o que pode eventualmente resultar em uma maior infiltração através do sistema de cobertura. Por outro lado, uma maior umidade no solo favorece a retenção dos gases haja vista que os vazios, preenchidos por água, dificultam a passagem dos gases, levando a uma menor permeabilidade ao ar (Lopes, 2010).

### **Coberturas tipo barreira capilar**

As camadas do tipo barreiras capilares são também camadas denominadas evapotranspirativas. Elas consistem num sistema de camadas envolvendo solos finos (silte ou argilas) localizados sobre solos de material com granulometria grosseira (areias, britas, geotextil não tecido) (Maciel, 2009). Seu funcionamento é baseado no efeito das forças capilares e no princípio do fluxo em solos não saturados.

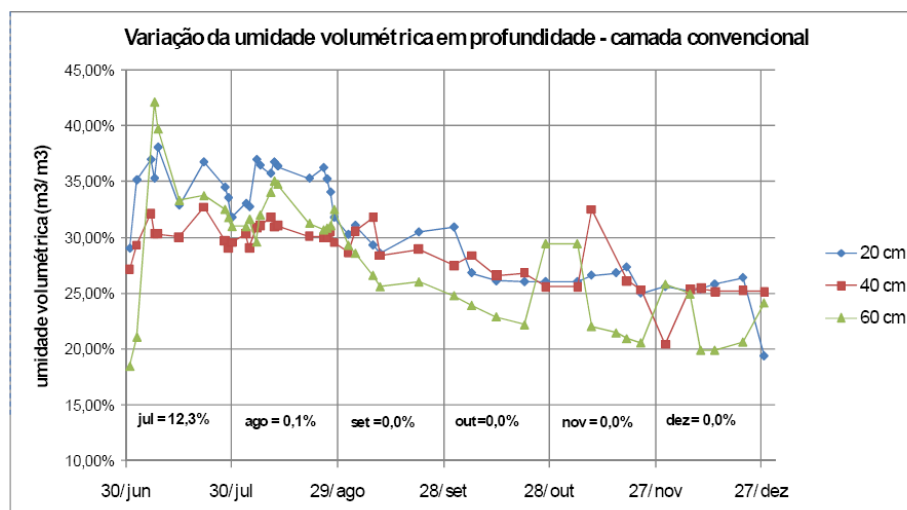
Nos aterros sanitários, existe uma necessidade de evitar a ascensão capilar de água do resíduo para a cobertura, diminuir o escape de gases do aterro e armazenar as águas que infiltram. Todas essas características são realizadas pela camada de cobertura que utiliza o princípio da barreira capilar (Fernandes, 2009).

Na pesquisa de Vieira (2005) foi indicado que o desempenho de uma aterro sanitário, principalmente devido a longa vida útil, tem relação direta com a eficiência do sistema de cobertura. Nesta pesquisa é indicada que os projetos de barreias capilares precisam levar em consideração maneiras de assegurar o melhor controle e também visam a diminuição do fluxo de água e ar atmosférico para dentro do aterro

Guedes (2007) indica que a barreira capilar, motivada pelo atual apelo estratégico e ambiental, pode ser construída com materiais alternativos usando os resíduos tratados em processos mecânico-biológicos (compostagem) o que levaria a minimizar a percolação oriunda da precipitação atmosférica para o interior da massa de resíduo. Esta proposta é formada pela 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.

Fernandes (2009) indica que o princípio de funcionamento de uma barreira capilar busca armazenar a água durante o período de chuva, para quando da chegada do período de estiagem a água armazenada é perdida pelo processo de evapotranspiração. A barreira capilar pode ser construída com uma camada de material fino e seguido de um outro material granular. O potencial mátrico da camada superior é maior do que o da camada inferior. Por este motivo, a água infiltrada tende a permanecer na camada de solo fino para que o equilíbrio seja atingido.

A camada convencional (Monolítica) foi estudada por Lopes (2010) em três pontos de profundidade (20 cm, 40 cm e 60 cm) para o período avaliado (Junho a Agosto são meses de chuva e Setembro a Dezembro meses de estiagem). A umidade volumétrica na camada superficial (20 cm) variou de 19 a 38% e na camada inferior (60 cm) variou de 18 a 42%, conforme a figura 3.



**Figura 3 - Medições de Umidade em Camada Convencional**

Fonte: Lopes, (2010)

A Barreira capilar estudada por Lopes (2010) apresentou em seu estudo, unidades volumétricas de retenção de líquidos similares as barreiras convencionais nos meses chuvosos, onde foi observado períodos de drenagem livre com 25 milímetros de chuva em 3 dias . Também foi observado que a infiltração aconteceu somente quando o grau de saturação atingiu valores de 70%.

A infiltração registrada por Lopes (2010) se deu apenas quando toda a camada estava com grau de saturação acima de 90%, o que significa que, em função da maior profundidade da camada convencional, a velocidade de infiltração é diminuída, fazendo com que a capacidade de campo demore a ser atingida.

### **Princípio de Funcionamento das Barreiras Capilares**

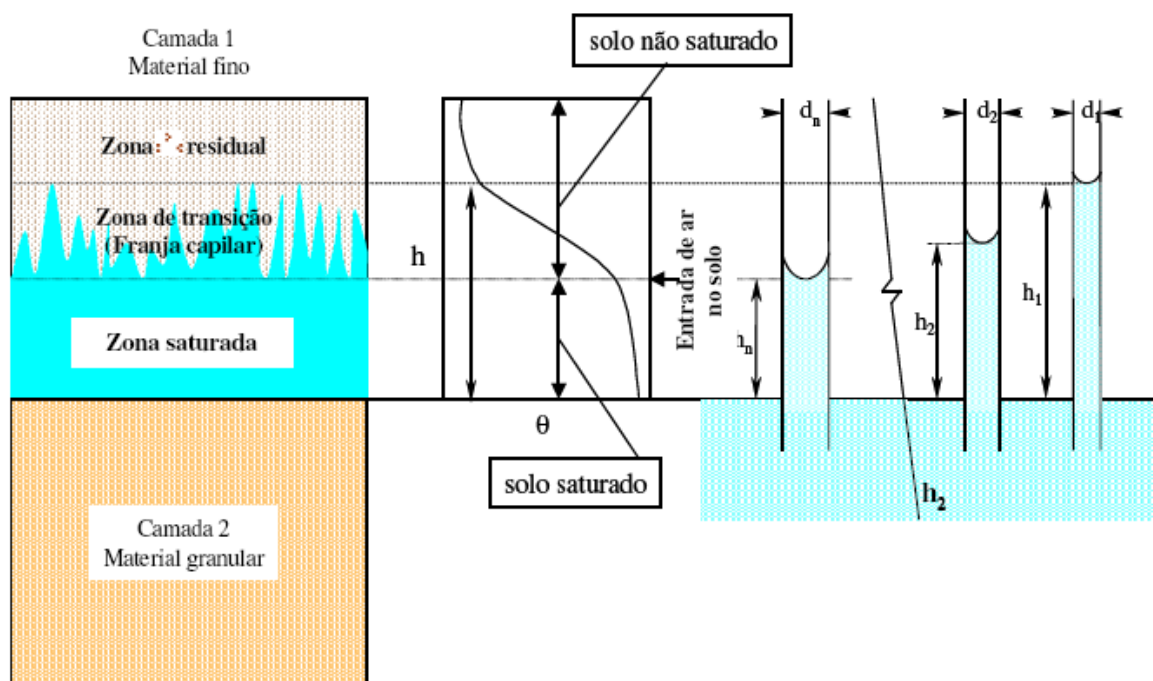
Segundo Izzo (2008) o movimento e retenção de água nas camadas de solo são similares em muitos aspectos à ascensão e retenção de água em tubos capilares. Embora existam diferenças entre os dois casos, pode-se entender o funcionamento das barreiras capilares comparando-as os tubos capilares interconectados. Assim é conveniente comparar com o fenômeno de capilaridade em solos. Este fenômeno é baseado em um modelo simplificado em que os vazios do solo são considerados como um conjunto de tubos capilares interconectados. A visualização deste



fenômeno simplifica bastante a análise e a retenção de água em solos e consequentemente o princípio de funcionamento das barreiras capilares.

A figura 4 apresenta o esquema que tem os capilares abertos na base e no topo, e que estão sujeitos a pressão atmosférica (pressão de referência igual a 0), e tem diâmetros  $d_i$ , com  $i$  variando de 1 a  $n$ .

O esquema proposto apresenta cada capilar tem comunicação um com o outro pela sua base e está inserido em água. Como os vários capilares têm diâmetros diferentes, a altura de ascensão capilar é diferente. Assim para um poro de diâmetro  $d_i$ , a ascensão capilar é a altura  $h_i$ . Para uma carga de pressão  $h_i$ , todos os poros com  $d < d_i$ , estão preenchidos com água. A soma do volume de todos os poros resulta na capacidade de retenção de água no solo neste nível de carga. Neste caso, para cada valor de carga de pressão  $h_i$ , com  $i=1$  a  $n$ , tem-se associado uma quantidade de água que é retida pelo solo, dada pelo teor de umidade volumétrico, em função da carga de pressão ou sucção  $h$  é representada por uma curva, conhecida como curva de retenção de água no solo.



**Figura 4** - Modelo Capilar de retenção de água no solo

Fonte: Modificado por Izzo, (2008)

A evaporação atua diretamente nos solos da camada de cobertura de aterros, e a água armazenada nos poros volta para atmosfera devido à radiação solar. Locais com alta evaporação tornam mais simples a continuidade de operação do aterro. No entanto, são necessários projetos eficientes que considerem tais benefícios (Fernandes, 2009).

Cabe ressaltar que o processo de evaporação em coberturas de aterros feito com material argiloso promove aparecimento de pequenas trincas ou fissuras. A ocorrência deste fenômeno está ligada ao ressecamento da cobertura do aterro, ocasionando o aumento das emissões fugitivas dos aterros e também a infiltração de águas de chuva aumentando a geração de percolados e também a entrada de ar atmosférico para dentro do maciço de resíduos.

Em Guedes (2007) é indicado que 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.

## **2.5 Oxidação do metano na camada de cobertura**

Por todos os lugares onde o metano gerado, seja ele fóssil ou abiogênico, alcança a área aeróbia da atmosfera, ocorre uma oxidação aeróbica e parcial do metano em dióxido de carbono e água e uma assimilação do carbono metanogênico pelas substâncias orgânicas através da atividade de um grupo de microrganismos que pode ser encontrado em toda a parte (Fernandes, 2009).

Segundo o Manual da SWANA (2010) os principais fatores que influenciam a oxidação do metano nas camadas de cobertura são a umidade, temperatura, tipo de

material usado na cobertura, espessura da cobertura e concentração do metano e a existência de cobertura vegetal..

As metodologias de cálculo para estimar a geração de metano em aterros usadas pela USEPA e pela UNFCCC apresentam um fator de oxidação de metano pela camada de cobertura. O fator de oxidação é uma taxa percentual que representa a quantidade de gás metano que se oxida na camada de cobertura dos aterros.

Segundo HUBER (2009) as camadas superficiais e de cobertura do aterro tendem a oxidar certa quantidade de gás metano. Também é indicado que os modernos aterros apresentam um percentual maior, se comparados com vazadouros sem camadas de cobertura.

Para Humer e Lechner (1999) a oxidação do metano acontece comumente em meios aquáticos devido a condição anaeróbia e relata como principais fatores que contribuem para a oxidação do metano são: presença microrganismos metanotróficos, fornecimento de oxigênio e nutrientes.

Em Christophersen (2001) comenta que o percentual de metano oxidado em medidas de campo são menores se comparadas com experimentos de oxidação de metano em laboratórios. A principal razão seria que em campo, haveria pequenas fissuras que permitiriam a passagem do metano sem a oxidação.

Humer e Lechner (1999) fizeram experimentos de oxidação de metano em laboratório, e em sua pesquisa foi identificada que com o aumento da temperatura de 15 até 20°C é capaz de dobrar a oxidação do metano.

Nos estudos Bahr (2006) e Maciel (2003) foram identificados que a umidade exerce um papel fundamental no processo de oxidação do metano em camadas de cobertura. Nestas pesquisas foram identificadas que baixa umidade e alta umidade causam baixas taxas de oxidação, e que as maiores taxas ocorrem entre a faixa de 35% e 80% de umidade.

### **3 ESTUDO DE CASO: CTR NOVA IGUAÇU**

#### **3.1 A Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu**

A gestão e gerenciamento da coleta, tratamento e disposição final dos resíduos gerados no município de Nova Iguaçu são realizados pela Empresa Municipal de Limpeza Urbana (Emlurb) a mais de 20 anos, quando a prefeitura outorgou a autarquia.

Com a proximidade do fechamento do antigo aterro da Marambaia (Lixão da Marambaia) devido o esgotamento da vida útil, A Emlurb de forma ambientalmente e com desenvolveu um edital de concorrência para os serviços de implantação de um novo Aterro Sanitário e recuperação do antigo vazadouro da Marambaia, no ano de 2000.

As bases deste edital também previam que fosse constituída uma uma Central de Tratamento de Resíduos, que deveria ser composta as seguintes unidades:

- Aterro de resíduos inertes;
- Aterros de resíduos urbanos e industriais Classe II;
- Unidade de Triagem e Britagem de Entulho da construção Civil;
- Unidade de Tratamento dos Resíduos do Serviço de Saúde (Hospitalares);
- Unidade de tratamento do Chorume;
- Unidade de Tratamento do Biogás;
- Além das unidades auxiliares e de apoio operacional.

Neste edital já estabelecia o local para implantação do novo aterro em uma área de 120 hectares, que tinha sido previamente selecionada pelo município e que já dispunha de EIA / RIMA e também de licença prévia para instalação de um novo aterro. Esta área havia sido previamente desapropriada pelo município de Nova Iguaçu em 1993.

A figura 5 indica a localização e situação da área que foi previamente selecionada pelo município antes do início da implantação do projeto.



**Figura 5** - Vista aérea da área selecionada para a implantação do Aterro Sanitário

A localização da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu (CTR Nova Iguaçu) está localizada na estrada de Adrianópolis, 5213, no bairro de Santa Rita, Nova Iguaçu, nas coordenadas  $22^{\circ}40'20''S$  e  $43^{\circ}27'59''S$  com distância de 10 quilômetros do centro da cidade.

A empresa vencedora da concorrência pública prevista no edital foi a SA Paulista, que ficou responsável pela implantação da Central de Tratamento e também da recuperação ambiental do aterro da Marambaia por um prazo de 20 anos. O início da operação de recebimento dos resíduos teve início em 2003 e a operação do sistema de captura e queima do biogás gerado teve início em 2007.

Segundo a pesquisa de BORBA (2006), somente 85% da coleta de resíduos é atendido pelo sistema atual e que existem uma grande parcela da população em áreas rurais e que 62% de ruas não pavimentadas. A geração estimada de resíduos por habitante é de 0,6 kg por dia.

A CTR Nova Iguaçu foi pioneira no desenvolvimento do projeto de captura e aproveitamento do biogás gerado nos aterros. Em 2004 a empresa conseguiu registrar o projeto segundo os critérios e procedimentos estabelecidos no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kioto e seu respectivo registro no Comitê Executivo do Organizações das Nações Unidas (ONU).

O prazo de encerramento do contrato de concessão termina em 2021. A Figura 6 ilustra a condição dos 4 aterros existem e em operação em 2011



**Figura 6** – Situação atual de operação da CTR Nova Iguaçu em 2011.

### **3.2 Descrição da área selecionada para a pesquisa**

A área selecionada para esta pesquisa foi o sub-aterro 1, que foi o primeiro aterro implantado e por isso apresenta um maior histórico de informações referentes aos quantitativos e qualitativos de resíduos, percolados e biogás. O sub-aterro 1 foi construído em uma área de aproximadamente 10.000 metros quadrados, e

inclinação de fundo igual a 2%, e com recebimento de cerca aproximadamente 25.000 toneladas mês em Julho de 2010.

O trabalho de Bortolazzo (2010) reuniu diversas informações referente ao sub-aterro 1 da CTR Nova Iguaçu, como o recebimento dos resíduos, origem e tipologia desde o início do recebimento em fevereiro de 2003 até o mês de agosto de 2010. Estas informações estão resumidas na tabela 7 a baixo.

Tabela 7 - Quantitativo de resíduos por origem no sub-aterro 1 nos anos de 2003 a 2010.

PERÍODO	NOVA IGUAÇU (Ton)						GRANDES GERADORES (Ton)		TOTAL (Ton)
	Domiciliar Ordinário	Público Granel	Varrição	Entulho Limpo	Resíduo Infectante	Lodo	Resíduo Infectante	Outros	
Fev / 2003	130.601	116.488	3.206	141	0	0	0	44.171	294.607
2004	140.693	191.630	6.459	40	0	198	0	241.662	580.682
2005	145.129	100.031	7.340	55.601	149	590	27	487.247	796.115
2006	151.969	109.523	3.848	48.924	29.083	284	76	188.629	532.337
2007	101.771	105.309	800	8.507	157	202	99	148.828	365.671
2008	62.599	55.247	65	3.698	80	103	65	194.780	316.636
2009	14.797	8.014	2	10	15	17	10	45.696	68.561
Ago / 2010	19.281	12.388	0	40	20	10	18	65.936	97.693
<b>Total Individual</b>	766.839	698.629	21.720	116.960	29.504	1.404	296	1.416.949	<b>3.052.302</b>
<b>Total de Resíduos</b>	1.635.056,43						1.417.245,09		
<b>% Individual</b>	46,90%	42,73%	1,33%	7,15%	1,80%	0,09%	0,02%	99,98%	<b>100%</b>
<b>% Total</b>	53,57%						46,43%		
<b>Média (t/ano)</b>	95.855	87.329	2.715	14.620	3.688	175	37	177.119	<b>381.538</b>

Fonte: Bortolazzo (2010)

Com base na tabela 6 é possível identificar que até o período de realização da pesquisa o sub-aterro 1 recebeu e 3.052.302 toneladas de resíduos de diferentes origens. A maioria dos resíduos recebidos, cerca de 53,57%, foram os resíduos urbanos gerados no Município de Nova Iguaçu, deste montante os resíduos domiciliares representam 46,9% o públicos a granel com 42,73%. A outra parcela que representa 46,43% do total de resíduos recebidos no sub-aterro 1 tem origem nos grandes geradores de todo estado do Rio de Janeiro.

Bortolazzo (2010) também dividiu os a totalidade dos resíduos recebidos no sub-aterro 1 em categorias, conforme indicado na tabela 8. Os resíduos orgânicos que



são os principais resíduos que propiciam a degradação da matéria orgânica formadora do biogás representam somente 32,82 % do total.

Tabela 8 - Principais resíduos Classe IIA e IIB recebidos no sub-aterro 1 nos anos de 2003 a 2010.

RESÍDUOS	%
Entulho	20,91
Lodo de ETE	4,24
Tecido / Plástico / Papel e papelão	0,75
Madeira / Galhos	3,91
Refratários e Ceramicos	2,27
Remoção Asfáltica	0,35
Resíduos orgânicos / Alimentos	32,82
Couro	1,16
Solo Classe II	1,00
Flutuadores	0,50
Bicarbonato de Cálcio / Sódio	0,01
Resíduos Industriais Gerais	30,62
EPI's Não Contaminados	0,06
Gesso	0,27
Lã de Rocha / Lã de Vidro	0,13
Produtos ImproPRIOS Para Consumo	1,00

## Temperatura

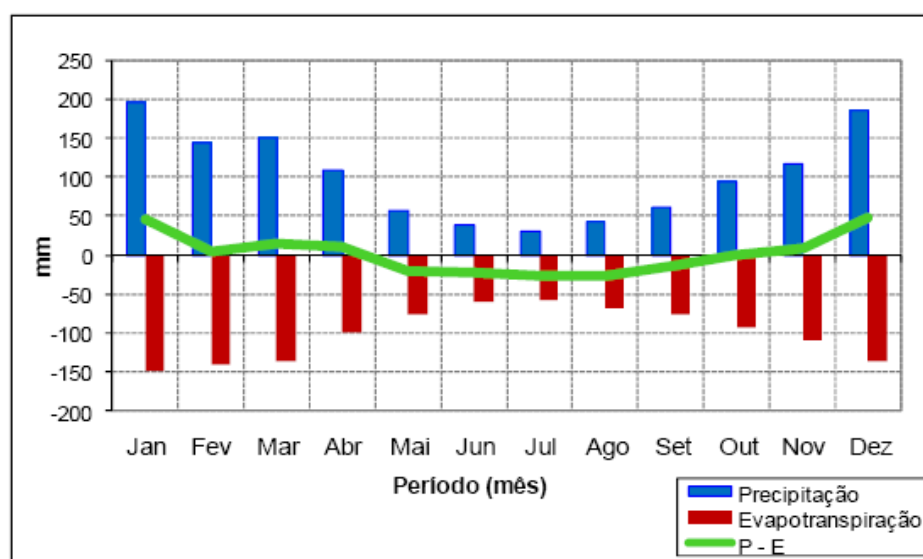
A temperatura média anual no verão corresponde a 26,7°C e a temperatura média anual no inverno é de 20,3°C. A temperatura média anual de 23,4 °C.

### 3.3 Informações sobre pluviometria na área

Bortolazzo reuniu as informações meteorológicas da estação próxima da CTR Nova Iguaçu, a uma distância de 32 quilômetros, coletando os dados obtidos pela estação meteorológica automática Seropédica-Ecologia Agrícola, operada pelo INMET correspondente ao intervalo de tempo de 1961 e 1990.



Na Figura 7 pode-se observar que as médias mensais históricas máximas tem incidência maior entre os meses de novembro à março, com valores máximos médios de pluviometria na ordem de 200 mm por mês e valores mínimos médios de pluviometria na ordem de 25 mm por mês. Uma importante informação deste gráfico, para uso na pesquisa deste trabalho, se refere a diferença entre os dados de precipitação, menos a evapotranspiração, que acontece entre o início de outubro até o mês de abril.



**Figura 7** – Comportamento hídrico referente às médias históricas de precipitação e evapotranspiração da estação meteorológica Ecologia Agrícola (1961 – 1990).

Fonte: Bortolazzo (2010)

### 3.3.1 Detalhes do projeto construtivo e de implantação

O projeto desenvolvido e proposto pela Engecorps (2001) propõe que o sistema principal de drenagem foi construído através de um formato de “espinha de peixe”, no qual os drenos secundários possuem espaçamento de 50 metros de distancia, apresentam dimensões de 0,70 x 0,80 m, são constituídos de pedra rachão , e se conectam com um ângulo de 45° graus com o dreno principal, que possui seção de 1,0 x 1,0 m, com tubos perfurados de concreto armado, com diâmetro de 0,40 m. externa\mente ao tubo de concreto, também é colocado pedra rachar e depois envolvido por uma manta geotêxtil. A figura 08 apresenta os detalhes do sistema de drenagem de percolados na fundação do sub-aterro 1.



**Figura 8** – Detalhes do conjunto do sistema de drenagem de percolados da fundação do sub-aterro 1.

Fonte: Engecorps (2001)

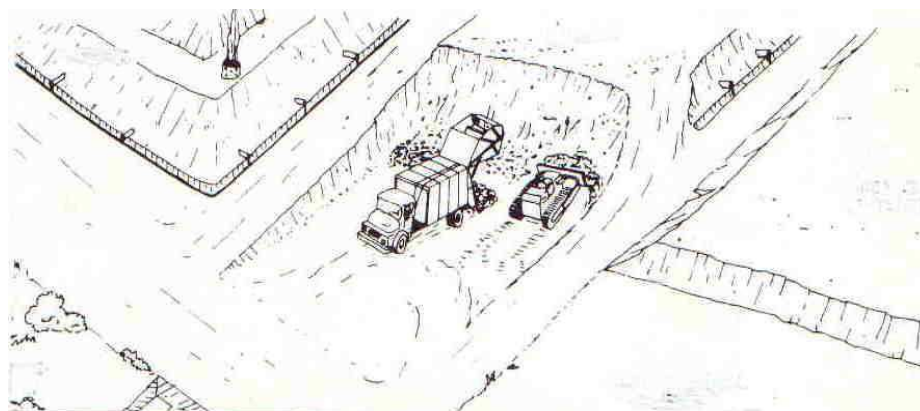
Adicionalmente aos drenos horizontais, também são construídos os drenos verticais, conforme a figura 9, que tem início na fundação do aterro até a superfície do aterro. Estes drenos tem a função de conduzir o chorume das camadas superiores até chegar o dreno principal localizado na fundação. Maiores detalhes serão apresentados e discutidos logo a frente.

Após a descarga dos resíduos os resíduos são realizados os trabalhos de espalhamento em camadas de 60cm de altura e compactação em talude com 6 passadas de um trator de esteira do tipo D6 ou mais potente. Este procedimento visa assegurar que os resíduos compactados apresentem peso específico superior a 1 tonelada por metro cúbico.



**Figura 9** – Detalhe de poço do tipo Vertical junto a redes de drenagem de chorume transversais e longitudinais.

O projeto da Engecorps (2001) prevê ainda que ao final de cada dia toda a frente de lançamento deverá ser recoberta com uma camada de solos argilosos de no mínimo 40cm. A forma de trabalho de disposição e cobertura dos resíduos está ilustrada na figura 10 a baixo.



**Figura 10** – Esquema descarga de resíduos e compactação em talude e cobrimento diário

Fonte: Engecorps (2001)

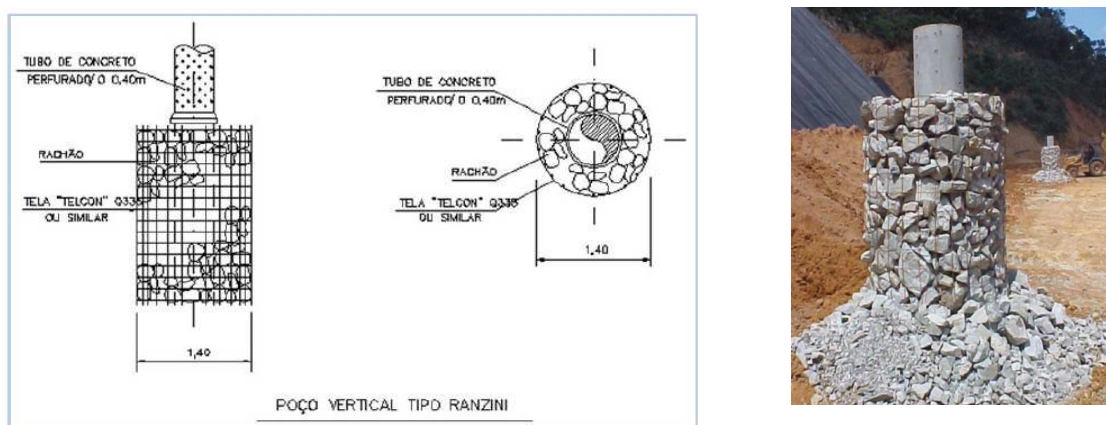
Concluída toda a praça de disposição, deverá ser iniciada uma nova praça adjacente a anterior seguindo o mesmo procedimento já descrito anteriormente, e assim

sucessivamente até a o esgotamento da possibilidade de disposição de resíduos nesta região. O talude externo final nesta área deverá ter inclinação máxima de 1V:2H e bermas de 3 metros de largura, a cada 5 metros de altura.

### 3.3.2 Poços Verticais de Drenagem de Chorume e Gás

Conforme discutido anteriormente os poços verticais, também chamados poços Ranzini (PDR), e representados na figura 11, são construídos desde a fundação do aterro, conectados no sistema de drenagem principal e até a camada superior do aterro (última camada). Para construção destes poços, o projeto prevê a instalação de tubos de concreto perfurados, com diâmetro de 0,40 m, envoltos por pedra rachão de forma que o diâmetro total do poço tenha 1,4 metros de diâmetro. Logo em seguida é instalado uma tela metálica do tipo Telcon que tem a função de permitir o alteamento dos poços antes do início da disposição dos resíduos nas células.

A objetivo da pedra rachão no poço vertical é permitir que o chorume produzido nas camadas e células superiores possam ser direcionados para o sistema de captação e drenagem que foi previamente instalado na fundação do aterro. Já o objetivo da instalação do tubo de concreto perfurado é permitir a saídas dos gases de forma direcionada para a atmosfera, através de um sistema passivo de exaustão de gases. enquanto que o tubo de concreto visa assegurar uma superfície livre para escoamento dos gases.



**Figura 11** – Poço de Drenagem Vertical do tipo Razine

### 3.3.3 Poços Horizontais de Drenagem de Chorume e Gás

Os drenos horizontais são instalados em todas as camadas (células) de resíduos, diretamente na parte superior de cada célula, através de escavação realizada com escavadeira hidráulica com lança de longo alcance suficiente para atingir a camada de cobertura localizada na célula inferior, atingindo assim profundidade mínima de 5 metros.

A construção para permitir o escoamento do chorume através destes drenos é realizada com o uso somente de com pedra rachão, que possui dimensões de 0,70 x 0,80 metros e em seguida o espaço restante da escavação é preenchido novamente com os próprios resíduos que foram retirados do local.

Também é usada a disposição dos drenos em forma de “espinha de peixe”, que tem o objetivo de promover a coleta do chorume gerado no maciço de resíduos e direcioná-los até os drenos verticais, conforme apresentado na figura 12



**Figura 12** - Detalhe da execução de trincheira para a implantação de drenos transversais e longitudinais.

Adicionalmente aos drenos horizontais, também está previsto no projeto a instalação de drenos de pé de taludes. O objetivo destes drenos é captar possíveis vazamentos

de nos taludes definitivos, de forma a não permitir o ocorra afloramentos e escoamento de chorume para a superfície das bermas.

### **3.4. Sistema de Ativo de Extração do Biogás**

Para maximizar a quantidade de biogás captado, um sistema de coleta deve ser projetado e operado de modo a promover condições anaeróbias (produção sustentável de metano). Além disso, o sistema de coleta deve remover o condensado de forma eficiente no processo de coleta, sem interromper a vazão e/ou sem permitir a entrada de ar.

Para o projeto instalado na CTR Nova Iguaçu, foram observados os seguintes critérios básicos:

- Vácuo disponível nos poços de extração de  $-25$  mbar ( $-10''$  H<sub>2</sub>O) ou superior;
- Comprimento e diâmetro dos tubos apropriados para uma velocidade de aproximadamente 12 m/seg. (2,400 ft./min) com vazão de gás e fluxo de condensado na mesma direção;
- Inclinação dos tubos de no mínimo 2% (por cento) com fluxos de biogás e condensado na mesma direção;
- Inclinação dos tubos de no mínimo 4% (por cento) com fluxos de biogás e condensado na direção oposta;
- Comprimento e diâmetro dos tubos apropriados para uma velocidade de aproximadamente 6 m/seg. (1,200 ft./min.) com vazão de gás e fluxo de condensado em direções opostas;

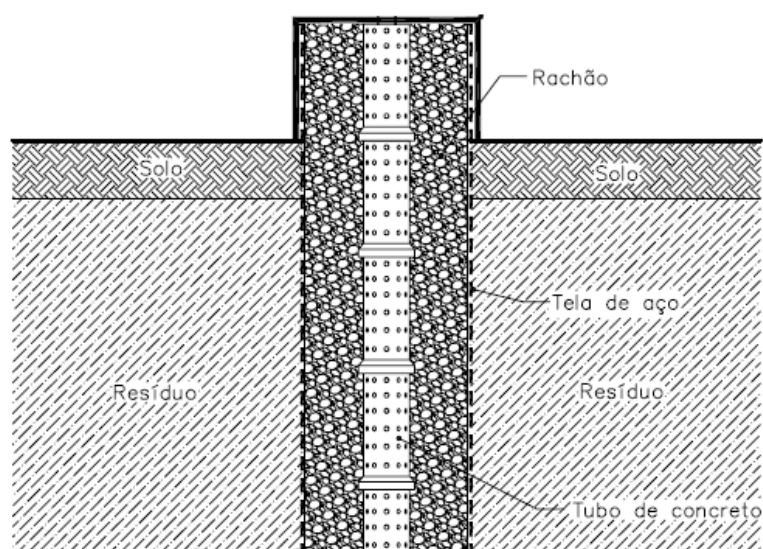
Além dos poços do tipo Ranzine (PDR) previstos no projeto executivo do aterro, que funcionam inicialmente como um dreno de alívio para o biogás, também foram instalados outros poços de extração do biogás e um sistema de tubulações e dispositivos para promover a maior eficiência de captura e extração ativa do biogás.



### 3.4.1 Adaptações nos Poços Ranzine (PDR)

Os poços Ranzini (PDRs), detalhado a figura 13, geralmente são utilizados para extração passiva de gás e também para drenar o lixiviado. Eles foram originalmente construídos para controlar o lixiviado durante operações de disposição dos resíduos. Os PDRs consistem em tubos de concreto perfurados com 400 mm de diâmetro, rodeados de brita contidos por uma tela metálica do tipo Telcon. Esses poços Ranzini foram instalados na base do aterro e foram sendo estendidos na medida em que o mesmo foi alteado.

Devido à movimentação do Aterro, proveniente da decomposição da matéria orgânica, juntamente com a estrutura ou material empregado na construção dos poços, estes tipos de poços podem apresentar obstruções que impedem ou limitam a captação do biogás ou a extração de lixiviado por bombeamento.



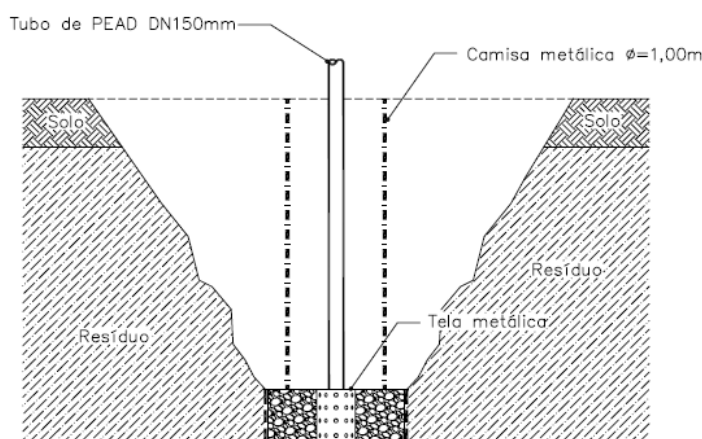
**Figura 13** – Poço do tipo Razine Típico

Fonte: SCS Engineers (2008)

Embora os poços PDRs apresentem outros propósitos, eles podem ser adaptados para receber um sistema ativo de captação, assim, segue é apresentado um esquema que mostra dos detalhes e etapas para promover a adaptação dos PDRs em um sistema ativo de extração do biogás.

A primeira etapa, conforme ilustrado na figura 14, consiste em fazer uma escavação na área do poço Ranzine de aproximadamente 4 ou 5 metros de profundidade, seguido de uma limpeza para garantir que o rachão esteja limpo e o poço desobstruído.

Uma camisa (tubo) metálica, com 1 metro de diâmetro, deverá ser introduzida no poço para funcionar como suporte à montagem, também um tubo, de diâmetro de 150 milímetros, de Poli Etileno de Alta Densidade (PEAD) deverá ser introduzido no poço, que terá a finalidade de levar pressão de sucção às partes mais profundas do poço.

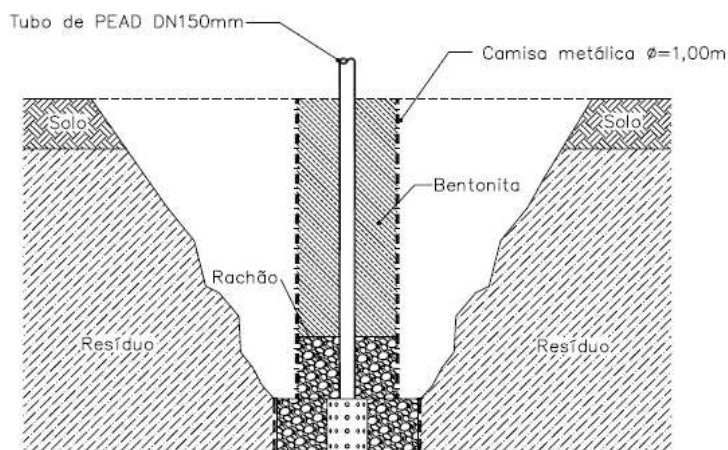


**Figura 14** – Primeira etapa de adaptação do poço tipo Ranzine.

Fonte: SCS Engineers (2008)

A segunda etapa é demonstrada na figura 15, e consiste no preenchimento interno da camisa metálica primeiramente com rachão, depois é colocado uma manta geotextil não tecido, e em seguida com bentonita, alternativamente poderá ser preenchida com solo e compactado.

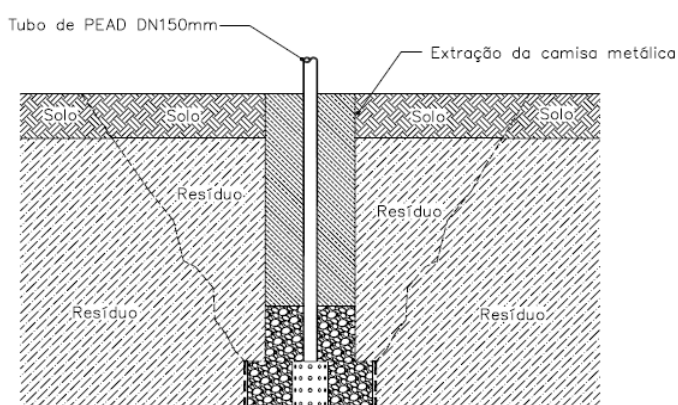




**Figura 15** – Segunda etapa de adaptação do poço tipo Ranzine.

Fonte: SCS Engineers (2008)

A terceira etapa, ilustrada na figura 16 consiste na recomposição externa da camisa com resíduos e também da camada de cobertura. Após isso deverá ser retirada a camisa metálica e com isso a adaptação do PDR esta concluída.



**Figura 16** – Terceira etapa de adaptação do poço tipo Ranzine.

Fonte: SCS Engineers (2008)

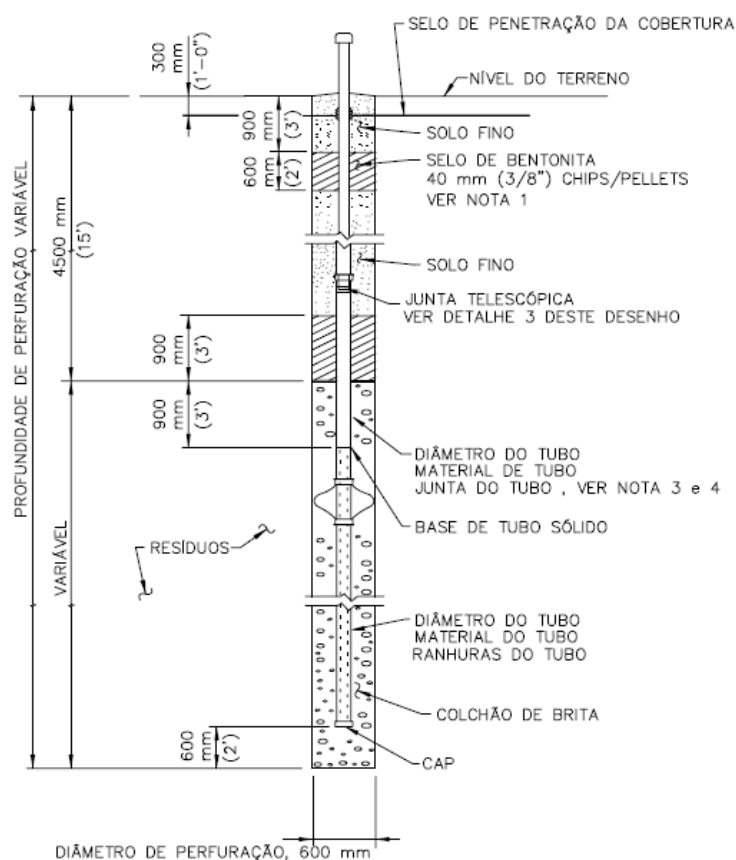
### 3.4.2 Poços verticais perfurados de extração do biogás

O diâmetro de perfuração indicado em projeto (600 mm), este diâmetro é recomendado no intuito de expor uma área maior de brita ao maciço de resíduos. Como o resíduo não é homogêneo ou isotrópico, quanto maior a área de resíduos exposta à brita, maior é o potencial para interceptar zonas produtoras de gás e

aumentar a extração deste. Um diâmetro maior de perfuração também permite uma remoção de lixiviado mais eficiente, caso necessária.

O material para a tubulação vertical é PVC SCH 80. Outros materiais usados na construção dos poços de extração de gás incluem PEAD, plástico reforçado com fibra de vidro (RPVC), aço inoxidável e aço carbono. O tubo de PVC SCH 80 é o mais recomendado pela sua resistência química, resistência à temperatura, resistência mecânica e custo.

Os selos de bentonita hidratada de 900mm e 600mm de espessura são recomendados para evitar a intrusão de ar na zona do tubo perfurado e possibilitar o aumento do vácuo no tubo perfurado. A localização dos selos e outros detalhes é apresentada na Figura 17



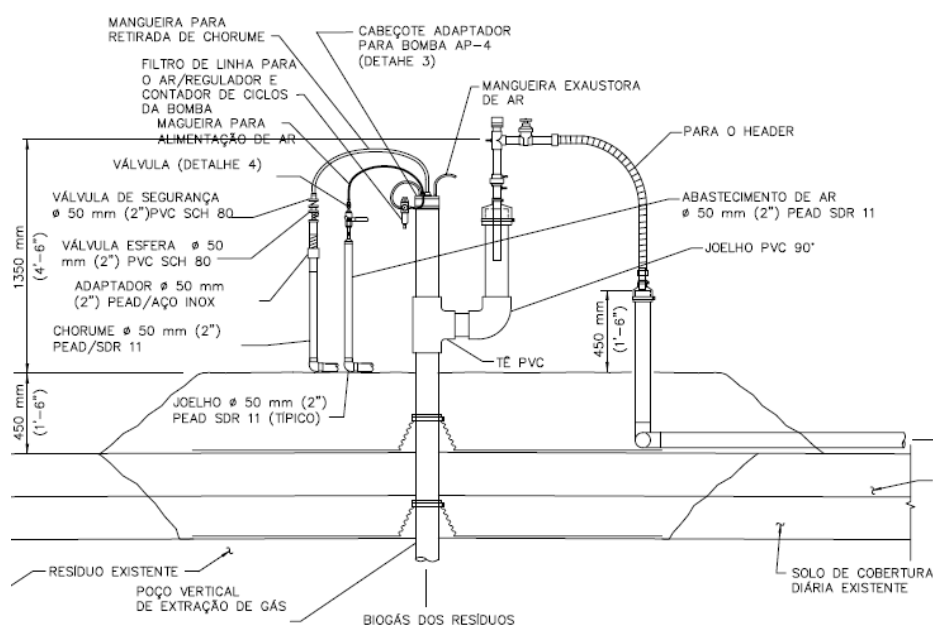
**Figura 17** – Poços verticais perfurados de extração do biogás

Fonte: SCS Engineers (2008)

### 3.4.3 Poços verticais perfurados com bombeamento de lixiviado e extração do biogás

A concepção do poço vertical para bombeamento do lixiviado é a mesma do poço vertical normal, a diferença está no diâmetro do tubo perfurado do projeto, que passa a ser de 8" polegadas, e é recomendado para acomodar a bomba de lixiviado. Esse diâmetro do tubo proporciona espaço para a bomba, mangueira de descarga, mangueira de suprimento de ar, mangueira de exaustão de ar e cabo de suporte. Esse diâmetro maior do tubo proporciona também maior flexibilidade na escolha do tipo e tamanho da bomba.

Quando o cabeçote do poço é montado conforme a figura 18 ele apresenta a funcionalidade de promover o bombeamento do lixiviado e extração de biogás de forma simultânea.



**Figura 18** – Poço de Extração de biogás e bombeamento de lixiviado

Fonte: SCS Engineers (2008)

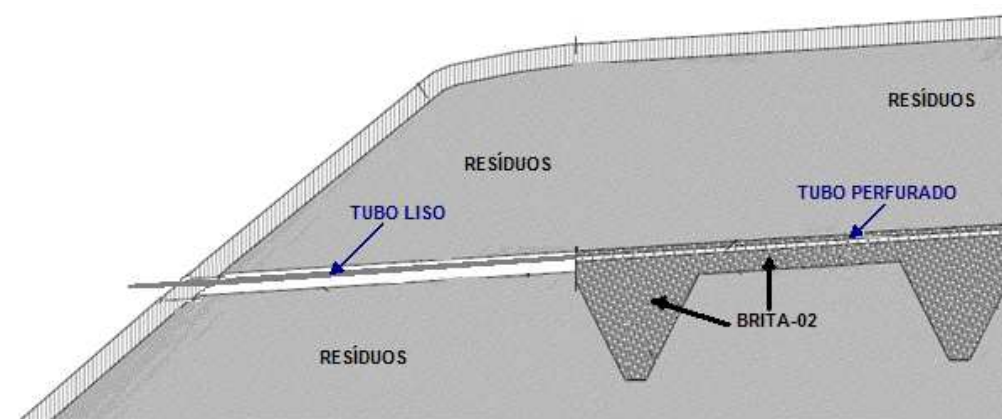
### 3.4.4 Poços Horizontais de extração do biogás

Os poços horizontais de extração de gás são geralmente instalados durante a operação do aterro. Dessa forma, os poços horizontais de extração de gás são

instalados nas novas áreas do aterro, ou áreas que se encontram em operação, possibilitando a captação de gás, mesmo antes de atingir as cotas finais e, dessa forma, interferirem menos na operação do aterro em áreas ativas.

Além disso, os poços horizontais são mais simples de instalar usando equipamentos de escavação convencionais. O diâmetro do tubo apresentado no projeto (180 mm) é recomendado para extração do gás e drenagem de lixiviado, caso necessário. O material recomendado para a tubulação horizontal é o PEAD devido às dimensões necessárias, menor custo, força/integridade das juntas e, por ser também mais flexível e aceitar, dessa forma recalques diferenciais, caso ocorram.

Também o projeto, conforme a figura 19 prevê a instalação de trincheiras drenantes espaçadas conforme orientação e indicação em projeto. Estas trincheiras auxiliam na drenagem de lixiviado mantendo a tubulação sempre a mais seca possível, dessa forma não interfere na extração do biogás.



**Figura 19** – Perfil típico de um poço horizontal instalado no sub vale 1.

Fonte: SCS Engineers (2008)

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

O desenvolvimento desta pesquisa ocorreu em 4 pontos (ou locais) selecionados, conforme ilustrado na Figura 20. Para localização destes 4 pontos levou-se em conta a seleção de áreas que não sofreriam impactos devido a operação de recebimento de resíduos do aterro, bem como qualquer movimentação de caminhões e equipamentos pesados.

O primeiro ponto (Local BC) é o local que foi selecionado para instalado a Barreira Capilar. Neste local foram realizadas as medições de Umidade, Temperatura na barreira capilar e emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura.

O segundo ponto (Local CM) é o local onde já existia uma Camada Monolítica de cobertura do aterro. Da mesma forma que no primeiro ponto (Local BC), foram realizadas as medições de Umidade, Temperatura na camada monolítica e emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura.

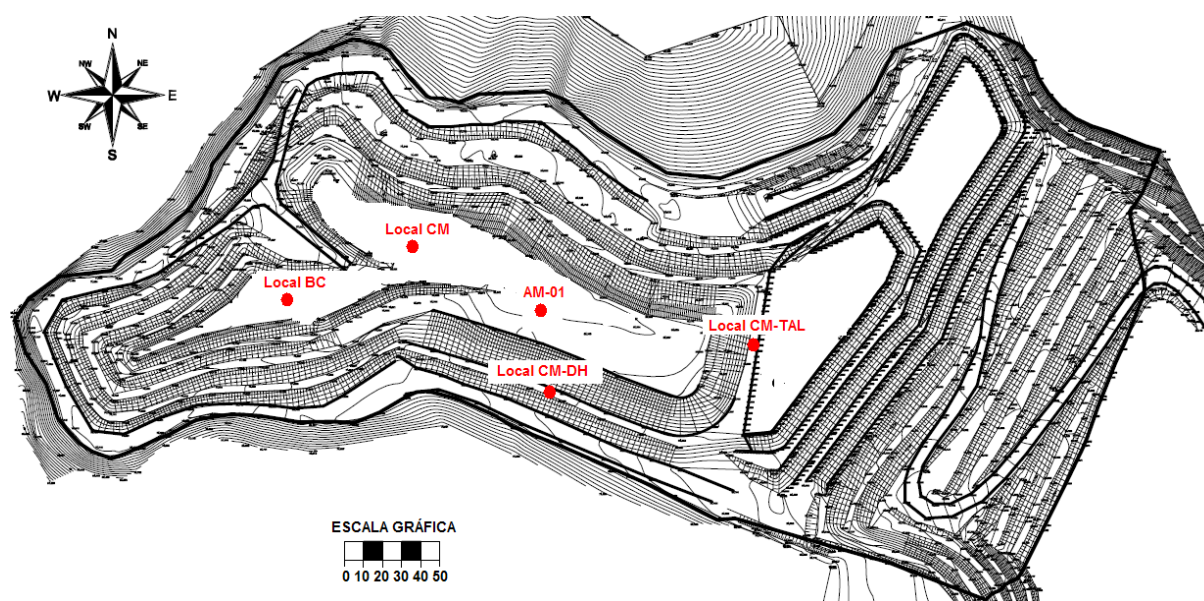
O terceiro ponto (Local CM-DH) é o local onde foi implantado um dreno horizontal de captação do biogás, e que a cobertura do aterro consiste de uma Camada Monolítica. Neste ponto foram realizadas somente medições das emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura.

O quarto ponto (Local CM-TAL) foi selecionado em uma área frontal do aterro, em um talude, e que também a cobertura do aterro consiste de uma Camada Monolítica. Neste ponto foram realizadas somente medições das emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura.

### **4.1 Materiais**

O Local BC está localizado na cota 82 que apresenta aproximadamente 55 metros de resíduos já dispostos, e é o local onde foi construída a camada capilar e

instalados 3 sensores de medidas de temperatura e umidade, neste local, também é um dos locais onde foram realizadas medições das emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura. O Local BC se encontra nas coordenadas  $22^{\circ}40'16.56''S$  e  $43^{\circ}28'47.82''O$ , e tem distancia de 25 metros de um PDR com extração de biogás e modificado conforme a Figura 13, e também a uma distancia de 15 metros de um poço vertical de extração do biogás conforme o esquema da Figura 18.



**Figura 20** – Localização dos pontos de medição no sub-aterro1

O Local CM também está localizado na cota 82 que apresenta aproximadamente 55 metros de lixos já dispostos, e consiste da atual camada de cobertura do aterro, do tipo monolítica. Neste local foram instalados 3 sensores para medidas de umidade e temperatura e também realizadas medições das emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura. Este ponto se encontra nas coordenadas  $22^{\circ}40'15.35''S$  e  $43^{\circ}28'47.60''O$ . O ponto 2 está a uma distancia de 10 metros de um PDR com extração de biogás, e também a uma distancia de 10 metros de um poço vertical de extração do biogás, e está localizado em uma área já encerrada do aterro.

O Local CM-DH está localizado na cota 62 que apresenta aproximadamente 35 metros de lixos já dispostos, se encontra nas coordenadas  $22^{\circ}40'17.84''S$  e  $43^{\circ}28'44.73''O$  e esta localizado em uma área onde foi instalado um dreno horizontal de extração do biogás, com comprimento total de 84 metros de extensão e

profundidade de 10 metros da camada de cobertura do aterro, neste local somente foram realizadas medições das emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura.

O Local CM-TAL esta localizado estrategicamente na área frontal do aterro, na cota 67 que apresenta aproximadamente 40 metros de lixos já dispostos. A Placa de fluxo foi posicionada em uma berma de 4 metros de largura, onde o talude superior e inferior tem 5 metros de altura e estão dispostos com inclinação de 2V (vertical) e 1 H (horizontal) no chamado “bolo de noiva”. Esse local é propício a fuga de gases e por isso neste ponto foram realizadas medições das emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura . O CM-TAL se encontra nas coordenadas 22°40'15.85”S e 43°28'40.30”O, e distancia de 20 metros de um PDR com extração de biogás, e também a uma distancia de 20 metros de um poço vertical de extração do biogás.

Na região de instalação das camadas estudadas foi retirada uma amostra para caracterização do solo de cobertura (AM-01), na cota 75 e indicado na Figura 4.1.

A amostra foi acondicionada em um saco plástico, devidamente identificada, para posteriormente serem encaminhadas ao Laboratório de Mecânica de Solos da UERJ. A quantidade retirada da amostra foi superior a 6 kg, de forma a garantir as frações necessárias para cada um dos ensaios que compõem a caracterização.

#### 4.1.1 Barreira Capilar

A instalação da barreira capilar ocorreu em uma área, já denominada Local BC, medindo 6 metros por 8 metros, totalizando 48 metros quadrados, e apresenta inclinação da cobertura de 2% da montante para a jusante. A profundidade de escavação foi de 1,2 metros:

- Camada superior com 50 centímetros de solo de cobertura local, totalizando 24,0 m<sup>3</sup> de volume de solo de cobertura;



- Camada intermediária com 40 centímetros de areia, totalizando 19,2 m<sup>3</sup> de volume de areia;
- Camada inferior com 30 centímetros de brita, totalizando 14,4 m<sup>3</sup> de volume de brita;

A figura 21 ilustra o início da escavação da camada capilar.



**Figura 21** - Escavação da barreira capilar

Após o término da escavação, com a ajuda de uma escavadeira hidráulica, foi realizado o nivelamento da área do fundo, conforme ilustrado na figura 22.



**Figura 22** - Detalhe do fundo da barreira capilar.



A camada mais profunda da barreira capilar foi composta de brita número 2 com espessura de 30 centímetros. Foi instalado uma manta geotextil não tecido, de 400 gramas por metro quadrado, em cima da brita para não permitir a mistura com a camada seguinte, composta de areia, conforme mostrado na Figura 23.



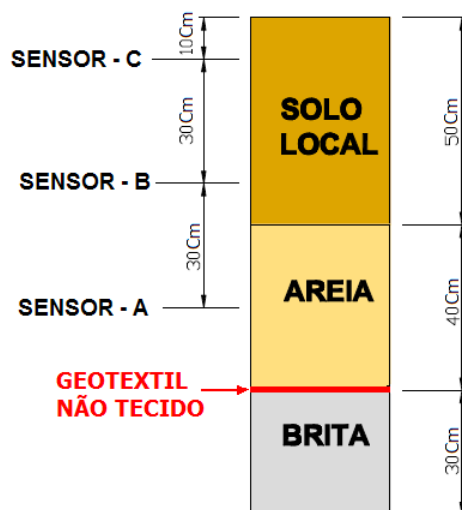
**Figura 23** - Instalação da manta geotextil não tecido na camada capilar

Imediatamente acima da manta geotêxtil não tecido, foi colocado uma camada de 40 centímetros de areia grossa e lavada. No meio desta camada de areia foi instalado o primeiro sensor de medição de temperatura e umidade. Após a camada de areia foi instalado o segundo sensor de temperatura e umidade, seguido da recomposição do solo de cobertura. A aproximadamente 10 centímetros da superfície foram instalados o terceiro sensor de temperatura e umidade.

Esta montagem foi representado na figura 24, que apresentada um esquema e o perfil das diversas camadas que compõe a barreira capilar, que foi denominada Local BC. A instrumentação nesta célula se constitui de 3 sensores de medição de temperatura e umidade, que foram instalados durante a construção da barreira capilar e apresentam as seguintes diferentes profundidades:

- Local BC, SENSOR – A) instalado a 70 centímetros da superfície;
- Local BC, SENSOR – B) instalado a 40 centímetros da superfície;

- Local BC, SENSOR – C) instalado a 10 centímetros da superfície.



**Figura 24** – Local BC, Camada Capilar e Posicionamentos dos sensores de umidade e temperatura.

Por fim, a escavadeira hidráulica fez o nivelamento do terreno e a compactação de toda a área conforme procedimento normal do aterro, conforme ilustrado na Figura 25.



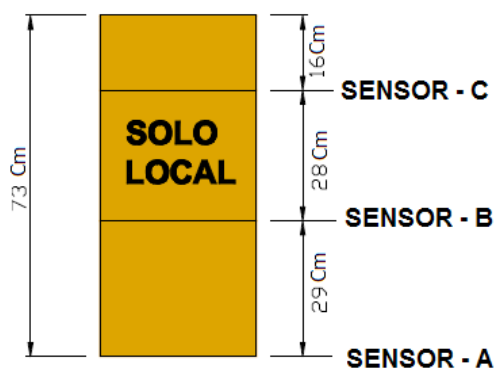
**Figura 25** - Nivelamento do terreno e a compactação superior da barreira capilar.

#### 4.1.2 Camada Monolítica

A camada monolítica estudada é exatamente a mesma camada de cobertura final do aterro, localizada no platô superior do sub-aterro 1, onde a camada de cobertura apresenta 80 centímetros de espessura, abrange uma área de 1.200 m<sup>2</sup>, e tem inclinação de 2% da montante para a jusante. Neste trabalho esta área foi chamada de Local CM.

Para realização da instalação dos sensores de umidade e temperatura na camada monolítica foi usada uma cavadeira manual, que perfurou a camada de solo até aproximadamente 75 centímetros. A partir desta profundidade os sensores foram posicionados nas cotas indicadas na Figura 26, sendo cada sensor recoberto com o próprio material (solo) que foi previamente escavado

- Local CM, SENSOR – A) instalado a 73 centímetros da superfície;
- Local CM, SENSOR – B) instalado a 44 centímetros da superfície;
- Local CM, SENSOR – C) instalado a 16 centímetros da superfície.



**Figura 26** – Local CM, Camada monolítica e posicionamentos dos sensores de umidade e temperatura

#### 4.2 Metodologia

Neste item será descrita a metodologia utilizada na caracterização da amostra de solo, na utilização da instrumentação para as medições nas camadas monolítica e barreira capilar e para as medidas das emissões fugitivas através da placa de fluxo.

#### 4.2.1 Caracterização do solo

A caracterização da amostra de solo foi realizada através dos seguintes métodos:

- A ) Preparação de Amostra para ensaios de caracterização NBR 6457/86.
- B) Análise Granulométrica por peneiramento NBR 7181/84.
- C) Análise Granulométrica por sedimentação NBR 7181/84.
- D) Determinação da Massa Específica NBR 6508/84 para o cálculo da densidade real dos grãos (Gs).
- E) Determinação dos índices de consistência (Limites de Atterberg) foi utilizado o método para Limite de Liquidez (LL) NBR 6459/84.

#### 4.2.2. Equipamentos utilizados nas medições de umidade, temperatura e Pluviometria

Para realizar as medições de umidade e temperatura foi utilizado o analisador fabricado pela DECAGON DEVICES, modelo ProCheck e o sensor EC-TM-Moist-Temp.

A figura 27 mostra o analisador e o respectivo sensor de umidade e temperatura. O analisador ProCheck é de fácil manuseio e as leituras são realizadas de forma muito simples, bastando fazer a conexão do plug (conector) do sensor à parte superior do analisador e pressionar a tecla “enter”.

As leituras e dados de umidade ( $q$ ) ( $m^3/m^3$ ), e ) do solo, é obtida através da medição da constante dielétrica do meio através da utilização da tecnologia de Frequência de Domínio no Tempo (TDR).



**Figura 27** - Analisador e o respectivo sensor de umidade e temperatura.

Fonte: DECOGON DEVICES (2007)

As leituras começavam logo após as instalações das duas células descritas acima, e foram anotadas em uma planilha de campo. As leituras de umidade e temperatura foram realizadas uma única vez ao dia, sempre entre às 09:00 e 11:00 horas da manhã de cada dia monitorado.

Neste mesmo horário também foi coletada as informações dos volumes de chuvas através de um pluviômetro, do tipo Ville de Paris, de propriedade e instalado na CTR Nova Iguaçu.

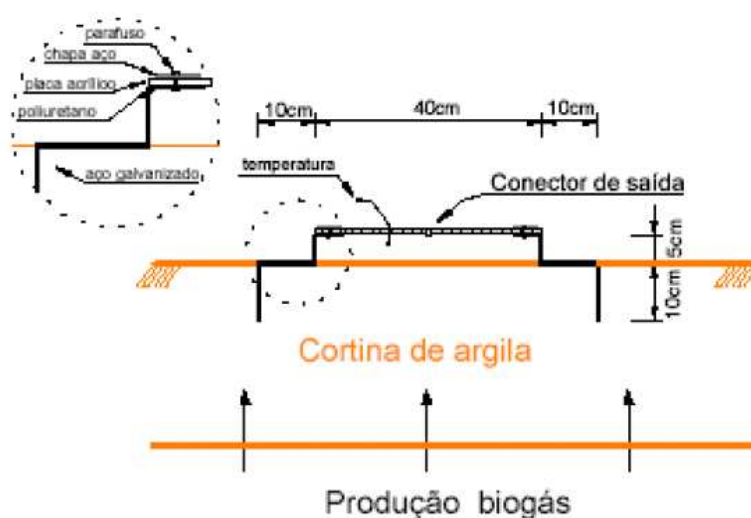
#### 4.2.3 Placa de Fluxo

As investigações de campo tiveram como objetivo medir as composições dos gases (metano, dióxido de carbono e oxigênio) e também estimar as vazões volumétricas de gases que atingem a atmosfera através da barreira capilar e da camada de cobertura.

Para realizar os cálculos das vazões volumétricas foi utilizada a Equação 2.1, apresentada no item 2.4. A taxa de emissão superficial determinada pelo método estático pode ser calculada, pois todas as variáveis da equação eram conhecidas.

As medições de gases que atravessam a camada de cobertura e atingem a atmosfera foram realizadas com a metodologia da placa de fluxo, semelhante à descrita por Maciel (2003).

Trata-se de uma placa estática onde ocorre a captação dos gases para o interior da mesma. As dimensões propostas para a placa (área de base igual a 0,16 m<sup>2</sup> e 8L de volume) estão dentro dos valores encontrados na literatura. O projeto da placa está apresentado no esquema da Figura 28.



**Figura 28.**– Esquema da placa de fluxo utilizada na investigação (Maciel, 2003).

A placa foi construída lateralmente com chapas de aço. A chapa utilizada no degrau foi de 2 mm de espessura, tendo sido escolhida por ser mais resistente, evitando possíveis alterações na placa durante a cravação no solo. A lateral superior foi construída com aço de 2 mm de espessura e a parte superior de acrílico cristal de 8 mm. O acrílico foi fixado à placa por 12 parafusos, três em cada lado. Para evitar perda de gases na interface entre placa de acrílico e chapa de aço, foi colocada uma espuma de poliuretano de alta densidade e silicone em todas as conexões. A placa e o detalhe dos conectores de engate rápido para as leituras são apresentados na Figura 29.



**Figura 29** – Detalhes da placa de fluxo

A configuração da placa em forma de degrau (10 cm de altura e largura) foi concebido para evitar a entrada de ar atmosférico para o interior da caixa induzida pelo vento. Esta configuração também é bastante útil durante a cravação da placa na cobertura, uma vez que a mesma pode ser pressionada de encontro ao solo. O degrau deve ficar em contato direto com o solo, garantindo assim a passagem do fluxo apenas na área de 40 cm x 40 cm, de outra maneira, qualquer espaço deixado entre o solo e a placa pode alterar os resultados encontrados (Maciel, 2003).

A placa de fluxo possui duas conexões do tipo engate rápido, posicionado no topo da caixa, que eram ligadas ao equipamento de medição de gases (GEM 2000) de forma que uma conexão realiza a retirada do gás do interior da placa e outra retorna o gás à placa (Figura 30). Este aparelho faz as leituras dos fluxos de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{O}^2$ .





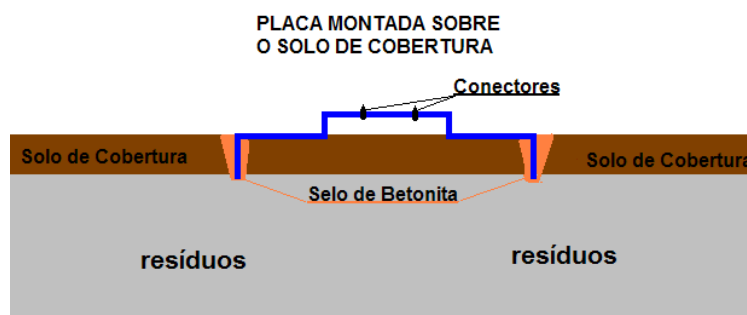
**Figura 30** - Medições diretamente na Placa de Fluxo

#### 4.2.3.1 Procedimento de ensaio - Placa de Fluxo

Os ensaios para cada local selecionado foram realizados conforme as configurações e cenários apresentados acima. A placa foi instalada sobre e sob a camada de cobertura conforme o esquema ilustrado na Figura 31.

Inicialmente, a placa de fluxo é disposta no local de realização do ensaio para a marcação do perímetro no solo da camada de cobertura. Posteriormente, retira-se a placa e uma escavação manual é feita deixando uma folga lateral para a entrada da placa verticalmente. A escavação deve ser feita com o máximo cuidado para evitar a modificação das condições naturais do solo. Realizada a cava, é adicionada bentonita granular para garantir a não entrada de ar atmosférico e também a saída do gás da placa de fluxo. Depois a placa de fluxo é inserida no local e pressionada através do degrau.





**Figura 31** - Placa de fluxo montada sobre o solo de cobertura

Finalmente, com a placa no local de realização do ensaio, é recomposto o solo manualmente na folga lateral, através de compactação, seguido de umedecimento da bentonita. O procedimento de cravação está mostrado nas figuras 32, 33, 34 e 35.



**Figura 32** - Marcação e escavação manual para montagem da placa



**Figura 33** - Assentamento da placa e colocação de bentonita



**Figura 34** - Recomposição, compactação e umedecimento do solo de cobertura



**Figura 35** - Situação final da placa no solo

As leituras começavam após a cravação da placa no solo, e foram anotadas em uma planilha de campo. As leituras no GEM 2000 dos gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{O}_2$ ) e pressão

barométrica foram efetuadas com um intervalo máximo entre as leituras de 10 minutos. Os tempos finais dos ensaios tiveram duração de até 340 minutos, em virtude de paradas para horário de almoço.

Em média houve pelo menos 15 leituras para cada cenário proposto, visando principalmente estabilizar as composições dos gases. Em seu ensaios Maciel (2003) utilizou o tempo de 25 minutos e Bogner et al.(1993) sugere intervalos de 20 a 40 minutos.

#### 4.2.3.2 Equipamentos utilizados

Para as investigações e medições de campo foi utilizado o analisador GEM 2000 do Fabricante LANDTEC, que possui a capacidade de leitura e análise de:

- % de composição de Metano ( $\text{CH}_4$ );
- % de composição de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ );
- % de composição de Oxigênio ( $\text{O}^2$ );
- Leitura de vazão de gases (por tubo de Pitot);
- Pressão Barométrica.

A figura 36 ilustra os detalhes do equipamento e o mesmo em operação, em um poço de extração vertical.

A leitura de metano é filtrada por uma frequência de absorção infravermelha de  $3,41\mu\text{m}$  (nominal), que é a frequência específica para cadeias de hidrocarbonetos. A calibração dos instrumentos usa mesclas de metano certificadas e proporcionarão leituras corretas.



**Figura 36** – Detalhes de operação do analisador GEM 2000

FONTE: Landtec (2005)

Para que isso ocorra é importante que não haja outros gases hidrocarbonetos presentes na amostra, como por exemplo o etano, propano, butano, e outros.

A leitura de dióxido de carbono é filtrada por uma frequência de absorção infravermelha de 4,29  $\mu\text{m}$  (nominal), que é a frequência específica para dióxido de carbono. Portanto, quaisquer outros gases geralmente encontrados em aterros sanitários não afetarão a leitura do dióxido de carbono.

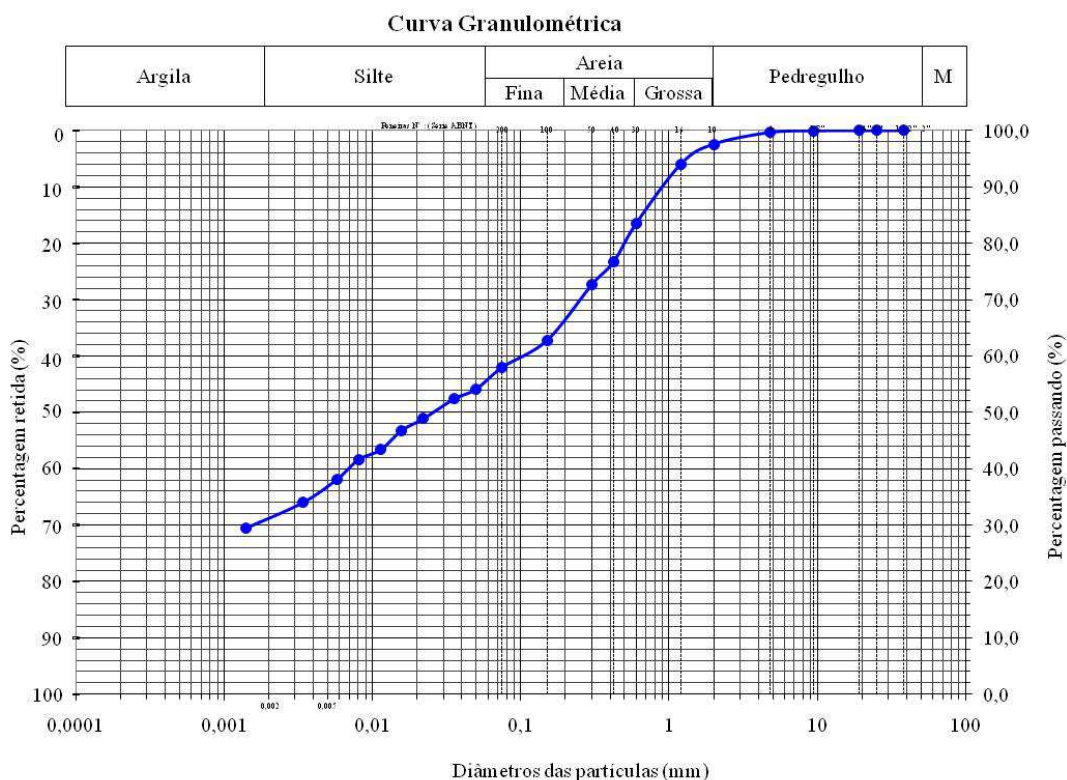
O sensor de oxigênio é de um tipo de célula galvânica, que praticamente não sofre influência de CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>, diferentemente de muitos outros tipos de célula de oxigênio.

O GEM 2000 possui uma bomba de sucção que trabalha com vazão constante de 50 mililitros por minuto (ml/min), desta forma utilizaremos este valor para os cálculos dos fluxos de gases.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

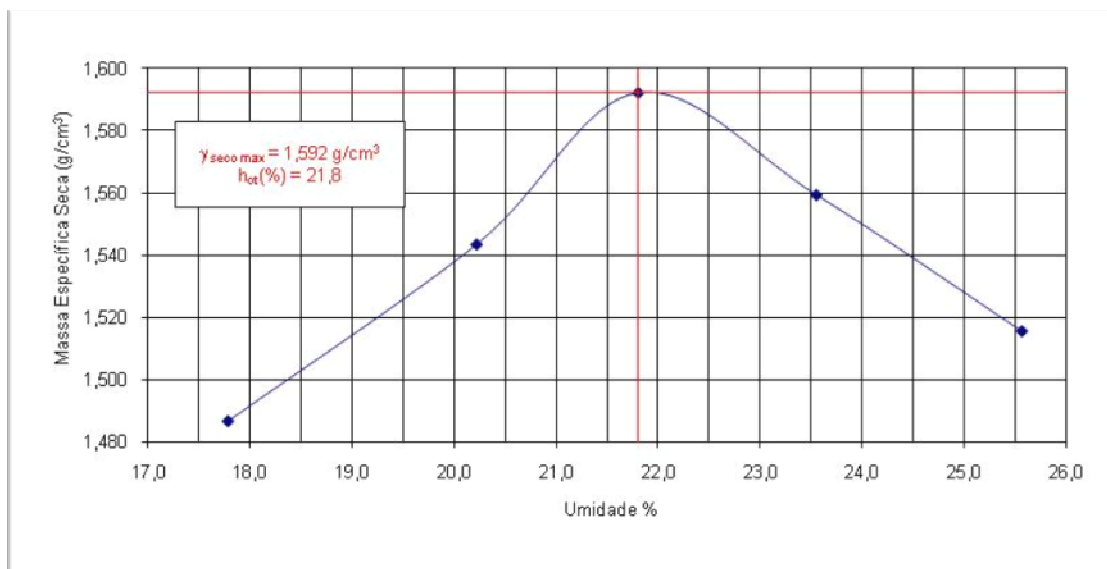
### 5.1 Solo utilizado nas camadas de cobertura

A figura 37 apresenta a curva granulométrica da amostra. O LL (Limite de Liquidez) determinado foi de 49,8 e o solo é não plástico. A classificação foi realizada mediante a utilização do Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS) apresentando-se como SM-SC (Areia Silto-argilosa).



**Figura 37** - Curva granulométrica do solo de cobertura do sub-aterro 1

A Figura 38 apresenta o resultado do ensaio de compactação, utilizando a energia Proctor Normal, da amostra de solo coletado, indicando o valor de 21,8% de umidade ótima para a amostra, e com massa específica aparente seca de 1,592 (g/cm<sup>3</sup>).



**Figura 38** – Ensaio de compactação do solo de cobertura do sub-aterro 1

## 5.2 Resultados de campo para as Medições de Temperatura

As medições de Temperatura e Umidade foram realizadas de forma simultânea na Barreira Capilar (Local BC) e na Camada Monolítica (Local CM). Estas medições foram efetuadas entre os meses de Julho à Novembro de 2010. Em anexo são apresentados os gráficos completos das medições durante todos os meses.

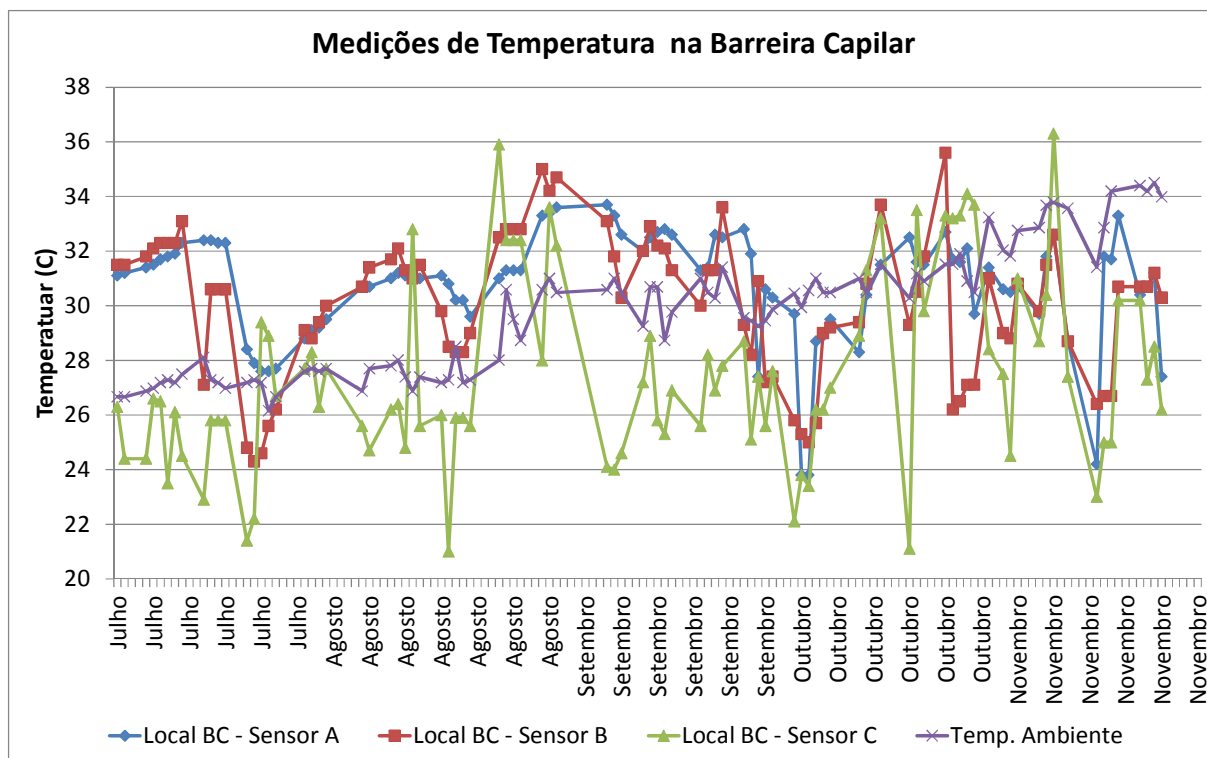
### 5.2.1 Medições de Temperatura

As medições de temperatura registradas na Camada Monolítica são apresentadas na figura 39, onde é observado que todos os sensores apresentaram temperaturas inferiores à temperatura ambiente registrada no mesmo período.

As temperaturas registradas nos sensores que foram instalados com maior profundidade (Sensor A e Sensor B) apresentaram valores próximos durante os meses de julho e agosto, e com diferença de 2°C a partir de setembro. Também é encontrado valores maiores se comparado ao sensor mais próximo da superfície (Sensor C). Adicionalmente, é possível relacionar a influencia direta entre as







**Figura 40** – Medições Consolidadas de Temperatura na Barreira Capilar

### 5.2.2 Comparação entre as Medições de Temperatura na Barreira Capilar e Camada Monolítica.

Conforme indicado anteriormente as profundidades de instalação dos sensores na Barreira Capilar e Camada Monolítica são similares. Assim as figuras 41, 42, e 43 visam estabelecer a comparação dos dados obtidos nos sensores para a Barreira Capilar e Camada Monolítica.

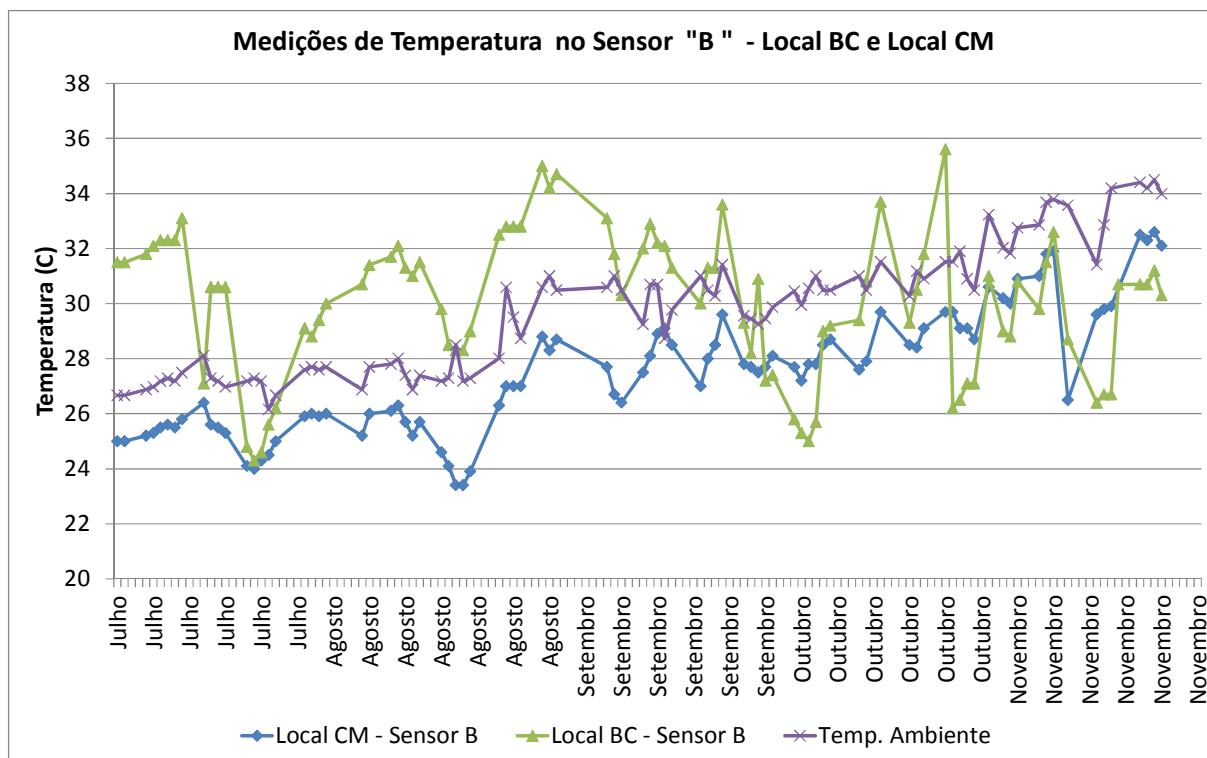
#### 5.2.2.1 Resultados da Medição de Temperaturas no Sensor “A”

Observa-se na figura 41 que os valores encontrados no Sensor A para na Camada Monolítica são inferiores aos valores encontrados na Barreira Capilar durante todo o experimento.

Também é possível confirmar que os valores de temperatura encontrados na Barreira Capilar são superiores aos valores da temperatura ambiente até início de Outubro. Na primeira quinzena do mês de Outubro a temperatura do Sensor A da Barreira Capilar apresenta uma tendência de aumento, ultrapassando a temperatura







**Figura 42** – Medições Consolidadas de Temperatura no Sensor “B” da Barreira Capilar e Camada Monolítica

### 5.2.2.3 Resultados da Medição de Temperaturas no Sensor “C”

As medições de temperatura registradas no Sensor “C” para a Barreira Capilar e a Camada Monolítica estão apresentadas na figura 43.

Os valores encontrados no Sensor C para a Camada Monolítica são inferiores aos valores encontrados na Barreira Capilar e também os valores da temperatura ambiente durante todo o experimento.







precipitação pluviométrica ocorrida no período, a média de umidade para os dois sensores foi de 20%.

Com estas observações, se verifica que para outubro e novembro o gradiente estabelecido entre os sensores diminui, indicando uma tendência à saturação da barreira capilar.

### 5.3.2 Comparação entre as Medições de Umidade na Barreira Capilar e Camada Monolítica.

As figuras 46, 47 e 48 visam estabelecer a comparação dos dados obtidos através das medições de umidade nos três sensores instalados na Barreira Capilar e Camada Monolítica, além de apresentar as medições de pluviometria registradas durante o período do experimento.

#### 5.3.2.1 Resultados da Medição de Umidade no Sensor “A”

As medições de umidade para o Sensor A estão representadas na figura 46.

Observa-se que os valores encontrados para a Camada Monolítica apresentaram pouca variação durante todo o período do experimento, não sofrendo qualquer variação que possa ser relacionada com a pluviometria ocorrida no mesmo período. Esta situação é diferente para a Barreira Capilar que logo após as chuvas ocorridas em Julho, e entre Outubro e Novembro, apresentaram variação que podem ser relacionadas aos índices pluviométricos.

Também fica claro no período de Agosto à Outubro, que os valores de umidade da Barreira Capilar ficam menores aos encontrados na Camada Monolítica indicando que a Barreira Capilar se encontrava em funcionamento. A partir de Novembro, com a intensificação das chuvas, os valores de umidade da Barreira Capilar aumentam de forma significativa, porém apresentando um valor errático, em que até se aproxima do valor da camada monolítica em dois momentos.

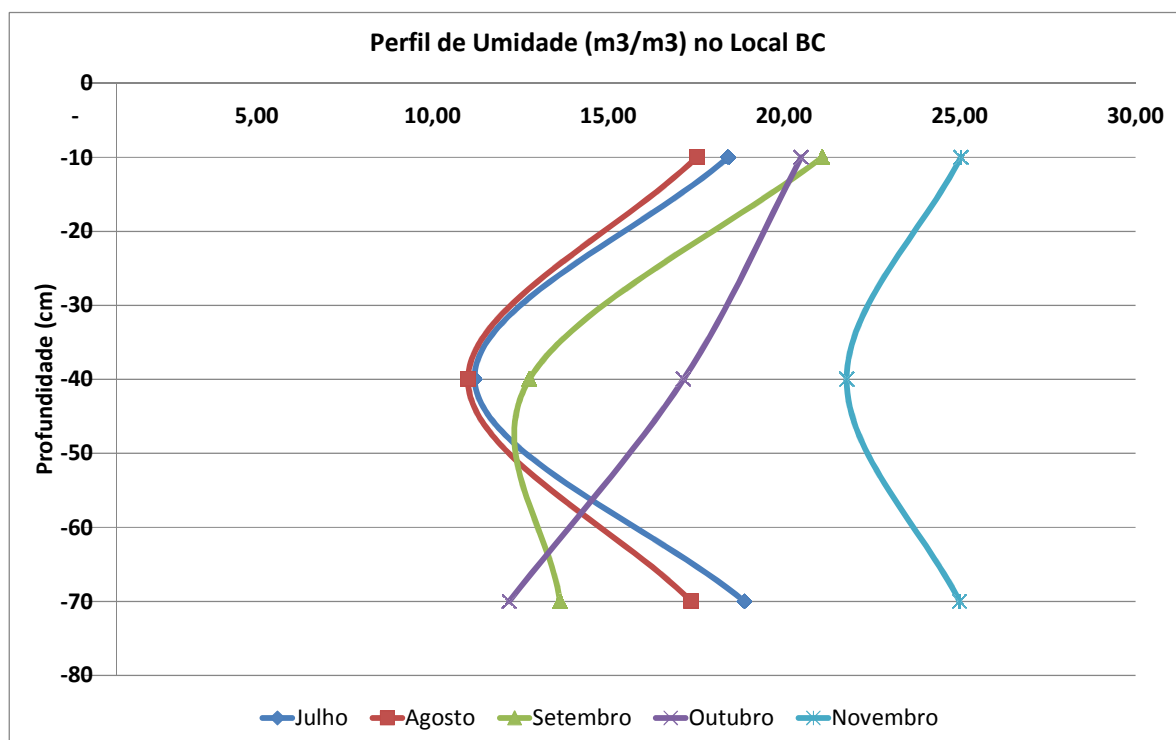








É possível observar que o gradiente de umidade, isto é, a diferença nos valores encontrado entre o sensor instalado mais próximo da superfície, o sensor intermediário e o sensor mais profundo, é encontrado em todos os meses, com exceção do mês de outubro, onde foi registrado a maior incidência de chuvas.



**Figura 49** – Perfil de umidade na Barreira Capilar

O perfil das medições de umidade em função da profundidade de instalação dos sensores, durante o período de julho a novembro de 2010, na camada monolítica está apresentado na figura 50.

Nota-se que os valores de umidade encontrados, todos os meses da pesquisa, nos sensores com instalação mais profunda indicam valores entre 16 a 20 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, já nos sensores instalados em profundidade intermediária indicaram valores de umidade entre 12 a 16 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>. Para os sensores com instalação mais próximos da superfície os valores de umidade foram mais dispersos, com variação de 7 a 20 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

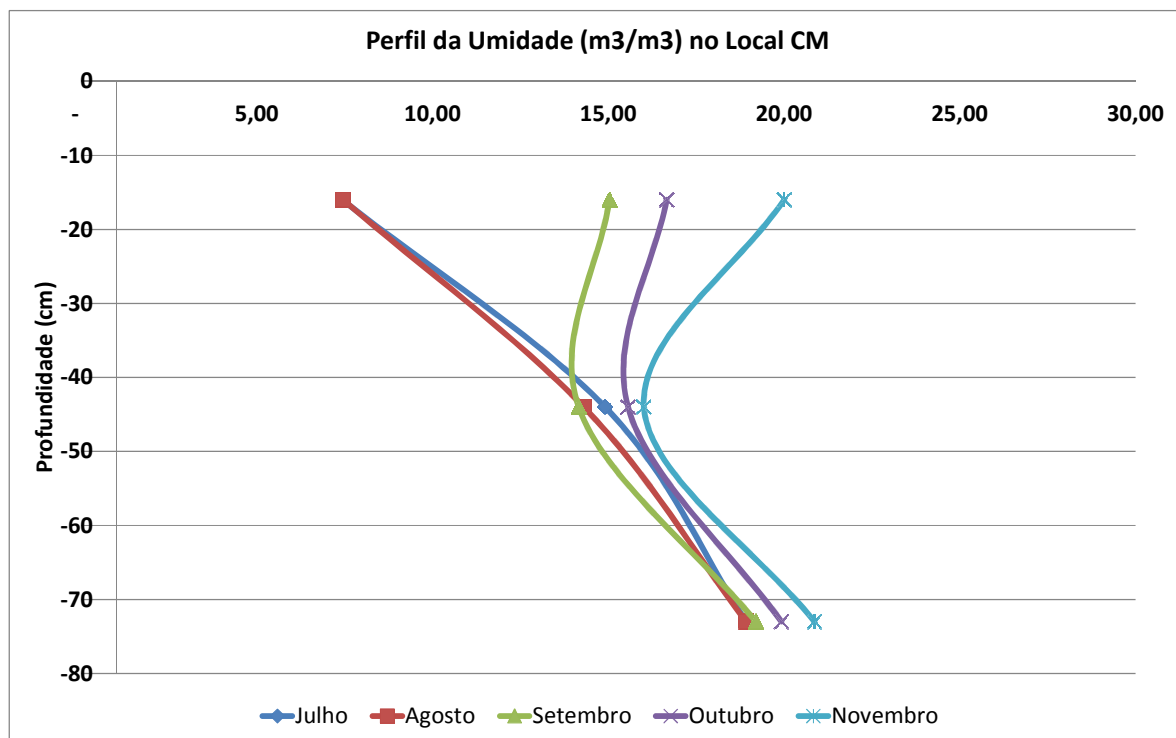


Figura 50 – Perfil de umidade na Camada Monolítica

#### 5.4 Resultados de campo para medições de Biogás

As medições de emissões fugitivas pela camada de cobertura foram realizadas em pontos estratégicos, como em bermas, próximos a poços horizontais e verticais de captação do biogás, conforme descrito no Capítulo 4 e detalhes de localização da Figura 20. Estas medições de gases foram efetuadas entre os meses de Julho à Novembro de 2010.

Em todas as medições de emissões fugitivas de gases, realizadas no sub-aterro 1 da CTR Nova Iguaçu, com os poços de extração ligados, foi constatado que a emissão de gases pela cobertura do aterro é praticamente inexistente, desta forma, foi somente possível calcular o fluxo de gases pela camada de cobertura do aterro, com os poços ativos de extração de biogás desligados durante o período de medição.

Tomando como referencia a equação 2.1, dimensões da placa de fluxo, vazão de sucção do analisador de gás (GEM2000) e uso dos dados de campo e leituras apuradas durante o período de medição, foi possível calcular os fluxos dos gases Metano (CH<sub>4</sub>), Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e Oxigênio (O<sub>2</sub>) pela camada de cobertura a partir da equação:

$$J_i = \frac{Q_a}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \quad (\text{Equação 5.1})$$

Onde

J<sub>i</sub> = fluxo de gás (ml / Min\*m<sup>2</sup>);

Q<sub>a</sub> = vazão de sucção do analisador de gás (50 ml/Min);

A = área de solo coberta pela placa (0,36 m<sup>2</sup>);

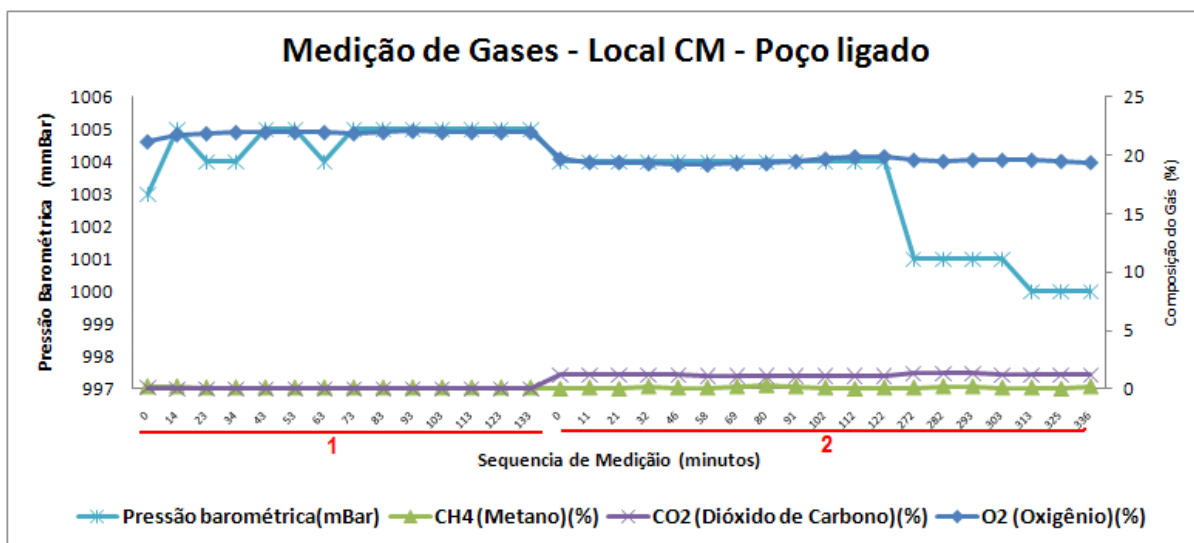
ΔC /Δt= variação da concentração do gás (% vol) com o tempo (s).

#### 5.4.1 Medições na Camada Monolítica (Local CM)

As medições das emissões fugitivas de biogás na camada monolítica estão apresentadas na figura 51. Foram realizadas 2 seqüências de medições nas seguintes datas:

- Seqüência 1 – Medição realizada em 25 de Julho;
- Seqüência 2 – Medição realizada em 29 de Julho;

As seqüências 1 e 2 ilustram a montagem da placa de fluxo sobre a camada de cobertura, com o poço de biogás de extração ativa ligado próximo ao Local CM. Não é identificada nenhuma relação entre a influencia da pressão atmosférica com as medições das sequências 1 e 2.

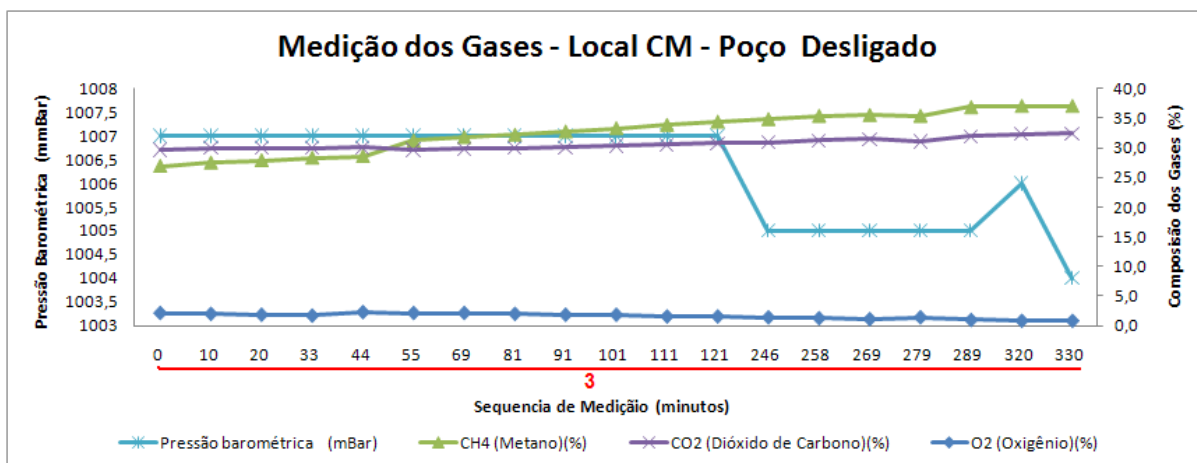


**Figura 51** – Resultados das medições de emissões fugitivas na camada monolítica e poço de extração de biogás ligado.

Para as sequências 1 e 2, as composições dos gases metano de dióxido de carbono são quase nulas, com valores médios de 0,15%, indicando assim, a inexistência de emissões fugitivas com o poço de extração ativa de gás ligado. Esta pequena presença de gases registrados está relacionada com o balanceamento diário dos poços de extração do biogás.

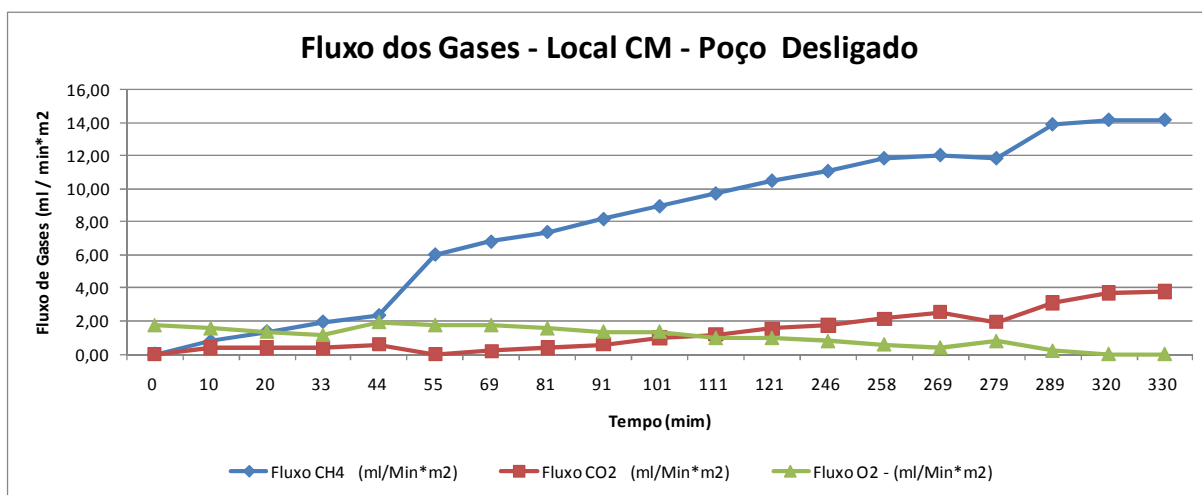
A figura 52 mostra as emissões fugitivas dos gases na camada monolítica, considerando que a placa de fluxo foi instalada sobre a superfície e o poço ativo de extração do biogás estava desligado.

Estas medições apresentas na sequência 3 foram realizadas em 16 de agosto, e indicam que durante esta medição houve um significativo crescimento na composição do gás metano entre 30% a 37%, quando o poço ativo de captação do biogás estava desligado. Também ocorre um aumento na composição do dióxido de carbono em valores similares e em torno de 30%, e diminuição dos níveis de oxigênio.



**Figura 52** – Resultados das medições de emissões fugitivas na camada monolítica e poço de extração de biogás desligado.

A figura 53 apresenta as medidas de fluxo de gases através da camada monolítica. Os valores de fluxo do gás metano se destacaram muito em relação aos outros gases. Ocorreram um crescimento nas medições até estabilizar em 280 minutos de medição, no valor de 14,10 ml/min\*m2.



**Figura 53** – Medições de fluxo de gases na camada monolítica e poço de extração de biogás desligado

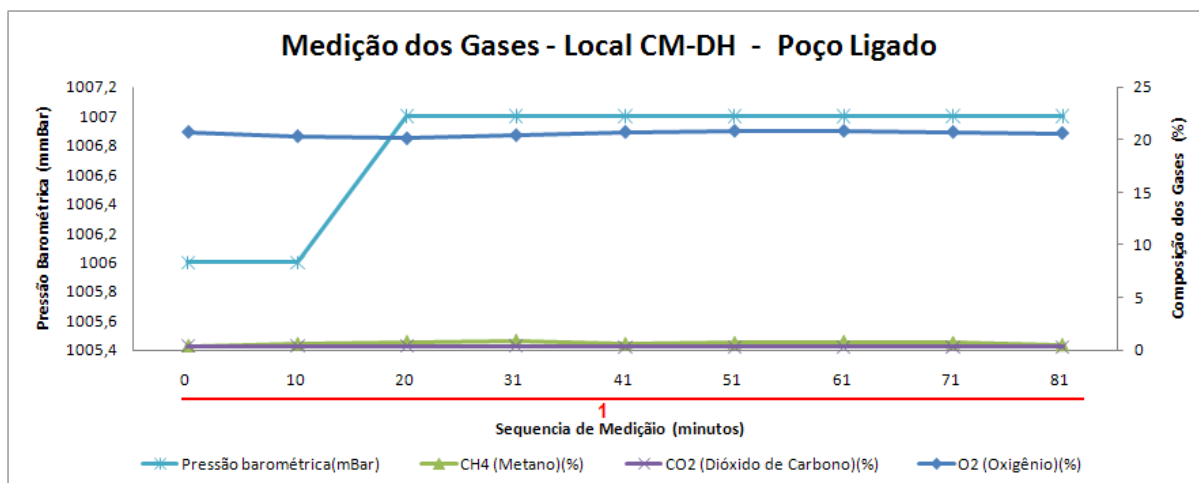
#### 5.4.2 Medições na camada monolítica (Local CM-DH), em dreno horizontal de extração do biogás.

Visando estabelecer uma correlação entre os diversos tipos de drenos e poços de extração do biogás instalados no sub-aterro 1, também foram realizadas medições

de fluxos de gases visando determinar as emissões fugitivas que ocorrem em diversas na área do aterro.

O Local CM-DH foi indicado previamente na figura 20, e está localizado na ombreira direita do sub-aterro 1, e foi realizada em 10 de Setembro.

Nesta área a operação de disposição de resíduos foi finalizada. A placa de fluxo foi montada em cima de um dreno horizontal de biogás, com extensão de 84 metros de comprimento, profundidade de 10 metros, e em operação (ligado). Os resultados desta medição de gases. Os resultados das medições fugitivas de gases pela camada de cobertura, Local CM-DH, estão apresentadas na figura 54.

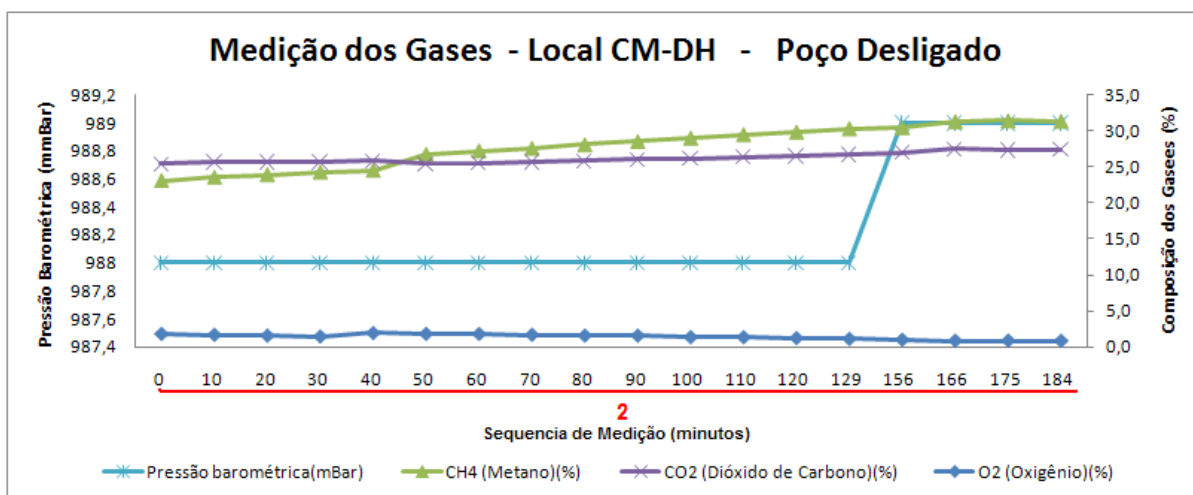


**Figura 54** – Resultados das medições de emissões fugitivas no Local CM-DH e poço de extração de biogás ligado.

Os valores encontrados na seqüência 1 de medições das emissões fugitivas são próximos a zero para as composições de metano e dióxido de carbono, e a composição do oxigênio apresentou valores próximos 20%, indicando então somente a presença de ar atmosférico. Salienta-se que mesmo após a variação da pressão atmosférica entre as seqüências de medição não houve qualquer mudança nas medições dos gases.

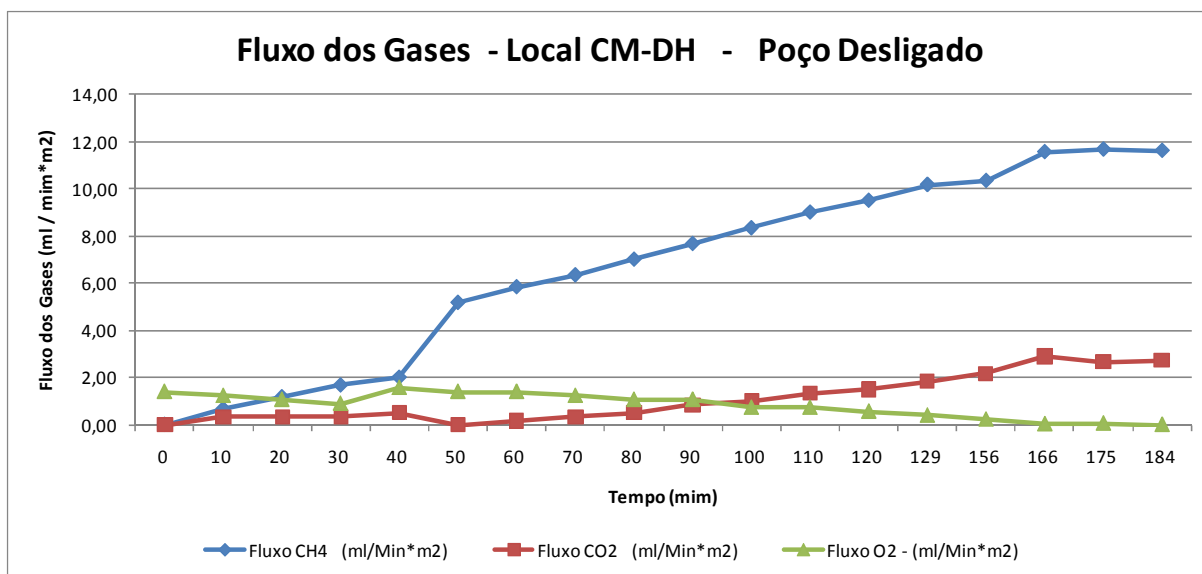
A seqüência de medição 2, foi realizada em 17 de setembro e esta representada na figura 55, no Local CM-DH, mas com o poço horizontal de captação de biogás desligado. Nesta situação o dióxido de carbono apresentou um pequeno

crescimento, variando de 26% a 28%, o oxigênio uma pequena queda de 2,1% a 0,8%. A composição do metano apresentou a maior variação entre o início com 25% e o término das medições próximo 32%.



**Figura 55** – Resultados das medições de emissões fugitivas no Local CM-DH e poço horizontal de extração de biogás desligado.

Os respectivos fluxos destes gases foram calculados e apresentados figura 56. Devido o baixo valor de crescimento na composição do dióxido de carbono e pequena queda na composição do oxigênio, refletiram nos cálculos de fluxo destes gases pela camada de cobertura, apresentaram valores proporcionais com pequenas variações. Já o fluxo de gas metano calculado foi crescente durante toda a seqüência de medições realizadas, com valores estabilizados em 180 minutos de medição e valores 11,6 ml/min\*m<sup>2</sup>.



**Figura 56** – Medições de fluxo de gases no local 3 e poço horizontal de extração de biogás desligado

#### 5.4.3 Medições na camada monolítica em Talude (Local CM-TAL)

Conforme indicado na figura 20 o Local CM-Tal está localizado em uma berma frontal do sub-aterro 1, entre um poço perfurado de drenagem de gás e bombeamento de lixiviado e um poço Ranzine (PDR) modificado para extração do biogás.

Esta área foi estrategicamente selecionada com o intuito de verificar as emissões fugitivas em locais que são propensos a ter emissões, como bermas e taludes, na área de pirâmide (bolo de noiva) do sub-aterro 1.

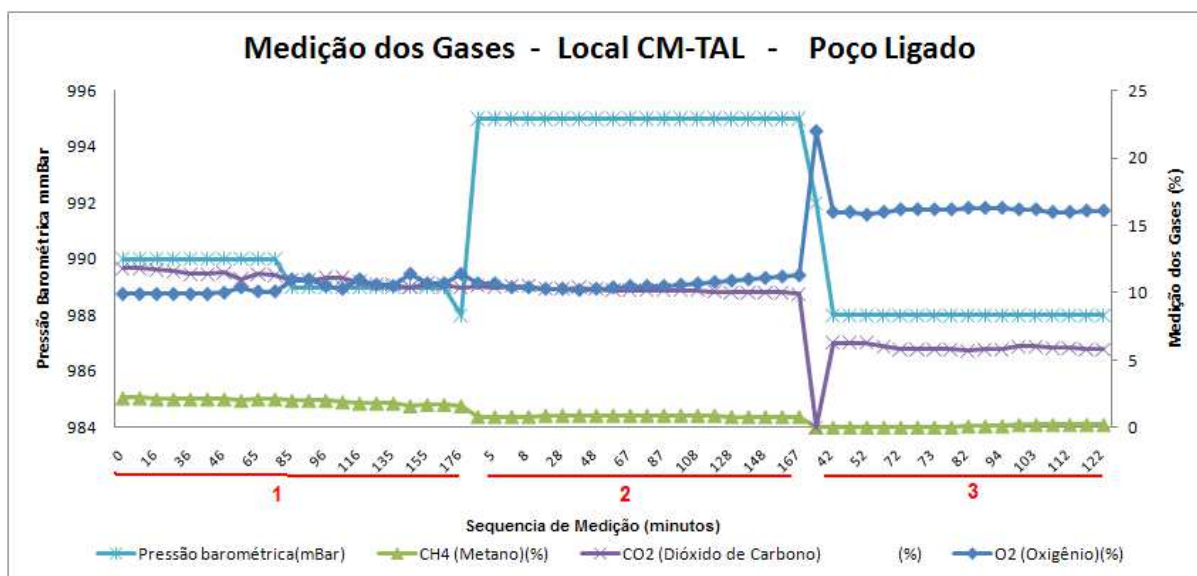
Neste local foram realizadas 3 seqüências de medição nas seguintes datas:

- Seqüência 1 – Medição realizada em 07 de Outubro;
- Seqüência 2 – Medição realizada em 21 de Outubro;
- Seqüência 3 – Medição realizada em 18 de Novembro.

Na figura 57, a seqüência 1, 2 e 3 ilustram a montagem da placa de fluxo sobre a camada de cobertura, com o poço de biogás de extração ativa e também o PDR ligados.



Não é identificada nenhuma relação entre a influencia da pressão atmosférica com as medições em todas as seqüências.

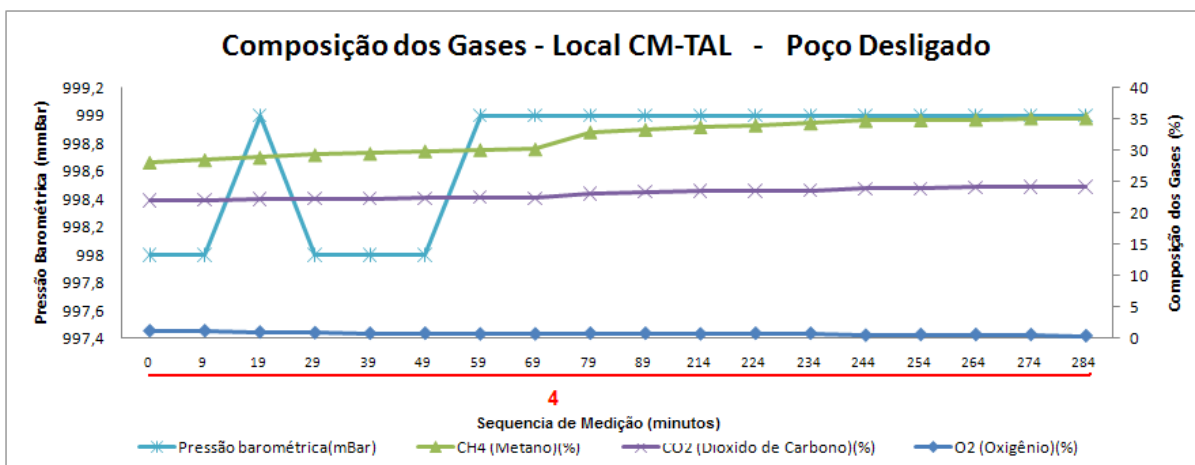


**Figura 57** – Resultados das medições de emissões fugitivas no Local CM-TAL e poço de extração de biogás ligado.

Nota-se que não ocorre qualquer modificação significativa das composições dos gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{O}_2$ ) quando se compara as seqüências 1, 2 e 3.

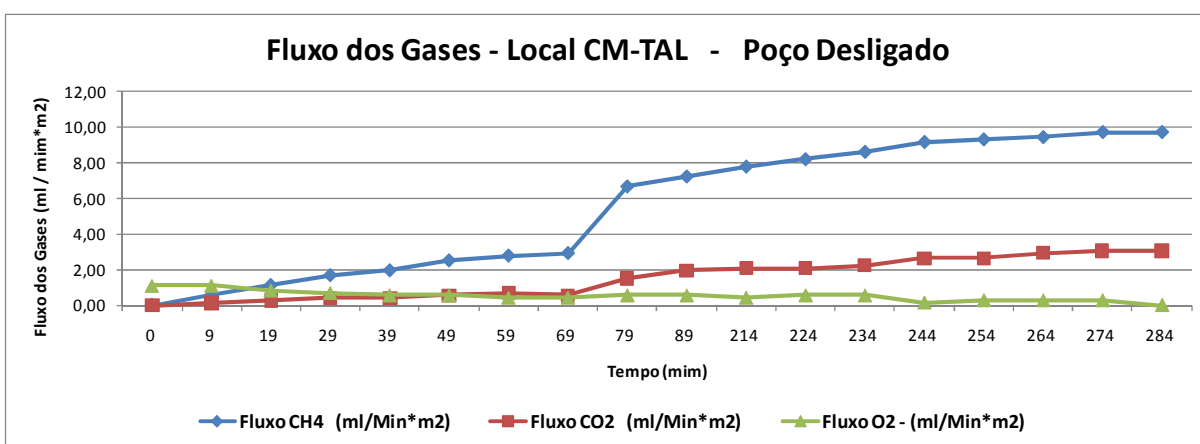
A seqüência 4 foi realizada em 11 de Novembro e foi representada pela figura 58, que apresenta as medições das concentrações dos gases considerando que os poços de extração estavam desligados.

Depois de passados 284 minutos a composição do gás metano, na seqüência 4, foi estabilizada com concentrações de 35%, a composição do dióxido de carbono foi estabilizada em 25% e as concentrações de oxigênio foram estabilizadas com valores de 0%. Novamente não foi possível estabelecer qualquer relação com as variações ocorridas com a pressão atmosférica e as medições de emissões fugitivas,



**Figura 58** – Resultados das medições de emissões fugitivas no Local CM-TAL e poço de extração de biogás desligado.

A figura 59 representa o fluxo de gases pela camada de cobertura nas medições da seqüência 4. Os valores do fluxo de Metano começaram somente a se estabilizar após mais de 250 minutos e com valores próximos a 10 ml/min\*m2, e fluxo de dióxido de carbono de 3 ml/min\*m2.



**Figura 59** – Medições de fluxo de gases no local 4 e poço de extração de biogás desligado

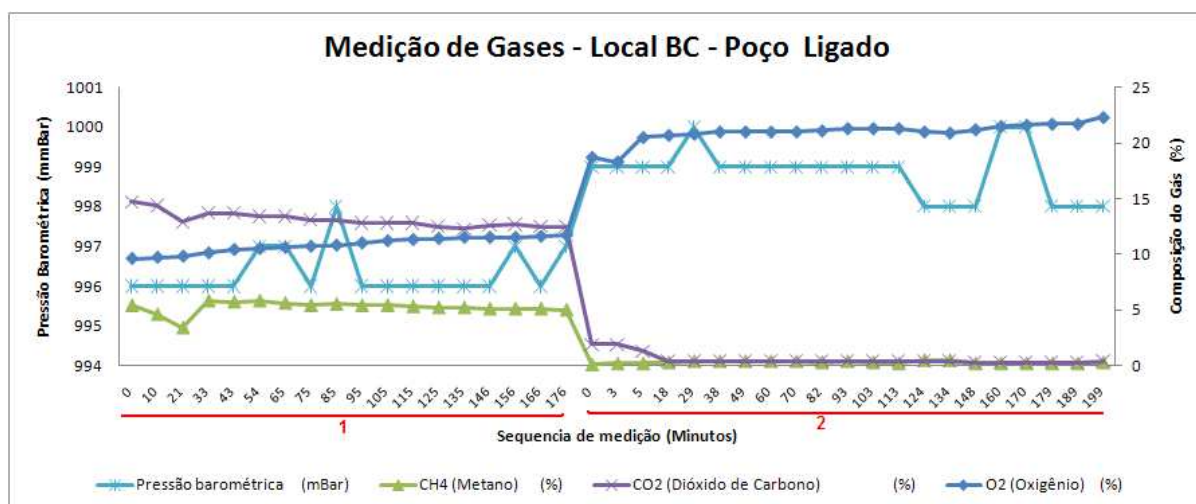
#### 5.4.4 Medições na Barreira Capilar

As medições das emissões fugitivas de biogás, na barreira capilar, estão apresentadas na figura 60, que apresenta 2 seqüências de medições realizadas nas seguintes datas:

- Seqüência 1 – Medição realizada em 07 de Julho;
- Seqüência 2 – Medição realizada em 22 de Agosto;

As seqüências 1 e 2 representam a montagem da placa de fluxo sobre a camada de cobertura, com o poço de biogás de extração ativa ligado, sendo que este poço esta localizado nas proximidades do Local BC. Também não é identificada nenhuma relação entre a influencia da pressão atmosférica com as medições das seqüências 1 e 2.

As diferenças nas composições dos gases CO<sub>2</sub> (cerca de 13%), CH<sub>4</sub> (cerca de 5%) e O<sub>2</sub> (de 12% para 22%) entre as seqüências 1 e a seqüência 2, ocorreram devido a um fator externo, pois o poço de biogás de extração ativa, durante as medições na seqüência 1 apresentava um elevado nível de percolado no seu interior.



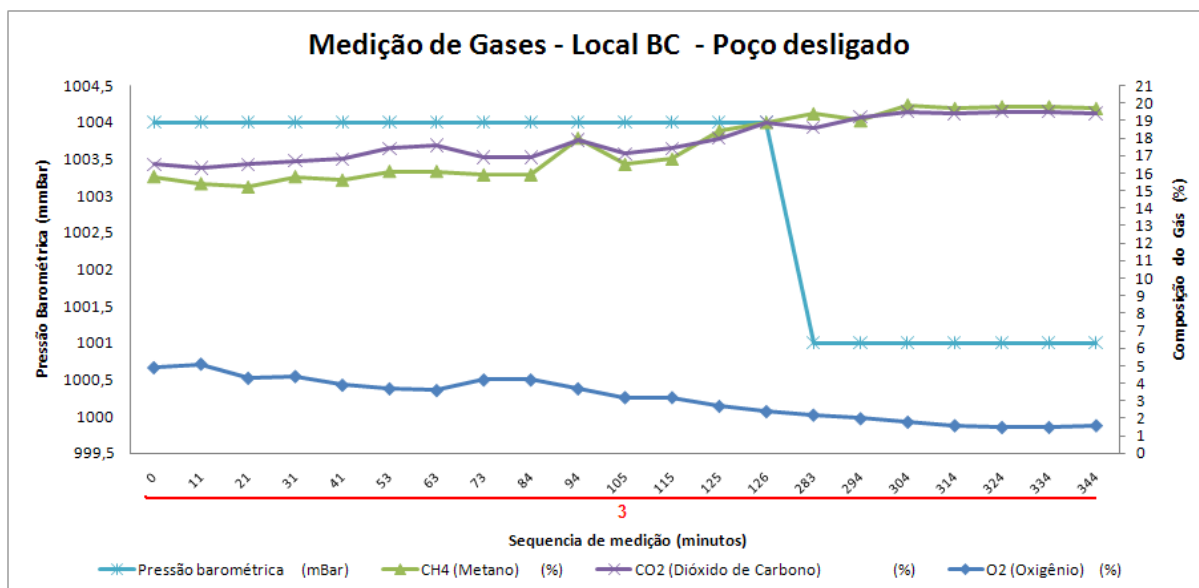
**Figura 60** – Resultados das medições de emissões fugitivas na barreira Capilar e poço de extração de biogás ligado.

Após a instalação e operação do sistema de bombeamento de lixiviado dentro do poço de biogás, conforme a Figura 18, promoveu o rebaixamento do nível piezométrico dentro do poço e a partir desta situação, foram realizadas as medições

da seqüência 2. Constatase então a inexistência de gases: tanto o CO<sub>2</sub> quanto o CH<sub>4</sub>, indicando que houve o poço ativo de captação atingiu a eficiência desejada.

A seqüência 3 foi realizada em 13 de julho. A figura 61, apresenta as medições das concentrações dos gases com o poço de extração ativa de biogás desligado.

A composição do gás metano e do dióxido de carbono, foram estabilizadas entre 19% e 20%. Isso indica uma interferência que está relacionada a dois fatores: Durante o período de medição da seqüência 3 foi observada uma queda na pressão atmosférica de 3 mmBar, porém nenhuma relação pode ser observada com as emissões de gases pela camada de cobertura da barreira capilar.

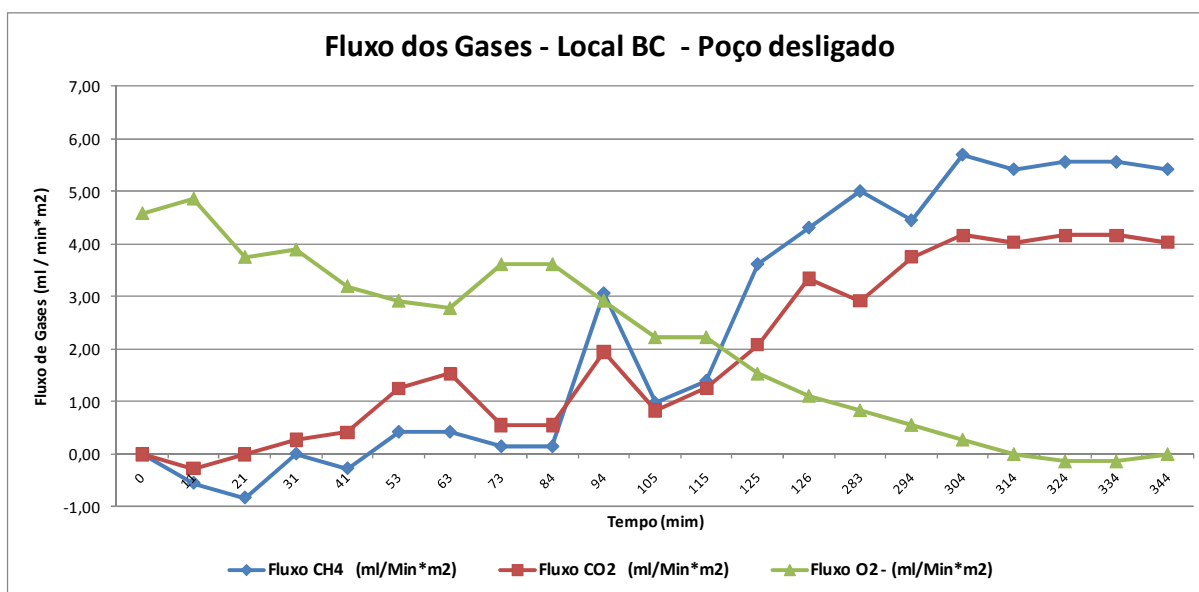


**Figura 61** – Resultados das medições de emissões fugitivas na barreira capilar e poço de extração de biogás desligado.

Adicionalmente na medição de gases pela cobertura da Barreira Capilar, foi possível registrar as menores diferenças de valores (cerca de 5%) entre o início e término das medições de CO<sub>2</sub> quanto o CH<sub>4</sub>.

Também é importante observar que após o bombeamento do lixiviado no poço de extração do biogás, a emissão de metano na camada de cobertura (superfície) é inexistente. Com isso conclui-se que o sistema de extração do biogás nesta área está captando todo o gás gerado no interior na massa de resíduos.

A figura 62 indica os valores calculados para os fluxos de gases pela camada de cobertura da barreira capilar, e tomando os dados apresentados na seqüência 3, anteriormente descrita. A concentração do gas metano ficou estabilizada 5,5 ml/Min\*m2, o dióxido de carbono em 4,1ml/Min\*m2 e o oxigênio em 0,0 ml/Min\*m2.

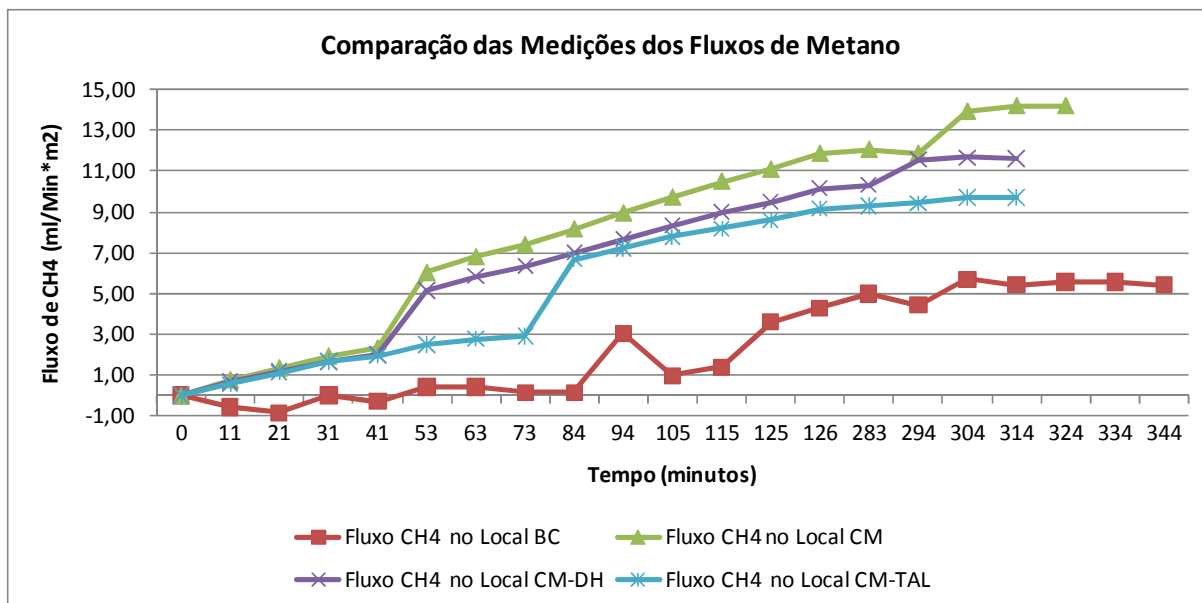


**Figura 62** – Medições de fluxo de gases na barreira capilar e poço de extração de biogás desligado

#### 5.4.5 Comparação nas Medições dos fluxos de Metano

Como informado anteriormente, foram realizadas as medições de emissões fugitivas em 4 locais distintos e com condições diferentes. Desta forma foi constatado que quando os poços de extração ativa do biogás estavam ligados e conectados a rede de extração, praticamente não foram encontradas emissões de metano pelas camadas de cobertura.

Assim, somente foi possível realizar os cálculos dos fluxos das emissões fugitivas de gases pelas camadas de cobertura quando os poços de extração ativa do biogás se encontravam desligados, permitindo que houvesse pequenas passagens e fluxos de gases pela camada de cobertura, conforme indicado na figura 63.



**Figura 63** – Comparação nas Medições dos fluxos de Metano

O menor fluxo das emissões de metano encontradas neste experimento foi localizado na Barreira Capilar com valores próximos a 5 ml/min\*m<sup>2</sup>, enquanto que as outras medidas do fluxo de metano encontrados nos outros pontos da Camada Monolítica foram significativamente maiores, na ordem de aproximadamente 3 vezes.

O Local CM-TAL apresentou valor de fluxo de metano de 10 ml/min\*m<sup>2</sup>, o Local CM-DH apresentou valores de 12 ml/min\*m<sup>2</sup> e o Local CM apresentou o maior valor de fluxo de metano com 14 ml/min\*m<sup>2</sup>.

Para estimar o valor médio de emissão de metano pela camada monolítica do sub-aterro 1, basta fazer um simples cálculo da média entre os valores encontrados para o Local CM, Local CM-DH e Local CM-TAL. O resultado para este cálculo médio é de apenas 12 ml/min\*m<sup>2</sup> de fluxo de metano pelas camadas monolíticas estudadas.

Considerando que o sub-aterro 1 tem área total de 120.000 m<sup>2</sup> de resíduos dispostos e cobertos com solo, ou seja, cobertos com a camada monolítica estudada. Pode então extrapolar este valor para toda a área do sub-aterro 1, obtendo o valor de 86,4 m<sup>3</sup>/hora de fluxo de metano pela cobertura do aterro.

O Valor de 86,4 m<sup>3</sup>/hora de fluxo de metano pela cobertura do aterro é extremamente baixo se comparado com a real produção de gás do sub-aterro 1 que se encontrava em aproximadamente 800 m<sup>3</sup>/hora durante o período do experimento.

Esta divergência possivelmente está associada as áreas de influencia de captação dos poços e também ao espaçamento usado entre poços ativos de captação, pois somente foram desligados os poços ativos de captação, num raio de 25 metros em torno do local onde foram realizadas as medições das emissões fugitivas, ocasionando assim, a interferência direta nas medições das emissões fugitivas do experimento.

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1 Conclusões

1. Na camada monolítica o sensor mais próximo da superfície sugere uma relação mais direta com a intensidade da pluviometria e da evapotranspiração. Enquanto o sensor mais profundo (70 centímetros), na interface solo com os resíduos, e o intermediário (40 centímetros) apresentaram pouca variação na pesquisa, indicando o crescimento nos valores de umidade somente com a intensificação das chuvas.
2. Durante as medições realizadas de julho até novembro de 2010, indiferente ao local de instalação, houve significativa variação nas medições de temperatura nos 3 sensores, que podem ser relacionadas com a temperatura ambiente. Indicando que a temperatura ambiente exerce influencia direta nos resíduos dispostos em até 1,5 metros de profundidade.
3. Na barreira capilar é indicado a existência de um gradiente de umidade, entre os sensores instalados em maior profundidade e o superficial com o sensor intermediário até o mês de agosto. O gradiente gerado neste período sugere que a barreira capilar estava ativa até a intensificação do regime de chuvas ocorrida em setembro, onde os sensores indicaram uma possível saturação da barreira capilar.
4. Tomando como base o item 2, onde a fica demonstrada que a barreira capilar estava em funcionamento até agosto, apresentando um resultado satisfatório de retenção, porém não foi possível identificar quantitativamente qual foi a eficiência de retenção de barreira Capilar.
5. A placa de fluxo usada nesta dissertação mostrou-se um instrumento útil e eficiente para medir quantidade e qualidades de gás das emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura em aterros.



6. A Placa de fluxo pode ser usada como instrumento de acompanhamento nos projetos de extração ativa de gás, de forma a indicar locais com maior emissão fugitiva de gases e propiciar eventuais correções no projeto, como instalações de novos poços, rebaixamento do nível piezométrico de poços de gás, espaçamento ideal para poços de gás.
7. Provou-se a eficiência do sistema ativo de extração de gás para impedir as emissões de gases fugitivos pela camada de cobertura do aterro da CTR Nova Iguaçu. A análise de resultados mostrou a inexistência praticamente de emissões fugitivas de metano quando os poços de biogás estavam ligados.
8. Foi somente possível identificar as emissões fugitivas dos gases quando os poços ativos de extração estavam desligados. Estas emissões fugitivas apresentaram valores baixos e estão relacionados ao espaçamento dos poços ativos de captação que foram desligados em um raio de 25 metros das áreas onde foram realizadas as medições de emissões fugitivas.
9. O dreno horizontal de extração do biogás demonstrou a mesma eficiência dos poços verticais de extração do biogás.
10. O rebaixamento do nível piezométrico, dentro dos poços ativos de extração de biogás, melhora a eficiência de captação na região do entorno do poço de extração de biogás que teve o chorume bombeado.
11. As emissões fugitivas de gases que foram calculados para o sub-aterro 1 da CTR Nova Iguaçu representam cerca de 10% do volume de gás captado.
12. As medições das emissões fugitivas e de fluxo de metano na camada de cobertura da barreira capilar, apresentaram os menores valores, indicando que a camada capilar funcionou como camada de distribuição de gás evitando picos de emissão ou “hotspots” e caminhos preferenciais, reduzindo a quantidade de gás que foi percolada pela camada de cobertura.

## 6.2 Sugestões para pesquisas futuras

1. Realizar medições de umidade e temperatura nas mesmas condições propostas deste trabalho, porém em meses diferentes e que apresentem historicamente maior incidência de chuvas.
2. Realizar novas medições de umidade com a instalação de um modelo de barreira que tenha inclinação de fundo e também entre as camadas, de forma a garantir o escoamento de líquidos percolados dentro do bloco capilar.
3. Realizar novas medições de emissões fugitivas, fluxo de percolados pela cobertura, umidade e temperatura em outros tipos de barreiras capilares de forma a comprovar a eficiência retenção de líquidos percolados e também de gases.
4. Aumentar o raio de desligamento dos poços ativos de captação do biogás para realização das medições de emissões fugitivas
5. Realizar os mesmos ensaios deste trabalho nos outros sub-aterros da CTR Nova Iguaçu e também em diferentes épocas do ano, para desta forma ter uma boa representatividade, estudar com mais dados a influência que tem os fatores climatológicos na emissão de gases.

## REFERÊNCIAS

Andrade, M.C.J. (2001), Estudo experimental da permeabilidade a água e ao ar de um solo utilizado na camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos urbanos de Recife – PE, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, Brasil.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 6459: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. NBR 7182: Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986.

American Society for Testing and Materials. ASTM – D 5298 – 03: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. 2003.

AUGENSTEIN, D.; PACEY, J. Modelling landfill methane generation. Proceedings of the Third International Landfill Symposium, Sardenha, Italia, v. 1, p115-148, 1991.

BAHR, T.; FRICKE, K; HILLEBRECHT, K.; KOLSH, F.; REINHARD, B. Clean Development Mechanism – Tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões. 2006.

BANCO MUNDIAL, Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe, 2003. Disponível em: <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/Archivos/Brasil/handbook.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2010, 14:30.

BAHR, T.; FRICKE, K; HILLEBRECHT, K.; KOLSH, F.; REINHARD, B. Clean Development Mechanism – Tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões. 2006.

BENVENUTO, C; CIPRIANO, M, A. Modelo reológico de comportamento de resíduos e aterros sanitário, segundo critérios de projeto e operação atuais no Brasil, 2009.

BIDONE, R., A., POVINELLI, J., Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos. São Carlos, EESC/USP, 1999.

BORBA, S. M. P., Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso. Dissertação de M. Sc, Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil; COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

BORTOLAZZO, W., M. Estimativa da Produção de Percolados no Aterro Sanitário de Nova Iguaçu com a Aplicação de Modelos Computacionais. Dissertação de M. Sc, Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

BRITO FILHO, L.F. Estudo de gases em aterros. Casos: Nova Iguaçu e Terra Brava. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE; Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

CAMPBELL, D. (1989)- Landfill gas migration, effects and control, Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact. Academic Press.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Rio de Janeiro: ABES / RiMa, 294 p., 2003.

CARVALHO, A. R., Desenvolvimento de um Equipamento para Determinação de Parâmetros Geotécnicos de Resíduos Sólidos. Tese de D. Sc, Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006,

CETESB; Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; Resíduos Sólidos Industriais, 2º Edição, São Paulo, 1999.

COSSU, R. Engineering of Landfill Barrier Systems. In: Landfilling of Waste: Barriers, ed. Christensen, Cossu & Stegmann, 2004.

COSSU, R.; MUNTONI, A.; CHIARANTINI, L.; MASSACCI, G.; SERRA, P.; SCOLLETTA, A.; STERZI, G. Biogas emission measurements using static and dynamic flux, v. 4, p 103-114, 1997.

CHRISTOPHERSEN, M.; KJELDSEN, P.; HOLST, H.; CHANTON, J. Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation. Waste Management & Research. nº 19. p 595-612, 2001a.

CZEPIEL, P.M.; MOSHER, B.; HARRISS, R.C. Quantifying the effect of oxidation on landfill methane emissions. Journal of Geophysical Research, v. 101, No D11, p 711-719, 1996.

DECAGON DEVICES , Inc – ProCheck Operator's Manual, Version 5, 2007.

ENGECORPS- Engecorps Corpo de Engenheiros Consultores Ltda – Projeto e Memorial da Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu, 2002.

FELIPETTO, A. V. M., Avaliação de Concessionária de Tratamento de Resíduos com Opções Reais. Dissertação de Mestrado, IBMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

FERREIRA, M. A. S., Aplicação de Modelos de Avaliação Qualitativa e Quantitativa dos Percolados Gerados em um Aterro Sanitário. Dissertação de M. Sc, Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.

FERNANDES, J., G.; Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental. Dissertação de Mestrado, Programa de Pósgraduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, 2009.

GUEDES, V., P.; Estudo do Fluxo de Gases através do solo de Cobertura ee Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos; Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

GOUVELLO, C; Estudo de baixo carbono para o Brasil, Banco Mundial, ESMAP, Brasília, DF, Brasil, 2010.

HUMER, M.; LECHNER, P. Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills. *Waste Management & Research*, v.17, p 443-452, 1999.

HUBER-HUMER, M.; RODER, S.; LECHNER, S.; Approaches to assess biocover performance on landfills; *Institute of Waste Management*; v.29, p 2092-2104, 2009.

IGNATIUS, S.G. Fluxo unidirecional de gás através de um solo compactado - Determinação laboratorial de parâmetros. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 337p, 1999.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Good Practice Guidance Management in National Greenhouse Gas Inventories, 2000.

IZZO, R. L. S.; Comportamento dos resíduos inertizados em Barreira Capilar Dissertação de D.Sc, Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

IPT/CEMPRE (2000)- Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado, 2ª edição.

LANDTEC, Inc – Gem 2000 Analisador de gás e monitor de extração - Manual de Operação, 2005

LOPES, R. L; Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos; Dissertação de mestrado; Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2011.

LOPES, R. L.; ALVES, M.C.M; MACIEL, F.J; JUCÁ, J.F.T; Avaliação de infiltração em coberturas alternativas construídas em uma célula experimental de RSU na Muribeca/PE; COBRAMSEG, 2010.

MACIEL, F. J., Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE. Dissertação de M. Sc, Programa de Engenharia Civil/Centro de Tecnologia e Geociências/UFPE, Recife-PE, Brasil, 2003.

MACIEL, F. J. Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos. Tese de Doutorado. , Programa de Engenharia Civil/Centro de Tecnologia e Geociências/UFPE; Recife-PE, Brasil, 2009.

MONTEIRO, V. E. D. Análises físicas, químicas e biológicas no Estudo do comportamento do aterro sanitário da Muribeca. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil/Centro de Tecnologia e Geociência; Universidade Federal de Pernambuco. 2003.

PEREIRA NETTO, A. D.; SISINNO, C. L. S.; MOREIRA, J. C. & ARBILLA, G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in leachate from a municipal solid waste dump of Niterói city, RJ, Brazil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 68:148-154, 2002.

PIRES, J.A.C., 2007. Estudo de barreira de proteção com solo compactado em célula experimental no Aterro Sanitário de Rio das Ostras (RJ). Dissertação de Mestrado. Programa de pos-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. UERJ. Rio de Janeiro, Brasil.

REINHART, D.R., COOPER D.C. Flux chamber design and operation for the measurement of municipal solid waste landfill gas emission rates. *Air Waste Management Association*. p.1067-1070.1992.

RESOL, Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos; Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

SIMÕES, G.F. Avaliação do desempenho de barreiras evapotranspirativas utilizadas em camadas de cobertura final de aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos. Relatório Técnico Final de Projeto de Pesquisa, FAPEMIG, Processo EDT 2158/03. 54p, 2007.

SCS ENGINEERS – Projeto e Melhorias no Sistema de captação do Biogás da CTR Nova Iguaçu, (2008).

SWANA (Solid Waste Association of North America); Manual de Gás de Aterros 2010.

TAYLOR, D. (1948)- *Fundamentals of Soil Mechanics*, New York, ed. John Wiley & Sons.

TARAZONA, C.F. Estimativa de Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos, Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S., 1993. *Integrated Solid Waste Management – Engineering Principles and Management Issues*. IRWIN/McGRAWHILL, USA.

TRÉGOURÉS, A.; BENEITO, A; BERNE, P.; GONZE, M.A.; SABROUX, J.C.; SAVANNE, D.; POKRYSZKA, Z.; TAUZIÉDE, C.; CELLIER, P.; LAVILLE, P.; MILWARD, R.; ARNAUD, A.;LEVY, F.; BURKHALTER, R. Comparison of seven methods for measuring methane flux at a municipal solid waste landfill site. *Waste Management & Research*. nº 17. p 453-458, 1999.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). *Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills – Background Information for Proposed Standards and Guidelines*. Emission Standards Division. 1991.

VEREDA – Vereda projetos ambientais, Estudo de Impactos ambientais da Central de tratamento de Resíduos Nova Iguaçu, 2001.

VIEIRA, A. M. Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduo. Tese de Doutorado. Escola Politécnica – USP, 287 p., 2005.