



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Ciência e Tecnologia

Faculdade de Engenharia

Thyago Trocilo Araujo

**Estudo Experimental de Emissões Fugitivas de Biogás em Camadas de
Cobertura de uma Célula de Aterro Sanitário**

Rio de Janeiro

2016

Thyago Trocilo Araujo

**Estudo Experimental de Emissões Fugitivas de Biogás em Camadas de Cobertura de
uma Célula de Aterro Sanitário**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elisabeth Ritter

Rio de Janeiro

2016

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

A658 Araújo, Thyago Trocilo.

Estudo experimental de emissões fugitivas de biogás em camadas de cobertura de uma célula de aterro sanitário / Thyago Trocilo Araújo. – 2016.

149f.

Orientador: Elisabeth Ritter.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Aterro sanitário - Dissertações. 3. Biogás - Dissertações. 4. Resíduos sólidos - 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.

Assinatura

Data

Thyago Trocilo Araujo

**Estudo Experimental de Emissões Fugitivas de Biogás em Camadas de Cobertura de
uma Célula de Aterro Sanitário**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovado em 15 de abril de 2016.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Elisabeth Ritter (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof^a. Dr^a. Maria Cristina Moreira Alves
Escola Politécnica - UFRJ

Prof^a. Dr^a. Ana Ghislane Henrique Pereira Van Elk
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família por todo o apoio nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por se fazer presente em todos os momentos da minha vida!

Aos meus pais, Paulo Araujo e Eliane Trocilo, pelo amor e dedicação extrema. Vocês sempre me proporcionaram tudo para chegasse até aqui. Assim sendo, compartilho esta vitória com vocês. Muito Obrigado!

À minha namorada Susane Rayanne por toda a ajuda e compreensão nos momentos difíceis pelos quais passei. Devo a realização deste trabalho ao seu apoio quando eu mais precisei. O sonho foi possível, se tornou realidade!

Não poderia deixar de agradecer a minha avó Clodia Trocilo que sempre me deu bons conselhos para superar os desafios impostos.

À Elisabeth Ritter, orientadora amiga, cuja presença segura e estimulante favoreceu meu desenvolvimento intelectual e a elaboração deste trabalho.

Aos amigos acadêmicos que me acompanharam nesta jornada. Agradeço em especial a Priscila Borba e Gilberto Oliveira pelos auxílios que me deram na construção deste trabalho.

À empresa Ciclus Ambiental pela permissão quanto ao acesso à área de pesquisa e pelo apoio operacional quando solicitado.

Ao meu amado irmão, que soube compreender minha ausência no preparo dos churrascos de fim de semana.

Por fim, agradeço a FAPERJ e ao CNPq pelo apoio financeiro ao projeto.

RESUMO

ARAÚJO, T. T. *Estudo experimental de emissões fugitivas de biogás em camadas de cobertura de uma célula de aterro sanitário*. 2016. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

A disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários geram subprodutos através de processos de biodegradação aeróbia e anaeróbia em forma de líquidos e gases, que precisam ser monitorados, tratados e/ou aproveitados. Os gases oriundos da biodegradação dos resíduos nos aterros sanitários são compostos basicamente por metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂), que provocam um sério problema de poluição atmosférica a níveis local e global. Os projetos de aterros sanitários contemplam sistema de captação de biogás para a geração de energia. Nesse contexto, empregam-se os sistemas de cobertura que possuem dentre os seus objetivos, a retenção das emissões fugitivas de biogás para a atmosfera. A pesquisa foi realizada na fase de operação do aterro sanitário de Seropédica no Rio de Janeiro, e tem por objetivo comparar as emissões fugitivas de CH₄ e CO₂ em três sistemas de cobertura construídos em célula experimental: convencional, barreira capilar e evapotranspirativa. As investigações de campo consistiram em ensaios de placa de fluxo para mensurar a composição do biogás e o fluxo pelas camadas de cobertura. Os ensaios foram realizados no período de agosto de 2014 a fevereiro de 2016. Os resultados indicaram que as emissões de biogás na camada convencional variaram de 7,5 a 389,0 g/m².dia para o CH₄ e de 29,0 a 843,4 g/m².dia para o CO₂. Na camada de barreira capilar, as emissões de CH₄ variaram de 7,2 a 369,2 g/m².dia e as emissões de CO₂ variaram de 37,4 a 961,3 g/m².dia. A camada evapotranspirativa proporcionou o melhor desempenho em relação às demais camadas de cobertura, apresentando variação de 5,0 a 68,9 g/m².dia para as emissões de CH₄ e de 36,5 a 207,6 g/m².dia para as emissões de CO₂. A vegetação neste tipo de cobertura mostrou-se um fator decisivo para a proteção da camada, reduzindo as emissões de biogás para a atmosfera.

Palavras-chave: Aterro sanitário; Camadas de cobertura; Camada evapotranspirativa; Barreira capilar; Fluxo de gás.

ABSTRACT

ARAÚJO, T. T. *Experimental study of biogas fugitive emissions cover layers of a landfill cell*. 2016. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

The disposal of solid waste in landfills generates by-products through aerobic and anaerobic biodegradation processes in the form of liquids and gases, which need to be monitored, processed and/or used. The gases from the waste biodegradation in landfills are composed primarily of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂), which causes a serious problem of local air pollution and global levels. Landfills projects include biogas collection system for power generation. In this context, are employed in the roofing systems that have among its objectives, the retention of biogas fugitive emissions to the atmosphere. The survey was conducted in the operation phase of the landfill Seropédica in Rio de Janeiro, and aims to compare the fugitive emissions of CH₄ and CO₂ in three roofing systems built on experimental cell: conventional, capillary barrier and evapotranspiration. The field investigations consisted of the flow plate assays to measure biogas composition and flow through the layers of coverage. The tests were performed from August 2014 to February 2016. The results indicated that in conventional biogas emission layer ranged from 7,5 to 389,0 g/m².day for CH₄ and 29,0 to 843,4 g/m².day for CO₂. In capillary barrier layer, CH₄ emissions vary from 7,2 to 369,2 g/m².day and CO₂ emissions ranged from 37,4 to 961,3 g/m².day. In evapotranspiration layer provided the best performance in relation to other layers of coverage, with varying from 5,0 to 68,9 g/m².day for CH₄ and 36,5 to 207,6 g/m².day to CO₂ emissions. The vegetation in this type of coverage proved to be a decisive factor for the protection layer by reducing emissions of biogas to the atmosphere.

Keywords: Landfill; Cover layers; Evapotranspiration layer; Capillary barrier; Gas flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Destinação final dos RSU no Brasil em 2013 e 2014 (t/dia).....	22
Figura 2 – Fases de geração de gases em aterros sanitários.....	26
Figura 3 – Fluxograma com os principais fatores que afetam a geração do biogás.....	30
Figura 4 – Ilustração dos ensaios de placas de fluxo estática e dinâmica.....	36
Figura 5 – Principais grupos de fatores que influenciam nas emissões de biogás.....	43
Figura 6 – Esquema de sistema de cobertura convencional.....	47
Figura 7 – Esquema de sistemas de cobertura barreira capilar simples e dupla.....	51
Figura 8 – Esquema de sistema de cobertura evapotranspirativa.....	53
Figura 9 – Efeito da umidade do solo na oxidação do CH_4	55
Figura 10 – Visão geral da CTR Seropédica.....	58
Figura 11 – Localização do sub-aterro 01 destacando a localização do experimento.....	59
Figura 12 – Bacia Hidrográfica do rio Guandu, com destaque para o Aquífero Piranema.....	60
Figura 13 – Distância entre o CTR Seropédica e a estação meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.....	61
Figura 14 – Temperatura média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.....	63
Figura 15 – Temperatura Máxima média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.....	63
Figura 16 – Temperatura Mínima média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.....	64
Figura 17 – Umidade Relativa média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.....	64
Figura 18 – Pressão Atmosférica média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.....	65
Figura 19 – Velocidade do Vento média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.....	65
Figura 20 – Radiação Global média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.....	66

Figura 21 – Precipitação mensal de janeiro de 2012 a abril de 2016 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.....	66
Figura 22 – Localização dos poços de captação de biogás passivos (vermelho) e ativos (verde) no sub-aterro 01 da CTR Seropédica.....	67
Figura 23 – Esquema (sem escala) da disposição das quatro células experimentais.....	68
Figura 24 – Esquema do perfil das camadas de cobertura do experimento.....	69
Figura 25 – Curvas granulométricas dos solos “A” e “B” empregado nas camadas de cobertura das células experimentais.....	72
Figura 26 – Resultados dos ensaios de compactação do solo “A” empregado nas camadas de cobertura das células experimentais C, BC e ET.....	73
Figura 27 – Resultados do ensaio de compactação do solo “B” empregado na camada de cobertura da célula experimental C’.....	73
Figura 28 – Placa de Fluxo de 0,16 m ² de área e 8,3 L de volume.....	78
Figura 29 – Placa de fluxo de 1 m ² de área e 50,0 L de volume.....	78
Figura 30 – Detector portátil Dräger X-am 7000.....	79
Figura 31 – Manômetro digital portátil Dwyer.....	80
Figura 32 – Termômetro digital portátil modelo APPA Mt-455.....	81
Figura 33 – Barômetro digital portátil Lufft.....	82
Figura 34 – Exemplos de imperfeições nas camadas de cobertura.....	83
Figura 35 – Etapas da instalação da placa de fluxo e dos equipamentos de leitura nos ensaios.....	84
Figura 36 – Concentrações de CH ₄ nos ensaios com a placa menor (0,16 m ² de área e 8,3 L de volume).....	90
Figura 37 – Concentrações de CO ₂ nos ensaios com a placa menor (0,16 m ² de área e 8,3 L de volume).....	91
Figura 38 – Concentrações de O ₂ nos ensaios com a placa menor (0,16 m ² de área e 8,3 L de volume).....	91
Figura 39 – Concentrações de CH ₄ nos ensaios com a placa maior (1 m ² de área e 50,0 L de volume) nas camadas convencionais.....	92
Figura 40 – Concentrações de CO ₂ nos ensaios com a placa maior (1 m ² de área e 50,0 L de volume) nas camadas convencionais.....	92
Figura 41 – Concentrações de O ₂ nos ensaios com a placa maior (1 m ² de área e 50,0 L de volume) nas camadas convencionais.....	93

Figura 42 – Concentrações de CH ₄ nos ensaios com a placa maior (1 m ² de área e 50,0 L de volume) na camada barreira capilar.....	93
Figura 43 – Concentrações de CO ₂ nos ensaios com a placa maior (1 m ² de área e 50,0 L de volume) na camada barreira capilar.....	94
Figura 44 – Concentrações de O ₂ nos ensaios com a placa maior (1 m ² de área e 50,0 L de volume) na camada barreira capilar.....	94
Figura 45 – Concentrações de CH ₄ nos ensaios com a placa maior (1 m ² de área e 50,0 L de volume) na camada evapotranspirativa.....	95
Figura 46 – Concentrações de CO ₂ nos ensaios com a placa maior (1 m ² de área e 50,0 L de volume) na camada evapotranspirativa.....	95
Figura 47 – Concentrações de O ₂ nos ensaios com a placa maior (1 m ² de área e 50,0 L de volume) na camada evapotranspirativa.....	96
Figura 48 – Fluxo de CH ₄ na camada de cobertura do tipo convencional com solo “A” em (g/m ² .dia).....	98
Figura 49 – Fluxo de CO ₂ na camada de cobertura do tipo convencional com solo “A” em (g/m ² .dia).....	99
Figura 50 – Característica física do solo “A” nos ensaios C2 e C4.....	100
Figura 51 – Característica física do solo “A” no ensaio C3.....	100
Figura 52 – Fluxo de CH ₄ na camada de cobertura do tipo convencional com solo “B” em (g/m ² .dia).....	101
Figura 53 – Fluxo de CO ₂ na camada de cobertura do tipo convencional com solo “B” em (g/m ² .dia).....	102
Figura 54 – Característica física do solo “B” nos ensaios C’2 e C’3.....	103
Figura 55 – Característica física do solo “B” no ensaio C’4.....	103
Figura 56 – Fluxo de CH ₄ na camada de cobertura do tipo barreira capilar em (g/m ² .dia).....	106
Figura 57 – Fluxo de CO ₂ na camada de cobertura do tipo barreira capilar em (g/m ² .dia).....	106
Figura 58 – Característica física do solo nos ensaios BC2 e BC4.....	107
Figura 59 – Característica física do solo no ensaio BC5, BC6 e BC7.....	108
Figura 60 – Fluxo de CH ₄ na camada de cobertura do tipo evapotranspirativa em (g/m ² .dia).....	110

Figura 61 – Fluxo de CO ₂ na camada de cobertura do tipo evapotranspirativa em (g/m ² .dia).....	110
Figura 62 – Característica física da grama nos ensaios ET2 e ET6.....	111
Figura 63 – Situação da camada de cobertura evapotranspirativa em diferentes períodos.....	112
Figura 64 – Estrutura do solo sob as raízes da camada evapotranspirativa.....	113
Figura 65 – Emissões de CH ₄ por tipo de camada de cobertura em (g/m ² .dia).....	115
Figura 66 – Emissões de CO ₂ por tipo de camada de cobertura em (g/m ² .dia).....	115
Figura 67 – Fluxos de CH ₄ nos ensaios que continham fissuras em (g/m ² .dia).....	116
Figura 68 – Fluxos de CO ₂ nos ensaios que continham fissuras em (g/m ² .dia).....	117
Figura 69 – Fluxos de CH ₄ nos ensaios que não continham fissuras em (g/m ² .dia).....	118
Figura 70 – Fluxos de CO ₂ nos ensaios que não continham fissuras em (g/m ² .dia).....	118
Figura 71 – Fluxo de CH ₄ nos ensaios realizados no dia 13/11/2014 em (g/m ² .dia).....	120
Figura 72 – Fluxo de CH ₄ nos ensaios realizados no dia 16/12/2014 em (g/m ² .dia).....	121
Figura 73 – Variação da umidade do solo a 0,20 m de profundidade nas camadas de cobertura C, ET e BC.....	123
Figura 74 – Variação da umidade do solo a 0,40 m de profundidade nas camadas de cobertura C, ET e BC.....	123
Figura 75 – Variação da umidade volumétrica nas camadas de cobertura estudadas, a 0,20 m de profundidade, no período 10/01/2015 a 10/02/2015.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Geração de resíduos sólidos por regiões do Brasil nos anos de 2013 e 2014.....	20
Tabela 2 –	Quantidade de resíduos sólidos urbanos coletados por regiões do Brasil...	20
Tabela 3 –	Índice de Abrangência da Coleta de RSU por regiões do Brasil.....	21
Tabela 4 –	Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil em 2008.....	21
Tabela 5 –	Série histórica da composição gravimétrica de resíduos sólidos do Município do Rio de Janeiro.....	24
Tabela 6 –	Intervalo de duração das fases na decomposição de resíduos.....	27
Tabela 7 –	Composição básica do biogás gerado em aterro sanitário.....	28
Tabela 8 –	Princípios básicos dos métodos das avaliações das emissões de gases.....	33
Tabela 9 –	Características físicas das placas de fluxo utilizadas em diversas pesquisas.....	37
Tabela 10 –	Emissões de CH_4 reportados nas literaturas em camadas de cobertura.....	39
Tabela 11 –	Principais parâmetros geotécnicos e os possíveis efeitos nas emissões do biogás.....	44
Tabela 12 –	Taxas de oxidação na camada de cobertura.....	54
Tabela 13 –	Caracterização do solo “A” empregado nas camadas de cobertura das células experimentais C, BC e ET.....	70
Tabela 14 –	Caracterização do solo “B” empregado na camada de cobertura da célula experimental C’.....	71
Tabela 15 –	Resultados do ensaio de massa específica (<i>in situ</i> e laboratório) e grau de compactação do solo nas camadas C, C’, BC e ET.....	74
Tabela 16 –	Dados do detector de gases utilizados nos ensaios de campo.....	79
Tabela 17 –	Quantitativo de ensaios de placa de fluxo.....	85
Tabela 18 –	Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de placa de fluxo nas camadas de cobertura.....	89
Tabela 19 –	Resultados dos fluxos de CH_4 e CO_2 na camada de cobertura convencional com solo “A”.....	98

Tabela 20 – Resultados dos fluxos de CH ₄ e CO ₂ na camada de cobertura convencional com solo “B”.....	101
Tabela 21 – Resultados dos fluxos de CH ₄ e CO ₂ na camada de cobertura barreira capilar.....	105
Tabela 22 – Resultados dos fluxos de CH ₄ e CO ₂ na camada de cobertura evapotranspirativa.....	109
Tabela 23 – Resumo das emissões de CH ₄ e CO ₂ com a caracterização dos pontos em relação à existência de fissuras.....	114
Tabela 24 – Estatística descritiva das emissões de biogás nos pontos com e sem fissuras.....	120
Tabela 25 – Emissões de biogás e umidade do solo nas camadas de cobertura.....	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CH ₄	Metano
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO ₂	Dióxido de Carbono
COMLURB	Companhia de Limpeza Urbana
CTR	Central de Tratamento de Resíduos
GEE	Gases de efeito estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
O ₂	Oxigênio
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solo

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO.....	16
1.	REVISÃO DA LITERATURA.....	19
1.1.	Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.....	19
1.1.1.	<u>Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos no Município do Rio de Janeiro.....</u>	23
1.2.	Microbiologia de Decomposição dos Resíduos Sólidos.....	25
1.3.	Geração de Biogás em Aterros Sanitários.....	27
1.3.1.	<u>Fatores que Afetam a Geração do Biogás nos Aterros Sanitários.....</u>	29
1.4.	Estimativas de Emissões de Gases “<i>in situ</i>”	32
1.4.1.	<u>Métodos para Medição de Gases.....</u>	33
1.4.2.	<u>Placas de Fluxo.....</u>	35
1.4.3.	<u>Infravermelho.....</u>	40
1.4.4.	<u>Método Micro Meteorológico.....</u>	41
1.4.5.	<u>Método de Traçadores.....</u>	41
1.5.	Fatores de Influenciam as Emissões de Biogás.....	42
1.6.	Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários.....	45
1.6.1.	<u>Coberturas Convencionais.....</u>	47
1.6.2.	<u>Coberturas Alternativas.....</u>	49
1.6.2.1.	<u>Barreiras Capilares.....</u>	50
1.6.2.2.	<u>Coberturas Evapotranspirativas.....</u>	52
1.7.	Oxidação de CH₄ em Camadas de Cobertura.....	53
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	56
2.1.	Introdução.....	56
2.2.	Descrição do Aterro Sanitário – CTR Seropédica.....	57
2.3.	Descrição do Local de Estudo.....	58
2.3.1.	<u>Fatores Físicos e Climatológicos.....</u>	59
2.3.2.	<u>Sistema de Extração de Biogás.....</u>	67
2.4.	Descrição do Experimento de Campo.....	68
2.4.1.	<u>Caracterização Geotécnica dos Solos Empregados nas Camadas de Cobertura.....</u>	70
2.4.2.	<u>Parâmetros Hidráulicos dos Solos Empregados nas Camadas de Cobertura.....</u>	75
2.5.	Investigações de Campo.....	76

2.5.1.	<u>Equipamentos Utilizados nas Investigações de Campo</u>	76
2.5.1.1.	<u>Placas de Fluxo</u>	77
2.5.1.2.	<u>Detector de Gases</u>	78
2.5.1.3.	<u>Manômetro</u>	80
2.5.1.4.	<u>Termômetro</u>	80
2.5.1.5.	<u>Barômetro</u>	81
2.6.	Metodologia – Placa de Fluxo	82
2.7.	Medição do Fluxo de Biogás	86
3.	RESULTADOS	87
3.1.	Ensaio de Placa de Fluxo	88
3.2.	Emissões de Biogás	97
3.2.1.	<u>Emissões de Biogás nas Camadas Convencionais</u>	97
3.2.2.	<u>Emissões de Biogás na Camada Barreira Capilar</u>	105
3.2.3.	<u>Emissões de Biogás na Camada Evapotranspirativa</u>	109
3.2.4.	<u>Análise Comparativa das Emissões de Biogás</u>	113
3.2.5.	<u>Influência da Umidade dos Solos nas Emissões de Biogás</u>	122
	CONCLUSÃO	127
	Sugestões	128
	REFERÊNCIAS	129
	APÊNDICE	135

INTRODUÇÃO

Acreditava-se no passado que a natureza teria a capacidade de suporte para absorver qualquer quantidade de resíduos antropogênicos sem causar incômodo às comunidades geradoras. A disposição dos resíduos sólidos urbanos ou industriais em vazadouros foi uma prática realizada por séculos. A partir de condições insalubres causadas à sociedade pelos depósitos irregulares, iniciou-se a prática de disposição em aterros sanitários.

A Norma Brasileira Técnica – NBR 8.419 de 1984 (ABNT, 1984) define aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos como uma obra de engenharia, onde a disposição final no solo não cause danos à saúde pública, minimizando assim seus impactos ambientais. Desta forma, é fundamental que haja um monitoramento ambiental e geotécnico durante a sua implantação, operação e encerramento.

Segundo Tchobanoglous et al. (1993), os resíduos sólidos urbanos quando lançados nos aterros sanitários, aterros controlados e lixões, geram subprodutos através de processos de biodegradação aeróbia e anaeróbia em forma de líquidos e gases, que precisam ser monitorados e tratados e/ou aproveitados. Devido às características físico-químicas e microbiológicas, o lixiviado tem alto poder poluidor, e o biogás que é classificado como gás de efeito estufa (GEE), contribui para o aquecimento global.

Em dezembro 2015, foi assinado o Acordo de Paris no âmbito da Convenção – Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, visando à adoção de uma economia de baixo carbono até o fim deste século. Dentre os objetivos da convenção, está o de promover o baixo desenvolvimento de emissões de gases de efeito estufa. Neste acordo, o Brasil se compromete a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025.

Os gases oriundos da biodegradação dos resíduos sólidos nos aterros sanitários são compostos basicamente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). A emissão descontrolada do biogás é um sério problema de poluição atmosférica a níveis local e global que necessita ser mitigado. Para Maciel (2003) os efeitos desta geração e liberação dos gases localmente variam do simples mau odor até possíveis doenças para a comunidade do entorno ao aterro.

No Brasil, a maioria dos aterros possui cobertura com camada homogênea de solo compactado, em grande parte usando solos argilosos. Essas camadas tem a função de minimizar a infiltração de água de chuva e impedir a passagem dos gases gerados para a atmosfera, já que é o elo existente entre o ambiente interno dos resíduos e a atmosfera.

Alternativas de utilização do biogás são ainda incipientes no Brasil. A queima do gás metano em aterros contribui para a mitigação do aquecimento global, mas o gás pode ser reaproveitado como fonte de energia elétrica. Portanto, a diminuição das emissões fugitivas deste biogás deve ser evitada na camada de cobertura do aterro sanitário.

Cada material ou sistema de cobertura está associado a problemas potenciais, vantagens e desvantagens, portanto, cada aterro sanitário terá a sua particularidade na escolha da camada de cobertura de modo que atendam de forma eficiente as funções requeridas para os quais foi proposto.

Para Maciel (2003), o desempenho das camadas de cobertura, com relação aos objetivos a que se propõe, pode variar ao longo do tempo, devido a fatores que estão intimamente ligados às características do solo tais como estrutura, índice de vazios, grau de compactação e umidade de compactação, e também das variações climáticas, precipitação e pressão atmosférica.

A justificativa da pesquisa vem da necessidade do controle das emissões de biogás, reduzindo assim a possibilidade de instabilidade dos aterros, minimizando a migração de gases para outras regiões circunvizinhas e emissões atmosféricas, além de contribuir na matriz energética dos aterros sanitários. Em aterros de grande porte, em função de questões operacionais, muitas vezes as camadas intermediárias ficam expostas por 2 ou 3 anos até receberem os resíduos novamente. Estas camadas não tem o controle de execução de uma camada final, portanto, medir as emissões nestas camadas tem relevância.

Nesse contexto, é de fundamental importância o estudo de camadas de cobertura de resíduos sólidos que apresentem características que promovam a retenção do biogás, reduzindo assim as emissões para a atmosfera, principalmente nos casos onde a exploração do biogás não seja técnica e economicamente viáveis.

A pesquisa tem como objetivo geral avaliar as emissões de biogás, enfocando o metano, em camadas de cobertura do tipo convencional, barreira capilar e evapotranspirativa, implantadas em células experimentais no aterro sanitário de Seropédica – RJ. Os objetivos

específicos foram identificar as emissões fugitivas de gás metano através das camadas de cobertura por meio de ensaios de placa de fluxo; e determinar experimentalmente o fluxo de gases através das três camadas de cobertura por meio de ensaios de campo (placa de fluxo).

Este trabalho encontra-se organizado em quatro capítulos. O capítulo 1 apresenta a revisão da literatura, onde são abordados aspectos relacionados com a geração do biogás e os tipos de camadas de cobertura normalmente utilizados em aterros sanitários. No capítulo 2 são apresentadas a metodologia, com a descrição do aterro sanitário, da área de estudo, dos equipamentos utilizados nos ensaios de campo e a metodologia de placa de fluxo. O capítulo 3 apresenta os resultados obtidos nos ensaios e suas respectivas discussões. Posteriormente, são apresentadas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras. Por fim, seguem-se as referências bibliográficas utilizadas ao longo do desenvolvimento do trabalho e o apêndice.

1. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados tópicos de interesse à questão do desempenho das camadas de cobertura em aterros sanitários. Introduziu-se inicialmente um panorama dos resíduos sólidos urbanos no Brasil e mais especificamente no Estado do Rio de Janeiro. Foram abordados conceitos relevantes ao entendimento da emissão fugitiva de gás, cuja ocorrência se relaciona diretamente com um dos objetivos das camadas de cobertura, sendo mencionados também os tipos de cobertura mais utilizados e alguns trabalhos presentes na literatura que abordam sobre o tema.

1.1. Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

A ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais) publicou para o ano de 2014 o panorama dos resíduos sólidos no Brasil, onde conclui que foram gerados 78.583.405 toneladas de resíduos sólidos urbanos no Brasil no ano de 2014, tendo uma geração per capita de 387,63 kg/hab./ano. Já a coleta foi de 71.260.045 toneladas no ano. A comparação entre a quantidade de RSU gerada e a coletada em 2014 mostra que o país contou com um índice de cobertura de coleta de 90,6%, levando à constatação de que pouco mais de 7 milhões de toneladas deixaram de ser coletadas no país neste ano e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio (ABRELPE, 2014; IBGE, 2010). A Tabela 1 mostra os índices de geração de resíduos para cada região do país para os anos de 2013 e 2014.

Tabela 1 – Geração de resíduos sólidos por regiões do Brasil nos anos de 2013 e 2014.

Regiões	2013	População Urbana (hab.)	2014
	RSU Gerado (t/dia) / Índice (Kg/hab./dia)		RSU Gerado (t/dia) / Índice (Kg/hab./dia)
Norte	15.169 / 0,892	17.261.983	15.413 / 0,893
Nordeste	53.465 / 0,958	56.186.190	55.177 / 0,982
Centro-Oeste	16.636 / 1,110	15.219.608	16.948 / 1,114
Sudeste	102.088 / 1,209	85.115.623	105.431 / 1,239
Sul	21.922 / 0,761	29.016.114	22.328 / 0,770
BRASIL	209.280 / 1,041	202.799.518	215.297 / 1,062

Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2014, p. 41.

Com relação aos resíduos sólidos urbanos coletados, a Tabela 2 mostra que em 2014 houve um acréscimo na quantidade de resíduos coletados em comparação ao ano de 2013. Na Tabela 3 pode-se visualizar que a região Sudeste continua respondendo por mais de 50% dos RSU coletados e apresenta maior percentual de cobertura dos serviços de coleta no país.

Tabela 2 – Quantidade de resíduos sólidos urbanos coletados por regiões do Brasil.

Regiões	2013	2014
	RSU Total (t/dia)	RSU Total (t/dia)
Norte	12.178	12.458
Nordeste	41.820	43.330
Centro-Oeste	15.480	15.826
Sudeste	99.119	102.572
Sul	20.622	21.047
Brasil	189.219	195.233

Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2014, p. 39.

Tabela 3 – Índice de Abrangência da Coleta de RSU por regiões do Brasil.

Regiões	Índice de Abrangência da Coleta de RSU (%)
Norte	80,83
Nordeste	78,53
Centro-Oeste	93,38
Sudeste	97,29
Sul	94,26
Brasil	90,68

Fonte: Adaptado de ABRELPE, 2014.

Quanto à composição gravimétrica dos resíduos sólidos, a Tabela 4 apresenta quantitativamente a estimativa de participação por tipos de resíduos coletados no Brasil em 2008, mencionados no Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2011.

Tabela 4 – Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos no Brasil em 2008.

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
Material reciclável	31,9	58.527,40
<i>Metais</i>	2,9	5.293,50
<i>Aço</i>	2,3	4.213,70
<i>Alumínio</i>	0,6	1.079,90
<i>Papel, papelão e tetrapak</i>	13,1	23.997,40
<i>Plástico total</i>	13,5	24.847,90
<i>Plástico filme</i>	8,9	16.399,60
<i>Plástico rígido</i>	4,6	8.448,30
<i>Vidro</i>	2,4	4.388,60
Matéria orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
Total	100,0	183.481,50

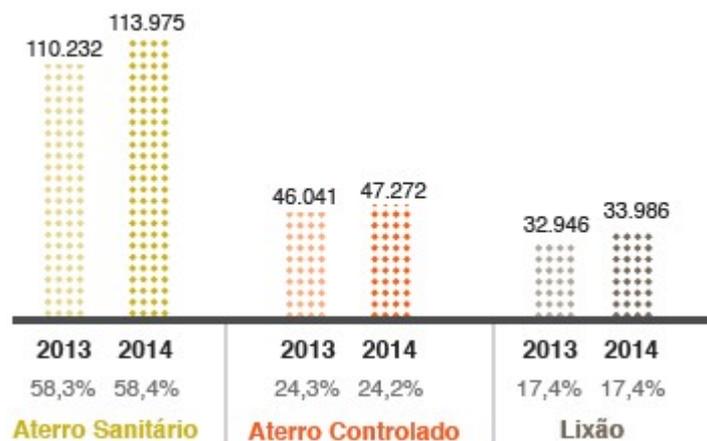
Fonte: Adaptado do PNRS, 2011, p. 9.

As formas mais usuais de disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil são os lixões (ou vazadouros) a céu aberto, os aterros controlados e os aterros sanitários. Cada uma

dessas disposições possui particularidades, porém, em termos de preservação e proteção do meio ambiente, a disposição em aterros sanitários apresenta-se como a melhor alternativa, entre as citadas, haja vista que leva em consideração critérios de engenharia e proteção do meio ambiente e saúde para implantação, operação e manutenção do sistema.

A disposição final de RSU no Brasil encontra-se em um período de transição e adequação à Lei Federal 12.305/2010, que determinou a erradicação da disposição de resíduos em vazadouros até o final do ano de 2014. De acordo com a ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), a Figura 1 mostra os percentuais da utilização das três modalidades de destinação final de RSU praticadas em diversos municípios do Brasil.

Figura 1 – Destinação final dos RSU no Brasil em 2013 e 2014 (t/dia).



Fonte: ABRELPE, 2014, p. 43.

A análise da Figura 1 mostra que a maior massa de resíduos sólidos coletada no país corresponde à alternativa ambientalmente adequada, onde os resíduos são dispostos em aterros sanitários. Conclui-se que a situação da destinação final dos RSU no Brasil em 2014 manteve-se estável em relação a 2013.

Vale ressaltar que os dados apresentados na Figura 1 não retrata a verdadeira situação das cidades brasileiras, haja vista que as maiores gerações de resíduos estão concentradas nas metrópoles, as quais geralmente dispõem os resíduos sólidos coletados em aterros sanitários. Os municípios de pequeno porte, com até 50.000 habitantes (IBGE, 2010), que são maioria no Brasil, normalmente fazem uso dos aterros controlados e/ou lixões.

1.1.1. Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos no Município do Rio de Janeiro

Dados da COMLURB (2014) mostram que diariamente na cidade do Rio de Janeiro, são coletadas cerca de 10.000 toneladas de resíduos sólidos produzidos por toda a cidade.

A nova Central de Tratamento de Resíduos CTR-Rio, em Seropédica, inaugurada em 19 de abril de 2011, implantada em uma área de 220 hectares, passou a receber gradativamente os resíduos gerados na cidade do Rio de Janeiro, viabilizando o processo de desativação do Aterro Metropolitano de Jardim Gramacho-AMJG, em Duque de Caxias. No decorrer de 2011, a quantidade de resíduos inicialmente vazados, da ordem de 1.000 t/dia, passou a 5.500 toneladas diárias no final deste mesmo ano (PMGIRS, 2012).

De acordo com a COMLURB (2014), ao se analisar a série histórica da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares no município do Rio de Janeiro, percebe-se que a matéria orgânica e os resíduos recicláveis representam mais que 90% do total do resíduo domiciliar. O restante é representado pelos rejeitos, que correspondem por 7,7%.

A Tabela 5 mostra a série histórica da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares no município do Rio de Janeiro.

Tabela 5 – Série histórica da composição gravimétrica de resíduos sólidos do Município do Rio de Janeiro.

Série Histórica do Município do Rio de Janeiro - % em Peso																			
Ano	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Componentes	(%)																		
Recicláveis	44,07	43,23	45,43	47,39	43,26	43,96	41,10	40,14	32,85	33,74	33,84	36,27	39,71	40,97	39,94	40,99	39,98	41,92	41,74
Papel – papelão	22,26	21,08	22,22	21,85	19,77	18,71	18,78	16,06	12,48	13,51	14,83	14,61	16,05	16,08	16,46	16,84	15,99	17,54	15,62
Plástico	15,09	16,11	16,78	19,90	17,61	19,77	17,61	19,17	15,44	15,34	14,69	17,17	19,19	20,31	19,11	19,29	19,14	16,01	21,01
Vidro	3,63	3,22	3,68	3,48	3,22	3,52	2,74	2,99	3,23	3,24	2,71	2,90	2,88	2,84	2,96	3,19	3,28	6,68	3,46
Metal	3,09	2,82	2,75	2,16	2,66	1,96	1,97	1,92	1,70	1,65	1,61	1,59	1,59	1,74	1,40	1,68	1,57	1,70	1,65
Matéria orgânica	48,80	49,09	48,51	50,05	51,27	51,65	55,96	53,05	59,72	60,74	61,35	58,13	55,65	53,63	55,02	52,68	53,28	51,99	52,00
Rejeitos	7,13	7,68	6,08	2,56	5,47	4,39	2,94	6,82	7,42	5,52	4,82	5,61	4,65	5,40	5,04	6,33	6,75	6,09	6,26
Inerte total	0,97	1,53	0,89	0,63	0,94	0,72	0,35	1,46	1,37	0,86	0,75	0,73	0,89	1,09	1,03	1,39	1,81	1,08	1,12
Folha	2,46	3,04	1,97	0,72	1,91	1,50	0,60	2,34	2,12	1,06	1,30	1,75	0,92	1,26	1,06	1,12	1,35	1,21	1,00
Madeira	0,53	0,76	0,68	0,18	0,44	0,44	0,38	0,66	0,66	0,34	0,33	0,38	0,28	0,34	0,36	0,37	0,34	0,53	0,42
Borracha	0,18	0,24	0,33	0,11	0,30	0,29	0,18	0,25	0,22	0,24	0,32	0,21	0,23	0,23	0,21	0,29	0,22	0,31	0,23
Pano – trapo	2,50	1,71	1,90	0,79	1,61	1,28	1,21	1,83	1,51	1,58	1,61	1,75	1,59	1,75	1,57	2,09	1,75	1,89	2,00
Couro	0,16	0,27	0,21	0,10	0,18	0,10	0,15	0,26	0,27	0,22	0,07	0,21	0,24	0,18	0,14	0,21	0,21	0,23	0,43
Osso	0,33	0,13	0,08	0,03	0,09	0,06	0,07	0,01	0,00	0,04	0,02	0,00	0,01	0,01	0,06	0,02	0,01	0,00	0,02
Coco	...	...	...	...	...	...	...	...	1,27	1,17	0,41	0,58	0,33	0,40	0,40	0,60	0,82	0,52	0,65
Vela/Parafina	...	...	...	...	...	...	...	...	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,05	0,03	0,04
Eletro/Eletrônico	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0,13	0,13	0,20	0,23	0,20	0,29	0,35

Fonte: Adaptado de COMLURB, 2014.

Conforme mostrado na Tabela 5, a parcela correspondente a geração de matéria orgânica nos anos analisados encontra-se na faixa de 48% a 62% aproximadamente, sendo o ano de 2006 aquele que apresentou maior percentual gerado, com um valor de 61,35%.

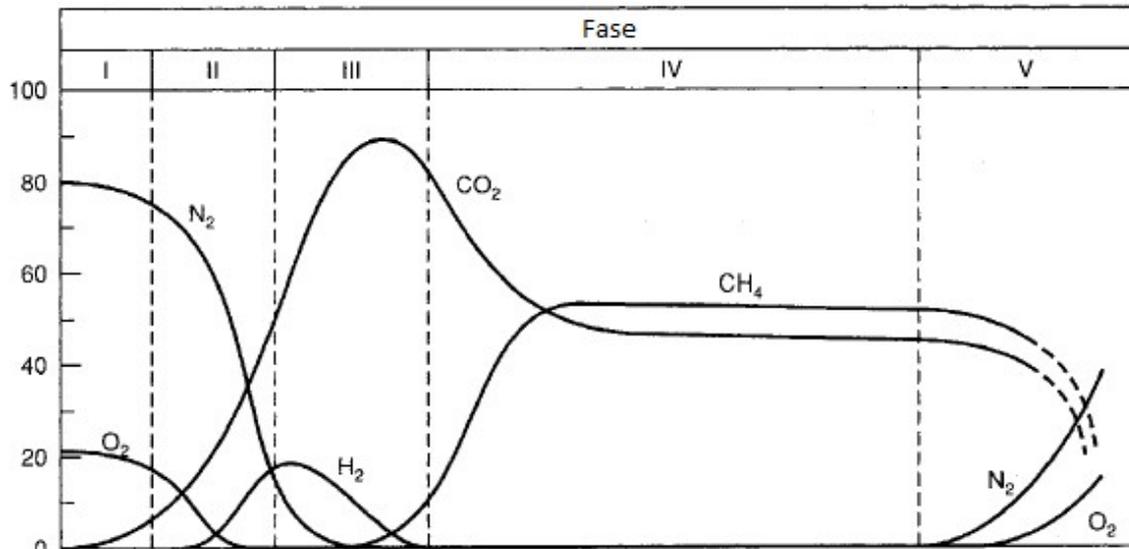
Os resíduos recicláveis representam outra parcela considerável do total de resíduos gerados. O resíduo de plástico teve um aumento do consumo, visto que no ano de 1996 apresentava um percentual de 15,09% e em 2014 passou para 21,01%, porcentagem esta que foi a maior no período. O papel-papelão apresentou uma redução, uma vez que em 1996 representava 22,26% e em 2014 passou a representar 15,62% do montante. Houve uma inversão do tipo de material que mais contribui para a formação dos recicláveis. No final dos anos da década de 1990, o principal reciclável gerado era o papel-papelão e, a partir dos anos da década de 2000, mais especificamente em 2003, passou a ser o plástico. A matéria orgânica, plástico e papel-papelão totalizaram 88,63% do volume total gerado no ano de 2014.

1.2. Microbiologia de Decomposição dos Resíduos Sólidos

Os resíduos sólidos urbanos constituem um rico ecossistema em que as interações de vários microrganismos degradam polímeros complexos (celulose, proteínas, lipídios e carboidratos) em compostos mais simples com grande geração de biogás e lixiviado. Dentre os diversos grupos de microrganismos existentes na massa de resíduo, aqueles que auxiliam a degradação dos resíduos são predominantemente as bactérias e os fungos e protozoários em menor escala. As bactérias presentes no lixo podem ser aeróbias, anaeróbias e facultativas a depender da fase de decomposição dos resíduos e das condições de oxigenação do meio.

A decomposição dos resíduos é um dos mais importantes fatores que influenciam a geração de biogás e lixiviado em aterros sanitários. Segundo Tchobanoglous et al.(1993), o processo de biodegradação dos resíduos passa por cinco fases até a bioestabilização, conforme ilustrado na Figura 2.

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



Fonte: TCHOBANOGLOUS et al. 1993, p. 680.

São as seguintes as fases da biodegradação:

Fase I – Fase aeróbia: Há o ajustamento inicial onde ocorre a predominância de fungos e bactérias, dada a presença de oxigênio difundido no meio da massa sólida. O oxigênio oxida os materiais orgânicos a CO_2 e água, com a liberação de calor.

O processo de decomposição aeróbio geralmente inicia-se durante a disposição do resíduo e estende-se até um curto período de tempo após o recobrimento do resíduo pela camada de cobertura e a temperatura interna pode atingir entre $70^{\circ}C$ e $80^{\circ}C$, visto que as reações são exotérmicas (BAIRD & CANN, 2011).

Fase II – Fase de transição: Temos o oxigênio se esgotando onde começa a desenvolver as condições anaeróbias.

Fase III – Fase ácida: A atividade microbiana iniciada na Fase II é acelerada com um aumento significativo na produção de dióxido de carbono e hidrogênio pelos microrganismos facultativos. A glicose da primeira fase é metabolizada por esse grupo. Há formação de ácidos com consequente diminuição do pH.

Fase IV – Fase da fermentação do metano: É caracterizada pela primeira evidência da produção de metano. Nesta fase outro grupo de microrganismos capazes de transformar ácido acético e gás hidrogênio em metano e gás carbônico se torna mais predominantes. Em alguns casos, esses microrganismos podem se desenvolver ainda no final da fase ácida. A degradação

é feita em ambiente exclusivamente anaeróbio e aos microrganismos chama-se de metanogênicos.

Fase V – Fase de maturação: Consiste na etapa final de decomposição, onde a maior parcela da massa de resíduo foi convertida em metano e gás carbônico. A umidade que percola pela massa de resíduo contribui para que regiões que não haviam sido degradadas passem a ser. Portanto, a taxa de degradação persiste nesta etapa, porém em quantidades reduzidas pela escassez de nutrientes. O lixiviado contém ácido húmico que dificulta o processo de degradação biológica.

A duração de cada uma das etapas citadas irá variar de acordo com a distribuição da matéria orgânica, da disponibilidade de nutrientes, do teor de umidade dos resíduos e do grau de compactação inicial (AUGENSTEIN & PACEY, 1991). A duração de cada etapa de decomposição está descrita na Tabela 6.

Tabela 6 – Intervalo de duração das fases na decomposição de resíduos.

Fases	Intervalo de duração das fases
I	Algumas horas a 1 (uma) semana
II	1 (um) mês a 6 (seis) meses
III	3 (três) meses a 3 (três) anos
IV	8 (oito) anos a 40 (quarenta) anos
V	1 (um) ano a mais de 40 (quarenta) anos

Fonte: Adaptado de AUGENSTEIN & PACEY (1991).

1.3. Geração de Biogás em Aterros Sanitários

A quantidade total de gases gerada em aterros é produzida distintamente ao longo do tempo de acordo com as fases de decomposição dos resíduos e os inúmeros fatores intervenientes no processo de degradação (ALVES, 2008).

Os aterros sanitários podem ser considerados grandes reatores bioquímicos, tendo como principais matérias prima os resíduos sólidos e a água, e como produtos o lixiviado e diversos gases (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

Os gases gerados nos aterros sanitários são compostos essencialmente de metano e gás carbônico. As atividades relacionadas aos resíduos sólidos e esgoto, correspondem por até 3%

das emissões de metano emitidos para a atmosfera. Desta parcela, os aterros sanitários contribuem com até 60% de tais emissões atmosféricas (IPCC, 2014). Já Alcântara (2007), reporta que as emissões de metano provenientes de aterros sanitários correspondem à cerca de 10% do total de emissões de origem antrópica.

De acordo com Huber-Humer e Lechner (1999), a maior parte dos resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários consiste de carbono orgânico, que é parcialmente degradável resultando em emissões de gases de efeito estufa como o metano e o dióxido de carbono. Aproximadamente, 40 a 60 milhões de toneladas de metano são anualmente gerados por aterros sanitários (HUBER-HUMER et al., 2009). A Tabela 7 apresenta os valores típicos da composição dos gases gerados em aterros sanitários.

Tabela 7 – Composição básica do biogás gerado em aterro sanitário.

Componente	Concentração média (%)
Metano (CH_4)	45 – 60
Dióxido de carbono (CO_2)	40 – 60
Nitrogênio (N_2)	2 – 5
Oxigênio (O_2)	0,1 – 0,1
Amônia (NH_3)	0 – 0,1
Compostos sulfúricos (H_2S)	0,1 – 0,1
Hidrogênio (H_2)	0 – 0,2
Monóxido de carbono (CO)	0 – 0,2
Outros gases traços	0,01 – 0,6

Fonte: TCHOBANOGLIOUS et al., (1993).

A Tabela 7 permite verificar que o gás metano e o gás carbônico são predominantes no processo de decomposição dos resíduos sob condições anaeróbias.

O biogás é classificado como Gás do Efeito Estufa (GEE) e sua emissão vem aumentando significativamente, principalmente pelas atividades humanas no setor industrial, na produção e consumo de energia, transportes e geração de eletricidade (OLIVEIRA, 2013). O aumento da concentração de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, metano e, em menor escala, o óxido nitroso (N_2O) e os halocarbonos (HFC) provocam a retenção de calor na atmosfera, impedindo que a radiação solar próxima a superfície terrestre seja liberada de volta ao espaço (BAIRD & CANN, 2011). O metano possui uma ação 21 vezes maior do que o dióxido de carbono em relação à retenção do calor responsável pelo aquecimento estimado do planeta ao longo de 100 anos (IPCC, 2007).

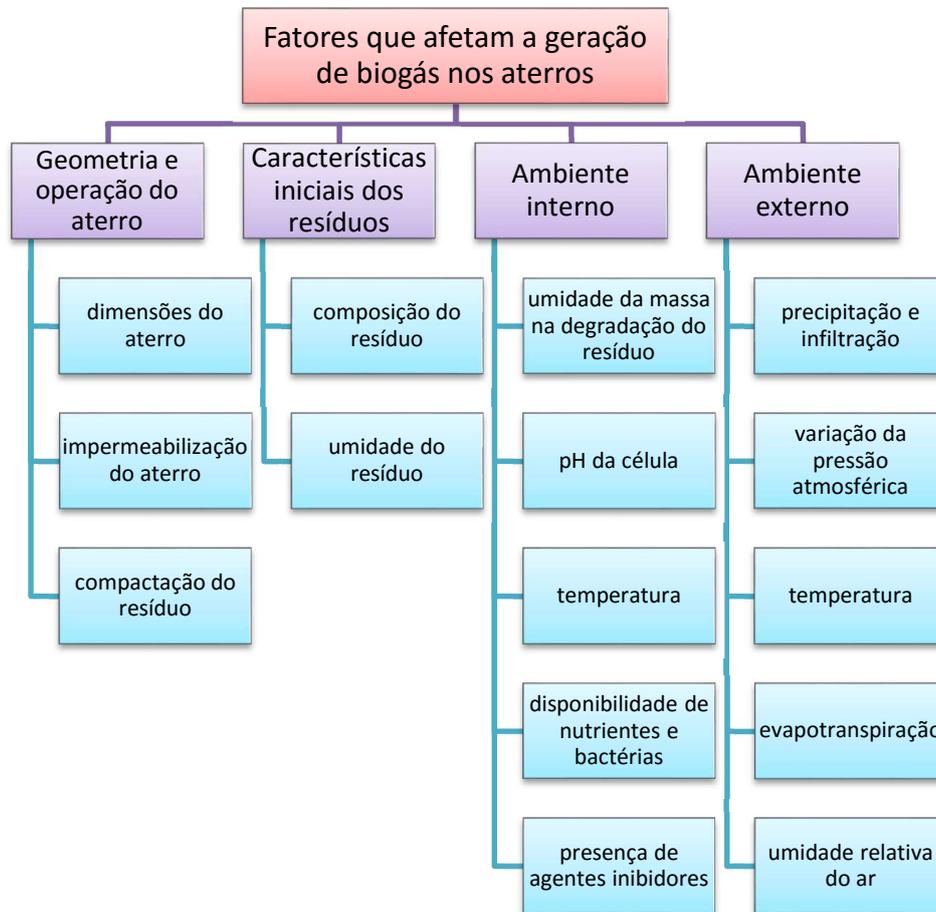
1.3.1. Fatores que Afetam a Geração do Biogás nos Aterros Sanitários

Inúmeros são os fatores que afetam a geração de gases em aterros de resíduos sólidos. Segundo El-Fadel et al. (1996), os fatores mais comuns estão relacionados com a composição, umidade, temperatura e pH da massa de resíduo, além da disponibilidade de bactérias e nutrientes e presença de agentes inibidores na célula. Cabe enfatizar que, além das variáveis citadas anteriormente, outros aspectos relacionados com a geometria e operação do aterro e com o ambiente externo às células também podem influenciar na biodegradação dos RSU e, conseqüentemente, na formação dos gases.

Maciel (2003) descreve os principais fatores de influência na geração de biogás organizados em quatro grupos: (i) geometria e operação do aterro; (ii) características dos resíduos; (iii) ambiente interno e (iv) ambiente externo. Teixeira (2008) corrobora que estes fatores influenciam na geração do biogás.

Os principais fatores que afetam a geração de biogás estão agrupados na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma com os principais fatores que afetam a geração do biogás.



Fonte: Adaptado MACIEL (2003).

Alguns dos fatores anteriormente citados não só afetam a produção, mas também influenciam na emissão do biogás para a atmosfera.

As principais características da geometria do aterro para a geração do biogás correspondem à altura da massa de resíduos e o sistema de impermeabilização da célula. Quanto maior a altura dos resíduos, menor é a influência da fase aeróbia na sua decomposição. Já o sistema de impermeabilização atua reduzindo os efeitos das condições atmosféricas na massa de resíduo. As camadas de cobertura funcionam como elemento de interação entre os resíduos no interior do aterro, e a atmosfera, servindo para minimizar a liberação de biogás não captada pelos drenos. Para Lopes (2011), os aterros que possuem plantas de aproveitamento energético devem possuir camadas de cobertura que maximizem a captação dos gases, ou seja, os materiais utilizados precisam ter características de baixa permeabilidade ao biogás, retendo-os o máximo possível, não impedindo as trocas ambientais

que favorecem a biodegradabilidade. Já para aterros que não possuem sistemas de biogás, as camadas de cobertura devem minimizar as emissões fugitivas tendo em vista os impactos ambientais desses gases (GEE) para a atmosfera.

A compactação do resíduo também apresenta uma vantagem para a geração de biogás em um aterro sanitário, uma vez que quanto maior a densidade alcançada, maior gera a geração de biogás por unidade de volume (MACIEL, 2003).

Com relação às características dos resíduos, temos que a composição gravimétrica afeta de forma qualitativa e quantitativa na geração do biogás. A maioria dos resíduos dispostos em aterros sanitários é biodegradável. Quanto mais facilmente é decomposta a fração orgânica do resíduo, mais acelerada será a taxa de produção de gases no aterro. Deste modo, um alto percentual de resíduos de alimento resultará em uma rápida biodegradação e consequentemente, a uma acelerada taxa de geração de biogás.

Para a umidade, existe uma faixa ótima na qual a taxa de biodegradação se torna adequada. Quanto maior o teor de umidade volumétrica, maior será a taxa de geração de biogás, até a umidade de saturação. Mariano (2008) destaca que valores de umidade entre 40% e 60% são considerados adequados para a biodegradação da fração orgânica dos RSU.

As características do ambiente interno à célula estão vinculadas à capacidade de favorecimento ou inibição da atividade dos microrganismos. Jucá et al. (1999) verificaram altas taxas de decomposição dos resíduos no Aterro de Muribeca para valores de umidade da massa do resíduo variando entre 20% e 40%. Além disso, valores de pH na faixa da neutralidade (6,7 a 7,5), aumenta a metanogênese de tal modo que a geração de metano é maximizada.

As condições de temperaturas influenciam no tipo de bactéria predominante e o nível de geração de biogás. Temperaturas cujas variações sejam de 35°C a 45°C contribuem para a maior atividade microbiana e a consequente formação do biogás.

A disponibilidade de macronutrientes (N e P) e micronutrientes, tais como sódio, potássio enxofre, cálcio e magnésio, bem como a presença de bactérias metanogênicas e acetogênicas favorecem a produção de biogás. Em contrapartida, o aumento das concentrações de metais pesados (Cu, Zn, Ni e Cr) e da salinidade (Na e Ca) do meio inibe o processo de biodegradação dos RSU, conforme destacado por (MACIEL, 2003; ALCÂNTARA, 2007).

Algumas variáveis externas às células dos aterros sanitários como, temperatura do ar e a precipitação provocam mudanças no ambiente interno das células. Estas alterações são ocasionadas particularmente pela entrada de oxigênio através da camada de cobertura e secundariamente pelas variações de temperatura. A precipitação elevada associada às deficiências nos sistemas de drenagem e impermeabilização possibilita a infiltração de água em direção à massa de resíduo. Juntamente com a água, ocorre o ingresso de oxigênio na forma dissolvida. A influência da temperatura dependerá do gradiente existente entre a temperatura externa e interna das células nos diferentes meses do ano. Aterros construídos em regiões de clima tropical, onde o gradiente é baixo e varia pouco durante o ano, o efeito da temperatura é percebido apenas nos primeiros metros da célula de resíduo. Quanto mais elevada a massa de resíduo, menor é a influência da temperatura do ar na geração do biogás. Cabe ainda ressaltar que, as bactérias anaeróbias e metanogênicas especialmente, são sensíveis às alterações de temperatura, reduzindo sua atividade metabólica e formação dos gases.

A evapotranspiração é um importante fator na perda de água de um aterro sanitário e qualquer variação na sua avaliação pode alterar significativamente o resultado da equação do balanço hídrico. As variações no balanço hídrico interferem na velocidade de degradação dos resíduos e conseqüentemente a geração de biogás devido à permanência de determinadas populações de microrganismos presentes na massa de lixo.

O resultado da interação física, química e biológica de todos estes fatores ao longo do processo de degradação dos resíduos é fundamental para a definição das diferentes fases de decomposição do resíduo e do potencial de geração do biogás no aterro.

1.4. Estimativas de Emissões de Gases “*in situ*”

Segundo Pereira Netto et. al. (2002) e Fernandes (2009), a quantificação de gases emitidos pela camada de cobertura de aterros sanitários são realizados para atender 3 (três) situações:

- Entender a magnitude do problema causado por aterros individualmente e, conseqüentemente, o problema global causado pela disposição de resíduos orgânicos em aterros;
- Identificar e implementar métodos para o controle de emissões atmosféricas;
- Avaliar a eficiência dos métodos de controle das emissões de gases dos aterros para a atmosfera.

A seguir serão expostas algumas destas formas de medições e suas respectivas características.

1.4.1. Métodos para Medição de Gases

Os métodos para medição de gases pela camada de cobertura de aterros sanitários buscam mensurar as concentrações e os fluxos do biogás gerado pela biodegradação dos resíduos sólidos. Estes podem ser mensurados *in situ* ou *ex situ*, sendo realizados de maneira local ou global, dependendo da metodologia adotada.

Os principais métodos de investigação das emissões de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos correspondem à análise de placa de fluxo (estática e dinâmica) e análises por infravermelho (MACIEL, 2003; REGATTIERI, 2009). A Tabela 8 apresenta o princípio de medição e a resolução dos métodos citados.

Tabela 8 – Princípios básicos dos métodos das avaliações das emissões de gases.

Método	Princípio	Abrangência	
		Espacial	Temporal
Placas de fluxo	Avaliação da concentração dos gases com o tempo em caixas fechadas (estática) ou semi-abertas (dinâmica) cravadas no solo de cobertura.	m ²	horária
Análise por infravermelho	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).

A metodologia de placa de fluxo consiste em acúmulo dos gases dentro da placa de fluxo, restringindo a passagem de tais gases liberados para a atmosfera. O acúmulo do biogás no inferior da câmara de fluxo é quantificado em intervalos de tempo previamente determinados. A concentração dos gases pode ser quantificada *in situ*, através de equipamentos portáteis, ou posteriormente em laboratório através da utilização da tecnologia de cromatografia gasosa.

Mesmo com o desenvolvimento destas técnicas ao longo dos anos, ainda há incertezas relacionadas ao uso e aos fatores que afetam as taxas de emissões. Conhecer as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos é primordial para a escolha da melhor técnica a ser empregada. Maciel (2003) cita alguns pontos importantes que estão descritos a seguir.

Placa de Fluxo (estática e dinâmica)

- Vantagens: mais precisa na determinação da emissão pontual, larga experiência prática, baixo custo, simples instalação, necessita de mão-de-obra pouco especializada.
- Desvantagens: necessita de inúmeros ensaios para avaliação da emissão total do aterro, duração do ensaio pode ser prolongada a depender das dimensões da placa e possibilidade de modificação das características da cobertura na cravação.

Outros autores como Babillote et al., 2009 e Gebert et al., 2009, avaliam que o método de placa de fluxo é capaz de detectar pequenos fluxos de metano e de não ser sensível às restrições topográficas ou outras fontes de metano perto do aterro. Porém, o método também tem desvantagens claras, sendo a principal delas o fato de que existe uma grande chance de que hot-spots (bolsões de gases) possam deixar de ser mensuradas, resultando em uma subestimação das emissões.

Análises por infravermelho

- Vantagens: mais preciso na obtenção da emissão total do aterro cobrindo rapidamente vários hectares e passível de localizar a dispersão da pluma de contaminação.
- Desvantagens: alto custo, tecnologia nem sempre disponível, necessidade de mão-de-obra qualificada, não identifica o ponto real no solo das emissões,

maior susceptibilidade a condições meteorológicas, número de gases analisados limitados.

1.4.2. Placas de Fluxo

Segundo BISZEK (2006), o método mais apropriado devido à disponibilidade, economia, simplicidade e possibilidade de aplicação em toda área de um aterro é o método das câmaras ou placas de fluxo.

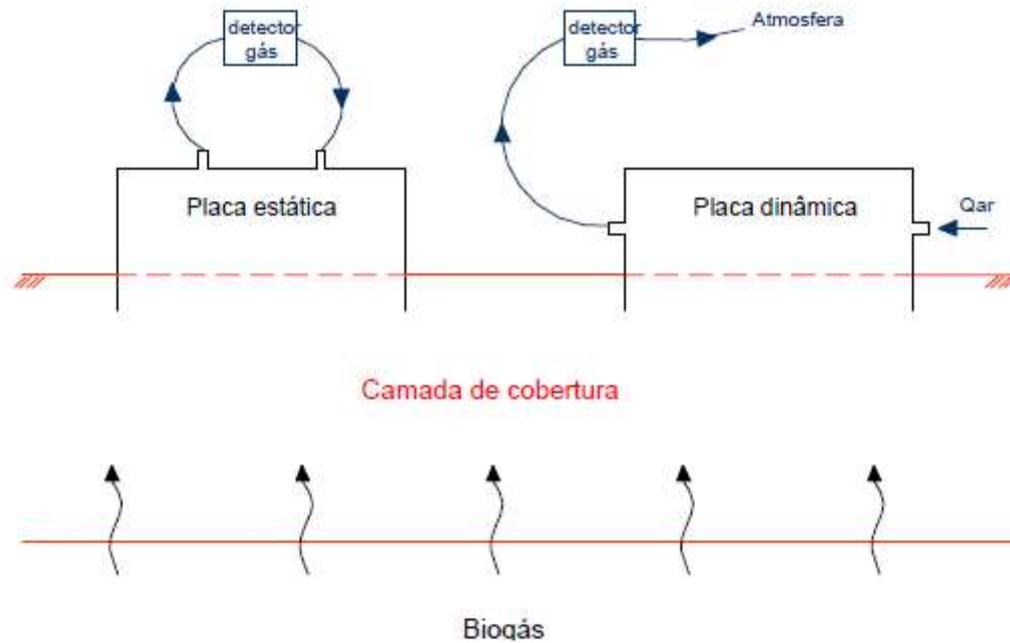
O método de placas de fluxo tem como objetivo avaliar a concentração dos gases confinados com o tempo em caixas fechadas (estáticas) ou semi-abertas (dinâmicas) e com isto determinar o fluxo de gases na superfície do aterro.

No ensaio de placa de fluxo dinâmica, os gases no interior da placa são diluídos por meio de um fluxo contínuo de ar para serem analisados e depois lançados para a atmosfera. Já no ensaio de placa de fluxo estática, os gases são analisados sem diluição e retornam para a própria placa após a passagem pelo equipamento de leitura utilizado no ensaio, constituindo assim um ciclo fechado (MARIANO, 2008).

O ensaio de placa de fluxo dinâmica requer um intervalo de tempo maior e precisa de um bom sistema de calibração em função do seu volume interno e do nível de emissão superficial para se tornar um instrumento satisfatório. Já o ensaio de placa de fluxo estática é mais simples e de menor custo, sendo mais indicada quando se precisa de uma grande quantidade de ensaios em um curto período de tempo (COSSU et al., 1997).

A Figura 4 apresenta de forma esquemática os ensaios de placa de fluxo estática e dinâmica mencionados.

Figura 4 – Ilustração dos ensaios de placas de fluxo estática e dinâmica.



Fonte: MACIEL (2003).

O fluxo de gás, ou simplesmente, a taxa de emissão superficial determinada pelo método estático pode ser calculada pela seguinte equação 1 (CZEPIEL et al., 1996):

$$J = \frac{V_p \times \rho}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \quad (1)$$

onde:

J = fluxo de gás (g/m^2s);

V_p = volume útil da placa de fluxo (m^3);

A = área de solo coberta pela placa (m^2);

ρ = massa específica do gás a determinada temperatura (g/m^3);

$\Delta C/\Delta t$ = variação da concentração do gás (% vol) com o tempo (s).

Em relação às características físicas, não existe um padrão para as dimensões das placas de fluxo utilizadas nos ensaios de campo. A literatura relata que diversas são as dimensões utilizadas por diferentes autores.

Na Tabela 9 são apresentadas às diferentes características físicas das placas de fluxo que foram utilizadas nas pesquisas de diferentes autores.

Tabela 9 – Características físicas das placas de fluxo utilizadas em diversas pesquisas.

Referência	Material	Forma	Dimensões (cm)		Área (m ²)	Volume (L)
			Base	Altura		
(PARK et al., 2013)	PVC	Cilíndrica	Φ200	100	0,03	31,4
(TEIXEIRA, 2009)	PVC	Cilíndrica	Φ40	24	0,13	30
(DI BELLA et al., 2011)	NC	NC	NC	NC	0,08	26
(OLIVEIRA et al., 2013)	Aço galvanizado + acrílico	Retangular	40x40	5	0,16	8
(BIETLOT et al., 2013)	Aço galvanizado + acrílico	Quadrada	NC	NC	0,25	29
(GECK et al., 2013)	Alumínio + plástico	Quadrada	8800x8800	50	17,6	8800
(KUMAR et al., 2004)	Aço galvanizado	Retangular	31x52	70	0,16	112,8
(HEGDE; CHANG; YANG, 2003)	Acrílico	Quadrada	40x40	65	0,16	96
(BORJERSSON et al., 1998)	Aço Inox	NC	NC	NC	0,205	51,3
(BOGNER; BURTON, 1997)	Aço Inox	NC	NC	NC	NC	19
(MOSHER et al., 1996)	NC	Cilíndrica	NC	NC	NC	9
(ASADI et al., 2013)	NC	Cilíndrica	Φ40	20	0,01	0,0205
(SCHROTH et al., 2012)	NC	Cilíndrica	Φ31	17	0,0007	0,012
(ABICHOU et al.,	Alumínio	Quadrada	630x630	200	0,4	80

2006)	Polido					
(REINHART; COOPER; WALKER, 1992)	Aço Inox	Cilíndrica	$\Phi 71,12$	30,48		
(MACIEL, 2003)	Aço galvanizado + acrílico	Retangular	40x40	5	0,16	8
(MARIANO, 2008)	Aço galvanizado + acrílico	Retangular	40x40	5	0,16	8

*NC = não citado

Fonte: BORBA, 2015, p. 48.

Segundo Costa et al. (2006), as placas de fluxo devem ser fabricadas com materiais que não sofram degradação no campo, apresentem o menor aumento possível da temperatura em seu interior e que causem o mínimo possível de perturbações no local da instalação.

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).

Sabe-se que o tempo de duração dos ensaios de placas de fluxo é algo que ainda não está devidamente consolidado, uma vez que são muitas as literaturas que apresentam diferentes valores para o tempo total de cravação. Maciel (2003) destaca que alguns autores sugerem que o intervalo de tempo para os ensaios varie de 15 minutos a 3 horas. Em seus ensaios, Maciel (2003) utilizou como tempo do ensaio 25 minutos. De acordo com Bogner et al. (1997), o tempo dependerá do tipo de gás a ser analisado e recomenda um período máximo de 30 minutos para o CH_4 .

Outra maneira de se analisar os gases liberados e confinados nas placas de fluxo em aterros sanitários é através da utilização de técnicas in situ, com o uso de equipamentos portáteis que possuem a capacidade de leitura dos gases confinados. Oliveira et al. (2013) e Maciel (2003) fizeram uso do equipamento portátil GEM 2000, que realiza a leitura de metano por frequência de absorção infravermelha. Mariano (2008) e Lopes (2011) utilizaram

o equipamento Drager X-am 7000 que realiza as leituras das concentrações dos gases por análise de absorção infravermelha.

Park et al. (2013) realizou as medições das concentrações do gás através da técnica de detector de metano a laser (LMD). Outra técnica frequentemente utilizada consiste na detecção de ionização de chama (FID) ou na detecção de captura de elétrons (ECD). Um detector de ionização de chama é um instrumento que mede a concentração de espécies orgânicas numa corrente de gás. São frequentemente utilizados como um detector em cromatografia em fase gasosa.

As técnicas de análise podem ser combinadas de acordo com o objetivo da pesquisa. Borba (2015) utilizou o método de placa de fluxo onde os gases confinados eram coletados em seringas para análise posterior em cromatografia gasosa (CG).

A Tabela 10 apresenta a variação de emissão de CH_4 de estudos que utilizaram a metodologia de placa de fluxo estática, realizados em diversos aterros no mundo, com a utilização de técnicas de avaliação *in situ* (FID e LMD) ou *ex situ* (seringas e cromatografia gasosa).

Tabela 10 – Emissões de CH_4 reportados nas literaturas em camadas de cobertura.

Referência	Média de Emissão (g/m².dia)	Máximo (g/m².dia)	Mínimo (g/m².dia)	Método de Análise
(MOSHER et al., 1996)	-	1495	45	Placa + Seringa (CG)
(HEGDE; CHANG; YANG, 2003)	3,8	18,2	0	Placa + Seringa (CG)
(MACIEL, 2003)	192,9	362,9	103,9	Placa + GEM 2000
(ABICHOU et al., 2006)	53,6	596	-	Placa + Seringa (CG)
(MARIANO, 2008)	81,9	401	0	Placa + DRAGER
(DI BELLA; DI TRAPANI;	35,4	695,5	0,09	Placa de fluxo + FID portátil

VIVIANI, 2011)				
(CHAKRABORTY et al., 2011)	24,9	86,6	2,9	Placa + Seringa (CG)
(PARK et al., 2013)	37,5	59	6,4	Placa + LMD portátil
(OLIVEIRA et al., 2013)	13,7	35,23	0	Placa + GEM 2000
(DI TRAPANI; DI BELLA; VIVIANI, 2013)	17,3	1114,6	0,009	Placa de fluxo + FID portátil
(ASADI et al., 2013)	1,14	18,3	0,001	Placa + Seringa (CG)
(DEVER et al., 2013)	1800	5400	-	Placa de fluxo
(SCHEUTZ et al., 2014)	-	446	3	Placa de fluxo + FID

Fonte: Adaptado de BORBA, 2015, p.51.

1.4.3. Infravermelho

Este método se baseia na emissão de feixe de luz infravermelho na superfície do aterro sanitário. O detector mede a intensidade da luz infravermelha e calcula as perdas dessa radiação. O procedimento pode ser repetido diversas vezes em diferentes distâncias, a fim de obter resultados mais precisos (BISKEK, 2006).

O princípio da quantificação utilizando detectores de infravermelho é baseado na capacidade que os gases de CO₂, CH₄ e N₂O possuem de absorver a radiação eletromagnética na faixa do infravermelho (COSTA et al., 2006).

Para Cossu et al. (1997), a análise por infravermelho é precisa para a avaliação global das emissões por um aterro, fornecendo uma medida de emissão em grandes áreas. Pode indicar os locais de maiores emissões e apresentar um cenário prévio onde pode se identificar saídas de biogás (hot spots).

Chanton et al. (2007) avaliou o fluxo de CH_4 pela camada de cobertura utilizando ensaios de placa de fluxo estática e infravermelho. Foi observado baixo fluxo de biogás pela camada, mas o fluxo avaliado pelo método de análise por infravermelho foi 1,26 a 1,38 vezes maiores que o fluxo avaliado pelos ensaios de placa. Os autores avaliam que para os aterros construídos em encostas ou no talude da célula, o método infravermelho é muito útil devido à dificuldade de realização de ensaios com placa de fluxo.

1.4.4. Método Micro Meteorológico

Esse método é mais utilizado para medir as concentrações de biogás em superfícies maiores, emissões globais. É caracterizado pela mensuraram de gradientes de concentração através de um plano horizontal imaginário, com medições distando de 0,5 a 3 metros acima da superfície do aterro. O fluxo do biogás pode ser medido como sendo a média do produto da concentração do biogás e a componente da velocidade do vento (SCHARFF et al., 2005).

Esta técnica, no entanto, só pode ser aplicada em terrenos planos e com emissões bastante homogêneas, sendo esta uma grande desvantagem, visto que as características topográficas da maioria dos aterros sanitários são bastante heterogêneas (SCHARFF et al., 2005). Segundo Scheutz et al. (2009), o método tem um custo elevado e exige equipamento especializado quando comparado às placas de fluxo.

Uma vantagem é a fácil automação, que permite medições em períodos mais longos do tempo e a possibilidade do monitoramento simultâneo de emissões de metano de gás carbônico (IPCC, 2006).

1.4.5. Método de Traçadores

O método por traçadores é feito através da liberação de um gás inerte conhecido próximo a área a ser avaliada. Muitas vezes utiliza-se o SF_6 ou N_2O para tais avaliações. O gás inerte é misturado ao gás que se deseja quantificar através da camada de cobertura, formando uma nuvem, sendo possível quantificar as emissões de biogás (BISZEK, 2006).

As emissões são calculadas a partir da razão entre metano e gás inerte (marcador) através da equação 2 (MOSHER et al., 1996):

$$F = R_t \times (C_m / C_t) \quad (2)$$

Onde:

F = taxa do gás que está sendo medido;

R_t = taxa de emissão do marcador (SF₆);

C_m = concentração do gás que esta sendo medido;

C_t = concentração do marcador.

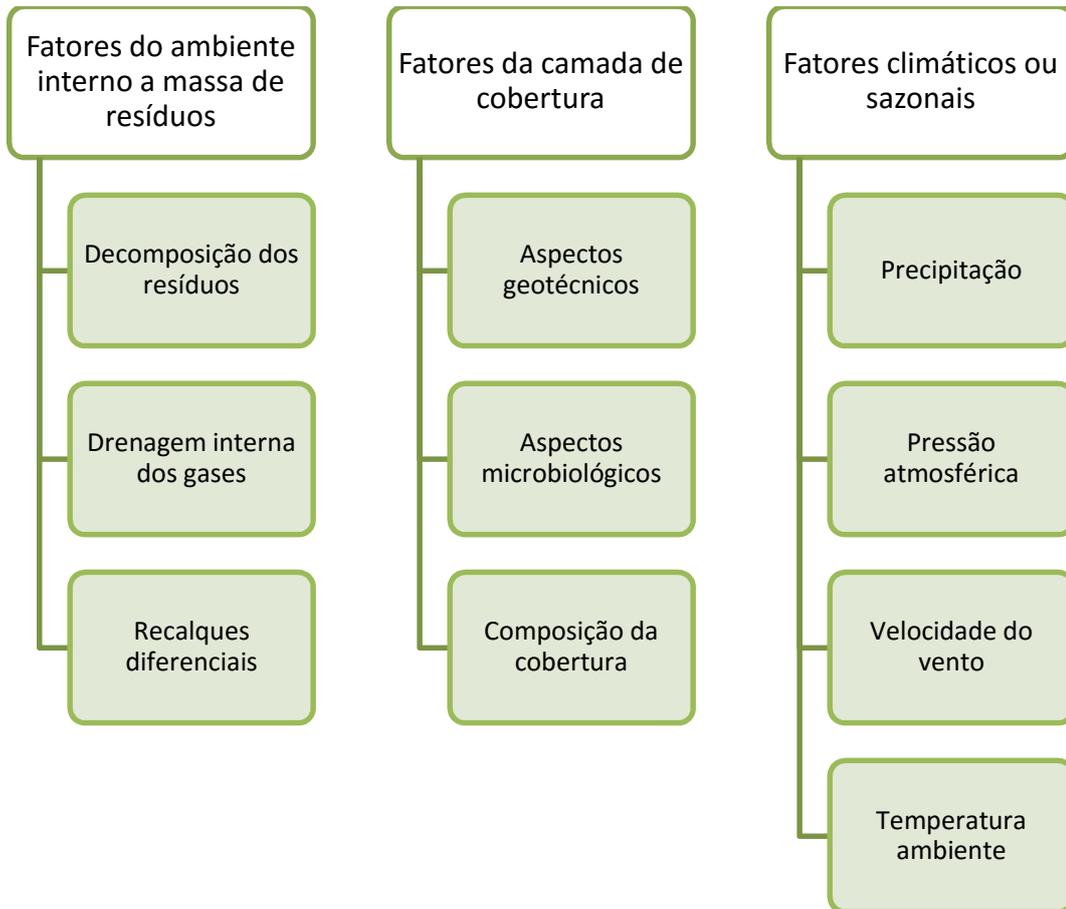
A concentração do metano pode ser avaliada pelo FID e a concentração do gás inerte (marcador) pelo ECD.

Para que a técnica seja aplicada de maneira correta é necessário, primeiramente, conhecer a direção do vento no momento da amostragem, além de que as condições climáticas devem ser suficientes para que o marcador seja efetivamente misturado ao gás emitido (MONSTER et al., 2015).

1.5. Fatores que Influenciam as Emissões de Biogás

Diversos são os fatores que afetam a quantidade e a qualidade do biogás emitido do aterro sanitário para a atmosfera. A migração do biogás e o seu fluxo variam espacialmente e temporalmente pela variação de fatores tais como condições ambientais, geotécnicas e atmosféricas no aterro. Além dos fatores mencionados, a geometria, operação e ambiente externo ao aterro também interferem neste processo (MACIEL, 2003). A Figura 5 apresenta os principais grupos de fatores, segundo sua natureza, que influenciam as emissões de biogás em aterros sanitários.

Figura 5 – Principais grupos de fatores que influenciam nas emissões de biogás.



Fonte: Adaptado de MACIEL (2003).

A decomposição dos resíduos e a drenagem interna dos gases são os principais fatores relativos ao ambiente interno da massa de resíduos. Esses fatores influenciam diretamente os níveis de pressão e concentração dos gases que atingem a camada de cobertura. Esses parâmetros são fundamentais para descrever o fluxo dos gases por advecção e difusão, no solo da camada de cobertura (MACIEL, 2003).

Os recalques diferenciais que ocorrem em aterros sanitários podem aumentar a liberação fugitiva do biogás nas camadas de cobertura pelo aparecimento de trincas ou fissuras. O recalque ocorre em consequência da biodegradação da massa de resíduos de disposta, pela má compactação dos resíduos ou em função da instabilidade da fundação do aterro.

O estudo e monitoramento das características geotécnicas do solo da camada de cobertura são fundamentais para a análise das emissões fugitivas de gases em um aterro

sanitário. A Tabela 11 destaca os principais parâmetros geotécnicos e possíveis efeitos nas emissões do biogás.

Tabela 11 – Principais parâmetros geotécnicos e os possíveis efeitos nas emissões do biogás.

Parâmetros geotécnicos	Possíveis efeitos nas emissões do biogás para a atmosfera
Tipo de solo	Solos de granulometria fina (argilas) são preferidos para controle das emissões (\downarrow permeabilidade e \uparrow retenção de umidade).
Espessura	Quanto maior espessura da camada, maior a possibilidade de retenção física, química e biológica dos gases.
Umidade / Saturação	A presença de água nos vazios do solo reduz a percolação dos gases. Redução drástica para valores acima de 75% de saturação.
Conteúdo volumétrico de ar	Quanto maior a presença de poros aerados na matriz, mais rápida é a velocidade dos gases no meio, consequentemente \uparrow emissões.
Densidade / Compactação	O aumento da densidade dificulta a passagem dos gases (\downarrow porosidade e permeabilidade) minimizando as emissões.
Sucção	Importante relação com a retenção/absorção da umidade na camada, especialmente nas evapotranspirativa.
Temperatura	A elevação da temperatura do solo favorece as emissões dos gases (Park e Shin, 2001).
Coefficiente de permeabilidade	Parâmetro que mede a facilidade/dificuldade do gás atravessar o solo por advecção. Grandeza proporcional às emissões de gases.
Coefficiente de difusão	Parâmetro que mede a facilidade/dificuldade do gás atravessar o solo por difusão. Grandeza proporcional ao fluxo de gás emitido.
Contração / expansão e fissuras	Ciclos de umedecimento/secagem favorecem o aparecimento de fissuras em solos argilosos, aumentando os níveis de emissão.
Mineralogia	Possíveis reações físico-químicas dos minerais do solo com os gases podem retê-los na cobertura.

Fonte: MACIEL (2003).

Com relação aos fatores climáticos ou sazonais, temos que Czepiel et al., (1996) apresentam resultados de aumento das emissões totais em aterro sanitário de 11,5 para 21 m^3/min de CH_4 em função de um decréscimo de 1,5 kPa (102,6 para 101,1 kPa) na pressão atmosférica.

A precipitação também pode influenciar as emissões de biogás para a atmosfera. Devido ao aumento do grau de saturação do solo, há decréscimo na permeabilidade do solo, acarretando na diminuição do fluxo de biogás.

Para Maciel (2003), outro fator não menos importante é a velocidade do vento. As correntes de ar provocam a diluição do biogás nas proximidades da superfície da camada de cobertura sendo, portanto, importante nas estimativas de emissões de biogás nos métodos onde não há o confinamento dos gases, como as análises por infravermelho. O método de placa de fluxo possui um sistema de vedação e estrutura aerodinâmica que restringem a entrada de ar atmosférico, reduzindo assim o efeito da velocidade do vento nestas avaliações.

A variação da temperatura ambiente provoca alterações na temperatura do solo, influenciando as emissões de biogás para a atmosfera. O aumento do fluxo de biogás está diretamente relacionado com a elevação da temperatura do solo da camada de cobertura.

1.6. Camadas de Cobertura de Aterros Sanitários

A NBR 13.896/97 estabelece no projeto do aterro sanitário a implantação do sistema de camada de cobertura final, que consiste de um sistema de impermeabilização superior. Esses sistemas de impermeabilização de base e as camadas de cobertura, intermediárias e finais, são concebidos com elementos naturais (solo) ou sintéticos (geomembranas).

O conceito tradicional de sistema de cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos propõe que a camada funcione como uma barreira de impermeabilização dos resíduos frente às condições do ambiente externo, minimizando a infiltração da água precipitada e a liberação de gases para a atmosfera. Além disso, a camada de cobertura deve manter a sua integridade com a ocorrência de erosão, ressecamento do solo, surgimento de trincas, colmatação e recalque diferencial e deve exigir o mínimo de custos com manutenção em longo prazo (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993).

Existem vários tipos de construção da camada de cobertura, sendo que a utilização de solos compactados com baixa condutividade hidráulica é o método mais empregado. Para Lopes (2011) é comum que as camadas de cobertura sejam construídas de materiais argilosos que são dispostos sobre os RSU para obtenção de uma camada com espessura variando de 0,5 a 1,0 metro adotando-se como parâmetro mínimo uma condutividade hidráulica do solo saturado na ordem de 10^{-8} cm/s. Mariano (2008) destaca que os solos constituídos

majoritariamente por argila são o material mais utilizado na camada de cobertura de aterros sanitários.

Cabe ressaltar que, os sistemas de cobertura devem minimizar a infiltração de água no aterro, exigir pouca manutenção, não estar sujeito à erosão, acomodar os assentamentos sem grandes deformações e possuir coeficiente de permeabilidade inferior ao da área do aterro sanitário.

Dentre as principais características geotécnicas que pode influenciar na permeabilidade das camadas de cobertura, podemos citar: umidade de compactação, estrutura do solo, grau de saturação, sucção do solo e conteúdo volumétrico de ar, dentre outros fatores (MACIEL, 2003; VIEIRA, 2005; TEIXEIRA, 2008; MARIANO, 2008).

De acordo com Mariano (2008), os sistemas de cobertura utilizados nos aterros são basicamente de dois tipos: as camadas convencionais e as camadas alternativas. As camadas convencionais são aquelas confeccionadas com camadas de solo natural argiloso compactado com baixa condutividade hidráulica. Já as camadas alternativas são todas as outras confecções de camadas de cobertura que diferem da convencional. São exemplos de camadas alternativas as coberturas evapotranspirativas, barreiras capilares, assim como as de materiais geossintéticos (geotêxteis e geomembranas).

A National Academy of Sciences (2007) afirma que as camadas evapotranspirativas são utilizadas principalmente em locais de clima árido e semiárido, onde o desempenho das camadas de baixa permeabilidade (sistemas de cobertura em solo natural de argila) fica comprometido pela alta evaporação, que provoca o ressecamento do solo e a formação de fissuras.

Para Barros (2005), na elaboração do projeto do sistema de cobertura final, alguns fatores devem ser analisados, como: tipo de resíduo a ser coberto, balanço hídrico e do clima local, estabilidade dos taludes, recuperação da área do aterro e disponibilidade de jazida de material próxima ao aterro.

1.6.1. Coberturas Convencionais

As camadas convencionais de cobertura são aquelas constituídas de uma camada de solo de granulometria fina (argila), na qual se aplica a compactação, visando à diminuição da permeabilidade da camada de cobertura (SANTOS, 2009). A Figura 6 ilustra o sistema de cobertura convencional usualmente utilizado em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.

A maioria das coberturas denominadas convencionais emprega um projeto similar que consiste de uma camada de solo argiloso compactado de uma jazida próxima ao local do aterro sanitário. Essa camada tem como objetivo minimizar a infiltração da água de chuva e reter o escape do biogás, podendo apresentar alguns problemas, tais como ressecamento e formação de fissuras e trincas quando utilizadas em alguns tipos de clima. O desempenho dessa camada convencional está relacionado à baixa condutividade hidráulica saturada do solo (geralmente inferior a 10^{-7} cm/s) para minimizar a infiltração e maximizar o escoamento superficial. Para que a camada de solo argiloso tenha um bom funcionamento como barreira hidráulica, o ideal é que ela possua uma condutividade hidráulica saturada igual ou inferior a 1×10^{-7} cm/s (SHACKELFORD et al., 2006).

Segundo Lopes (2011), as camadas de coberturas convencionais são utilizadas muitas vezes apenas com a preocupação de efeito estético de cobertura dos resíduos, controle de odores e de proliferação de vetores, desprezando o critério técnico requerido para a minimização de infiltração de líquidos e emissões de gases para o meio.

Figura 6 – Esquema de sistema de cobertura convencional.



Muitos aspectos devem ser avaliados para se optar por um tipo de camada de cobertura, haja vista os fatores intervenientes no seu desempenho. Cada sistema de cobertura possui as suas vantagens e desvantagens, portanto, os materiais da camada de cobertura devem ser selecionados de modo que atendam satisfatoriamente as funções requeridas para os quais foi proposto.

Para Peng e Jiang (2009), os sistemas de coberturas convencionais são mais adequados aos locais onde a precipitação é elevada, uma vez que as camadas do solo argiloso permanecem saturadas ou próximas da saturação, evitando o ressecamento. Mesmo assim, o sistema é susceptível às falhas causadas por ciclos de secagem e umedecimento, promovendo o surgimento de trincas e fissuras.

De acordo com Zornberg e McCartney (2007), os principais aspectos a serem considerados em projetos com camadas de cobertura convencional são: a caracterização das propriedades hidráulicas e a adequada determinação da espessura da camada. Ainda segundo o autor, projetos requerem a seleção da espessura da camada e armazenamento da água no solo suficiente para manter a infiltração em um nível mínimo permitido, dadas as condições climáticas previstas para o lugar onde será instalada.

Bogner et al. (1997) estudaram as emissões de CH₄ em um aterro na Califórnia (USA) com uma cobertura que consistia de 1 m de sedimentos arenosos, sem vegetação. As emissões de CH₄ foram extremamente elevadas com valores acima de 1.000 g/m².dia, sendo atribuídas a ausência de um sistema de captação ativo de biogás e granulometria grossa no solo de cobertura e baixo teor de umidade. Os resultados mostraram que, obviamente, sedimentos arenosos são incompatíveis na estrutura de um sistema de cobertura.

Maciel (2003) estudou o fluxo de gases existente na célula nº8 do Aterro da Muribeca, localizado na Região Metropolitana do Recife, no município de Jaboatão dos Guararapes - PE que não continha drenagem interna do biogás a fim de mapear as suas emissões para a atmosfera. A camada de cobertura era constituída por uma camada única de solo argiloso compactado com espessura variando de 0,25 a 0,90 m. O fluxo de CH₄ encontrado variou de 103,7 a 362,9 g/m².dia que provou a ineficiência da camada de cobertura da referida célula na minimização da poluição atmosférica ocasionada pelo CH₄.

Mariano (2008) também estudou a emissão de biogás em camada convencional com solo compactado de espessura variando de 0,25 m a 0,90 m, no Aterro Controlado de Aguazinha – PE e encontrou valores para o fluxo de CH₄ que variaram de 18 a 401 g/m².dia. Cabe ressaltar que neste aterro não existia sistema de extração do biogás. Os resultados encontrados são similares aos de Maciel (2003), o que corrobora a ineficiência da camada convencional na retenção do biogás.

Oliveira (2013) avaliou as emissões fugitivas de biogás que atravessavam a camada de cobertura final de resíduos na Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu (CTR Nova Iguaçu) e no Lixão Remediado de Seropédica. Os resultados indicaram ausência de fluxo de biogás pela camada de cobertura convencional no lixão remediado de Seropédica que foi encerrado em 2012 e operou durante 50 anos com 1,10 m de espessura em sua camada de cobertura. Já no CTR Nova Iguaçu, foi verificado que o fluxo de CH₄ variou de 0 a 35,2 g/m².dia para a camada convencional de 0,8 m de espessura com o sistema de biogás ligado.

Borba (2015) estudou as taxas de emissões de gases de GEE na camada de cobertura intermediária do aterro sanitário de Seropédica no município do Rio de Janeiro e encontrou valores que variaram de 0,1 a 575,0 g/m².dia para o fluxo de CH₄. Os estudos de Borba (2015) foram realizados em uma área temporariamente inativa do aterro sanitário, mas que continham resíduos dispostos a aproximadamente 3 anos.

Vale ressaltar que a compactação e espessura do solo nas camadas intermediárias de aterros sanitários normalmente são inferiores quando comparadas com as de uma camada final de cobertura. Portanto, espera-se em camadas intermediárias que as emissões de biogás sejam maiores do que as emissões em camadas finais de cobertura.

1.6.2. Coberturas Alternativas

As camadas alternativas são sistemas que fazem uso das características de retenção do solo e da evapotranspiração para produzir uma cobertura econômica e eficiente para aterros sanitários de resíduos sólidos em geral. Dois tipos de coberturas alternativas podem ser definidos: as barreiras capilares e as evapotranspirativa, sendo que as barreiras capilares podem também funcionar como evapotranspirativa (TEIXEIRA, 2008).

Observa-se um crescente interesse no uso das coberturas alternativas em relação ao sistema convencional. Para Teixeira (2008), isto se deve à necessidade de redução dos custos, aos insucessos das coberturas convencionais em algumas regiões e ao crescente desenvolvimento da tecnologia com o comportamento associado ao clima.

As camadas de cobertura do tipo evapotranspirativa ou barreiras capilares são denominadas alternativas por ter como finalidade a substituição das camadas convencionais,

satisfazendo os critérios de projeto mantendo-se a eficiência em relação à infiltração da água de chuva e gases, quanto à erosão devido às chuvas e ventos.

As camadas evapotranspirativa e barreiras capilares atuam como armazenadoras de água em estações chuvosas e, posteriormente permitem a evaporação para a atmosfera, em estações secas.

De acordo com Peng e Jiang (2009), os locais de clima árido e semiárido, por possuírem precipitação menor que a evaporação potencial e estações chuvosas bem definidas, devolvem a umidade para a atmosfera durante a estação seca, e a capacidade de armazenamento hídrico é renovada para o próximo período chuvoso.

Benson et al. (2001) realizaram trabalhos em regiões áridas e semiáridas nos Estados Unidos e demonstraram que as taxas de infiltração de água de chuva em camadas evapotranspirativa e barreiras capilares são significativamente menores do que em climas úmidos.

A utilização de resíduos industriais como materiais alternativos vêm ganhando expressão e isso se deve, especialmente, aos aspectos econômicos e ambientais. Catapetra e Simões (2011) destacam que os resíduos de construção e demolição são atrativos e podem ser utilizados sem nenhuma restrição para a cobertura intermediária de resíduos em aterros, uma vez que os mesmos são compostos, geralmente, de resíduos inertes e solos diversos.

Um fator importante a considerar é a necessidade da instalação adequada da camada de cobertura que leve em consideração um projeto apropriado, de acordo com os materiais a serem utilizados, além de medidas de controle de qualidade requeridas, de forma que se analisem, para essas camadas alternativas, os efeitos dos fatores ambientais ao longo do tempo (ZORNBERG et al., 2003).

1.6.2.1. Barreiras Capilares

As barreiras capilares consistem de uma camada de material fino (argila ou silte argiloso) sobreposta a uma camada de material mais grosso (areia). O contraste de permeabilidade na condição não saturada do material mais grosso cria uma resistência ao

fluxo na interface dos dois materiais (TEIXEIRA, 2008). A camada de solo fino tem a mesma função de uma camada de solo convencional, que é armazenar água até esta ser removida do solo pelos mecanismos de evaporação ou evapotranspiração. A camada de solo de material mais grosseiro é utilizada para que haja uma ruptura hidráulica na interface entre as duas camadas, o qual permite à camada de solo fino reter mais água que o sistema de cobertura monolítica de igual espessura (USEPA, 2003).

As barreiras capilares para uso em aterros sanitários devem ser projetadas de maneira a assegurar certo controle do fluxo de água e/ou oxigênio para dentro do aterro. Assim a barreira funciona como meio de minoração das variações do perfil de sucção do solo, mantendo um perfil de sucção mínimo necessário à diminuição do fluxo de água e/ou oxigênio que entrará em contato com o resíduo (FERNANDES, 2009).

Na Literatura encontram-se dois tipos de barreiras capilares: simples e dupla (KHIRE et al., 1999; KHIRE et al., 2000; CABRAL et al., 2007; SANTOS, 2009). O sistema de cobertura por barreira capilar simples é o caso de uma camada de solo de granulometria fina colocada sobre uma camada de material de granulometria grossa, como, areia ou cascalho, por exemplo. As camadas devem possuir uma inclinação para que o solo de granulometria grossa drene lateralmente a água. Na barreira dupla, na qual o efeito de quebra de capilaridade é duplicado, a camada de material granular superior exerce duas funções importantes: na época de seca ela impede que a água armazenada na camada de material fino migre por capilaridade para a camada de material granular e na época de chuva, essa camada funciona como um dreno, conduzindo lateralmente a água que infiltra na cobertura, prevenindo a saturação da camada de material fino (CABRAL et al., 2007). A Figura 7 ilustra os sistemas de cobertura de barreira capilar simples e dupla.

Figura 7 – Esquema de sistemas de cobertura barreira capilar simples e dupla.



Fernandes (2009) avaliou a emissão fugitiva de biogás em duas diferentes camadas de cobertura (barreira capilar e convencional), instaladas no Aterro Experimental de Belo

Horizonte – MG. A camada de barreira capilar apresentava uma espessura de 30 cm de solo fino sobreposto a 30 cm de resíduos de construção civil e a convencional apresentava uma espessura de 60 cm de solo fino. Ambas as camadas receberam na parte superior mais 5 cm de resíduos de construção civil para proteger o solo fino de formação de trincas. A taxa de emissão média na camada de barreira capilar foi de 73,7 g/m².dia e na camada convencional foi de 176,5 g/m².dia. Através de ensaios de placa de fluxo, concluiu que a camada do tipo barreira capilar mostrou-se mais eficiente na retenção do biogás gerado pela decomposição dos resíduos.

Lopes (2011) investigou a eficiência de três diferentes tipos de camadas de cobertura (convencional, barreira capilar e metanotrófica) instaladas em uma célula experimental do Aterro da Muribeca, situado no município de Jaboatão dos Guararapes – PE e concluiu que a camada de barreira capilar apresentou as menores taxas de emissão de CH₄ para a atmosfera.

Segundo Ubaldo et al. (2007), o dimensionamento do tipo de cobertura barreira capilar é geralmente realizado com base no balanço hídrico, onde uma maior atenção deve ser dada ao fluxo evaporativo do solo, por se tratar de um processo difícil de quantificar, que depende tanto das propriedades do solo quanto das condições climáticas.

1.6.2.2. Coberturas Evapotranspirativas

Camadas evapotranspirativas são sistemas alternativos vegetados com plantas nativas capazes de resistir e sobreviver às condições locais, conforme ilustrado na Figura 8. O controle para a percolação de lixiviado para a base é alcançado, pois a camada evapotranspirativa atua como uma esponja ou reservatório que armazena umidade durante a precipitação e a devolve para a atmosfera através da evapotranspiração ou drenagem lateral (ZORNBERG et al., 2003).

Neste sentido, numa camada de cobertura evapotranspirativa há relevância na escolha da camada de vegetação e do solo. A vegetação está associada com a função de aumentar a evapotranspiração durante o período de crescimento dos vegetais, enquanto a camada de suporte possui a função de armazenar a água durante os períodos de baixa evapotranspiração (MARIANO, 2008).

Projetos de sistemas de cobertura evapotranspirativa são baseados no balanço hídrico de um aterro, o qual inclui capacidade de armazenamento de água do solo, precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e infiltração. Assim, siltes e argilas de baixa plasticidade são os solos mais usados em coberturas evapotranspirativa, porque são capazes de armazenar água ao mesmo tempo em que minimizam a ocorrência de possíveis trincas e rachaduras devido ao ressecamento do solo (ZORNBERG et al., 2003).

O projeto da espessura da camada de solo de granulometria fina deve ser tal que, ajuste a capacidade de armazenamento da cobertura minimizando o volume de água que atinge os resíduos.

De acordo com Joaquim Jr. (2015), as coberturas evapotranspirativa apresentam baixo custo, praticidade, facilidade de manutenção e auto-renovação de sistemas biológicos, além de permanência efetiva por longo período de tempo.

Figura 8 – Esquema de sistema de cobertura evapotranspirativa.



Em Lopes (2011) foram realizados ensaios de placa de fluxo em camada convencional de 0,70 m de solo compactado com e sem vegetação na superfície. Os resultados encontrados mostraram que a área da camada de cobertura sem vegetação apresentou maior variação de fluxo de CH_4 , com valores de 5,1 a 433,9 $g/m^2 \cdot dia$. Já os resultados na área com vegetação apresentou fluxo de CH_4 medido de até 43,9 $g/m^2 \cdot dia$, mostrando que a presença da vegetação foi determinante para a redução das emissões de CH_4 .

1.7. Oxidação de CH_4 em Camadas de Cobertura

Embora a oxidação do metano possa desenvolver-se na atmosfera através de reações fotoquímicas, grande parte é oxidada pelas atividades microbianas, sobretudo nos solos que

constituem os materiais de cobertura (TEIXEIRA, 2008). Essa atividade é exercida pelas bactérias metanotróficas que utilizam o gás metano como única fonte de carbono e energia. O metano consumido pelas bactérias metanotróficas é convertido em água, dióxido de carbono e biomassa celular, como mostra a reação da Equação 3 (TEIXEIRA et al., 2009).



O sistema de cobertura de aterros de RSU funciona como uma barreira biológica (barreira de oxidação passiva) para a minimização das emissões de metano para a atmosfera. Borjesson (2001) estima a redução de 35% da emissão de CH_4 para a atmosfera através do processo de oxidação do metano. Maciel (2003) cita que, em geral, as bactérias metanotróficas consomem cerca de 10% a 20% do CH_4 percolado pelo solo.

A Tabela 12 apresenta algumas taxas de oxidação do CH_4 encontradas na literatura e as profundidades das camadas que contribuem para esse efeito. Nota-se que, com exceção do estudo de Borjesson e Svensson (1997) que verificou as maiores taxas de oxidação entre 50 e 60 centímetros, o maior consumo de CH_4 ocorre nos primeiros 30 centímetros da camada de cobertura.

Tabela 12 – Taxas de oxidação na camada de cobertura.

Referências	Tipo de estudo	Taxas de oxidação (g/m ² .dia)	Máxima oxidação verificada entre
Whalen et al. (1990)	Laboratório	45	0 – 12 cm
Jones e Nedwell (1993)	Campo	0,0003 – 7,21	10 – 32 cm
Kightley et al. (1995)	N.I.	166	N.I.
Czepiel et al. (1996)	Laboratório	1,1 – 70	5 – 10 cm
Borjesson e Svensson (1997)	Laboratório	3,4 – 403	50 – 60 cm
Maurice e Lagerkvist (2002)	Laboratório	7 – 58	< 10 cm

N.I. = não informado

Fonte: MACIEL (2003).

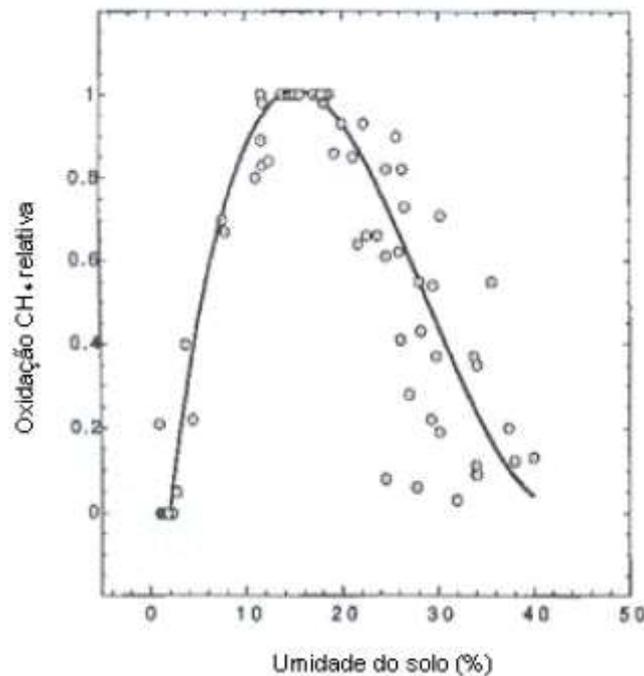
Diversos são os fatores que influenciam as taxas de oxidação do metano como: existência de microrganismos metanotróficos no meio, suprimento de metano e oxigênio, necessidade de adequado suprimento de nutrientes para o crescimento dos microrganismos,

além de teor de umidade e condições ambientais adequados (HUBER-HUMER e LECHNER, 1999).

Segundo Bahr et al. (2006), o crescimento de bactérias metanotróficas é limitado pela disponibilidade de carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S) em alguns casos raros.

Czepiel et al. (1996) cita que a umidade do solo é o principal parâmetro regulador da oxidação do metano, existindo uma faixa ótima de umidade que favorece o desenvolvimento das atividades microbiológicas. A Figura 9 ilustra graficamente a relação da oxidação do CH_4 com a variação da umidade do solo.

Figura 9 – Efeito da umidade do solo na oxidação do CH_4 .



Fonte: CZEPIEL (1996).

A temperatura é um parâmetro importante, tendo em vista que a oxidação do metano é um processo biológico. Da mesma forma que a umidade, existe uma faixa ótima de temperatura que favorece as bactérias metanotróficas. Huber-Humer e Lechner (1999) observaram que diversas bactérias metanotróficas vivem e se multiplicam melhor sob temperaturas variando entre 20°C e 37°C. Christophersen et al. (2001) e Park et al. (2009), em

seus estudos laboratoriais observaram excelentes taxas de oxidação para temperaturas compreendidas entre 25°C e 35°C.

Os microrganismos metanotróficos são tolerantes a variação de pH ente 4 e 9. Porém, o valor ótimo para o seu crescimento está entre 5,5 e 8,5 (CHRISTOPHENSEN et al., 2001).

Substâncias inorgânicas (amônia e nitrato) estimulam ou inibem a oxidação de CH_4 no solo, dependendo das espécies e das concentrações destas substâncias aliadas à concentração de CH_4 e do pH (SCHEUTZ et al., 2009).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Esse capítulo apresentará a descrição do aterro sanitário e do local de estudo, suas características físicas, climáticas, operacionais, os procedimentos adotados, os materiais utilizados nos ensaios de campo e a cronologia dos ensaios realizados. Esta pesquisa foi desenvolvida concomitantemente a outros dois estudos, um que avaliou a infiltração de água pluvial em camadas de cobertura (JOAQUIM Jr, 2015) e o outro que quantificou as taxas de emissões de gases através da camada de cobertura intermediária da célula 1 e no ar atmosférico (BORBA, 2015). Portanto, alguns dados destes estudos foram utilizados na presente pesquisa.

2.1. Introdução

O presente estudo foi realizado no aterro sanitário da Central de Tratamento de Resíduos de Seropédica (CTR Seropédica), localizado no município de Seropédica – RJ. A pesquisa desenvolveu-se em uma área com resíduos já depositados, onde já haviam sido construídas e delimitadas por Joaquim Jr. (2015), células experimentais com camadas de cobertura do tipo convencional, barreira capilar e evapotranspirativa. Essa área foi escolhida pelo fato de não sofrer impactos devido à operação de disposição de resíduos, bem como qualquer movimentação de veículos, caminhões e equipamentos pesados.

2.2. Descrição do Aterro Sanitário - CTR Seropédica

As características do aterro sanitário em estudo já foram apresentadas por Borba (2015). No entanto, para uma breve caracterização do empreendimento, serão descritos a seguir de forma resumida alguns elementos importantes. Os dados foram obtidos através do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) do empreendimento ou fornecidos pela empresa Ciclus, que gerencia o aterro sanitário. Informações mais detalhadas, principalmente sobre o sistema de captação de biogás, não foram concedidos pela empresa responsável.

A Central de Tratamento de Resíduos Sólidos – CTR Seropédica está localizada a 10 Km do centro do município de Seropédica, na Estrada Santa Rosa, no município de Seropédica, Rio de Janeiro. As coordenadas geográficas são S 22°47'13.27" e W 43°45'44.92" (localização do experimento), tendo área útil de aproximadamente 2.226.000 m². A Figura 10 mostra a visão geral do CTR Seropédica.

De acordo com o Plano Diretor do município de Seropédica (Lei n° 328 de 2006) a área do CTR Seropédica está localizada em área rural, onde são permitidas atividades agrícolas, industriais, comerciais e de prestação de serviço. A área apresenta topografia predominantemente plana que favorece a operação do aterro, além de dispor de áreas com disponibilidade natural de solos argilosos que podem ser empregados na cobertura diária.

A CTR Seropédica consiste num sistema de disposição final de resíduos sólidos urbanos, classe II, conforme a classificação definida pela ABNT 10.004 (ABNT, 2004). O projeto considera o aterro sanitário como bioenergético, constituído de estação de tratamento de lixiviado para transformação em água de reuso e estação de captação e tratamento do biogás para geração de energia limpa.

O aterro iniciou as operações em 19 de Abril de 2011, tendo recebido todas as licenças ambientais necessárias para a operação. Atualmente, recebe resíduos dos municípios de Seropédica, Itaguaí e Rio de Janeiro, com média de 10 mil toneladas por dia de resíduos, onde 95% são caracterizados como resíduos sólidos urbanos (CICLUS, 2015).

Figura 10 – Visão geral da CTR Seropédica.



Fonte: Google Earth, em 20 de janeiro de 2016.

O sistema de impermeabilização possui em sua fundação drenos para captar a água do lençol freático, caso venha a se elevar em períodos chuvosos. Acima dos drenos, foi aplicada uma camada de argila compactada de 50 cm, coberta com uma manta de PEAD (polietileno de alta densidade) com 1,5 mm de espessura e uma nova camada de solo para proteção da manta com espessura não inferior a 0,20 m. O aterro é dotado de sistema de drenagem de águas pluviais, de gases e de lixiviado além de um sistema de monitoramento ambiental e geotécnico. (RIMA, 2007).

2.3. Descrição do Local de Estudo

O experimento foi conduzido dentro do chamado sub-aterro 01 da CTR Seropédica. O sistema de cobertura adotado no aterro sanitário é o convencional, composto de uma camada de solo compactado oriundo de uma jazida local, com espessura de 0,50 m sobre os resíduos sólidos dispostos.

A localização das células experimentais dentro do sub-aterro 01, localiza-se em uma área temporariamente inativa do aterro, com altura de resíduos na cota aproximada de 70,0 m. A cota final de projeto para a altura do aterro sanitário é de 125,0 m (CICLUS, 2015).

A Figura 11 destaca em amarelo o perímetro aproximado do sub-aterro 01 da CTR Seropédica e de vermelho a localização das células experimentais.

Figura 11 – Localização do sub-aterro 01 destacando a localização do experimento.

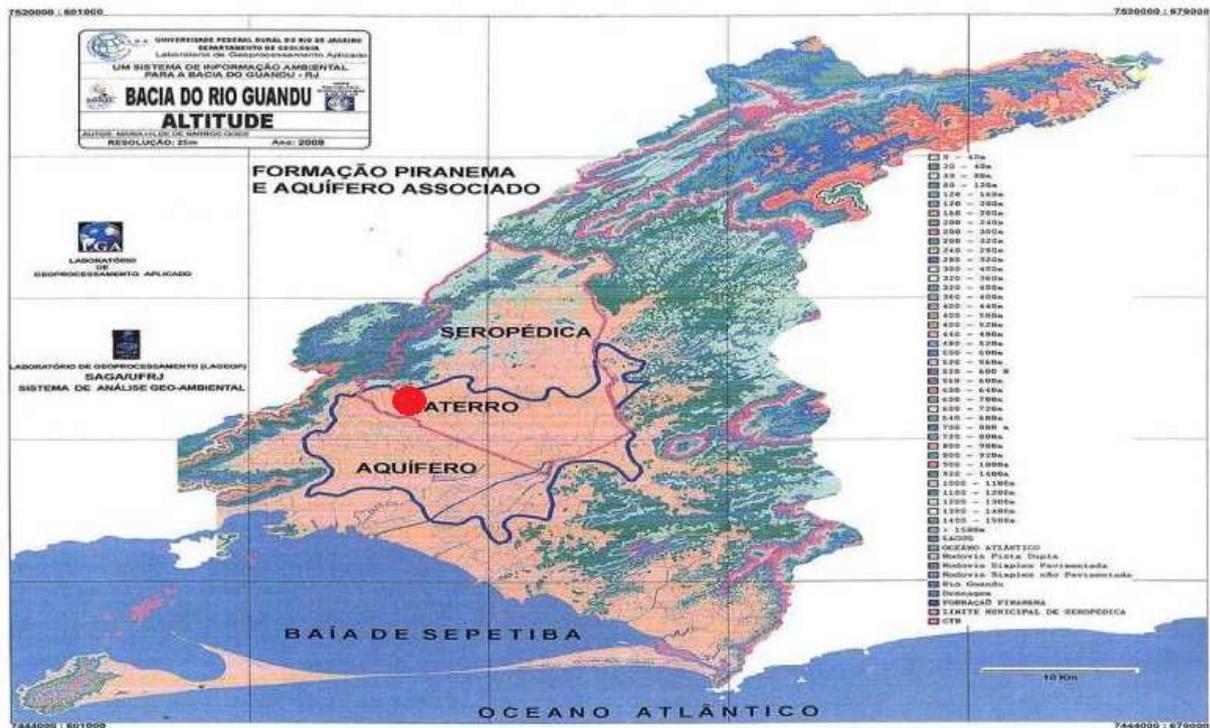


Fonte: Google Earth, em 20 de janeiro de 2016.

2.3.1. Fatores Físicos e Climatológicos

A CTR Seropédica está situada acima do Aquífero Piranema, que faz parte da bacia hidrográfica do rio Guandu. De acordo com o Comitê Guandu (2011) o aquífero possui abrangência territorial de aproximadamente 250 km² com maior concentração na parte centro-sul da bacia, estendendo-se pelos municípios de Seropédica, Itaguaí e Rio de Janeiro (bairro de Santa Cruz), cuja matriz é arenosa, de composição mineralógica simples e predominância de feldspato e quartzo. A Figura 12 ilustra a área de abrangência do Aquífero Piranema delimitada pela curva azul, destacando a localização da CTR Seropédica no círculo vermelho.

Figura 12 – Bacia Hidrográfica do rio Guandu, com destaque para o Aquífero Piranema.



Fonte: JOAQUIM Jr. (2015).

Em relação à geologia local, resumidamente, o perfil típico da área é (do topo para a base):

- Camada de areia fina à média, pouco argilosa, com espessura máxima de 70 cm. A forma de distribuição em área, textura e arranjo sugerem materiais inconsolidados (transportado);

- Camada de areia média, pouco argilosa a argilosa, com espessura variando de 20 cm a 2,20 m. As características dos grãos e forma do depósito sugerem origem aluvionar, possivelmente correlacionada à face inferior da Formação Piranema;

- Material residual – alteração de rocha. Este pacote é composto por areia média e grossa com presença de argila (argilo arenosos). Nota-se variações na coloração, presença de estrutura da rocha original (gnaisse) e de cristais por vezes grosseiros de quartzo e feldspato angulares. (Espessura de 40 cm a 8 m).

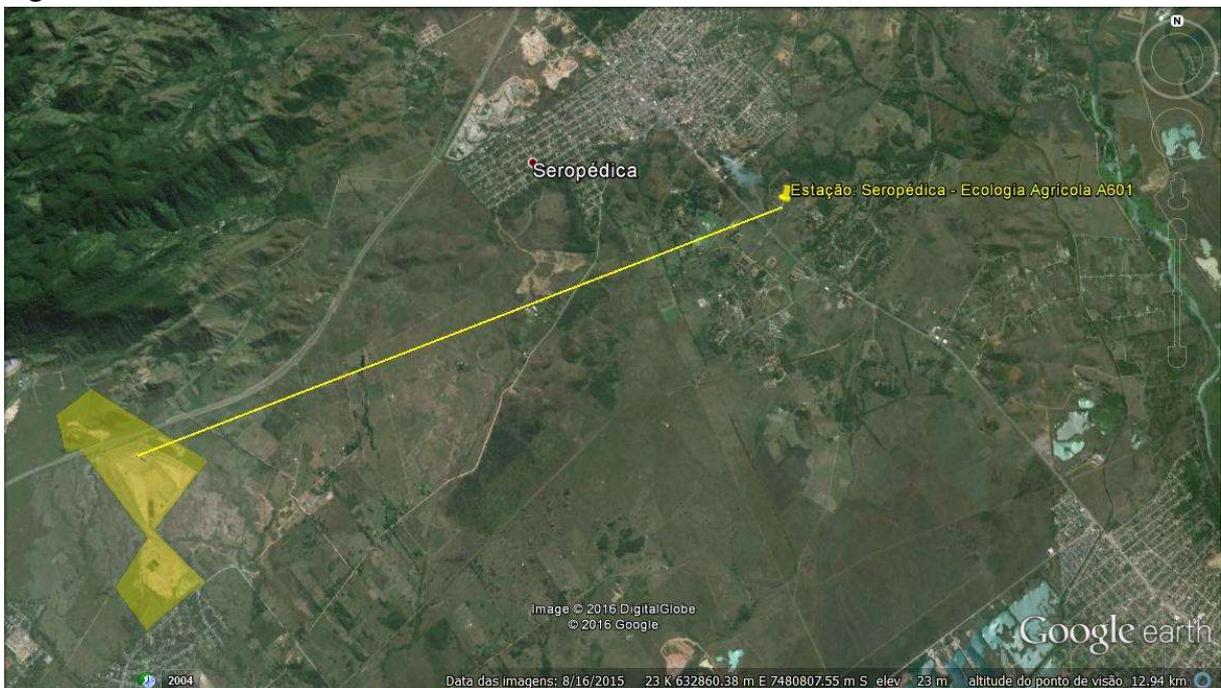
A topografia é predominantemente plana, destacando-se a presença de duas colinas isoladas com, respectivamente, 70 m e 120 m de altitude e declividades médias. A jazida de empréstimo está localizada ao sul da área e é caracterizada por um morrete de encostas

suavemente convexas e topo relativamente plano, com cotas máximas em torno de 50 m (RIMA, 2007).

O clima da região se classifica como subtropical a tropical chuvoso, apresentando inverno mais seco e verão quente, devido a sua posição geográfica, proximidade do mar e densa cobertura vegetal em setores da encosta costeira. Segundo Rocha (2011), no inverno há poucas chuvas, com ocorrência de entradas de frentes frias e no verão podem ser observados os maiores picos de precipitação, podendo estes ser registrados acima de 100 mm/dia.

Os dados meteorológicos foram obtidos a partir da Estação Meteorológica Automática Seropédica-Ecologia Agrícola, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), solicitados no site (<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/mapaEstacoes>). A estação meteorológica tem cota de 34 metros e está situada sob as coordenadas de latitude de 22°48'S e longitude de 43°41'W e a aproximadamente 8,5 km do aterro. A Figura 13 ilustra o posicionamento da estação meteorológica e o seu distanciamento aproximado da CTR Seropédica.

Figura 13 – Distância entre o CTR Seropédica e a estação meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.



Fonte: Google Earth, em 20 de janeiro de 2016.

Nas Figuras 14 a 21 são apresentados graficamente os dados meteorológicos correspondentes aos anos de 2012, 2013 e 2014 da estação meteorológica automática Seropédica-Ecologia Agrícola do INMET. Os dados correspondentes ao ano de 2015 também foram solicitados, porém o INMET não forneceu os mesmos na primeira solicitação feita. Posteriormente, em uma nova solicitação ao INMET, obtiveram-se os dados de precipitação para o ano de 2015 e 2016 (janeiro a abril).

A temperatura encontra-se majoritariamente acima dos 18°C durante todos os meses do ano, apresentando uma temperatura média anual de 23,8°C. Tal fato é justificado pela alta pressão promovida pelo deslocamento das massas de ar. As Figuras 14, 15 e 16 apresentam os dados de temperatura média do ar e as médias das temperaturas máximas e mínimas respectivamente. As maiores temperaturas foram registradas entre os meses de setembro a março.

Com relação à umidade relativa do ar, pode-se averiguar através da Figura 17 que a média anual encontra-se na faixa de 80%.

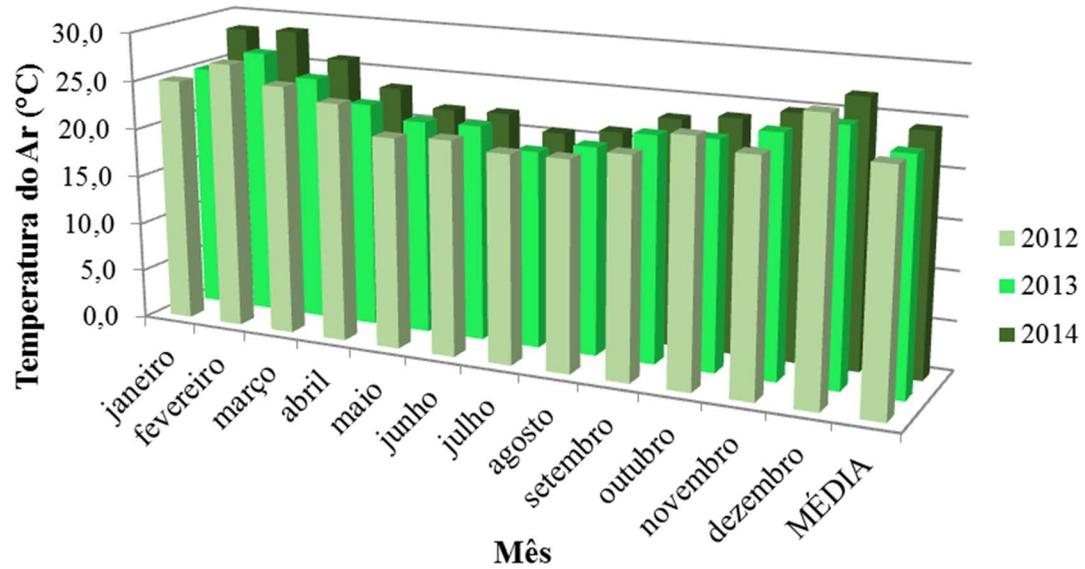
A pressão atmosférica apresenta maiores médias no inverno, apresentando uma variação entre 1014 a 1019 hPa, e menores no verão com variações entre 1006 a 1010 hPa, como pode ser observado na Figura 18.

A velocidade do vento presente na região, se caracteriza por uma média anual de aproximadamente 2 m/s, conforme pode ser visto na Figura 19. Neste item meteorológico há que observar a ocorrência frequente de rajadas de vento, as quais apresentam direção de nordeste para sudoeste na maioria dos casos.

Na Figura 20 observa-se que os níveis de radiação solar apresentam valores maiores entre os meses de setembro a março, comportamento similar aos encontrados nas temperaturas.

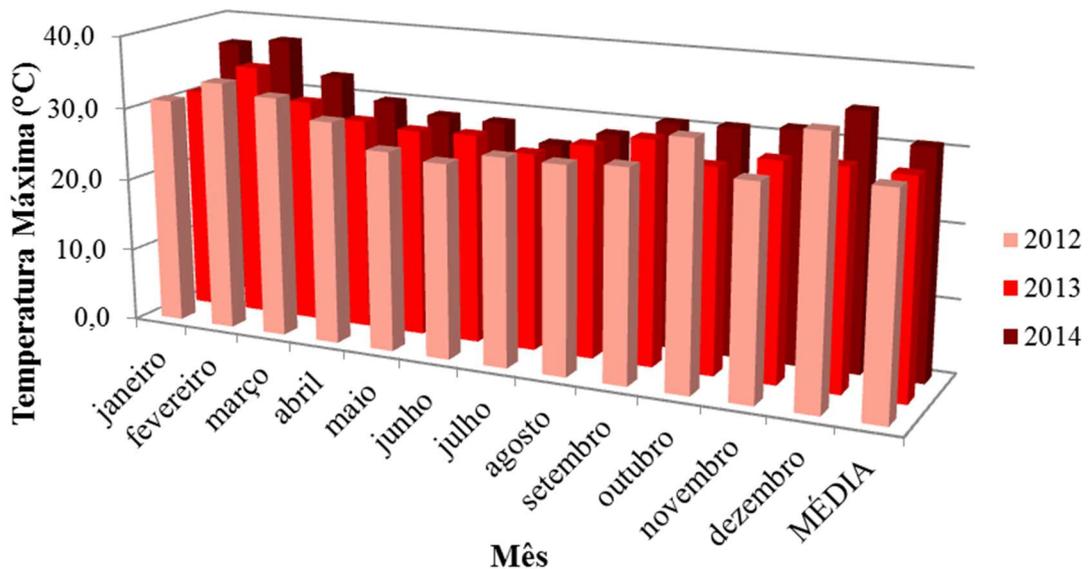
A precipitação média na bacia hidrográfica varia entre 1.000 mm/ano e 2.230 mm/ano (JOAQUIM Jr., 2015). O período de precipitação pluviométrica máxima vai de novembro a março e o de precipitação pluviométrica mínima, de abril a outubro, conforme observado na Figura 21. O mês mais seco é agosto, com uma precipitação média de 23 mm/ano e o mês mais chuvoso é janeiro, com precipitação média de 241 mm/ano. Os dados obtidos da Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola, mostra que a precipitação anual varia entre 930 mm/ano a 1.475 mm/ano.

Figura 14 – Temperatura média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.



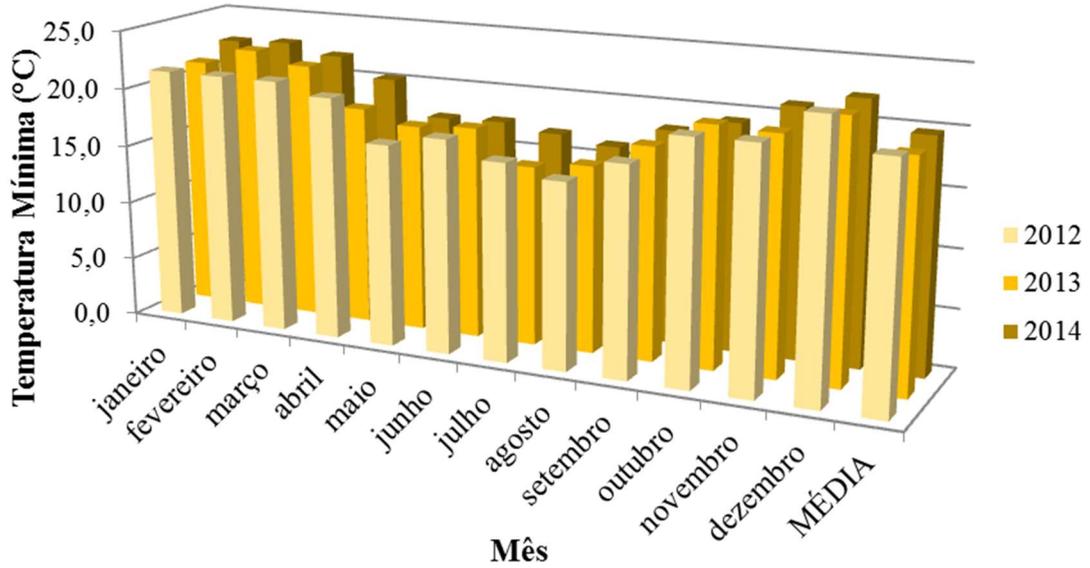
Fonte: INMET (2015).

Figura 15 – Temperatura Máxima média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.



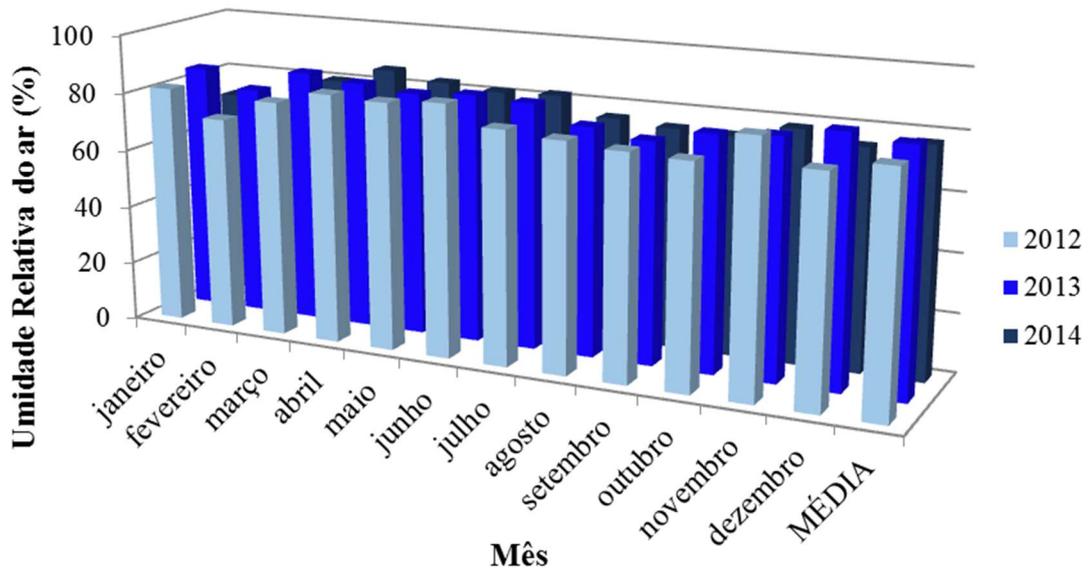
Fonte: INMET (2015).

Figura 16 – Temperatura Mínima média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.



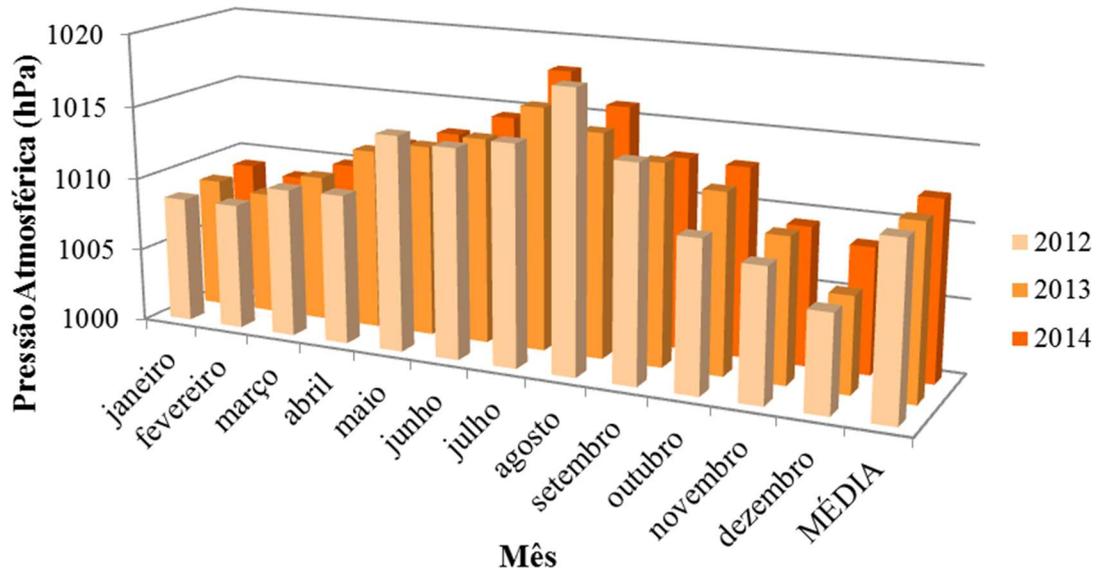
Fonte: INMET (2015).

Figura 17 – Umidade Relativa média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.



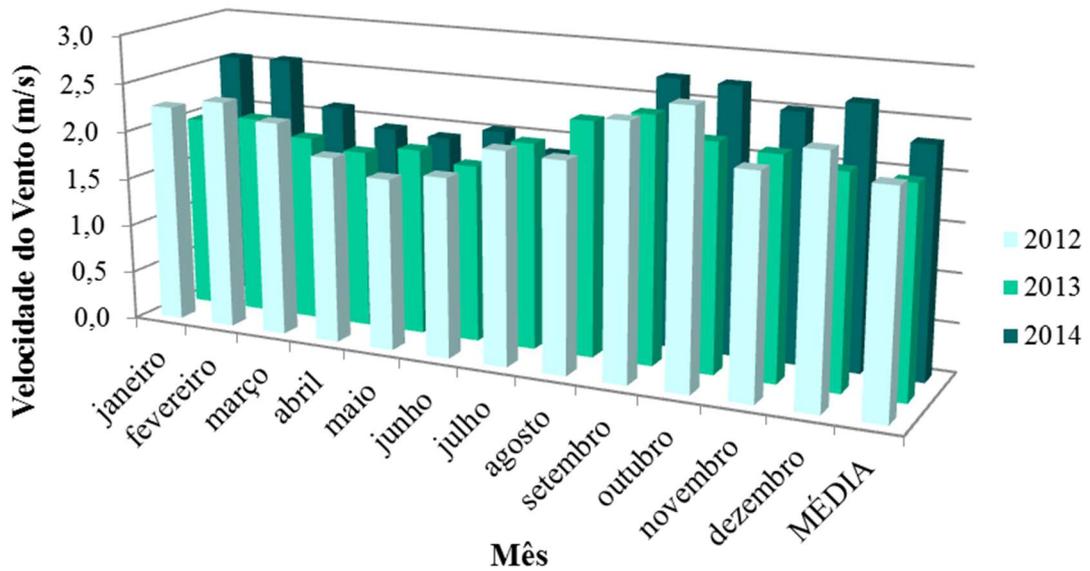
Fonte: INMET (2015).

Figura 18 – Pressão Atmosférica média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.



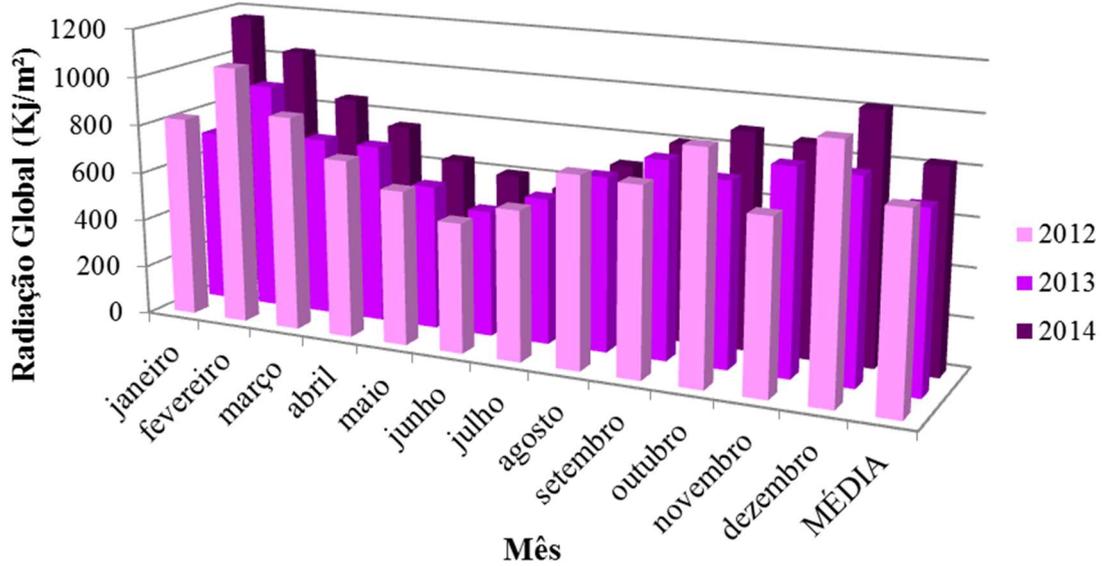
Fonte: INMET (2015).

Figura 19 – Velocidade do Vento média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.



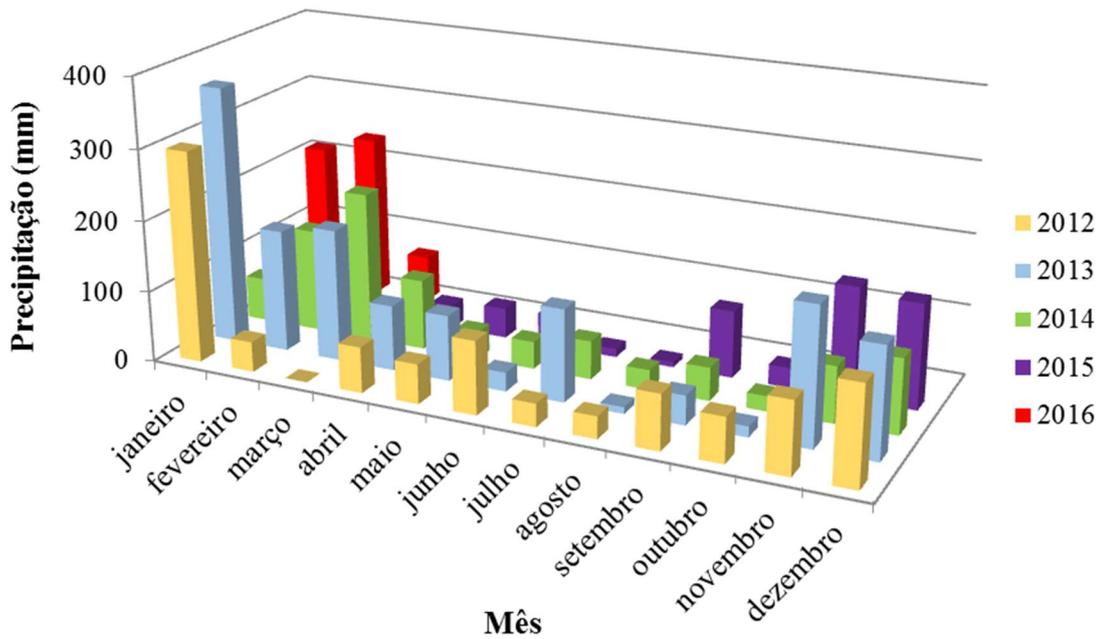
Fonte: INMET (2015).

Figura 20 – Radiação Global média mensal para os anos de 2012 a 2014 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.



Fonte: INMET (2015).

Figura 21 – Precipitação mensal de janeiro de 2012 a abril de 2016 na Estação Meteorológica Seropédica-Ecologia Agrícola.



Fonte: INMET (2016).

2.3.2. Sistema de Extração de Biogás

O sistema de extração de biogás presente no sub-aterro 01 da CTR Seropédica é composto de 80 poços de extração. Destes, 35 estão com sistema de extração ativa e 45 com extração passiva (BORBA, 2015). Os poços de extração passiva estão localizados em área que receberá futuramente novos resíduos sólidos, conforme o planejamento da empresa que gerencia o aterro sanitário. Portanto, os poços de extração passiva ainda não foram transformados em poços de captação ativa de biogás.

A Figura 22 apresenta a localização aproximada dos poços de captação de biogás, onde os poços de extração passiva estão representados pela cor vermelha e os de extração ativa pela cor verde (BORBA, 2015). A localização do experimento é destacada pelo polígono amarelo. Ressalta-se que o experimento está localizado em área com presença de poços de captação passiva de biogás. O retângulo em preto na figura refere-se a uma lagoa de lixiviado.

Figura 22 – Localização dos poços de captação de biogás passivos (vermelho) e ativos (verde) no sub-aterro 01 da CTR Seropédica.

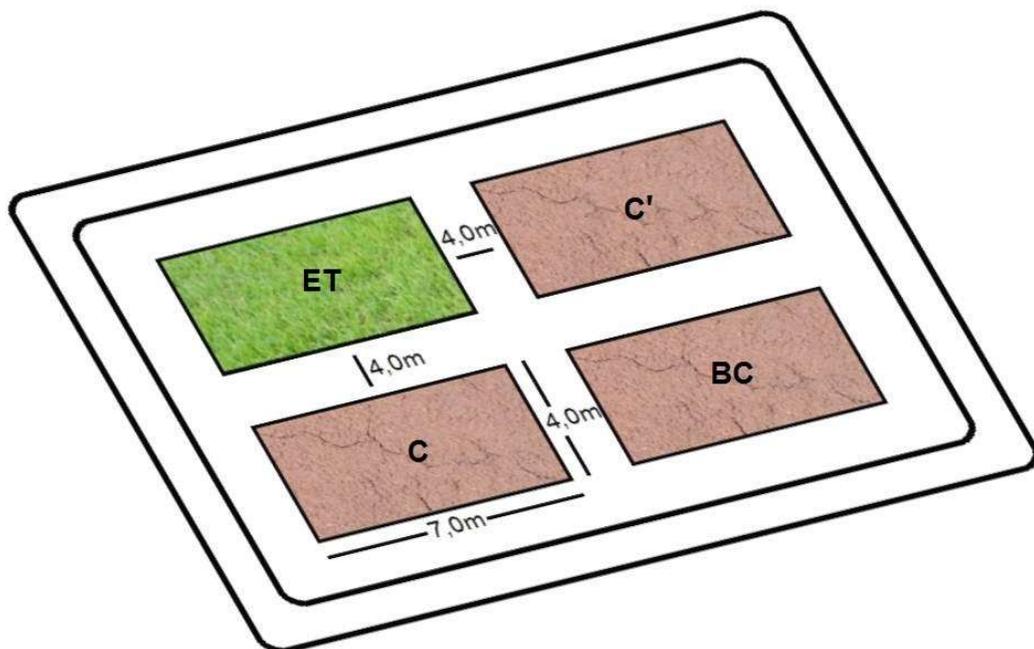


Fonte: BORBA, 2015, p. 71.

2.4. Descrição do Experimento de Campo

O experimento consiste de 4 (quatro) células experimentais construídas por Joaquim Jr. (2015) no sub-aterro 01 da CTR Seropédica. As células experimentais foram construídas com tamanhos reduzidos, em virtude das limitações impostas pelo lugar concedido e condições operacionais do aterro. Cada célula foi construída com as dimensões de 4,0 m x 7,0 m, totalizando 28,0 m² de área, possuindo um espaçamento de 4,0 m entre si. A Figura 23 apresenta o desenho esquemático da disposição das 4 (quatro) células experimentais no sub-aterro 01. A altura de resíduos dispostas nesta área era de aproximadamente 70,0 m.

Figura 23 – Esquema (sem escala) da disposição das quatro células experimentais.



Legenda: C e C' = convencional; BC = barreira capilar; ET = evapotranspirativa

As descrições das configurações do projeto das camadas de cobertura são listadas a seguir:

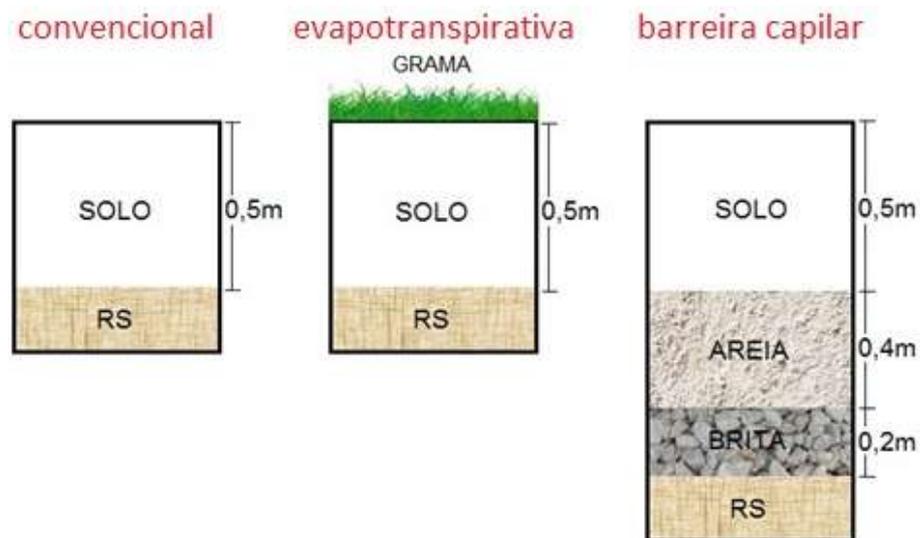
- Camada Convencional (C): camada compactada de 0,50 m de solo da jazida (A) local (denominado solo "A");

- Camada Convencional (C’): camada compactada de 0,50 m de solo da jazida (B) local (denominado solo “B”);
- Barreira Capilar (BC): camada de 0,20 m de brita, sobreposta por uma manta geotêxtil não tecido de 400 g/m², seguida de uma camada de 0,40 m de areia e por fim uma camada de 0,50 m de solo da jazida (A) local;
- Evapotranspirativa (ET): camada de 0,50 m de solo da jazida (A) local, seguida de uma cobertura vegetal de grama do tipo “esmeralda”.

Segundo a Ciclus, os solos das jazidas (A) e (B) possuem destinações distintas no aterro sanitário. O solo “A” é geralmente empregado nas coberturas intermediárias, enquanto que o solo “B” é destinado à camada de cobertura final. Em função da aplicação diferenciada, ambos os solos foram estudados em relação às emissões de biogás.

A Figura 24 ilustra esquematicamente as configurações das coberturas que compõem o experimento. Como as configurações da camada convencional (C) e da camada convencional (C’) são similares, representaram-se as mesmas em um único perfil esquemático.

Figura 24 – Esquema do perfil das camadas de cobertura do experimento.



2.4.1. Caracterização Geotécnica dos Solos Empregados nas Camadas de Cobertura

O aterro foi projetado para que o lançamento dos resíduos nas células atendam procedimentos básicos, nos quais as células apresentem altura de 4,0 m, dispostas em taludes com inclinação máxima indicada em projeto e cobertura diária com espessura mínima de 0,2 m (RIMA, 2007).

Os resultados obtidos em laboratório e *in situ* para caracterizar os solos das camadas de cobertura na pesquisa de Joaquim Jr. (2015) serão utilizados na presente pesquisa, visto que os solos empregados foram os mesmos.

A Tabela 13 apresenta a caracterização geotécnica do solo da jazida (A) que foi empregado nas camadas de cobertura das células experimentais C, BC e ET. Nesta pesquisa, convencionou-se que este solo seria denominado de solo “A”. Este solo apresentou 60% de teor de areia, 30% de silte e 10% de argila, sendo classificado como areia siltosa (SM), segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

Tabela 13 – Caracterização do solo “A” empregado nas camadas de cobertura das células experimentais C, BC e ET.

Parâmetros	Resultados
Granulometria	
Argila (%)	10,0
Silte (%)	30,0
Areia Fina (%)	14,0
Areia Média (%)	30,0
Areia Grossa (%)	16,0
Pedregulho (%)	0,0
Limites de Atterberg	
Limite de Liquidez (%)	56,5
Limite de Plasticidade (%)	34,4
Índice de Plasticidade (%)	22,1
Peso específica dos grãos (kN/m³)	27,5

Fonte: JOAQUIM Jr., 2015, p. 115.

A Tabela 14 apresenta a caracterização geotécnica do solo da jazida (B) que foi empregado na camada de cobertura da célula experimental C’, sendo denominado de solo

“B”. Este solo apresentou 50% de teor de areia, um pouco menor do que o solo “A” e 8% de teor de argila, similar ao solo “A”. Destaca-se como diferença o maior teor de silte do solo “B” em comparação com o solo “A”, além da presença de pedregulho. Os resultados granulométricos obtidos para os teores de argila, silte e areia fizeram com que o solo “B” fosse classificado como areia siltosa (SM), assim como o solo “A”.

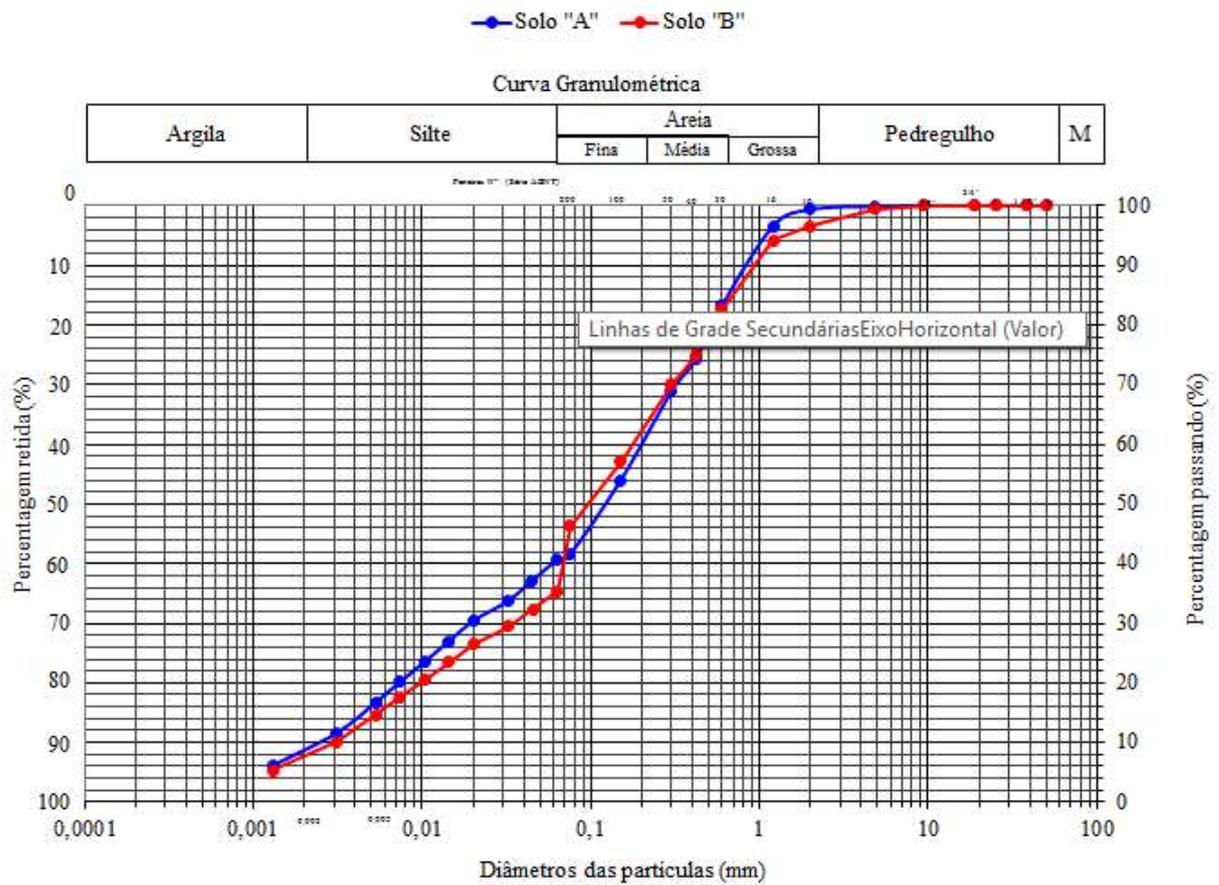
A Figura 25 apresenta a curvas granulométricas dos solos “A” e “B” onde se observa a similaridade dos resultados obtidos.

Tabela 14 – Caracterização do solo “B” empregado na camada de cobertura da célula experimental C’.

Parâmetros	Resultados
Granulometria	
Argila (%)	8,0
Silte (%)	38,0
Areia Fina (%)	12,0
Areia Média (%)	24,0
Areia Grossa (%)	14,0
Pedregulho (%)	4,0
Limites de Atterberg	
Limite de Liquidez (%)	49,7
Limite de Plasticidade (%)	27,8
Índice de Plasticidade (%)	21,8
Massa específica dos grãos (kN/m³)	27,4

Fonte: JOAQUIM Jr., 2015, p. 117.

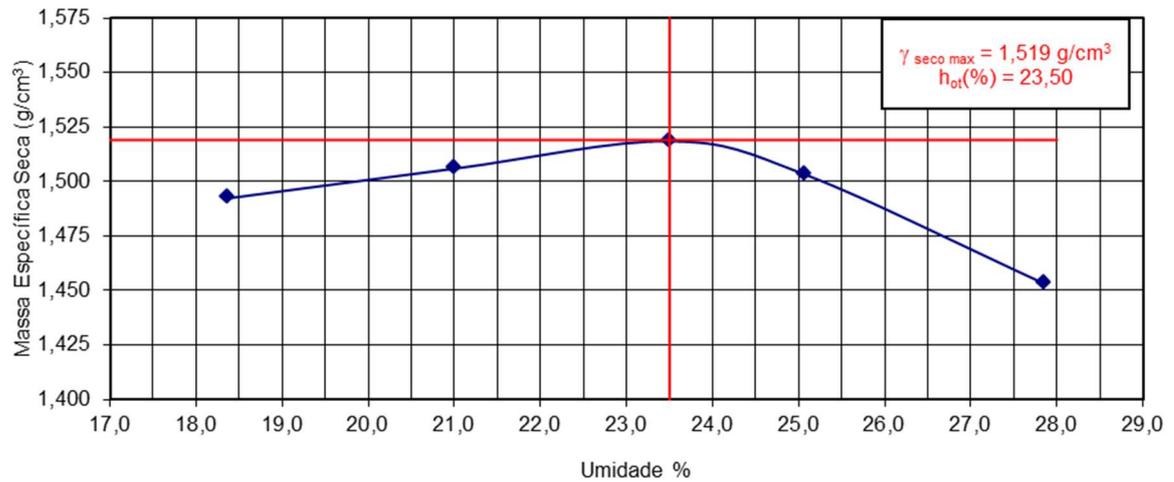
Figura 25 – Curvas granulométricas dos solos “A” e “B” empregado nas camadas de cobertura das células experimentais.



Fonte: Adaptado de JOAQUIM Jr., 2015.

Os resultados do ensaio de Proctor Normal indicaram massa específica seca de 1,519 g/cm³ e uma umidade ótima de 23,5% para o solo “A”, conforme apresentado na Figura 26.

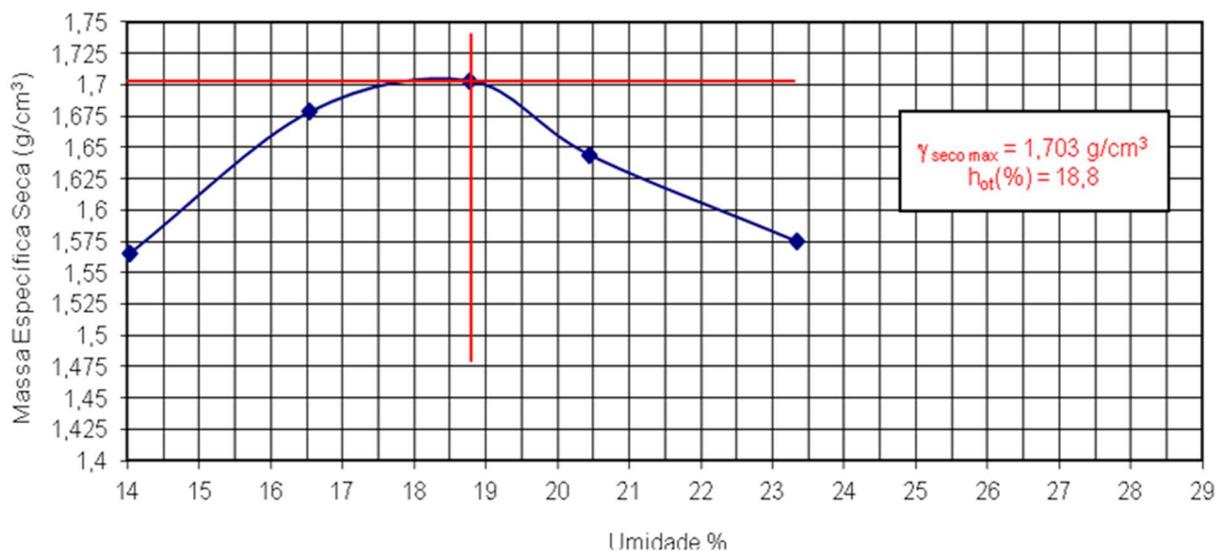
Figura 26 – Resultados dos ensaios de compactação do solo “A” empregado nas camadas de cobertura das células experimentais C, BC e ET.



Fonte: JOAQUIM Jr., 2015, p. 116.

A Figura 27 apresenta os resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo “B”. Os resultados indicaram massa específica seca de $1,703\ \text{g/cm}^3$ e uma umidade ótima de 18,8%.

Figura 27 – Resultados do ensaio de compactação do solo “B” empregado na camada de cobertura da célula experimental C’.



Fonte: JOAQUIM Jr., 2015, p. 118.

Os resultados apresentados demonstram que os solos são muito similares em termos de composição granulométrica, tendo o diferencial do solo “B” ter a presença de pedregulho. Similar conclusão se dá em relação aos limites de consistência, com valores muito próximos, e a massa específica dos grãos, de valor idêntico em ambos os solos. São tipicamente solos residuais de gnaiss.

Porém, esta tendência não se repetiu com relação ao ensaio de compactação, pois os resultados levam a uma diferença de comportamento, conforme pode ser constatado nas Figuras 26 e 27, observando-se diferenças nas faixas de umidade, na umidade ótima e na massa específica seca máxima. A presença de pedregulho (4%) conferiu uma massa específica maior com teor de umidade ótima menor, típico de material granular. Desta forma, a compactação foi mais eficaz no solo “B”, visto que este solo possui características de compactação mais satisfatória em relação ao solo “A”, conforme pode ser observado na Figura 27.

Os resultados dos ensaios de campo realizados por Joaquim Jr. (2015) para a determinação da massa específica aparente úmida em campo e grau de compactação do solo empregado nas células experimentais são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados do ensaio de massa específica (*in situ* e laboratório) e grau de compactação do solo nas camadas C, C’, BC e ET.

Célula experimental	C	C’	BC	ET
Massa específica úmida (campo) (g/cm³)	1,512	1,636	1,428	1,211
Umidade %	8,1	8,9	9,9	10,5
Massa específica seca (campo) (g/cm³)	1,399	1,502	1,321	1,096
Massa específica seca máxima (laboratório) (g/cm³)	1,519	1,703	1,519	1,519
Grau de compactação %	92,00	88,2	86,9	72,2

Fonte: Adaptado de JOAQUIM Jr, 2015, p. 118.

O grau de compactação foi determinado pela relação (em percentual) entre a massa específica seca determinada no campo e a massa específica seca máxima definida em laboratório.

Os resultados dos graus de compactação (Tabela 15) apresentaram valores abaixo de 90%, exceto para a célula C, camada convencional com solo “A”. Segundo Mariano (2008), valores de grau de compactação abaixo de 90% sugere erro no controle de compactação, indicando que em geral este solo foi compactado no ramo seco da curva de compactação, aumentando sua permeabilidade ao gás.

A célula experimental com camada de cobertura do tipo convencional (C') tinha sido construída recentemente na época do ensaio de massa específica *in situ* com maior grau de compactação (88,2%) com o solo “B”, enquanto que as camadas de cobertura alternativas (barreira capilar e evapotranspirativa) haviam sido implantadas com grau de compactação menor, sendo de 86,9% e 72,2% respectivamente. Portanto, havia indicação de vantagens na utilização do solo “B”.

2.4.2. Parâmetros Hidráulicos dos Solos Empregados nas Camadas de Cobertura

Joaquim Jr. (2015) também pesquisou a condutividade hidráulica do solo saturado (k_{sat}) em laboratório, realizado através do método de carga decrescente. Os resultados da camada convencional com solo “A” apresentaram um valor de $4,84 \times 10^{-6}$ m/s, com solo retirado no início do experimento, e valor de $1,21 \times 10^{-5}$ m/s, em amostra retirada depois de decorrido um ano de monitoramento. A camada de barreira capilar apresentou inicialmente um valor de $6,35 \times 10^{-7}$ m/s e passou para $4,12 \times 10^{-6}$ m/s após um ano de monitoramento (JOAQUIM Jr., 2015 e JOAQUIM Jr. et al., 2015). A ordem de grandeza dos valores encontrados corresponde a valores típicos de areias argilosas e siltosas não compactadas. No entanto, são valores elevados para camada de cobertura compactada. Observa-se ainda, que a exposição ao tempo durante um ano elevou em torno de uma ordem de grandeza o valor da permeabilidade. Vale ressaltar que neste período o solo “B” ainda não havia sido empregado em uma das camadas convencionais do presente estudo.

Posteriormente, nova pesquisa foi realizada para a determinação dos parâmetros hidráulicos do solo “A” e “B”. Com relação aos resultados relativos ao solo “B” (célula experimental C'), a condutividade hidráulica apresentou um resultado de $7,90 \times 10^{-6}$ m/s, não representando melhoria em relação ao solo “A” que apresentou resultados de $2,24 \times 10^{-6}$ m/s

para a camada convencional (C), $2,87 \times 10^{-6}$ m/s para a barreira capilar e $4,23 \times 10^{-6}$ m/s para a evapotranspirativa. Os resultados confirmam a similaridade dos solos e não justifica as destinações distintas dadas aos solos dentro do aterro sanitário (JOAQUIM Jr., 2015).

Foi determinada também a permeabilidade saturada in situ, após um ano da instalação da camada, utilizando o método do permeâmetro de carga constante modelo IAC, resultando em um valor de $2,97 \times 10^{-5}$ m/s para a camada convencional e barreira capilar com solo “A” e de $2,78 \times 10^{-5}$ m/s para a camada evapotranspirativa também com o solo “A” (JOAQUIM Jr., 2015).

Os resultados obtidos indicam que as características dos solos são impróprias para o uso em camadas de cobertura de aterros sanitários, em virtude do percentual elevado de areia, conseqüentemente a condutividade hidráulica alta. Vale ressaltar que estas camadas são intermediárias no CTR Seropédica. Neste trabalho, não foi determinada a permeabilidade ao ar.

2.5. Investigações de Campo

As investigações de campo tiveram o objetivo de estimar as concentrações dos gases metano, dióxido de carbono e oxigênio que são liberados para a atmosfera através das camadas de cobertura das células experimentais (convencional, barreira capilar e evapotranspirativa) no aterro sanitário de Seropédica – CTR Seropédica.

2.5.1. Equipamentos Utilizados nas Investigações de Campo

Para a realização das investigações de campo foram utilizados equipamentos que fornecessem dados referentes à concentração, temperatura e pressão do biogás liberado para a atmosfera.

2.5.1.1. Placas de Fluxo

Nesta pesquisa foram utilizadas 2 (duas) placas de fluxo estática para a determinação das concentrações dos gases nos ensaios realizados nas células experimentais. Uma das placas utilizadas é semelhante àquela descrita por Maciel (2003) e a mesma utilizada por Oliveira (2013), com poucas adaptações (diminuição da profundidade de cravação de 0,10 m para 0,03 m), com o objetivo de tornar o processo de cravação mais acelerado, evitando maiores perturbações na área de investigação. Trata-se de uma placa com dimensões de 0,16 m² (0,4 m x 0,4 m) de área e 8,3 L de volume (Figura 28), sendo construída com chapas de aço galvanizado de 2 mm de espessura e topo em acrílico cristal com 8 mm de espessura, fixado na parte metálica por 4 parafusos em cada extremidade e vedado com espuma de poliuretano de alta densidade. No topo da placa, existem duas conexões de saída (tipo encaixe rápido) onde, por meio de mangueiras flexíveis de silicone, são conectados os equipamentos de medição de gases e de pressão. A placa também possui entrada para o termopar do termômetro para a medição da temperatura interna.

A outra placa utilizada nos ensaios possui dimensões de 1 m² (1 m x 1 m) de área e 50,0 L de volume (Figura 29). A placa foi construída toda em aço inox. No topo da placa, existem duas conexões de saída, uma com diâmetro externo de 7,7 mm e outro com diâmetro externo de 4,5 mm, onde são conectados os equipamentos de medição de gases e de pressão através de mangueiras flexíveis de silicone. A placa também possui um orifício de diâmetro de 2 mm para a inserção do termopar do termômetro visando a medição da temperatura interna da placa.

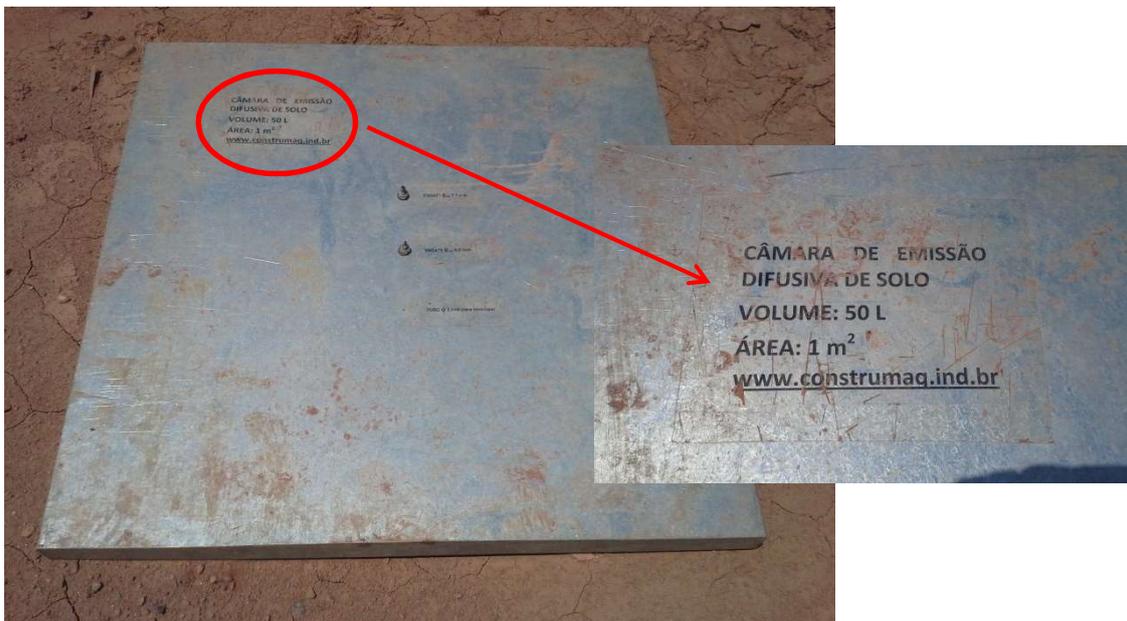
No início da pesquisa a única placa de fluxo existente era a menor, porém procurou-se obter uma nova placa de fluxo que fosse capaz de abranger uma área maior e, que assim pudesse recobrir fissuras mais extensas presentes nas camadas de cobertura. Também se buscou uma maior representatividade nos resultados obtidos.

Figura 28 – Placa de Fluxo de 0,16 m² de área e 8,3 L de volume.



Fonte: OLIVEIRA, 2013, p. 57.

Figura 29 – Placa de fluxo de 1 m² de área e 50,0 L de volume.



2.5.1.2. Detector de Gases

Para as determinações das concentrações dos gases nas camadas de cobertura foi utilizado o detector portátil Dräger X-am 7000 da marca Dräger, modelo X-am 7000 (Figura 30). O equipamento detecta simultaneamente e de forma contínua até 5 (cinco) gases: (CH_4 , CO_2 , CO , H_2S e O_2).

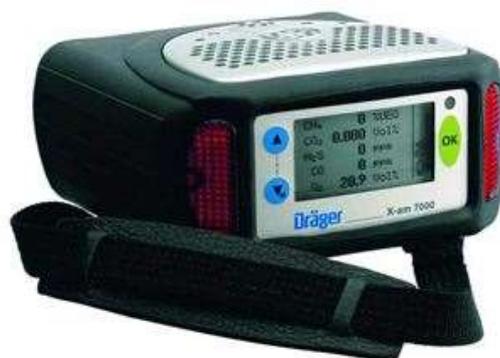
De acordo com a Dräger o equipamento possui 5 (cinco) sensores dentre os quais, 3 (três) são eletroquímicos e 2 (dois) são catalíticos. A bomba de alta potência retira amostras de gases através de uma mangueira que é acoplada ao equipamento. Um grande display possibilita a fácil identificação dos valores medidos em campo. As faixas de leitura e limites de quantificação de cada gás que o equipamento mensura são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Dados do detector de gases utilizado nos ensaios de campo.

Gases	Faixa de medição	Limite de quantificação	Faixa de erro
CH₄	0 – 100%	0,1 %	± 2,0%
CO₂	0 – 100%	0,1 %	± 5,0%
O₂	0 – 25%	0,1 %	± 5,0%
H₂S	0 – 500 ppm	0,1 %	± 1,0%

O dispositivo ainda possui um alarme sonoro e um alarme visual brilhante integrado. A carga da bateria, os níveis dos gases e vapores e níveis TWA (média ponderada do nível de pressão sonora para uma jornada de 08 horas) e STEL (medida do total inalado, através de um curto período, normalmente 15 minutos) são monitorados continuamente e farão soar os alarmes caso necessário.

Figura 30 – Detector portátil Dräger X-am 7000.



Fonte: Dräger (2015).

2.5.1.3. Manômetro

O manômetro digital portátil Dwyer (Figura 31) é um equipamento que está propício a medir gases às baixas pressões, que são encontradas em camadas de cobertura de aterros sanitários. O equipamento possui uma faixa de leitura de 0 kPa a 10 kPa. O aparelho dispõe de 9 unidades de medições e na função memória permite o armazenamento de até 40 leituras de pressões.

Figura 31 –
Manômetro
digital portátil
Dwyer.



Fonte: Dwyer
(2015).

2.5.1.4. Termômetro

O termômetro digital portátil modelo APPA Mt-455 (Figura 32) de sensibilidade de 0,1°C, foi utilizado para as medições de temperatura interna e externa durante os ensaios de placa de fluxo. O terminal de entrada do aparelho é para termopar tipo K e a faixa de medição varia de -200°C a 1.372°C.

Figura 32 –
Termômetro
digital portátil
modelo APPA
Mt-455.



Fonte: Minipa
(2015).

2.5.1.5. Barômetro

O barômetro digital portátil Lufft modelo 2120.00 C300 (Figura 33) com faixa de medição de 750 hPa a 1100 hPa, possui precisão de $\pm 0,5$ hPa e resolução de 0,1. O equipamento foi utilizado para medir a pressão atmosférica.

Figura 33 – Barômetro digital portátil Lufft.



2.6. Metodologia - Placa de Fluxo

As determinações dos fluxos dos gases CH_4 e CO_2 através das camadas de cobertura das células experimentais presentes na CTR Seropédica foram realizadas com o uso da metodologia descrita e desenvolvida por Maciel (2003). Outros autores como Mariano (2008), Fernandes (2009), Lopes (2011) e Oliveira (2013) também fizeram uso da mesma metodologia. A metodologia consiste na cravação da placa de fluxo no solo de cobertura para posterior medição da concentração dos gases com a utilização do equipamento Dräger X-am 7000, com medições de pressão e temperaturas interna e externa ao longo do tempo do ensaio.

A escolha inicial para a instalação da placa de fluxo foi baseado em locais providos de rachaduras e fendas (fissuras) na área das células experimentais, onde o escape do gás é preferencial. Na Figura 34 são exemplificadas as diferentes imperfeições encontradas nas camadas de cobertura investigadas.

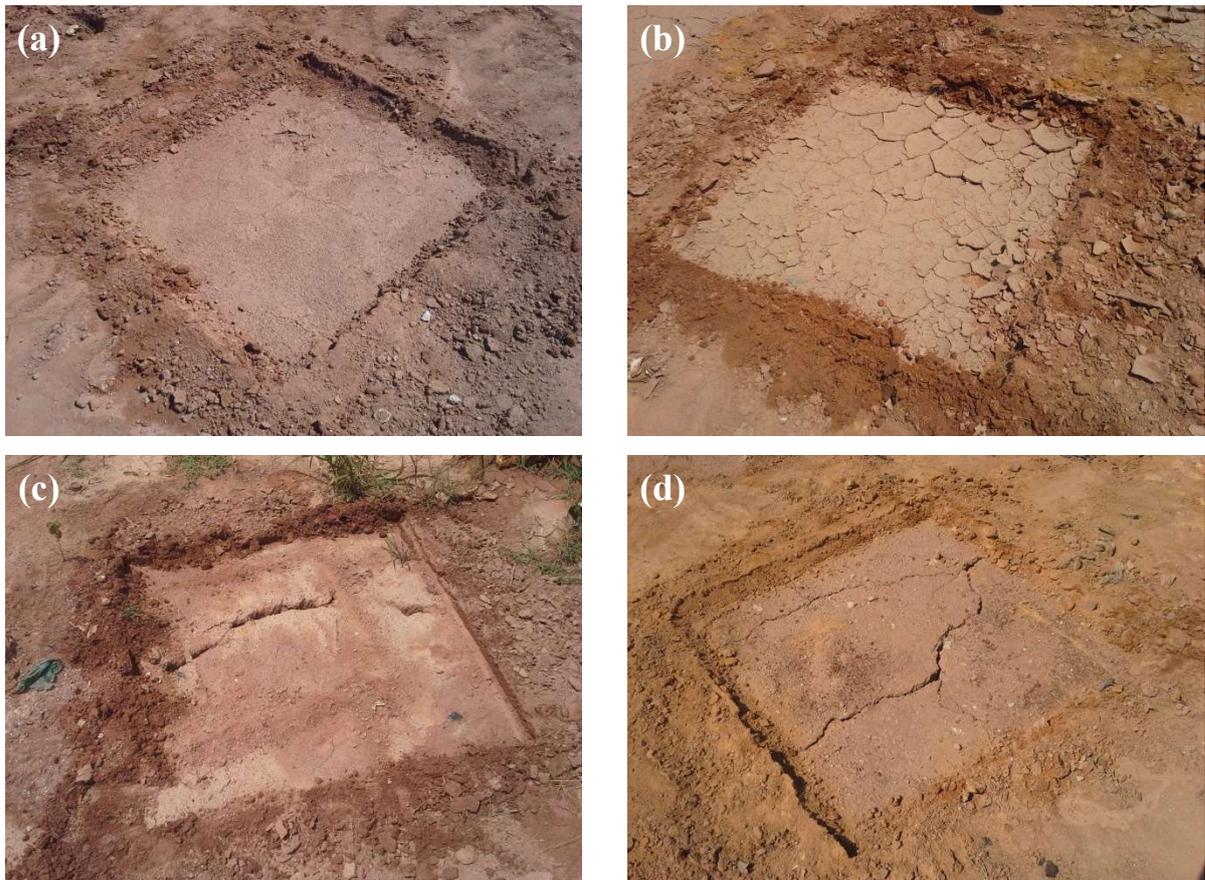
A instalação da placa de fluxo e dos equipamentos de leitura para a realização dos ensaios na área de estudo ocorreu segundo a cronologia a seguir:

- Análise da área de estudo para a localização de rachaduras e fendas;
- Delimitação do perímetro da placa de fluxo no solo de cobertura;
- Cravação da placa de fluxo com o auxílio de pá e enxada, selando as extremidades com o solo de cobertura do aterro e água, evitando o escape dos gases para a

atmosfera. Cabe ressaltar que especificamente na placa de 1 m² de área e 50,0 L de volume, foi necessário o cobrimento da mesma com solo para evitar o aquecimento pelo sol, uma vez que é constituída de aço inox;

- Instalação dos equipamentos de leitura de gases, temperatura e pressão com a utilização de mangueiras de silicone e polietileno assim que o processo de cravação estivesse concluído.

Figura 34 – Exemplos de imperfeições nas camadas de cobertura.



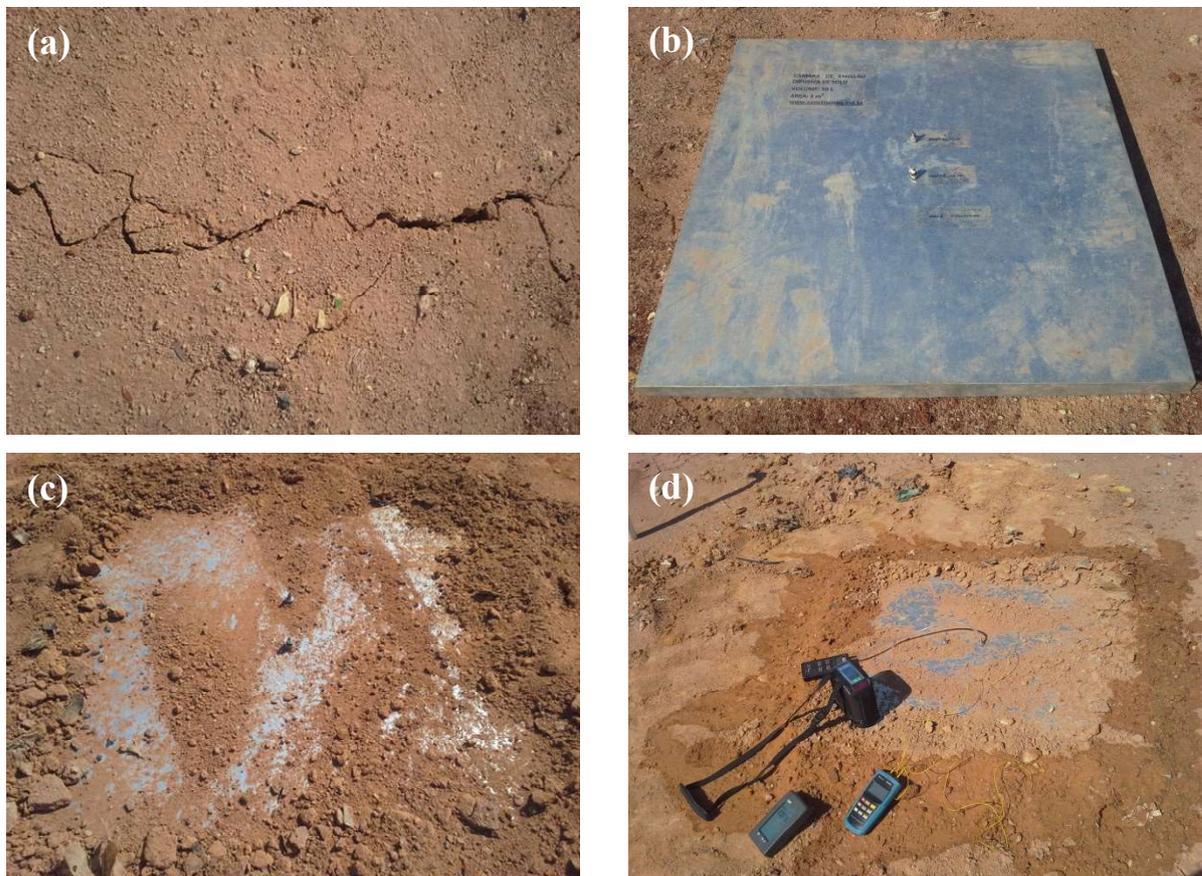
Legenda: (a) – sem fissura; (b) – rachaduras superficiais; (c) e (d) – fissuras maiores (fendas).

A leitura da concentração dos gases na placa de fluxo estática iniciou-se logo após o término do acoplamento dos equipamentos e este foi considerado o instante inicial de cada ensaio realizado. A partir deste instante, realizam-se periodicamente as leituras envolvendo medições na placa de fluxo. O intervalo das leituras foi de 5 minutos para a placa menor (0,16 m² de área e 8,3 L de volume). Já para a placa maior (1 m² de área e 50,0 L de volume) adotou-se intervalos de 2 minutos até o oitavo minuto e, posteriormente em

intervalos de 4 minutos até o minuto final. A duração dos ensaios de ambas as placas de fluxo foram de 60 minutos.

A Figura 35 ilustra as etapas de instalação da placa de fluxo e dos respectivos equipamentos de leituras de concentração dos gases, pressão e temperaturas interna e externa na camada de cobertura até o momento inicial do ensaio. Observa-se que a placa maior permitiu uma cobertura mais eficaz de fissuras com maiores comprimentos. Em contrapartida, a placa menor tinha o manuseio facilitado em função do seu tamanho.

Figura 35 – Etapas da instalação da placa de fluxo e dos equipamentos de leitura nos ensaios.



Legenda: (a) – local com fissura; (b) – delimitação do perímetro da placa; (c) – Cravação da placa e (d) – selamento da placa e instalação dos equipamentos.

Os ensaios de campo para a determinação das emissões do biogás foram realizados de agosto de 2014 a fevereiro de 2016. No início do estudo foram realizados 4 ensaios consecutivos com a utilização da placa de fluxo menor ($0,16 \text{ m}^2$ de área e $8,3 \text{ L}$ de volume) que já pertencia ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade

do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Posteriormente, mais precisamente no mês de outubro de 2014, adquiriu-se a outra placa de fluxo com dimensões maiores (1 m² de área e 50,0 L de volume).

Foram realizados 23 ensaios de placa de fluxo nas camadas de cobertura construídas nas células experimentais da CTR Seropédica. A Tabela 17 apresenta o quantitativo de ensaios realizados por cada placa de fluxo nas diferentes camadas de cobertura estudadas.

Tabela 17 – Quantitativo de ensaios de placa de fluxo.

Período	Modelo	Tipo de Camada de Cobertura				TOTAL
		C	C'	BC	ET	
07/08/2014 a 13/11/2014	Placa de Fluxo (0,16 m ² / 8,3 L)	1	1	1	1	4
27/11/2014 a 03/02/2016	Placa de Fluxo (1 m ² / 50,0 L)	5	3	6	5	19
TOTAL		6	4	7	6	23

No período de março de 2015 a janeiro de 2016 não foi realizado nenhum ensaio de placa de fluxo na camada de cobertura evapotranspirativa devido à necessidade de troca da grama “esmeralda” da célula experimental. A troca da vegetação foi demorada por dificuldades encontradas pela empresa responsável pela operação da CTR Seropédica e por fatores climáticos que impossibilitaram o acesso ao local estudado.

A data de realização dos ensaios não seguiu um calendário específico, visto a dificuldade encontrada de transporte nas idas ao aterro sanitário. Os ensaios de campo foram realizados em dias que fossem ensolarados ou de preferência sem chuva, visto que o acesso ao local do experimento ficava intransitável na ocorrência de chuva. As tentativas de idas ao aterro sanitário para a realização de ensaios de campo em datas posteriores há dias chuvosos foram negadas pela CTR Seropédica em virtude dos fatores já mencionados.

Mesmo com todas as impossibilidades encontradas para a realização de ensaios em tempo chuvoso, o período no qual está compreendida a pesquisa foi caracterizado por baixas precipitações, principalmente no verão de 2015.

Ressalta-se ainda que não foi efetuado controle da umidade do solo durante a realização dos ensaios de campo.

2.7. Medição do Fluxo de Biogás

Para a determinação do fluxo de gás foi utilizada a metodologia descrita por Maciel (2003). O fluxo de gás foi determinado por meio da avaliação do volume de CH_4 está relacionada com a velocidade de aumento da concentração do gás no interior da placa, com os volumes ajustados para as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). O fluxo de gás (J) foi determinado a partir dos resultados obtidos nos ensaios de placa de fluxo estática por meio da Equação 4. Esta equação é dada por:

$$J = \frac{V_p \times \rho}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \quad (4)$$

onde:

J = fluxo de gás (Kg/m^2s);

V_p = volume útil da placa de fluxo (m^3);

A = área de solo coberta pela placa (m^2);

ρ = densidade do gás a determinada temperatura (Kg/m^3)

$\Delta C/\Delta t$ = variação da concentração do gás (% vol) com o tempo (s)

Para facilitar o procedimento de cálculo, visto que o fluxo (J) decresce com o decorrer do ensaio, recomenda-se que as curvas de variação de concentração do gás com o tempo ($\Delta C/\Delta t$) sejam representadas em termos mássicos ($\Delta M/\Delta t$). Assim, utilizou-se a densidade corrigida dos gases (CH_4 e CO_2), em função das leituras da temperatura interna da placa de fluxo, através das equações 5 e 6:

$$\rho_{CH_4}(t) = \frac{\rho_{CH_4}(0^\circ C) \times 273}{(273+t)} \quad (5)$$

$$\rho_{CO_2}(t) = \frac{\rho_{CH_4}(t) \times PM_{CO_2}}{PM_{CH_4}} \quad (6)$$

Onde:

$\rho_{CH_4}(t)$ = densidade do metano em função da temperatura (t) em °C

$\rho_{CH_4}(0^\circ C) = 0,716 \text{ Kg/m}^3$

$\rho_{CO_2}(t)$ = densidade do dióxido de carbono em função da temperatura (t) em °C

PM_{CO_2} = peso molecular do dióxido de carbono = 44

PM_{CH_4} = peso molecular do metano = 16

Maciel (2003) e Mariano (2008) destacam que nos primeiros 30 – 60 min de análise ocorre a variação máxima na concentração do CH_4 com o tempo. Após este intervalo inicial, a concentração aumenta a taxas decrescentes. De acordo com Maciel (2003), o fluxo de CH_4 deve ser calculado no intervalo inicial de cada ensaio para assim obter a máxima taxa de percolação do gás no solo.

3. RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados referentes às concentrações e as taxas de emissões dos gases CH_4 e CO_2 obtidas nos ensaios de placa de fluxo nas camadas de cobertura das células experimentais presentes na CTR Seropédica. Além dos ensaios de campo, as características físicas do solo (integridade das coberturas) nos momentos dos ensaios, foram reunidas e utilizadas na discussão do desempenho das camadas de cobertura. Por fim, foi realizada uma análise comparativa das camadas em relação à influência da umidade dos solos de cobertura nas emissões de biogás. Ressalta-se que os resultados apresentados de umidade dos solos não foram determinados durante a pesquisa, sendo obtidos

por Joaquim Jr. (2015) em estudo comparativo do desempenho dos sistemas de cobertura em relação à infiltração de água pluvial no mesmo aterro sanitário.

3.1. Ensaio de Placa de Fluxo

Os resultados dos ensaios de campo possuem como finalidade determinar as emissões dos gases pelas camadas de cobertura de forma pontual. As informações obtidas nesses ensaios referem-se às concentrações de (CH_4 , CO_2 e O_2), as temperaturas internas e externas a placa e a pressão (interna e externa) dos gases.

No momento das investigações de campo, caracterizou-se o solo de cobertura em relação à existência de fissuras nos pontos em que foram realizados os ensaios.

A Tabela 18 apresenta um resumo dos resultados das concentrações finais dos gases obtidos nos ensaios de placa de fluxo, o tipo de placa utilizado em cada ensaio e a caracterização do solo de cobertura em cada ponto em que foram realizados os ensaios de campo. A cobertura evapotranspirativa não sofreu com os problemas relacionados às fissuras, portanto todos os ensaios realizados neste tipo de camada foram caracterizados como não tendo fissuras.

Cabe ressaltar que para uma mesma data, foi realizado apenas um ensaio de placa de fluxo na mesma camada de cobertura. Os ensaios foram realizados dentro do perímetro das células experimentais, porém, na sua maioria em localidades diferentes dentro da mesma.

Tabela 18 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de placa de fluxo nas camadas de cobertura.

Ensaio	Data	Concentração final dos gases na Placa de Fluxo (%)			Placa de Fluxo	Tipo de camada de cobertura	Presença de Fissuras no ensaio
		CH ₄	CO ₂	O ₂			
C'1	07/08/2014	11,6	12,0	13,9	PP	Convencional	Sim (pequena)
BC1	13/11/2014	26,0	24,0	5,3	PP	Barreira Capilar	Sim (média)
C1	13/11/2014	1,0	1,2	17,0	PP	Convencional	Não
ET1	13/11/2014	1,2	2,0	17,0	PP	Evapotranspirativa	Não
C'2	27/11/2014	26,0	20,5	10,6	PG	Convencional	Sim (grande)
ET2	27/11/2014	6,3	5,4	17,0	PG	Evapotranspirativa	Não
BC2	16/12/2014	40,4	33,3	3,0	PG	Barreira Capilar	Sim (média)
C2	16/12/2014	2,2	2,0	16,9	PG	Convencional	Sim (grande)
ET3	16/12/2014	0,6	2,1	17,7	PG	Evapotranspirativa	Não
BC3	16/01/2015	10,4	12,2	11,5	PG	Barreira Capilar	Sim (pequena)
C3	16/01/2015	1,0	3,0	16,3	PG	Convencional	Sim (grande)
BC4	26/01/2015	1,0	1,9	17,3	PG	Barreira Capilar	Sim (pequena)
C4	26/01/2015	0,7	1,1	18,5	PG	Convencional	Sim (pequena)
ET4	26/01/2015	4,2	3,2	19,0	PG	Evapotranspirativa	Não
C5	10/02/2015	1,1	1,3	18,6	PG	Convencional	Não
ET5	10/02/2015	5,6	4,4	16,5	PG	Evapotranspirativa	Não
C'3	01/09/2015	7,4	6,0	16,3	PG	Convencional	Não
BC5	01/09/2015	8,0	11,3	11,9	PG	Barreira Capilar	Sim (pequena)
BC6	22/10/2015	6,8	8,0	13,7	PG	Barreira Capilar	Sim (pequena)
C6	22/10/2015	1,4	3,8	14,8	PG	Convencional	Sim (pequena)
BC7	03/02/2016	8,8	4,4	17,4	PG	Barreira Capilar	Sim (pequena)
C'4	03/02/2016	10,3	11,7	10,1	PG	Convencional	Sim (pequena)
ET6	03/02/2016	9,6	10,7	15,0	PG	Evapotranspirativa	Não

Legenda: PP – placa pequena; PG – placa grande.

As Figuras 36 a 38 apresentam os gráficos de variações das concentrações dos gases CH₄, CO₂ e O₂ em função do tempo de duração do ensaio obtidos nas 4 (quatro) investigações com a utilização da placa de fluxo menor (0,16 m² de área e 8,3 L de volume). Já nas Figuras 39 a 47 estão apresentados os resultados das concentrações dos gases CH₄, CO₂ e O₂ em função do tempo de duração do ensaio obtidos nas demais investigações com a utilização da placa de fluxo maior (1 m² de área e 50,0 L de volume).

Os dados obtidos nestes ensaios estão detalhados numericamente nas planilhas utilizadas em campo presentes no Apêndice (A) desta dissertação.

Figura 36 – Concentrações de CH₄ nos ensaios com a placa menor (0,16 m² de área e 8,3 L de volume).

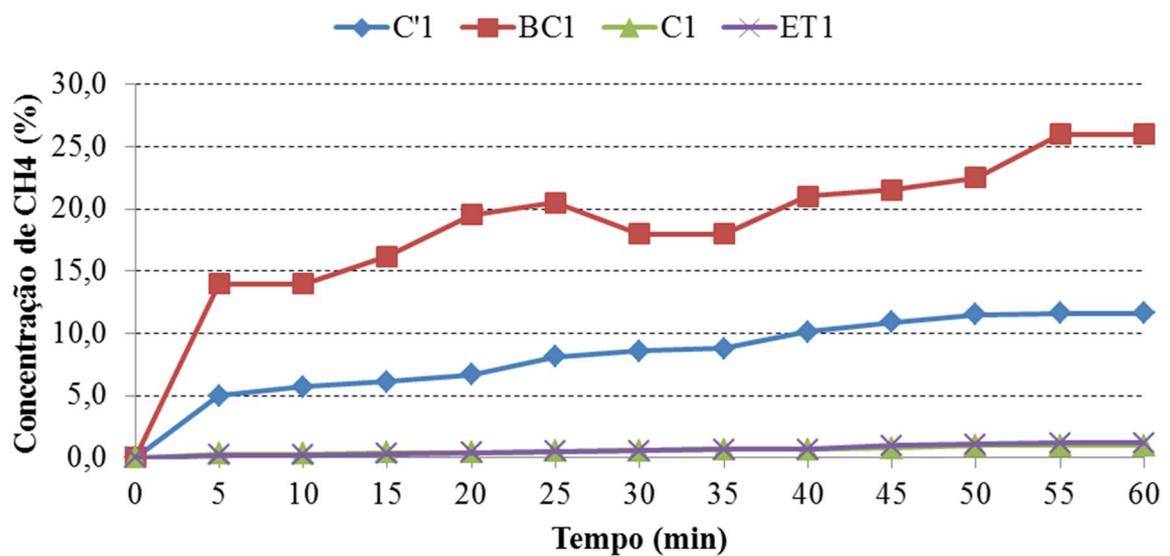


Figura 37 – Concentrações de CO₂ nos ensaios com a placa menor (0,16 m² de área e 8,3 L de volume).

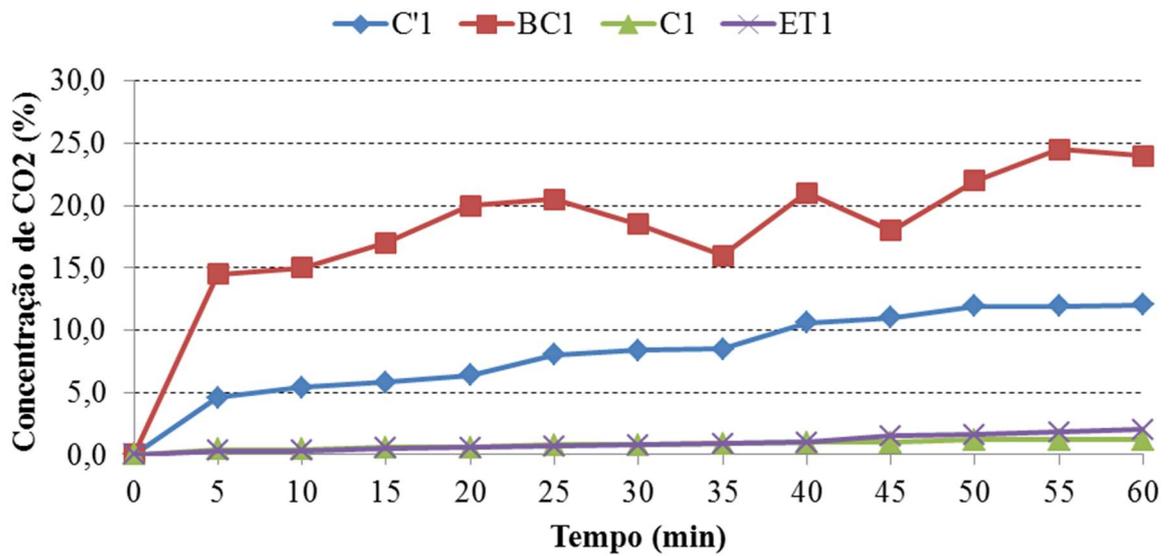


Figura 38 – Concentrações de O₂ nos ensaios com a placa menor (0,16 m² de área e 8,3 L de volume).

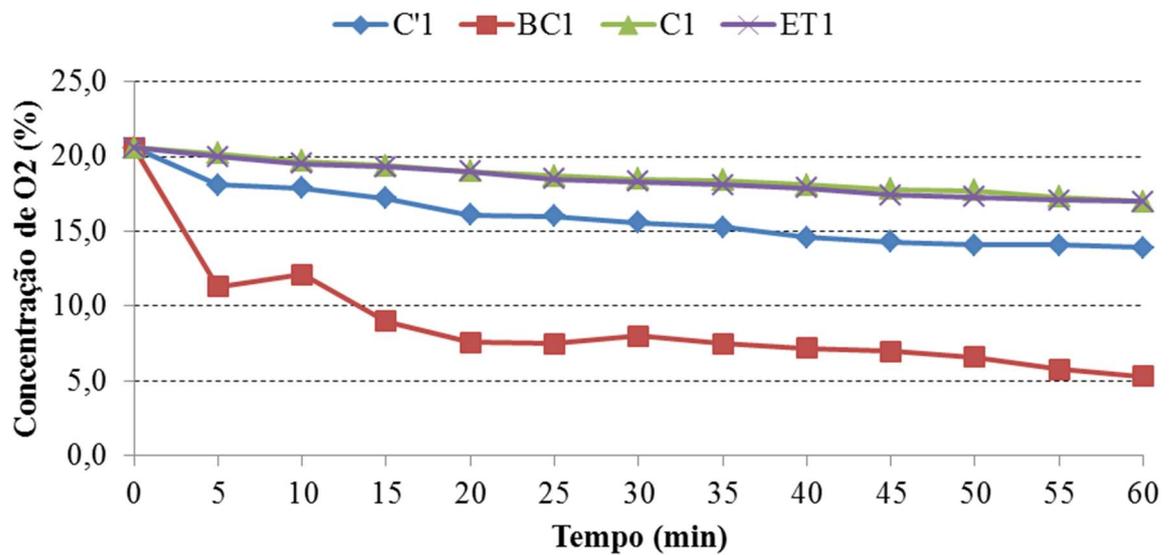


Figura 41 – Concentrações de O₂ nos ensaios com a placa maior (1 m² de área e 50,0 L de volume) nas camadas convencionais.

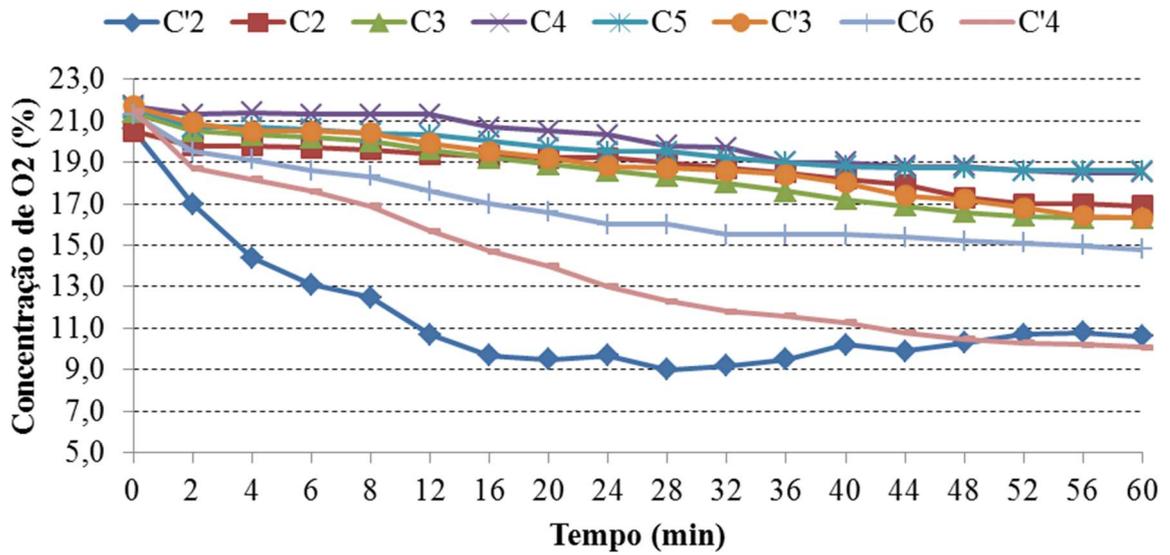


Figura 42 – Concentrações de CH₄ nos ensaios com a placa maior (1 m² de área e 50,0 L de volume) na camada barreira capilar.

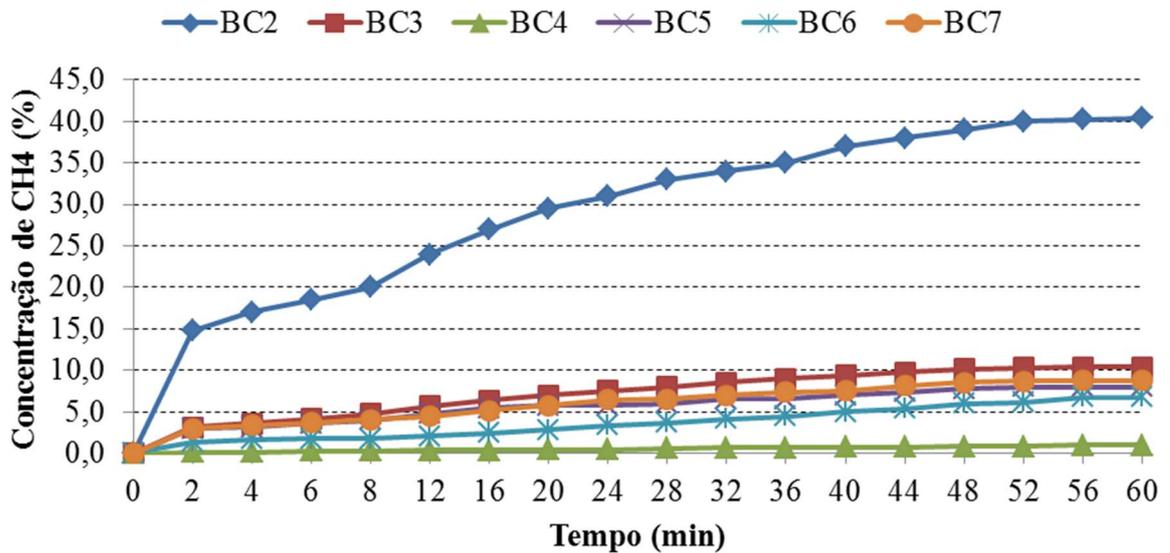


Figura 43 – Concentrações de CO₂ nos ensaios com a placa maior (1 m² de área e 50,0 L de volume) na camada barreira capilar.

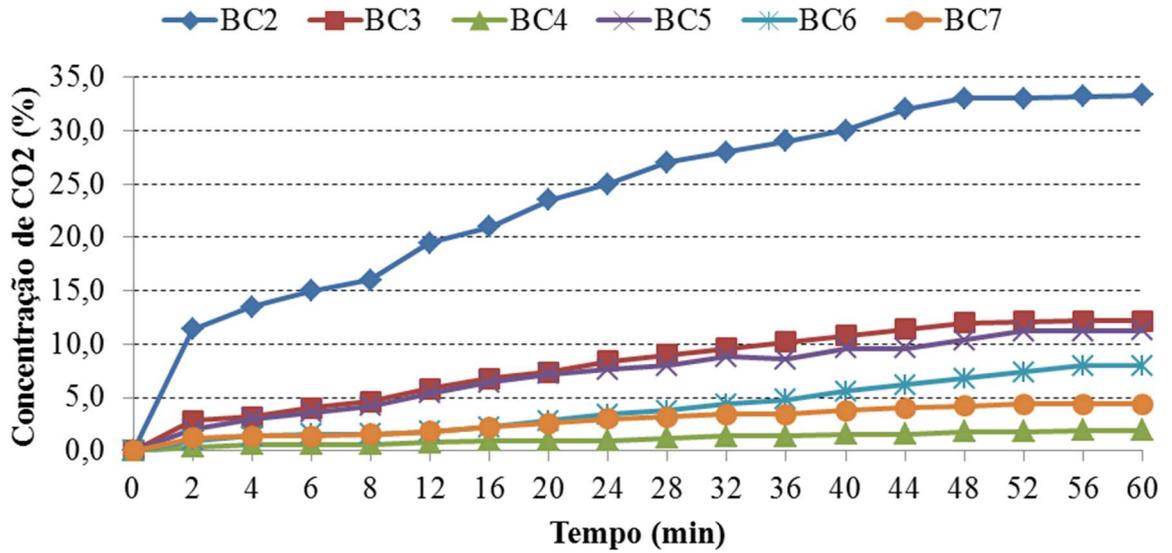


Figura 44 – Concentrações de O₂ nos ensaios com a placa maior (1 m² de área e 50,0 L de volume) na camada barreira capilar.

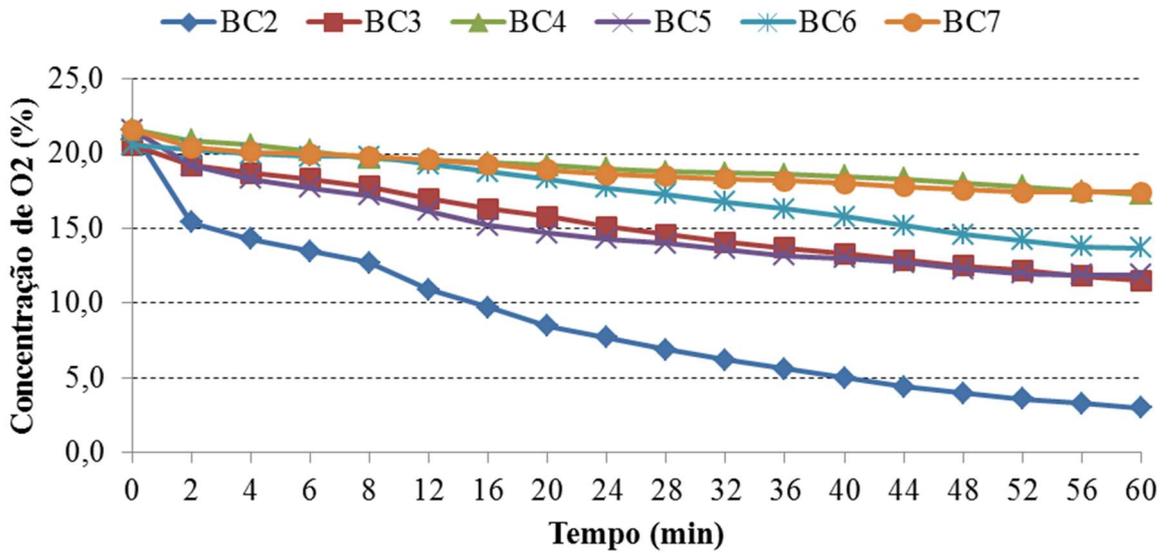


Figura 45 – Concentrações de CH₄ nos ensaios com a placa maior (1 m² de área e 50,0 L de volume) na camada evapotranspirativa.

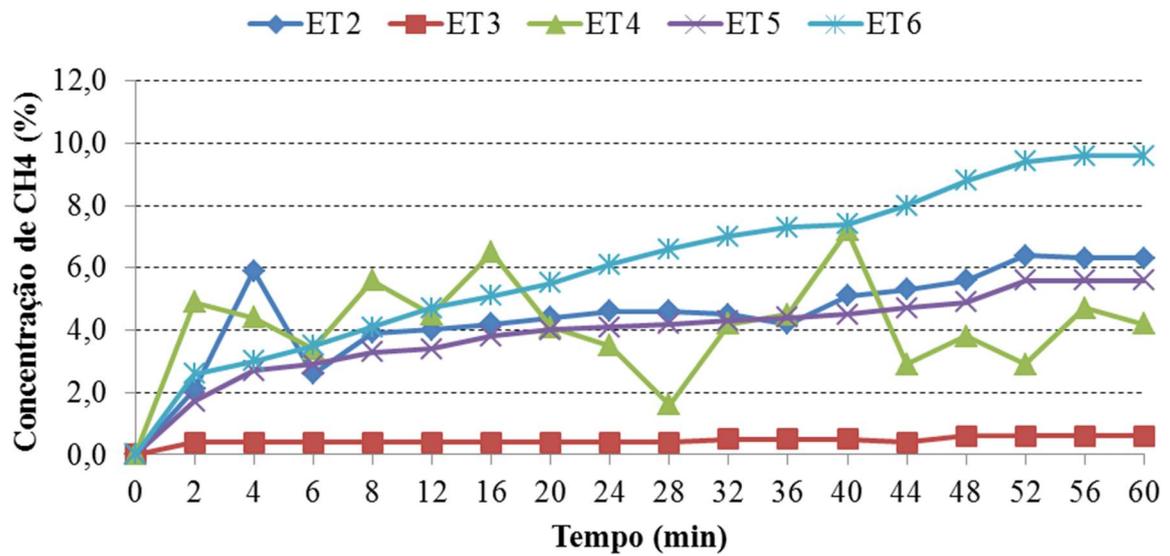


Figura 46 – Concentrações de CO₂ nos ensaios com a placa maior (1 m² de área e 50,0 L de volume) na camada evapotranspirativa.

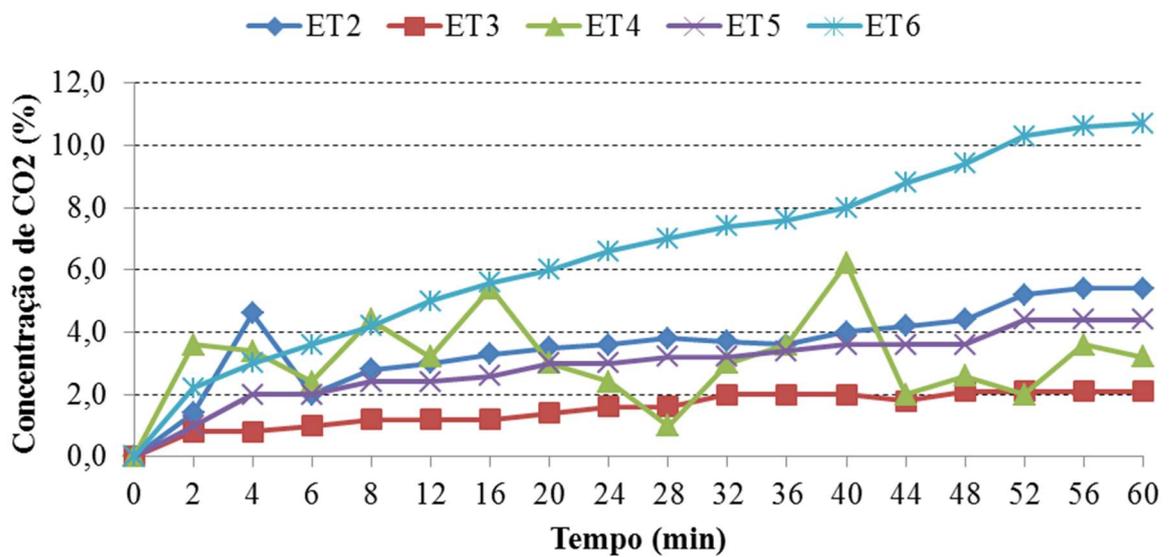
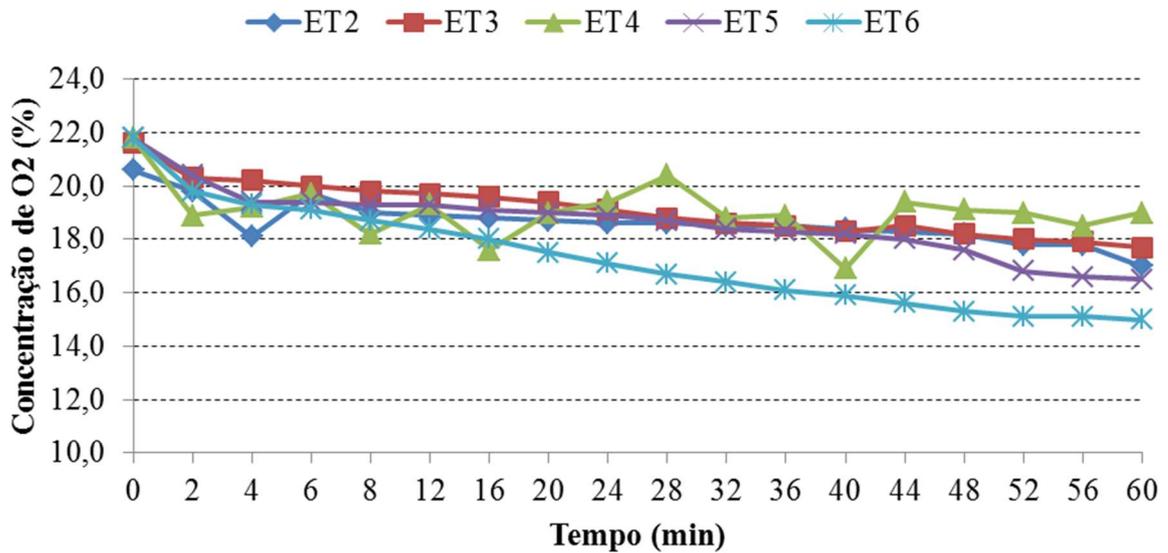


Figura 47 – Concentrações de O_2 nos ensaios com a placa maior (1 m^2 de área e $50,0\text{ L}$ de volume) na camada evapotranspirativa.



Em geral, as curvas de variação das concentrações dos gases apresentaram comportamento qualitativo semelhante com o decorrer do tempo de ensaio. Isto é, há o aumento das concentrações de CH_4 e CO_2 e diminuição da concentração de O_2 , sugerindo que não houve entrada de oxigênio durante a realização do ensaio, seja pelas conexões, mangueiras ou pelas laterais da placa de fluxo.

Durante o ensaio de placa de fluxo, há o decaimento da variação das concentrações dos gases com o tempo. No início do ensaio as concentrações dos gases na placa são nulas, sendo o gradiente de concentração máximo. No decorrer do ensaio, o volume do gás dentro da placa aumenta, a concentração interna aumenta, o gradiente de concentração diminui e o fluxo de gás é reduzido de acordo com a Lei de Fick (MARIANO, 2008).

O ensaio ET4 apresentou comportamento atípico nas variações das concentrações dos gases, sugerindo que pode ter havido entrada de O_2 na placa de fluxo durante a realização do ensaio. Sendo assim, o ensaio ET4 foi descartado da análise dos fluxos dos gases por não apresentar resultado confiável. Os demais ensaios apresentaram comportamento onde as variações das concentrações dos gases em função do tempo são semelhante às observadas nas pesquisas de MACIEL (2003), MARIANO (2008), FERNANDES (2009), LOPES (2011) e OLIVEIRA (2013).

Em relação à variação de temperatura, observou-se que a temperatura medida no interior da placa de fluxo é influenciada pela temperatura externa, isto é, pela temperatura do ambiente. É possível observar que em todos os ensaios realizados, as curvas de temperatura interna e externa possuem comportamento equivalente e, que a temperatura interna foi maior que a externa. A temperatura interna influencia a densidade dos gases confinados, tendo sido considerado nos cálculos dos fluxos dos gases conforme observado no Capítulo 2 item 2.7 – Medição do Fluxo de Biogás. Os gráficos das temperaturas (interna e externa) obtidos nos 23 ensaios de placa de fluxo estão apresentados no Apêndice (B).

3.2. Emissões de Biogás

As taxas de emissões de CH_4 e CO_2 foram determinadas conforme metodologia apresentada no Capítulo 2 item 2.7 – Medição do Fluxo de Biogás.

Conforme já dito, as investigações de campo foram realizadas em um período com baixas precipitações, sendo caracterizado como um período seco. Os meses de novembro e dezembro de 2014 apresentaram precipitações de 79 mm e 105 mm, respectivamente. Para o ano de 2015, os meses de janeiro, fevereiro, setembro e outubro apresentaram precipitações de 4 mm, 113 mm, 95 mm e 28 mm respectivamente. No ano de 2016, as precipitações tornaram-se mais elevadas no verão, apresentando um valor de 207 mm para o mês de janeiro e 232 mm para o mês de fevereiro.

3.2.1. Emissões de Biogás nas Camadas Convencionais

Os resultados das emissões de CH_4 e CO_2 obtidos nos ensaios realizados na camada de cobertura do tipo convencional com solo “A” são apresentados na Tabela 19 e graficamente nas Figuras 48 e 49, respectivamente.

O fluxo de CH₄ na camada de cobertura convencional com solo “A” variou de 7,5 a 29,9 g/m².dia. Já o fluxo de CO₂ variou de 29,0 a 125,0 g/m².dia. A emissão média de metano foi de 13,9 g/m².dia e a emissão média de dióxido de carbono foi de 58,6 g/m².dia.

Tabela 19 – Resultados dos fluxos de CH₄ e CO₂ na camada de cobertura convencional com solo “A”.

Data	Ensaio	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)
13/11/2014	C1	8,2	29,0
16/12/2014	C2	29,9	65,8
16/01/2015	C3	14,0	69,5
26/01/2015	C4	7,5	32,4
10/02/2015	C5	9,3	30,1
22/10/2015	C6	14,7	125,0
Mínimo		7,5	29,0
Máximo		29,9	125,0
Média		13,9	58,6

Figura 48 – Fluxo de CH₄ na camada de cobertura do tipo convencional com solo “A” em (g/m².dia).

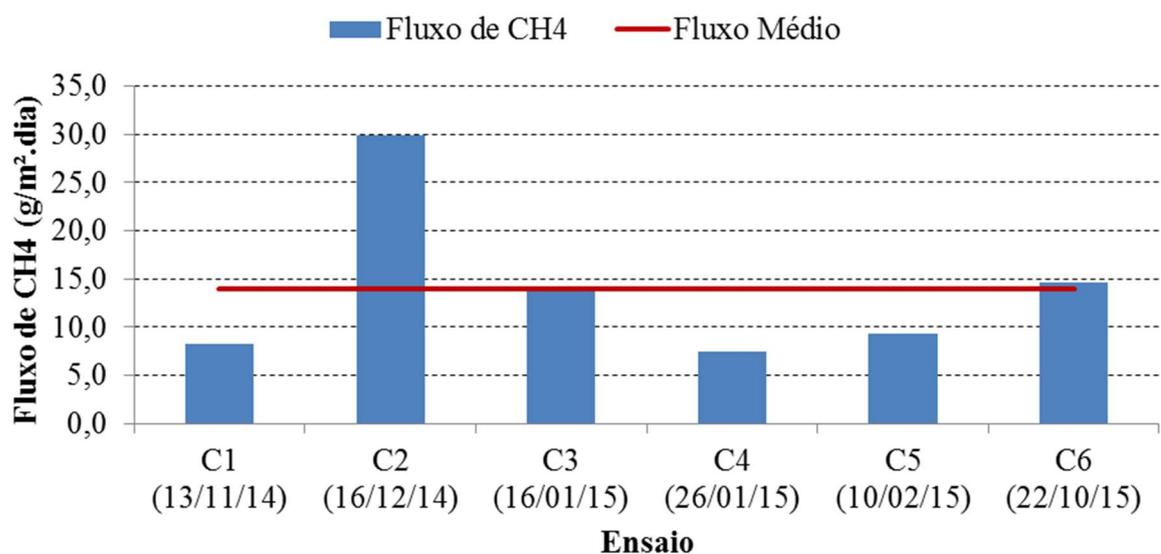
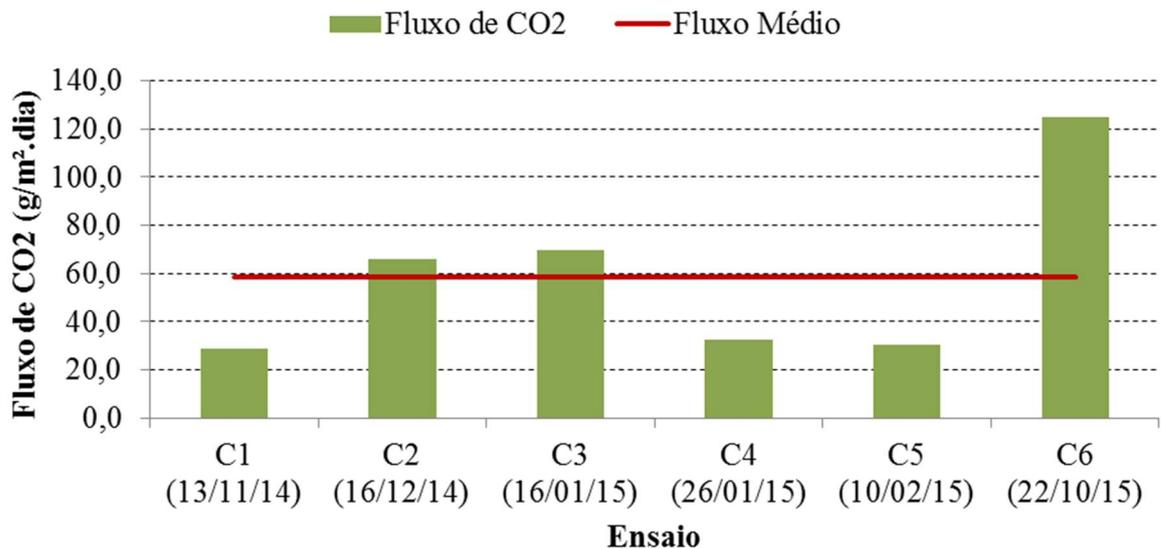


Figura 49 – Fluxo de CO₂ na camada de cobertura do tipo convencional com solo “A” em (g/m².dia).



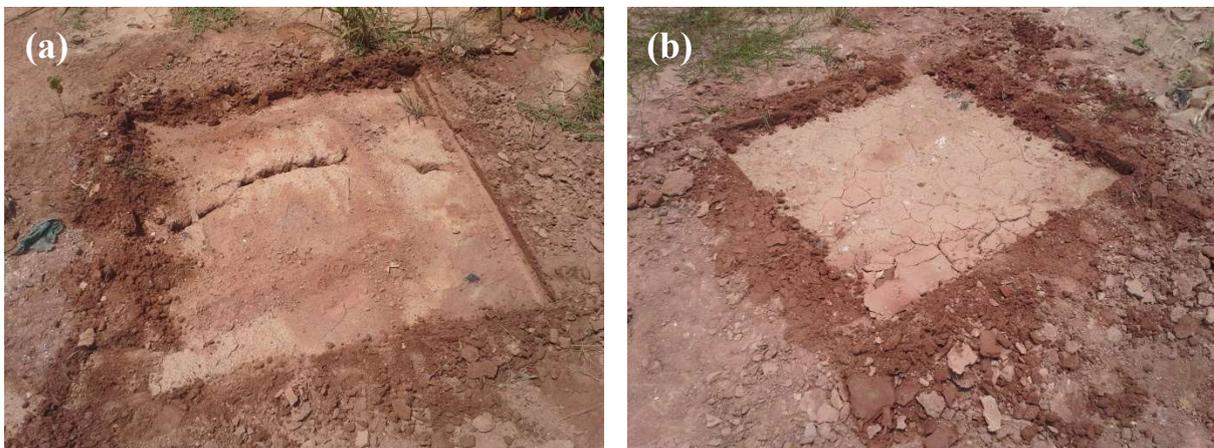
O ensaio C2 apresentou valor de fluxo de CH₄ muito acima do fluxo médio calculado. Este ensaio apresentou o maior fluxo de CH₄ dentre todos aqueles realizados na camada convencional com solo “A”, apresentando um valor de 29,9 g/m².dia. Este valor é 4,0 vezes mais elevado do que o valor apresentado no ensaio C4, que foi de 7,5 g/m².dia. Já os ensaios C3 e C6 apresentaram resultados similares a média, conforme observado na Figura 48.

Já se esperava que a emissão de CH₄ no ensaio C2 fosse maior em relação aos demais nesta camada de cobertura, visto que o ensaio foi realizado sobre uma grande fissura. Já o ensaio C4 foi realizado sobre pequenas rachaduras superficiais ocasionadas pelo ressecamento da camada, o que justifica o reduzido valor obtido para o fluxo de CH₄. A Figura 50 ilustra a diferença da integridade da camada de cobertura no momento dos ensaios C2 e C4.

O ensaio C3 foi realizado um mês após o ensaio C2 sobre a mesma fissura na camada de cobertura e, apresentou um fluxo de CH₄ de 14,0 g/m².dia. Comparativamente, o fluxo de CH₄ do ensaio C2 foi 2,1 vezes mais elevado do que o fluxo de CH₄ do ensaio C3. Ambos os ensaios foram realizados em tempo ensolarado, com temperaturas do ar elevadas (acima de 30°C). Este resultado pode ser um indicativo das possíveis variações de fluxo de biogás que ocorrem em um aterro sanitário considerando, a dinâmica operacional do sistema de extração ativa e passiva de biogás.

A Figura 51 ilustra a fissura da camada de cobertura no ensaio C3. Percebe-se que esta fissura é idêntica a da Figura 50-a.

Figura 50 – Característica física do solo “A” nos ensaios C2 e C4.



Legenda: (a) – ensaio C2; (b) – ensaio C4.

Figura 51 – Característica física do solo “A” no ensaio C3.



Os demais ensaios (C1, C5 e C6) na camada de cobertura convencional com solo “A” foram realizados sobre rachaduras superficiais similares ao do ensaio C4 (Figura 50-b) e, as emissões de CH_4 apresentadas nessas investigações variaram de $8,2 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$ a $14,7 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$.

Para o fluxo de CO_2 , o ensaio C6 apresentou o maior resultado dentre os ensaios realizados na camada convencional com solo “A”, que foi de $125,0 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$. Já o ensaio que apresentou o menor fluxo de CO_2 foi o C1 com um valor de $29,0 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$, que é 4,3 vezes menor do que o fluxo de CO_2 encontrado no ensaio C6.

Os resultados das emissões de CH₄ e CO₂ obtidos nos ensaios realizados na camada de cobertura convencional com solo “B” são apresentados na Tabela 20 e nas Figuras 52 e 53, respectivamente.

O fluxo de CH₄ na camada de cobertura do tipo convencional com solo “B” variou de 64,6 a 389,0 g/m².dia e o fluxo de CO₂ variou de 115,6 a 843,4 g/m².dia. A emissão média de metano foi de 166,3 g/m².dia e a emissão média de dióxido de carbono foi de 394,2 g/m².dia.

Tabela 20 – Resultados dos fluxos de CH₄ e CO₂ na camada de cobertura convencional com solo “B”.

Data	Ensaio	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)
07/08/2014	C'1	105,1	291,5
27/11/2014	C'2	389,0	843,4
01/09/2015	C'3	64,6	115,6
03/02/2016	C'4	106,7	326,3
Mínimo		64,6	115,6
Máximo		389,0	843,4
Média		166,3	394,2

Figura 52 – Fluxo de CH₄ na camada de cobertura do tipo convencional com solo “B” em (g/m².dia).

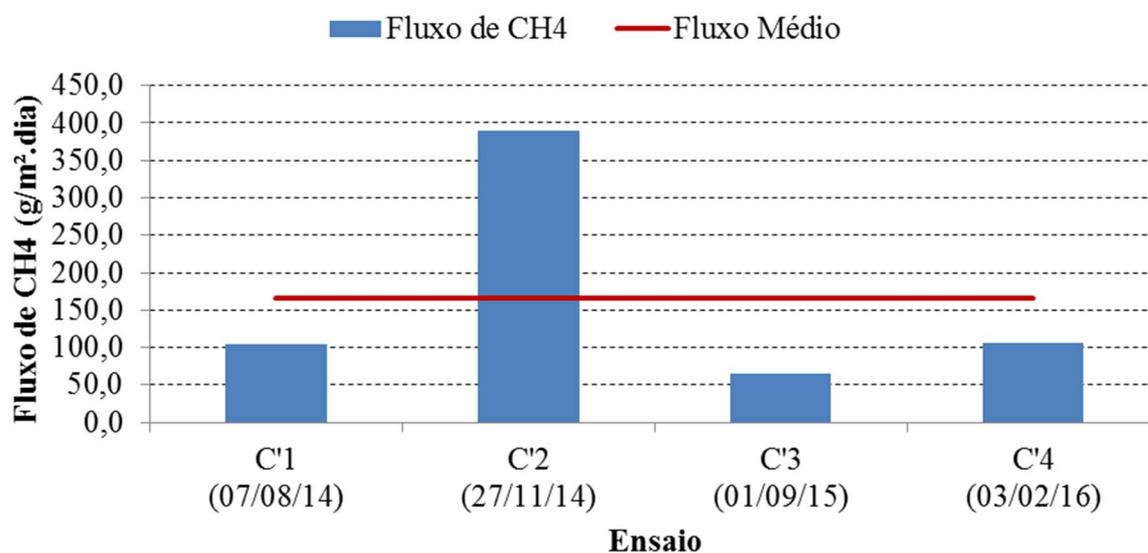
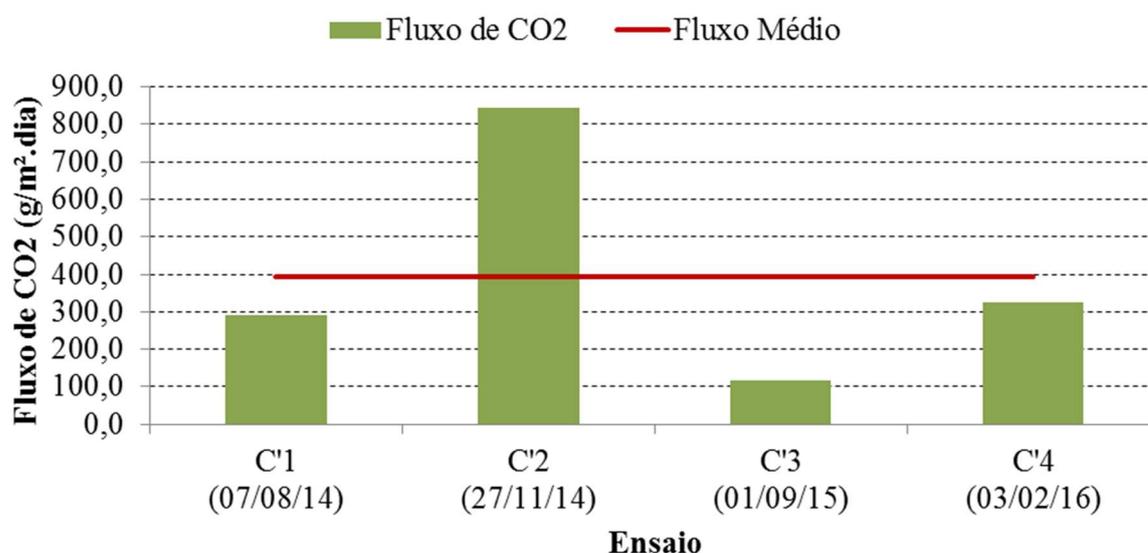


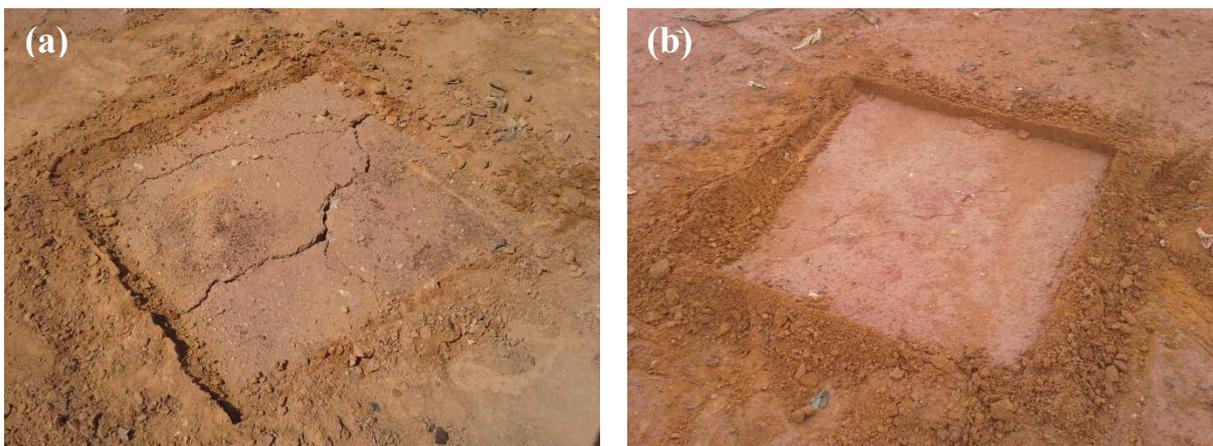
Figura 53 – Fluxo de CO₂ na camada de cobertura do tipo convencional com solo “B” em (g/m².dia).



O ensaio C'2 apresentou o maior fluxo de CH₄ dentre os ensaios realizados na camada de cobertura convencional com solo “B”, apresentando um valor de 389,0 g/m².dia, sendo 6,0 vezes mais elevado do que o ensaio C'3 que apresentou o menor fluxo de CH₄, que foi de 64,6 g/m².dia. Temos que o ensaio C'2 foi o único realizado sobre uma grande fissura e que o ensaio C'3 foi realizado sobre o solo sem fissura. A dispersão dos resultados entre os dois fluxos pode ser justificada pela diferença na caracterização física do solo da camada de cobertura no momento das investigações conforme ilustrado na Figura 54.

Os ensaios C'1 e C'4 apresentaram fluxos de CH₄ da ordem de 105,0 g/m².dia. Ambos os ensaios foram realizados em rachaduras superficiais o que justifica a similaridade dos resultados obtidos. A Figura 55 exemplifica a condição da camada de cobertura no momento da realização do ensaio C'4.

Figura 54 – Característica física do solo “B” nos ensaios C’2 e C’3.



Legenda: (a) – ensaio C’2; (b) – ensaio C’3.

Figura 55 – Característica física do solo “B” no ensaio C’4.



Para o fluxo de CO_2 , o ensaio C’2 apresentou o maior resultado dentre os ensaios realizados na camada convencional com solo “B”, que foi de $843,4 \text{ g/m}^2.\text{dia}$. Já o ensaio que apresentou o menor fluxo de CO_2 foi o C’3 com um valor de $115,6 \text{ g/m}^2.\text{dia}$, que é 7,3 vezes menor do que o fluxo de CO_2 encontrado no ensaio C’2.

Esperava-se que os resultados das emissões de biogás nas duas camadas convencionais apresentassem menores dispersões entre os valores, visto que os resultados encontrados na composição granulométrica foram similares, fazendo com que o solo “B” tivesse a mesma classificação que o solo “A”. No entanto na determinação de grau de compactação diferiram, sendo de 92% para o solo “A” e de 88,2% para o solo “B”.

Os resultados encontrados para o fluxo de CH₄ na camada convencional com solo “A” mostraram-se ser pontuais para a área na qual se encontra esta célula experimental. Borba (2015) realizou pesquisa na mesma camada de cobertura do sub-aterro 01 no Aterro Sanitário de Seropédica - RJ, porém em outros locais fora do perímetro da célula experimental e, encontrou valores que variaram de 0,1 a 575,0 g/m².dia para o fluxo de CH₄. Esta camada era composta por 0,5 m do mesmo solo “A” compactado utilizado na presente pesquisa para a camada convencional (C). Os ensaios foram realizados por todo o platô do sub-aterro 01, abrangendo uma área muito maior do que a célula experimental (C) da presente pesquisa, que possui delimitação e certo “controle”.

Comparativamente, os resultados encontrados na camada convencional (C) com solo “A”, são 19,2 vezes inferiores aos resultados obtidos por Borba (2015). Apesar do controle da camada (C), e do grau de compactação de 92% determinado, a dispersão dos resultados não pôde ser justificada unicamente por tal fato.

Mariano (2008) encontrou fluxos nulos de CH₄ em quatro ensaios no Aterro de Aguzinha – PE que possuía sistema de extração passivo de biogás. O material possuía grau de compactação do solo (entre 87% e 99%), porcentagem de finos variando entre 42 a 55% e grau de saturação maior que 50%. A espessura da camada de cobertura não foi um fator determinante na retenção dos gases, visto que as mesmas possuíam (0,33 e 0,41 m), sendo uma diferença pouco significativa para o campo. De uma forma geral pode-se dizer que para locais com solos com porcentagem de finos próximo a 50%, grau de compactação acima de 90% e grau de saturação acima de 50% influenciam na redução das emissões de gases para a atmosfera (MARIANO, 2008).

Ainda em Mariano (2008), foi encontrado valor de fluxo de CH₄ de 401,0 g/m².dia para uma das investigações realizadas. Destaca-se que neste ensaio, o grau de compactação do solo foi de 76% e o grau de saturação foi de 34%. Concluiu-se que a existência de fluxo elevado ocorreu devido à baixa compactação do solo.

Fernandes (2009) encontrou valores para o fluxo de CH₄ que variaram de 23,3 a 337,7 g/m².dia em célula convencional com 0,05 m de entulho sobreposto a 0,6 m de solo fino, sem extração de biogás.

Lopes (2011) encontrou valores de fluxo de CH₄ que variaram de 2,1 a 984,7 g/m².dia nos 23 ensaios realizados em período seco com um grau de compactação médio de 93,6% nos

locais onde realizaram-se os ensaios. Na mesma pesquisa, verificou-se que, executando-se os 2 ensaios com fluxos de grande magnitude ($>300 \text{ g/m}^2\text{.dia}$), a camada convencional apresentou uma tendência de fluxo de CH_4 de até $250 \text{ g/m}^2\text{.dia}$.

3.2.2. Emissões de Biogás na Camada Barreira Capilar

Os resultados das emissões de CH_4 e CO_2 obtidos nos ensaios realizados na camada de cobertura do tipo barreira capilar são apresentados na Tabela 21 e graficamente nas Figuras 56 e 57, respectivamente.

O fluxo de CH_4 na camada de cobertura do tipo barreira capilar variou de 7,2 a 369,2 $\text{g/m}^2\text{.dia}$. Para o fluxo de CO_2 , a variação foi de 37,4 a 961,3 $\text{g/m}^2\text{.dia}$. A emissão média de metano foi de 142,5 $\text{g/m}^2\text{.dia}$ e a emissão média de dióxido de carbono foi de 376,2 $\text{g/m}^2\text{.dia}$.

Tabela 21 – Resultados dos fluxos de CH_4 e CO_2 na camada de cobertura barreira capilar.

Data	Ensaio	Fluxo de CH_4 ($\text{g/m}^2\text{.dia}$)	Fluxo de CO_2 ($\text{g/m}^2\text{.dia}$)
13/11/2014	BC1	349,5	961,3
16/12/2014	BC2	369,2	855,1
16/01/2015	BC3	86,0	278,3
26/01/2015	BC4	7,2	37,4
01/09/2015	BC5	67,5	247,5
22/10/2015	BC6	51,0	167,5
03/02/2016	BC7	66,8	86,4
Mínimo		7,2	37,4
Máximo		369,2	961,3
Média		142,5	376,2

Figura 56 – Fluxo de CH₄ na camada de cobertura do tipo barreira capilar em (g/m².dia).

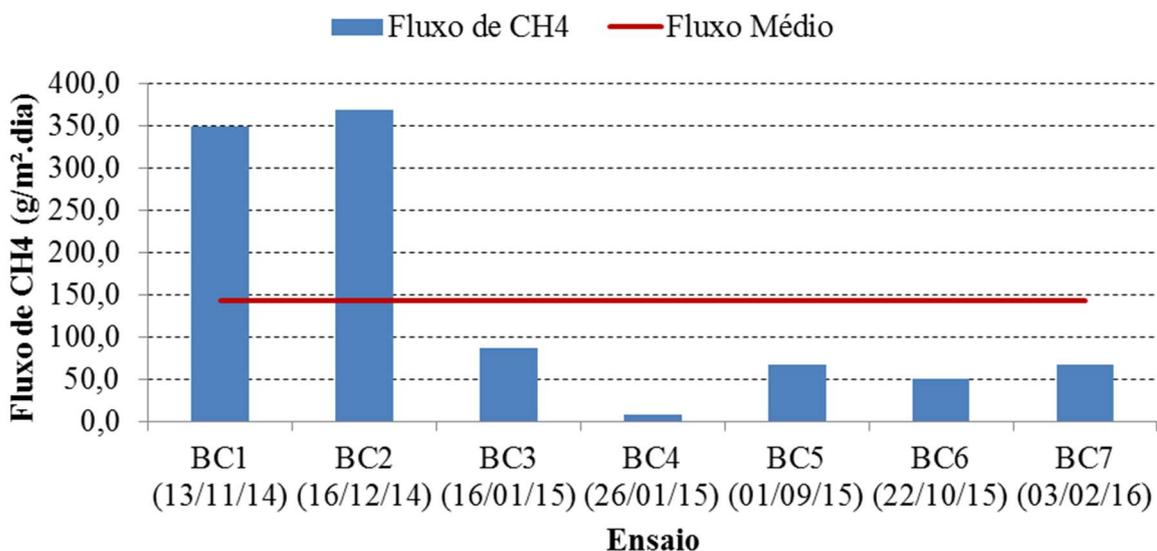
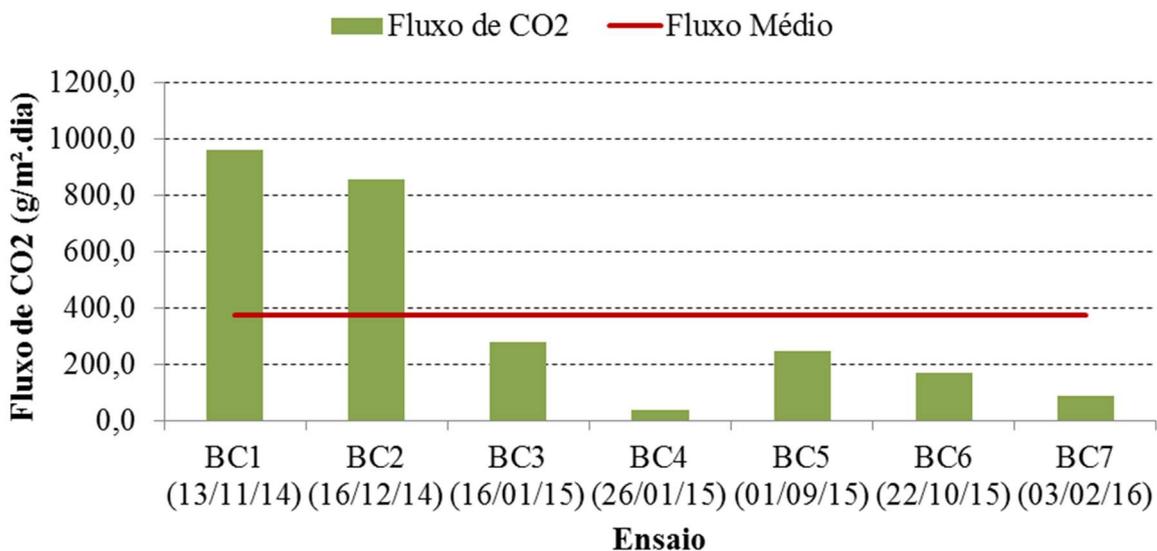


Figura 57 – Fluxo de CO₂ na camada de cobertura do tipo barreira capilar em (g/m².dia).



Dos sete ensaios realizados na camada de barreira capilar, apenas dois pontos (BC1 e BC2) apresentaram fluxo de CH₄ acima da média calculada, conforme observado na Figura 56. Os mesmos, também apresentaram fluxo de CO₂ acima da média obtida.

Excetuando-se os fluxos de CH₄ de maiores magnitudes dos ensaios BC1 e BC2, a camada de barreira capilar apresenta uma tendência de fluxo de CH₄ de até 86,0 g/m².dia, reduzindo as emissões médias de CH₄ e CO₂ para 55,7 g/m².dia e 163,4 g/m².dia, respectivamente.

Os ensaios BC1 e BC2 foram realizados no mesmo ponto da camada de cobertura, sobre uma fissura média, em um período curto de tempo. A similaridade dos valores encontrados para o fluxo de CH_4 já era previsto, uma vez que a integridade da camada de cobertura era a mesma em ambos os ensaios. Observa-se que por outro lado, nos ensaios C2 e C3 (Figuras 50-a e 51) na cobertura convencional com solo “A” tal similaridade não ocorreu.

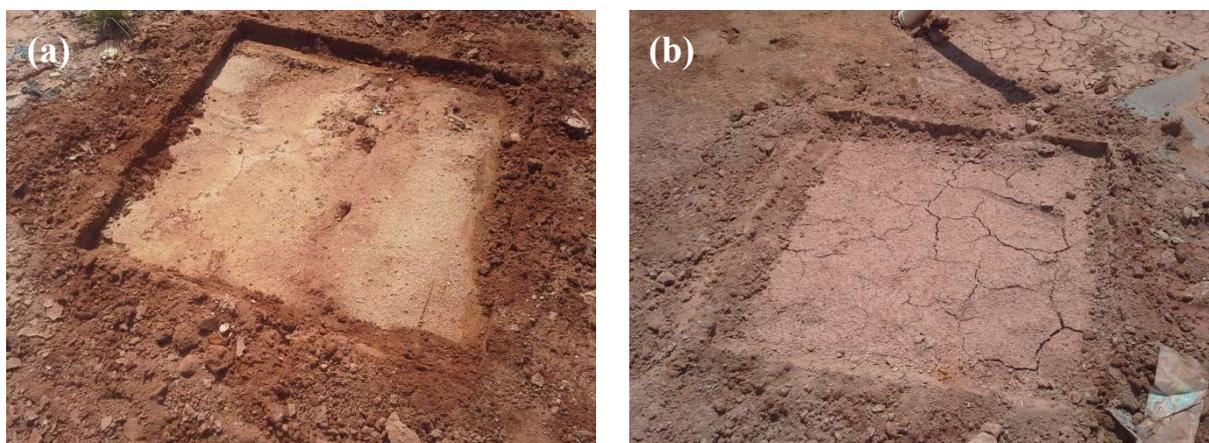
Os demais ensaios (BC3, BC4, BC5, BC6 e BC7) foram realizados em pontos que continham pequenas rachaduras superficiais na camada de cobertura. A variação do fluxo de CH_4 nesses ensaios foi de 7,2 a 86 $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$.

A Figura 58 mostra que no ensaio BC2 que obteve o maior valor de fluxo de CH_4 (369,2 $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$), a camada de cobertura possuía buracos profundos e no ensaio BC4 que obteve o menor fluxo de CH_4 (7,2 $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$), a camada possuía apenas rachaduras muito superficiais. A dispersão obtida para os fluxos de CH_4 nos ensaios pode ser justificada pela diferenciação da integridade da camada de cobertura nos ensaios.

A Figura 59 mostra a semelhança da integridade da camada de cobertura nos ensaios BC5, BC6 e BC7. Observa-se que nesses ensaios os valores encontrados para o fluxo de CH_4 foram de pequena variação entre si.

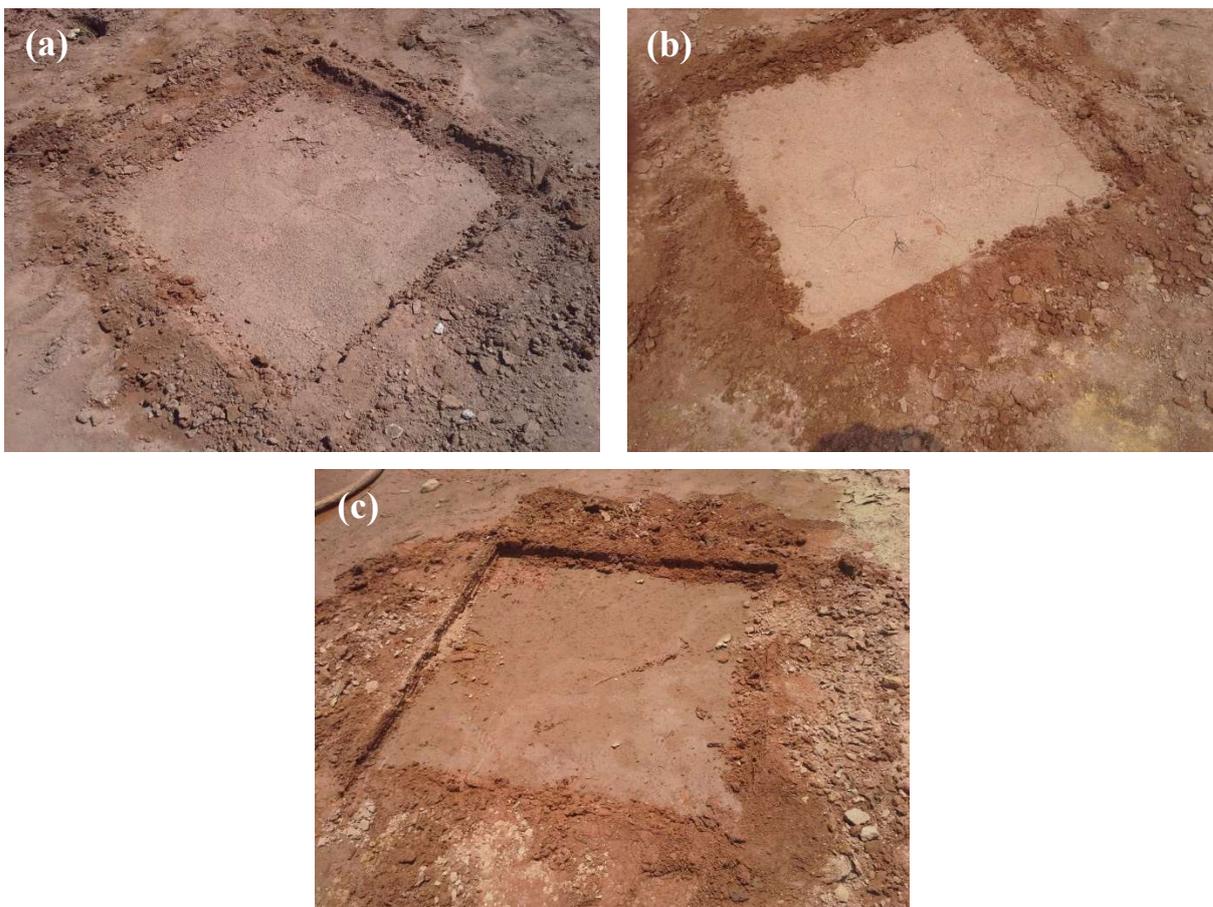
Em relação ao fluxo de CO_2 , o ensaio BC1 apresentou o maior resultado que foi de 961,3 $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$, representando um valor 25,7 vezes mais elevado do que o ensaio BC4 que apresentou o menor fluxo, com um valor de 37,4 $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$.

Figura 58 – Característica física do solo nos ensaios BC2 e BC4.



Legenda: (a) – ensaio BC2; (b) – ensaio BC4.

Figura 59 – Característica física do solo no ensaio BC5, BC6 e BC7.



Legenda: (a) – ensaio BC5; (b) – ensaio BC6; (c) – ensaio BC7.

Scheutz et al. (2003), encontrou emissões de CH_4 que variaram de 0 a $10 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ em camada de barreira capilar com 0,8 m de solo argiloso compactado acima de uma camada de 0,4 m de areia, mas com sistema de extração ativo de biogás, o que influencia significativamente nas emissões fugitivas.

Fernandes (2009), em seus ensaios encontrou valores variando na faixa de 23,2 a $118,5 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ para o fluxo de CH_4 e de 29,1 a $186,3 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ para o fluxo de CO_2 . A emissão média foi de $73,7 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ para o CH_4 e de $89,6 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ para o CO_2 .

Em Lopes (2011), as emissões de CH_4 na camada de barreira capilar apresentaram variação de 0 até $63,4 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ e de 0 a $233,9 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ para as emissões de CO_2 . O grau de compactação verificado nos locais dos ensaios apresentou uma média de 90,6%, frente ao grau de compactação 86,9% verificado na barreira capilar da CTR Seropédica.

Observa-se que os resultados encontrados por Lopes (2011) são similares aos encontrados na camada de barreira capilar da CTR Seropédica quando se excetua os ensaios BC1 e BC2 conforme mencionado anteriormente.

3.2.3. Emissões de Biogás na Camada Evapotranspirativa

Os resultados das emissões de CH₄ e CO₂ obtidos nos ensaios realizados na camada de cobertura do tipo evapotranspirativa são apresentados na Tabela 22 e graficamente nas Figuras 60 e 61, respectivamente.

O fluxo de CH₄ na camada evapotranspirativa variou de 5,0 a 68,9 g/m².dia e o fluxo de CO₂ variou de 36,5 a 207,6 g/m².dia. A emissão média calculada foi de 35,2 g/m².dia para o fluxo de CH₄ e de 99,3 g/m².dia para o fluxo de CO₂.

Tabela 22 – Resultados dos fluxos de CH₄ e CO₂ na camada de cobertura evapotranspirativa.

Data	Ensaio	Fluxo de CH₄ (g/m².dia)	Fluxo de CO₂ (g/m².dia)
13/11/2014	ET1	8,8	36,5
27/11/2014	ET2	49,8	111,3
16/12/2014	ET3	5,0	47,7
10/02/2015	ET5	43,3	93,5
03/02/2016	ET6	68,9	207,6
Mínimo		5,0	36,5
Máximo		68,9	207,6
Média		35,2	99,3

Figura 60 – Fluxo de CH₄ na camada de cobertura do tipo evapotranspirativa em (g/m².dia).

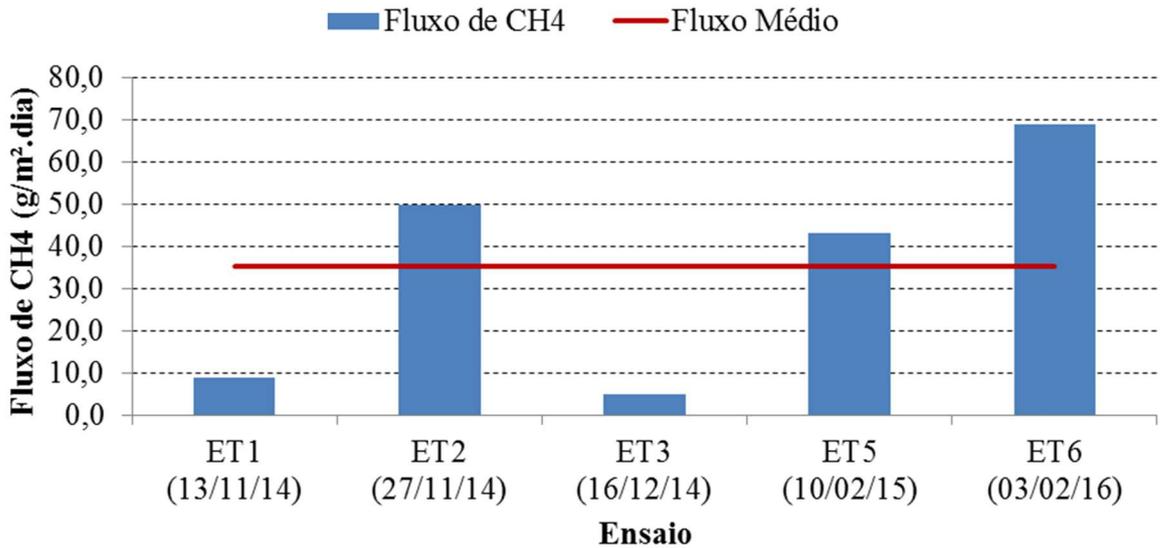
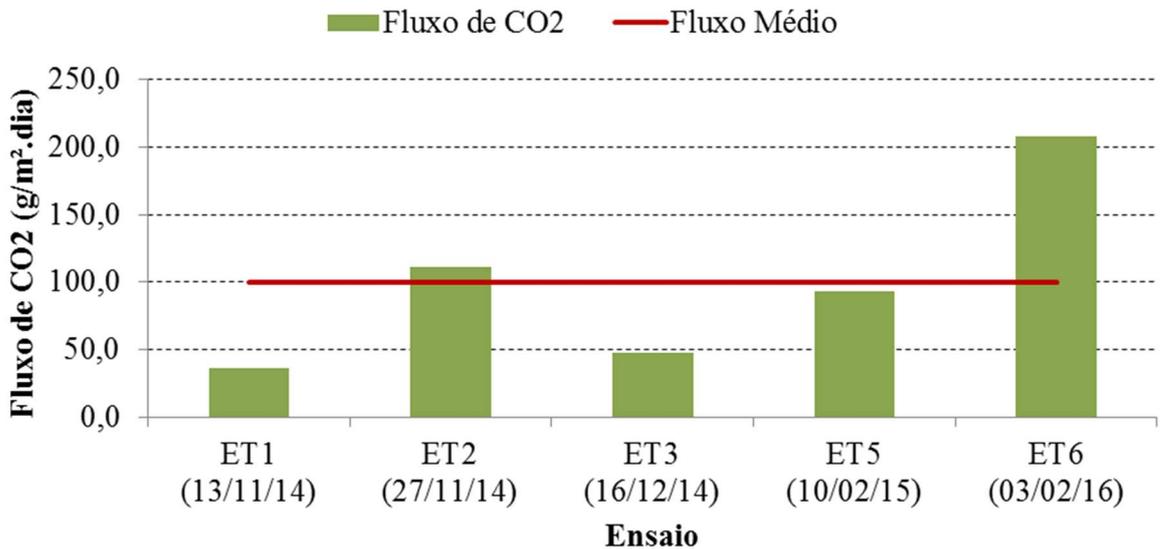


Figura 61 – Fluxo de CO₂ na camada de cobertura do tipo evapotranspirativa em (g/m².dia).



Os ensaios ET2, ET5 e ET6 apresentaram valores acima da média calculada para fluxo de CH₄. Em relação ao fluxo de CO₂, os ensaios ET2 e ET6 apresentaram valores de fluxo acima da média calculada.

O ensaio ET6 apresentou o maior fluxo de CH₄ dentre os ensaios realizados na camada evapotranspirativa, apresentando um valor de 68,9 g/m².dia. Este fluxo de CH₄ no ensaio ET6

é 13,9 vezes mais elevado do que o menor fluxo de CH_4 apresentado no ensaio ET3, que foi de $5,0 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$.

Os resultados apresentados para os fluxos de CH_4 e CO_2 na camada de cobertura evapotranspirativa estão diretamente relacionados à situação na qual a vegetação se encontra. Nos ensaios ET1, ET2, ET3 e ET5 a condição da vegetação era mais adequada em toda a célula experimental. Já no ensaio ET6 a vegetação apresentava sinais claros de depreciação.

A Figura 62 ilustra a situação da vegetação nos ensaios ET2 e ET6 que apresentaram fluxos de CH_4 de $49,8 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ e $68,9 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$, respectivamente.

Figura 62 – Característica física da grama nos ensaios ET2 e ET6.



Legenda: (a) – Ensaio ET2; (b) – Ensaio ET6.

Lopes (2011) estudou as emissões de biogás em camada de cobertura com configuração de perfil similar e encontrou valores para o fluxo de CH_4 de até $43,9 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$ e para o fluxo de CO_2 de até $388,7 \text{ g/m}^2 \cdot \text{dia}$. Cabe ressaltar que a média do grau de compactação nos locais desses ensaios foi de 90,5%. Comparativamente, os resultados encontrados na camada evapotranspirativa da CTR Seropédica foram similares, mesmo com grau de compactação do solo inferior de 72,2%.

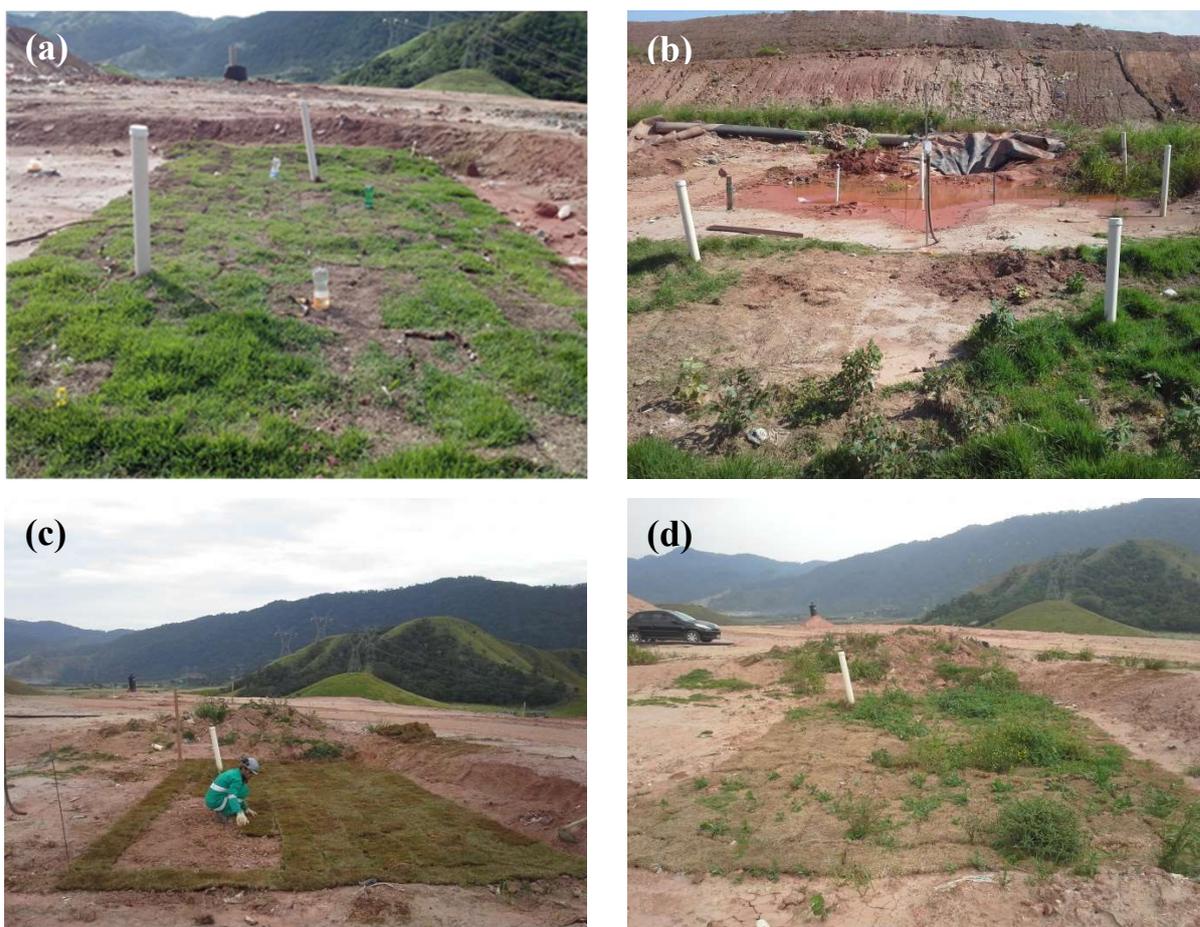
A camada de cobertura evapotranspirativa ficou livre dos problemas relacionados às rachaduras superficiais e fendas, o que representou sua principal vantagem.

Cabe ressaltar que a vegetação presente na célula experimental tendeu a ter um efeito não duradouro com o passar do tempo, mostrando-se não ser uma espécie ideal para este tipo de utilização. A condição da camada evapotranspirativa nunca esteve ideal, porém no início

da pesquisa apresentava melhores condições em comparação com o final. Com o desenvolvimento do trabalho a mesma sofreu uma depreciação em função dos ensaios realizados, das condições climáticas e operacionais no aterro sanitário.

A Figura 63 ilustra as mudanças que ocorreram no aspecto físico da vegetação na cobertura evapotranspirativa no decorrer da pesquisa.

Figura 63 – Situação da camada de cobertura evapotranspirativa em diferentes períodos.



Legenda: (a) – outubro de 2014; (b) - março de 2015; (c) – julho de 2015; (d) – dezembro de 2016.

Outro benefício da camada evapotranspirativa reside na característica da estrutura da superfície do solo. Observou-se que a vegetação atuou benéficamente na construção de uma estrutura coesa entre o solo e às raízes da grama. Esta estrutura apresenta maior resistência ao escape do biogás do que nas outras células experimentais.

A Figura 64 apresenta a condição do solo sob as raízes da vegetação que evidencia uma espessura significativa de solo aderido na região do sistema radicular da grama.

Figura 64 – Estrutura do solo sob as raízes da camada evapotranspirativa.



Fonte: JOAQUIM Jr, 2015, p. 159.

3.2.4. Análise Comparativa das Emissões de Biogás

Com base nas investigações de campo e nos resultados obtidos dos fluxos de metano e dióxido de carbono é apresentada uma análise comparativa das camadas de cobertura estudadas no aterro sanitário de Seropédica em relação à retenção do biogás.

A Tabela 23 apresenta um resumo dos resultados obtidos para as emissões de CH_4 conjuntamente com a caracterização dos pontos em relação à existência de fissuras no momento dos ensaios de campo.

Tabela 23 – Resumo das emissões de CH₄ e CO₂ com a caracterização dos pontos em relação à existência de fissuras.

Ponto	Data	Fluxo de CH ₄ (g/m ² .dia)	Fluxo de CO ₂ (g/m ² .dia)	Placa	Presença de Fissuras no ensaio
C'1	07/08/2014	105,1	291,5	PP	Sim (pequena)
BC1	13/11/2014	349,5	961,3	PP	Sim (média)
C1	13/11/2014	8,2	29,0	PP	Não
ET1	13/11/2014	8,8	36,5	PP	Não
ET2	27/11/2014	49,8	111,3	PG	Não
C'2	27/11/2014	389,0	843,4	PG	Sim (grande)
BC2	16/12/2014	369,2	855,1	PG	Sim (média)
C2	16/12/2014	29,9	65,8	PG	Sim (grande)
ET3	16/12/2014	5,0	47,7	PG	Não
BC3	16/01/2015	86,0	278,3	PG	Sim (pequena)
C3	16/01/2015	14,0	69,5	PG	Sim (grande)
BC4	26/01/2015	7,2	37,4	PG	Sim (pequena)
C4	26/01/2015	7,5	32,4	PG	Sim (pequena)
C5	10/02/2015	9,3	30,1	PG	Não
ET5	10/02/2015	43,3	93,5	PG	Não
C'3	01/09/2015	64,6	115,6	PG	Não
BC5	01/09/2015	67,5	247,5	PG	Sim (pequena)
BC6	22/10/2015	51,0	167,5	PG	Sim (pequena)
C6	22/10/2015	14,7	125,0	PG	Sim (pequena)
BC7	03/02/2016	66,8	86,4	PG	Sim (pequena)
C'4	03/02/2016	106,7	326,3	PG	Sim (pequena)
ET6	03/02/2016	68,9	207,6	PG	Não

Legenda: PP – placa pequena; PG – placa grande.

As Figuras 65 e 66 apresentam os resultados obtidos para as emissões de CH₄ e CO₂, medidas em g/m².dia, para os três tipos de camadas de cobertura estudados respectivamente.

Os resultados mostraram que entre as camadas convencionais, aquela constituída com solo “A” obteve menores emissões de CH₄ e CO₂ em comparação com a camada convencional que continha o solo “B”. Em relação às camadas alternativas, a evapotranspirativa obteve menores emissões de CH₄ e CO₂ quando comparada com a camada de barreira capilar.

Observa-se que a camada de barreira capilar apresentou emissões de CH₄ com variação de 7,0 a 369,0 g/m².dia. Excetuando-se os dois ensaios que apresentaram maiores fluxos de CH₄, a variação das emissões de CH₄ neste tipo de camada é de até 86,0 g/m².dia. A camada evapotranspirativa apresentou emissões de CH₄ que variaram de 5,0 a 68,9 g/m².dia. Em relação às camadas convencionais, aquela constituída com o solo “A” apresentou

emissões de CH₄ que variaram de 7,5 a 29,9 g/m².dia e a constituída com o solo “B” apresentou emissões de CH₄ que variaram de 64,6 a 389,0 g/m².dia.

Figura 65 – Emissões de CH₄ por tipo de camada de cobertura em (g/m².dia).

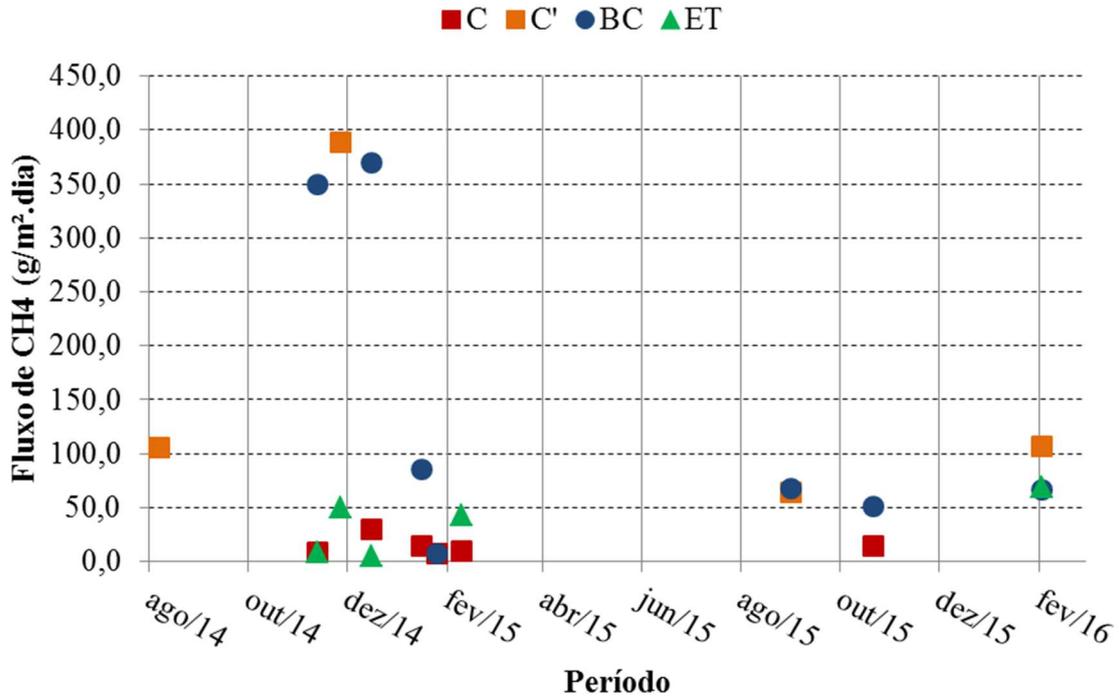
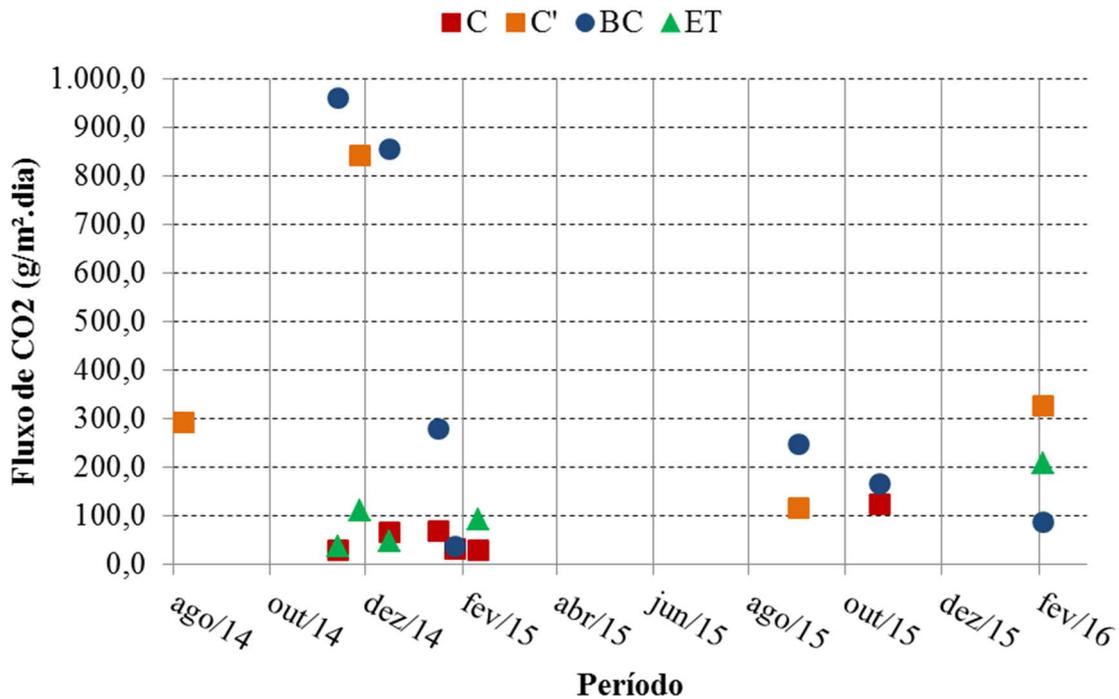


Figura 66 – Emissões de CO₂ por tipo de camada de cobertura em (g/m².dia).



Observa-se que as emissões de CH₄ nas camadas de cobertura convencional (C) e evapotranspirativa (ET) se concentraram na faixa de 5,0 a 70,0 g/m².dia. Já nas camadas convencional (C') e barreira capilar (BC) houve maior dispersão nas emissões de CH₄, apresentando valores na faixa de 7,0 a 390,0 g/m².dia. Porém, a maioria dos resultados obtidos nestas duas camadas se concentraram na faixa de 7,0 a 110,0 g/m².dia, apresentando valores que são 1,6 vezes superiores aos encontrados nas camadas C e ET.

Para o CO₂ as variações foram na faixa de 30,0 a 210,0 g/m².dia nas camadas convencional (C) e evapotranspirativa (ET) e de 37,0 a 962,0 g/m².dia nas camadas convencional (C') e barreira capilar (BC).

As emissões de biogás também foram comparadas separadamente em relação à existência de fissuras nos pontos em que foram realizados os ensaios de placa de fluxo.

Os resultados das emissões de biogás em pontos que continham fissuras nas camadas de cobertura são apresentados nas Figuras 67 e 68, para o metano e dióxido de carbono, respectivamente.

Observa-se que os fluxos de CH₄ nos ensaios realizados em pontos com fissuras (7,2 a 369,2 g/m².dia) apresentaram valores mais elevados do que os ensaios realizados em pontos sem fissuras (5,0 a 68,9 g/m².dia), conforme o esperado.

Figura 67 – Fluxos de CH₄ nos ensaios que continham fissuras em (g/m².dia).

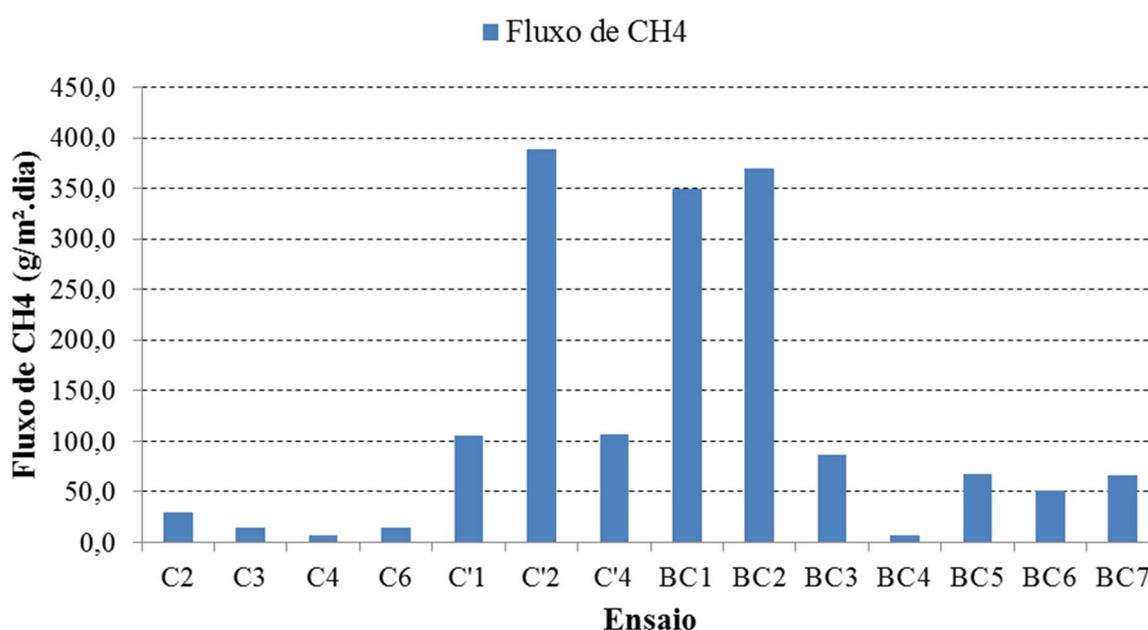
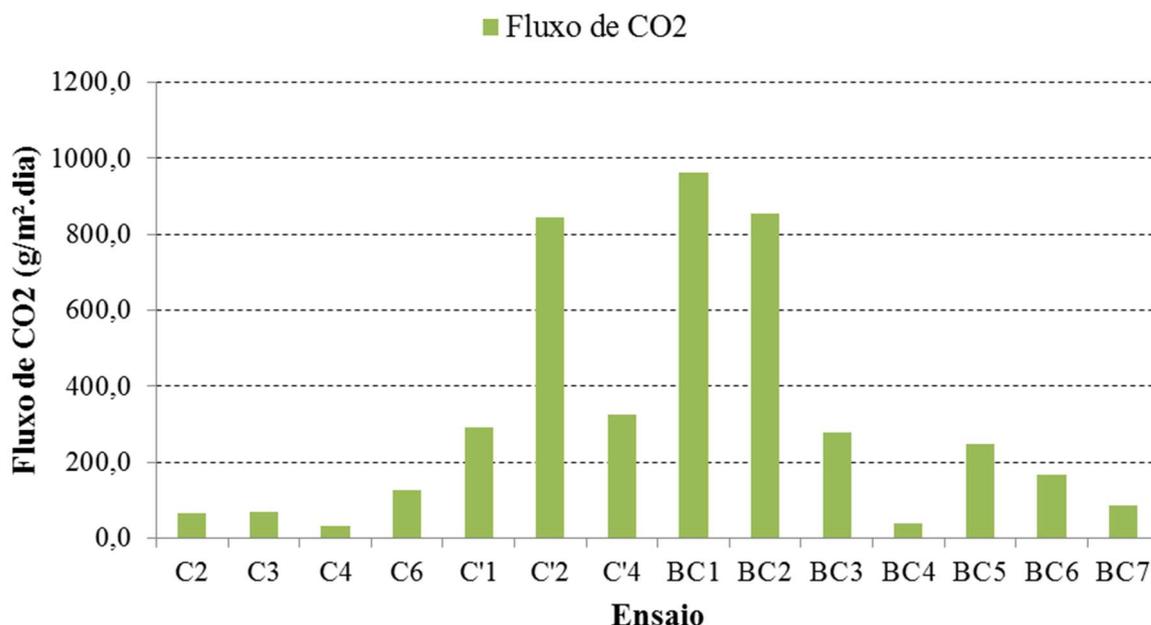


Figura 68 – Fluxos de CO₂ nos ensaios que continham fissuras em (g/m².dia).



O ensaio C'2 apresentou o maior fluxo de CH₄, que foi de 389,0 g/m².dia. Os ensaios BC1 e BC2 apresentaram valores para o fluxo de CH₄ similares, sendo de 249,5 g/m².dia e 369,2 g/m².dia respectivamente. Entretanto, as fissuras dos ensaios BC1 e BC2 foram caracterizadas como médio porte e a do ensaio C'2 como de grande porte.

Observa-se que, apesar das fissuras terem sido caracterizadas como grandes nos ensaios C2 e C3, os valores encontrados para o fluxo de CH₄ foram insignificantes quando comparado com o ensaio C'2, que teve a mesma caracterização quanto ao tamanho da fissura. Conforme já mencionado, o grau de compactação da camada C foi de 92% enquanto da C' 88% no dia da determinação de campo indicando uma condição melhor.

Dentre as investigações realizadas sobre pequenas fissuras (rachaduras superficiais), os maiores resultados foram encontrados nos ensaios realizados sobre a camada de cobertura com solo "B", mais especificamente os ensaios C'1 e C'2.

Em relação ao fluxo de CO₂, os resultados encontrados obedecem ao mesmo padrão que os verificados para o fluxo de CH₄.

Nas Figuras 69 e 70 são apresentados os resultados dos ensaios que não continham fissuras para o fluxo de CH₄ e CO₂, respectivamente.

Figura 69 – Fluxos de CH₄ nos ensaios que não continham fissuras em (g/m².dia).

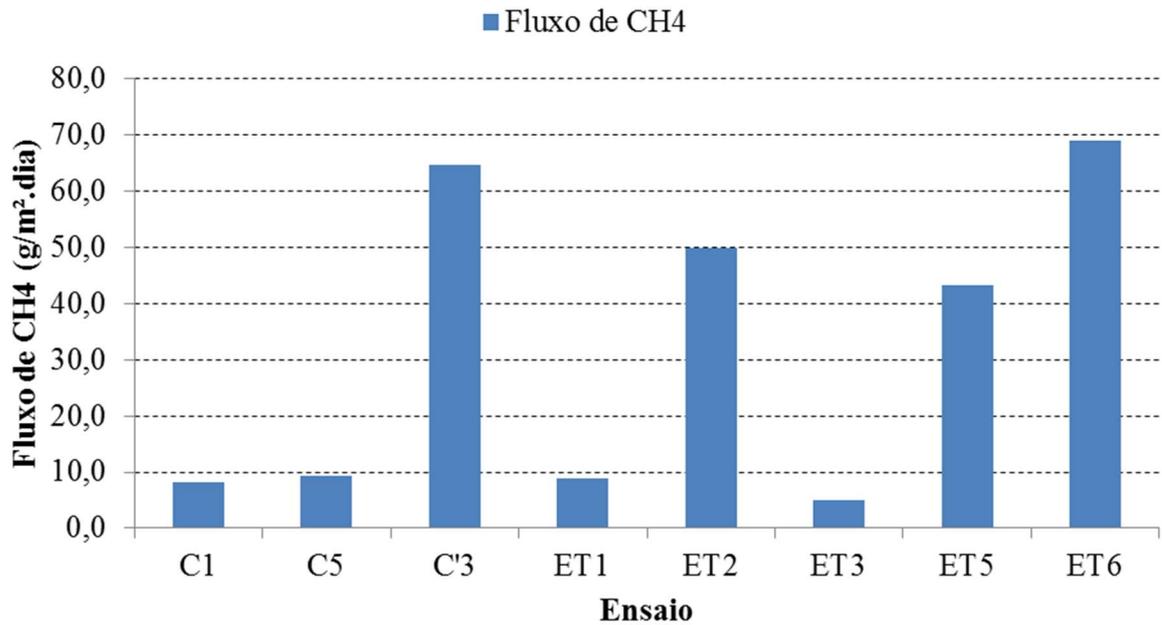
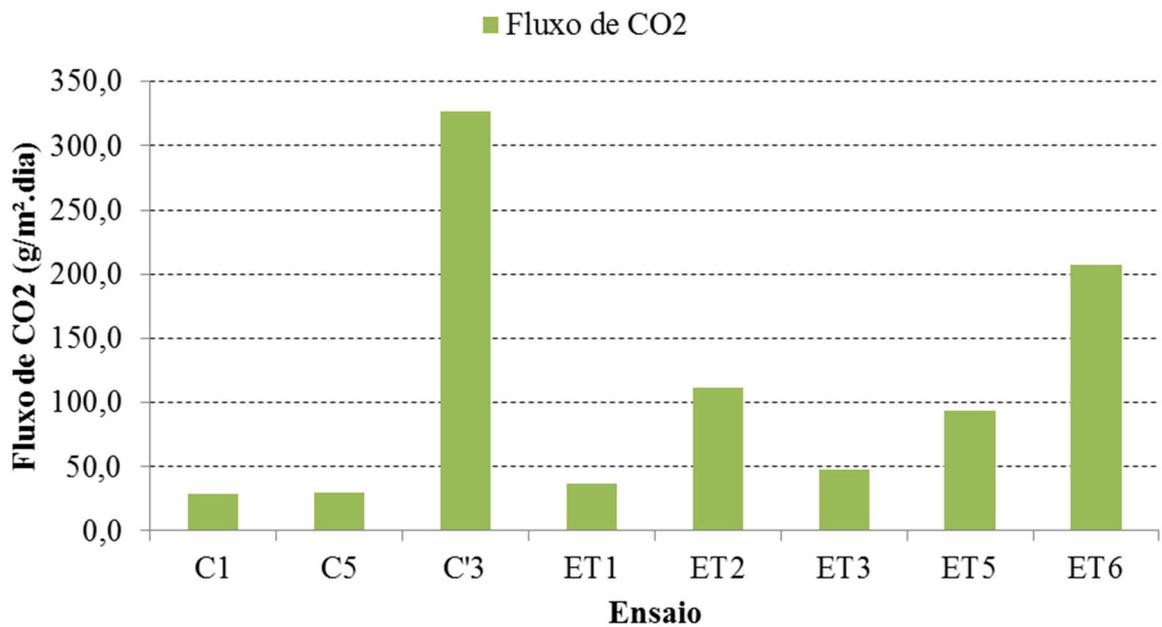


Figura 70 – Fluxos de CO₂ nos ensaios que não continham fissuras em (g/m².dia).



O ensaio ET6 apresentou o maior fluxo de CH₄ dentre os pontos sem fissura, porém a condição da vegetação estava precária conforme já dito anteriormente.

Comparando os resultados encontrados nos ensaios das camadas convencionais nos pontos sem fissuras, temos que o ensaio C'3 apresentou o maior fluxo de CH₄ (64,6 g/m².dia), sendo 7,9 vezes superior ao menor fluxo de CH₄, representado pelo ensaio C1 (8,2 g/m².dia).

Para o fluxo de CO₂, o ensaio C'3 apresentou o maior fluxo com um valor de 326,3 g/m².dia. Este resultado é 11,3 vezes superior ao menor fluxo de CO₂ encontrado no ensaio C1, que foi de 29,0 g/m².dia.

Vale ressaltar que mesmo na inexistência de rachaduras ou fendas nas camadas de cobertura, os ensaios realizados apresentaram emissões de CH₄ e CO₂. Este fato pode ser explicado devido ao fato de que os solos empregados nas camadas de cobertura apresentaram alto teor de areia em sua composição, possuindo uma condutividade hidráulica em laboratório que foi de $4,84 \times 10^{-6}$ m/s no solo "A" e $7,90 \times 10^{-6}$ m/s no solo "B". Estes valores indicam que os gases têm condições de migrar através dos vazios existentes nos solos. Observa-se ainda que o sistema de captação do biogás era passivo na área das células experimentais.

Conclui-se que a camada de cobertura convencional com solo "B" obteve o pior desempenho na minimização das emissões de biogás, visto que os resultados encontrados na presença ou ausência de fissuras foram superiores aos demais ensaios realizados nas outras coberturas.

Borba (2015) encontrou valores para as emissões de CH₄ que variaram de 181,4 a 574,6 g/m².dia para os ensaios realizados em fissuras, com emissão média de 329,6 g/m².dia. Já para os ensaios realizados sem fissuras, as emissões de CH₄ variaram de 0,1 a 59,5 g/m².dia, com uma emissão média de 18,4 g/m².dia.

Comparando somente os resultados dos fluxos de CH₄ em pontos com fissuras obtidos nas camadas convencionais, observa-se que somente o ensaio C'2 (389,0 g/m².dia) apresentou resultado dentro da faixa encontrada por Borba (2015). Todos os demais ensaios apresentaram fluxo de CH₄ abaixo de 100 g/m².dia.

Em relação aos pontos sem fissuras, o ensaio C'3 apresentou um valor de 64,6 g/m².dia para o fluxo de CH₄, estando compreendido na faixa de valores encontrada por Borba (2015).

Em Dever et al. (2013) foram estudados 16 diferentes aterros na Austrália, e os resultados de emissões de gases pela camada de cobertura intermediária foram também

divididos em pontos contendo fissuras ou não contendo fissuras. A emissão média de CH₄ foi de 1200,0 g/m².dia para os pontos com fissuras e de 25 g/m².dia para os pontos sem fissuras. Os resultados encontrados para os ensaios em pontos sem fissuras são similares aos obtidos na camada convencional com solo “A” no aterro sanitário de Seropédica, onde a emissão média foi aproximadamente de 27 g/m².dia.

A Tabela 24 apresenta a estatística descritiva das emissões de biogás obtidas nos pontos com e sem fissuras.

Tabela 24 – Estatística descritiva das emissões de biogás nos pontos com e sem fissuras.

Integridade da camada de cobertura	Gases	Emissão mínima (g/m ² .dia)	Emissão máxima (g/m ² .dia)	Emissão média (g/m ² .dia)
Com fissuras	CH ₄	7,2	389,0	118,9
	CO ₂	32,4	961,3	313,4
Sem fissuras	CH ₄	5,0	68,9	32,2
	CO ₂	29,0	326,3	110,3

Nos dias 13/11/2014 e 16/12/2014 foram realizados ensaios de placa de fluxo em cada uma dos 3 tipos de células experimentais e, os resultados encontrados para o fluxo de CH₄ nesses ensaios são apresentados nas Figuras 71 e 72 respectivamente.

Figura 71 – Fluxo de CH₄ nos ensaios realizados no dia 13/11/2014 em (g/m².dia).

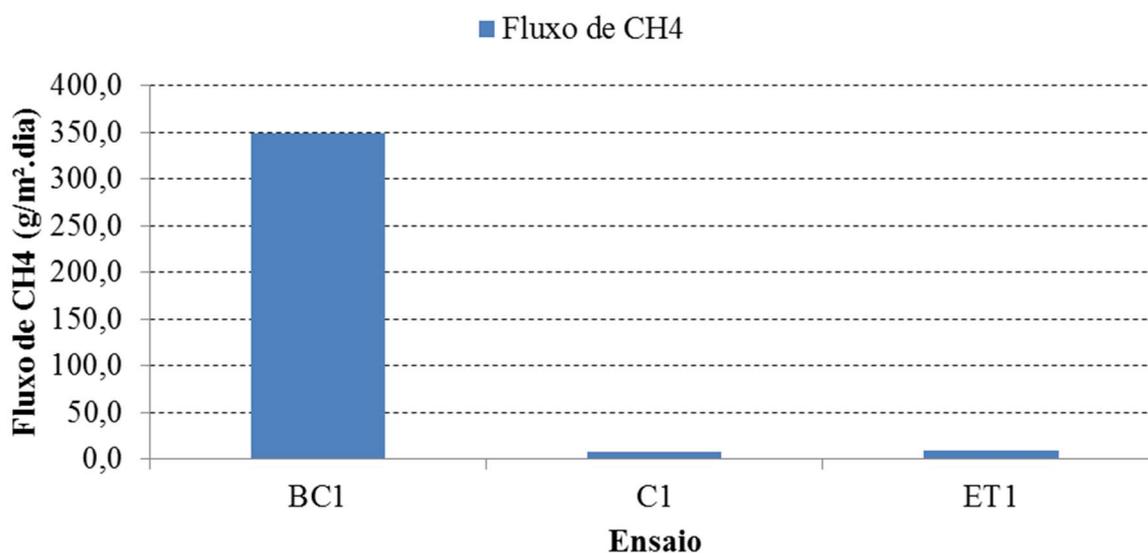
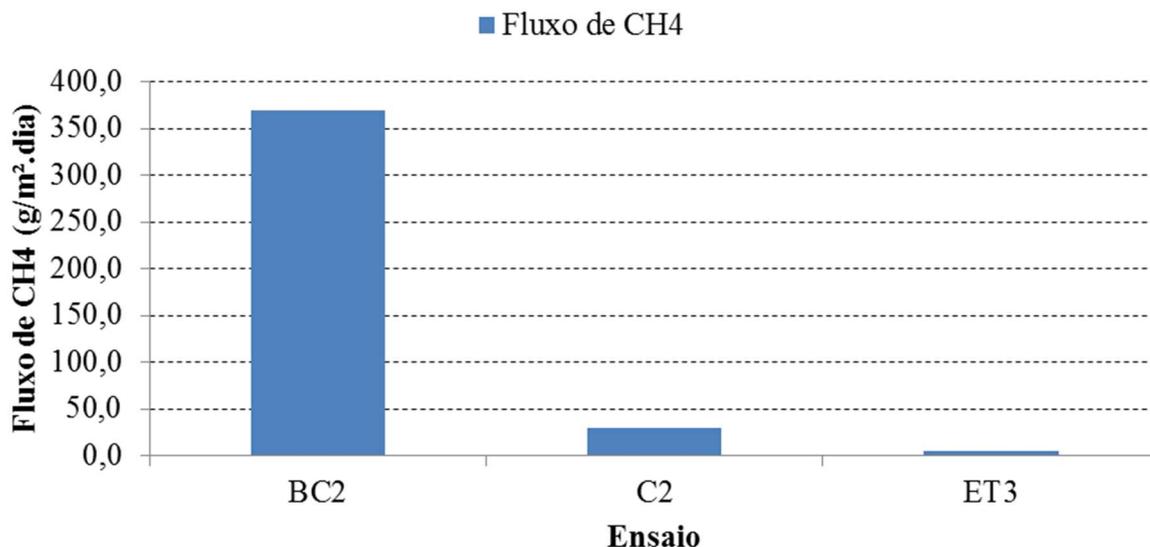


Figura 72 – Fluxo de CH₄ nos ensaios realizados no dia 16/12/2014 em (g/m².dia).



Para um mesmo dia de investigação de campo onde as condições climáticas e operacionais presentes nos ensaios de campo são idênticos, temos que em ambos os dias, os ensaios realizados na camada de barreira capilar apresentaram valores elevados em relação aos demais. Uma possível justificativa para tais resultados é a profundidade da fissura presente nos pontos BC1 e BC2. Uma vez que a profundidade da fissura alcance a camada de areia da barreira capilar, a emissão fugitiva é facilitada em função da elevada permeabilidade ao ar deste tipo de granulometria. Conforme já dito, os ensaios BC1 e BC2 foram realizados em pontos com fissuras médias.

Apesar da similaridade dos resultados obtidos para o fluxo de CH₄, temos que o ensaio C1 foi realizado em um ponto que não continha fissura e o ensaio C2 em um ponto com uma grande fissura. Independentemente da existência ou não de fissuras, os ensaios realizados na camada convencional com solo “A” apresentaram valores muito reduzidos. Mesmo tendo sido determinado um grau de compactação de 92% nesta célula, esses resultados com baixos valores encontrados para o fluxo de CH₄ nesta camada devem ser considerados com cautela. Os valores obtidos estão muito abaixo das médias, tanto para os pontos com fissuras quanto para os sem fissuras (tabela 24) e abaixo das médias de Borba, 2015. Possivelmente estes resultados revelam uma especificidade da célula experimental em estudo, não representando a realidade das emissões de biogás normalmente encontradas neste sistema de cobertura.

Considerando este resultado pontual encontrado na célula experimental da camada convencional com solo “A”, as demais medidas de emissões indicam que a camada evapotranspirativa apresentou melhor desempenho na minimização da emissão do biogás para a atmosfera, mesmo considerando as condições adversas ao estabelecimento e manutenção da vegetação no campo.

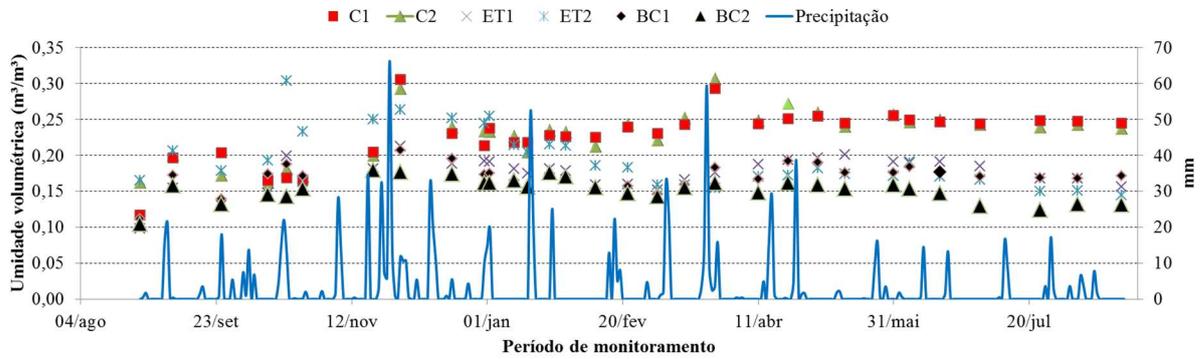
3.2.5. Influência da Umidade dos Solos nas Emissões de Biogás

Os dados de umidade do solo nas camadas de cobertura, obtidos no estudo de Joaquim Jr. (2015) nas mesmas células experimentais, foram utilizados no entendimento da influência da umidade nas emissões de biogás.

Com o intuito de se obter o comportamento do solo em relação à umidade durante um período longo, buscou-se analisar os resultados obtidos por Joaquim Jr. (2015) em um período de um ano de monitoramento (agosto de 2013 a agosto de 2014), que contou apenas com uma estação chuvosa. Foram obtidos dados de umidade volumétrica do solo com a utilização de sensores instalados nas profundidades de 0,20 m e 0,40 m nas células experimentais C, BC e ET. Cabe ressaltar que este período não compreende as datas dos ensaios realizados na presente pesquisa e, a camada convencional com solo “B” ainda não havia sido instalada.

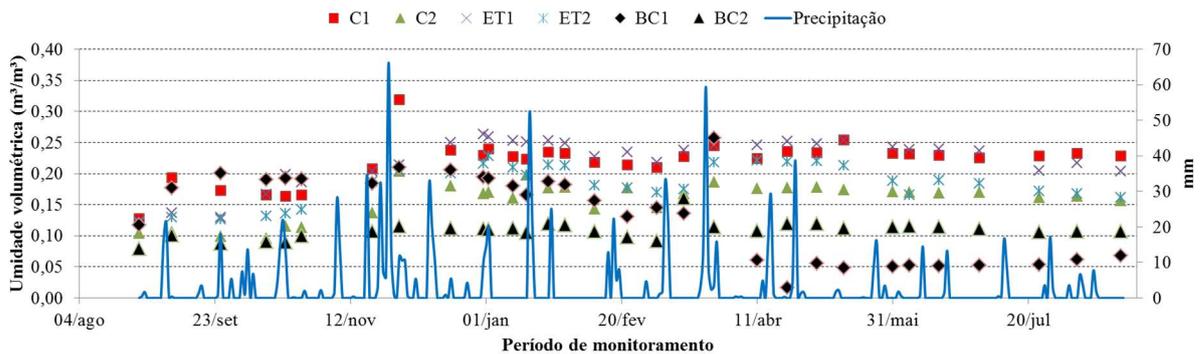
As Figuras 73 e 74 apresentam as variações da umidade do solo a 0,20 m e 0,40 m respectivamente, conjuntamente com os dados pluviométricos correspondentes ao período.

Figura 73 – Variação da umidade do solo a 0,20 m de profundidade nas camadas de cobertura C, ET e BC.



Fonte: Adaptado de Joaquim Jr., 2015, p. 137.

Figura 74 – Variação da umidade do solo a 0,40 m de profundidade nas camadas de cobertura C, ET e BC.



Fonte: Adaptado de Joaquim Jr., 2015, p. 138.

No início do monitoramento a umidade encontrada nas células experimentais apresentavam valores bem reduzidos ($0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$) em ambas as profundidades analisadas. Considerando a sucção correspondente nas curvas características obtidas em laboratório, este valor é extremamente baixo. As umidades residuais médias obtidas nas curvas foram de $0,20$ a $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (JOAQUIM Jr., 2015).

Ao analisar a Figura 73 observa-se que a umidade variou de $0,15$ a $0,30 \text{ m}^3/\text{m}^3$ na profundidade de $0,20 \text{ m}$ para todas as camadas de cobertura. Já a Figura 74 mostra que na profundidade de $0,40 \text{ m}$ a variação foi de $0,10$ a $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Na camada de barreira capilar, a umidade em ambas as profundidades é inferior às demais coberturas na maior parte do tempo.

Na camada evapotranspirativa, a umidade na profundidade de 0,20 m apresentou valores compreendidos entre 0,10 e 0,25 m^3/m^3 . Já na profundidade de 0,40 m, a variação da umidade ficou entre 0,15 e 0,27 m^3/m^3 . Portanto, a umidade na profundidade 0,20 m foi menor do que na profundidade 0,40 m.

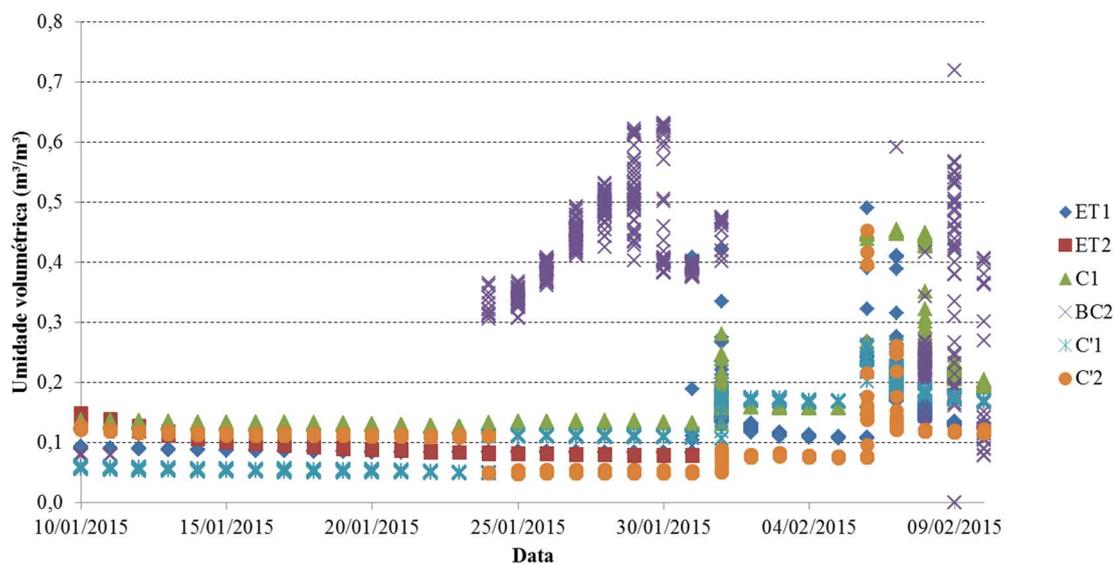
A faixa de umidade durante todo o período ficou compreendida entre 0,05 e 0,35 m^3/m^3 . Esses valores são considerados baixos, correspondendo a um período seco (JOAQUIM Jr, 2015). Porém, observa-se que os valores de umidade na camada convencional são superiores aos encontrados nas demais coberturas.

A partir de dezembro de 2014, Joaquim Jr. (2015) introduziu um sistema automático de aquisição de dados (*dataloggers*) nas células experimentais. Os resultados obtidos pela leitura dos sensores eram armazenados neste sistema automático e, posteriormente descarregados em um software computacional. Neste período, a camada convencional com solo “B” já havia sido instalada, podendo assim analisar comparativamente o comportamento dos dois solos (“A” e “B”).

Problemas oriundos do funcionamento dos sensores de umidade acarretaram em uma série de discontinuidades nas medições. Portanto, os resultados apresentados correspondem apenas aos sensores instalados na profundidade de 0,20 m (JOAQUIM Jr., 2015).

A Figura 75 apresenta os dados obtidos no período de 31/12/2014 a 10/02/2015, onde o intervalo de medição no aparelho foi programado para recolher os resultados a cada meia hora.

Figura 75 - Variação da umidade volumétrica nas camadas de cobertura estudadas, a 0,20 m de profundidade, no período 10/01/2015 a 10/02/2015.



Os resultados da umidade volumétrica apresentados na Figura 75 constataam uma pequena diferença entre as camadas de cobertura das células experimentais. Destaca-se que em 10 de janeiro de 2015, a umidade estava entre $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ na maioria das camadas, representando valores extremamente baixos. Esse período foi caracterizado por pouquíssima precipitação combinado com elevada evaporação, o que pode explicar a situação da umidade do solo.

Em consequência de dias chuvosos no início de fevereiro de 2015, a umidade em todas as camadas de cobertura aumentou, apresentando valores entre $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,50 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Observa-se que neste período, os menores níveis de umidade ocorreram na camada de cobertura convencional C', que recebeu o solo "B". Uma possível razão para este desempenho está relacionada com o fato de que a cobertura C' é um ano mais nova do que as demais coberturas.

Comparativamente, tanto no período seco quanto no chuvoso, os valores de umidade na camada convencional com solo "A" apresentaram resultados superiores aos encontrados na cobertura convencional com solo "B".

A análise da influência da umidade do solo na emissão de biogás foi realizada para seis ensaios que ficaram compreendidos no período de obtenção dos dados de umidade. Infelizmente os demais ensaios ficaram fora do intervalo e não foram contemplados na análise.

A Tabela 25 apresenta os resultados dos fluxos desses ensaios e os valores de umidade do solo correspondentes.

Tabela 25 – Emissões de biogás e umidade do solo nas camadas de cobertura.

Data	Ensaio	Fluxo de CH₄ (g/m².dia)	Fluxo de CO₂ (g/m².dia)	Umidade (m³/m³)
16/01/2015	BC3	86,0	278,3	-
	C3	14,0	69,5	0,132
26/01/2015	BC4	7,2	37,4	0,400
	C4	7,5	32,4	0,135
10/02/2015	C5	9,3	30,1	0,195
	ET5	43,3	93,5	0,125

Nota-se que no dia 26/01/2015 os resultados encontrados para os fluxos de CH₄ e CO₂ foram similares, porém a umidade na camada de barreira capilar era 3,0 vezes superior em relação à camada convencional com solo “A”.

O fluxo de CH₄ no ensaio ET5 foi de 43,3 g/m².dia, sendo 4,7 vezes superior ao fluxo de CH₄ no ensaio C5. O valor de umidade no ensaio ET5 foi de 0,195 m³/m³, sendo 1,6 vezes mais elevado do que a umidade no ensaio C5, que foi de 0,125 m³/m³. É possível que a umidade tenha influenciado as emissões de biogás nestes ensaios.

Os baixos valores de fluxo de biogás encontrados nos ensaios realizados na camada convencional com solo “A” não foram justificados pela influência da umidade na camada de cobertura, visto os baixos valores encontrados para a umidade no momento dos ensaios.

Conclui-se que não houve uma relação direta entre umidade do solo na camada de cobertura e a emissão do biogás nos ensaios que puderam ser analisados. Possivelmente a característica de este solo ser arenoso, aliada a localização do aterro, onde venta bastante, e as elevadas temperaturas, tenha feito com que o fator evaporação fosse preponderante.

CONCLUSÃO

A metodologia de placa de fluxo mostrou-se um procedimento de fácil utilização e manuseio para a determinação das emissões dos gases nas camadas de cobertura. O tempo relativamente curto de duração dos ensaios (1 hora) permitiu a realização de mais de uma investigação na área de estudo.

Os solos empregados nas camadas de cobertura apresentaram características granulares inadequadas (alto teor de areia) para a minimização das emissões fugitivas de biogás.

A cobertura do tipo convencional e a barreira capilar apresentaram danos por ressecamento (fissuras). Já a cobertura evapotranspirativa apresentou vantagem por ficar livre dos problemas relacionados às fissuras, além de atuar de forma eficaz na construção de uma estrutura que contribui para a retenção do biogás.

Os resultados indicaram que as emissões de biogás na camada convencional com solo “A” variaram de 7,5 a 29,9 g/m².dia para o CH₄. Borba (2015) apresentou resultados para o fluxo de CH₄ na mesma camada de cobertura de até 575,0 g/m².dia, o que indicou que os baixos valores encontrados para o fluxo de CH₄ nesta camada se referiu a uma especificidade da célula experimental estudada. Já a camada convencional com solo “B” apresentou variação de 64,6 a 389,0 g/m².dia para as emissões de CH₄, resultados que foram mais coerentes aos encontrados em diversos estudos com camadas convencionais em diversos aterros sanitários pelo Brasil.

Em relação às camadas alternativas, a barreira capilar obteve emissões de CH₄ que variaram de 7,2 a 369,2 g/m².dia e as emissões de CO₂ variaram de 37,4 a 961,3 g/m².dia. A camada evapotranspirativa proporcionou o melhor desempenho em relação às demais camadas de cobertura, apresentando variação de 5,0 a 68,9 g/m².dia para as emissões de CH₄ e de 36,5 a 207,6 g/m².dia para as emissões de CO₂. As emissões de CH₄ nos ensaios realizados em pontos com fissuras obtiveram uma emissão média de 118,9 g/m².dia, sendo maior do que aqueles realizados em pontos sem fissuras onde a emissão média foi de 32,2 g/m².dia.

A variabilidade de valores encontrados para os fluxos de biogás pode indicar variações de produção de gases dentro do aterro sanitário ou explicar a eficácia do sistema de extração do entorno.

Os estudos de emissões fugitivas de biogás pela camada de cobertura de um aterro sanitário são essenciais para modelagens, planejamento e instalação de novos projetos e também para o acompanhamento da eficiência do sistema de captação de gases implantados.

Sugestões

- Realizar mais investigações de placa de fluxo, umidade e temperatura, abrangendo períodos secos e chuvosos, analisando as variações de fluxo encontradas ao longo do tempo;
- Avaliar como as dimensões de diferentes placas de fluxo podem influenciar nos resultados obtidos para os fluxos de biogás;
- Determinar em laboratório, por meio de cromatografia gasosa, as emissões de gases nas células experimentais da CTR Seropédica e correlacioná-las com os resultados obtidos no presente estudo;
- Avaliar outras espécies de vegetação com maior potencial de desenvolvimento e resistência às condições adversas de um aterro sanitário;

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 8.419:** *Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – Procedimento*, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 10.004:** *Resíduos sólidos - Classificação*, 2004.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza pública e Resíduos Especiais. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014*. **Grappa Editora e Comunicação:** São Paulo, 2014. ISSN 2179-8303

ALCÂNTARA, P. B. *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. 2007. 366 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2007.

ALVES, I. R. F. S. *Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos*. 2008. 134 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2008.

AUGENSTEIN, D.; PACEY, J. *Modelling lanfill methane generatio*. In.: **Proceedings of the 3° International Landfill Symposium**, Sardenha, Italia, v. 1, p. 115-148, 1991.

BABILOTTE, A.; GREEN, R.; HATER, G.; WATERMOLEN, T.; STALEY, B. *Field intercomparison of methods to measure fugitive methane emissions*. In.: **Proceedings Sardinia**, 20° International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2009.

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.

BAIRD, C.; CANN, M. *Química ambiental*. **Bookman:** Porto Alegre, 4 ed., p. 844, 2011. ISBN 978-85-7780-848-9

BARROS, M. C. *Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura*. 2005. 146 f. **Dissertação** (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

BENSON, C.; ABICHOU, T.; ALBRIGHT, W.; GEE, G; ROSELER, A. *Field evaluation of alternaive earthen final covers*. **International Journal of Phytoremediation**, v. 3, p. 1-21, 2001.

BISZEK, M. *Evaluation of measurement methods and estimation of biogás emission from landfills*. Srodkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Srodowiska, Poland, p.27-43, 2006.

BOGNER, J. E.; SPOKAS, K. A.; BURTON, E. A. *Kinetics os methane oxidation in a landfill cover soil: temporal variations, a whole-landfill oxidation experiment, an modeling of net CH₄ emissions*. **Environ. Sci. Technol.**, v. 31, p. 2504-2514, 1997.

BORBA, P. F. S. *Avaliação das emissões de GEE e BTEX em aterro sanitário de grande porte*. 2015. 135 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

BORJESSON, G.; SVENSSON, B. H. *Seasonal and diurnal methane emissions from a landfill and their regulation by methane oxidation*. **Waste Management & Research**, v. 15, n 1, p. 33-54, 1997.

BORJESSON, G. *Inhibition of methane oxidation by volatile sulfur compounds (CH₃SH and CS₂) in landfill cover soils*. **Waste Management & Research**, v. 19, p. 314-319, 2001.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2 ago. 2010.

CABRAL, A. R.; EL-GHABI, B.; PARENT, S-É.; MARINEAU, L. *Design and performance of an experimental double capillary barrier cover placed*. In.: **Proceedings Sardinia**, 11º International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2007.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. *Utilização de resíduos de construção e demolição para cobertura intermediária de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários*. In.: **26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Porto Alegre, 2011.

CHANTON, J.; HATER, G.; GOLDSMITH, D.; GREEN, R.; ABICHO, T.; BARLAZ, M. A. *Comparison of a tunable diode laser approach with static chambers for determination of surface methane emission*. In.: **11º International Waste Management and Landfill Symposium**, 2007.

CHRISTOPHENSEN, M.; KJELDSSEN, P.; HOLST, H.; CHANTON, J. *Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation*. **Waste Management & Research**, v. 19, p. 595-612, 2001.

CICLUS – Ciclus Ambiental. Disponível em: <http://www.ciclusambiental.com.br/ciclus_ctr.php> Acesso em: 15 de Junho de 2015.

COMLURB – Companhia Municipal de Limpeza Urbana. 2014.

COMITÊ GUANDU, 2011.

COSSU, R.; MUNTONI, A.; CHIARANTINI, L.; MASSACCI, G.; SERRA, P.; SCOLLETTA, A.; STERZI, G. *Biogas emission measurements using static and dynamics flux chambers and infrad methods*. **Waste Management & Research: Proceedings of The 6º International Landfill Symposium**, S. Margherita de Pula, Cagliari, Italy, v. 4, p. 103-114, 1997.

COSTA, F. S.; GOMES, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. *Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera*. **Ciência Rural**: Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 639-700, 2006.

CZEPIEL, P. M.; MOSHER, B.; CRILL, P. M.; HARRISS, R. C. *Quantifying the effect of oxidation on landfill methane emissions*. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D11, p. 16.721-16.730, 1996.

DEVER, S.; WELSH, M.; HUNSTONE, M.; STUETZ, R. *Assessment of fugitive landfill gas emissions rates in Australia*. **Proceedings Sardinia 2013**. In.: 14^o International Waste Management and Landfill Symposium, Italy, 2013.

DRAGER – Drager X-am 7000. Disponível em: <http://www.draeger.com/sites/pt-bras_br/Pages/Oil-Gas-Industry/Draeger-X-am-7000.aspx> Acesso em: 10 de Agosto de 2015.

DWYER – Series 477-2-FM. Disponível em: <<http://www.dwyer-inst.com/Product/Pressure/Manometers/Digital/>> Acesso em: 10 de Agosto de 2015.

EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A. N.; LECKIE, J. O. *Biochemical and physical processes in landfill*. **Journal Solid Waste Technic Management**. v. 23, n. 3, 1996.

FERNANDES, J. G. *Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental*. 2009. 101 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009.

GEBERT, J.; RACHOR, I.; GRÖNGRÖFT, A. *Column Study for Assessing the Influence of Soil Compaction on CH₄ Oxidation in Landfill Covers*. **University of Hamburg**, Germany, 2009.

GOOGLE EARTH. *Município de Seropédica*. Acesso em: 20 de Janeiro de 2016.

HUBER-HUMER, M.; LECHNER, P. *Alternative approach to elimination of greenhouse gases from old landfills*. **Waste Management & Research**, v. 17, n. 6, p. 443-452, 1999.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. **Reimpressão**: Rio de Janeiro, 2010.

IPCC 2006 - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In.: **International Panel on Climate Change**, Task Force on National Greenhouse Gas Inventories, Hayama, Japan, 2006. Disponível em: <<http://www.ipccgip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>> Acesso em: 20 de Maio de 2016.

IPCC 2007 - Climate Change. In.: **Mitigation. Contribution of Working Group III to the 4^o Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-ts.pdf>> Acesso em: 02 de Junho de 2015.

IPCC 2014 – Climate Change, Synthesis Report, Summary for Policymakers. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf> Acesso em: 09 de Abril de 2016.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>> Acesso em: 22 de Julho de 2015.

JOAQUIM JUNIOR, G. O. *Comparação de desempenho de sistemas de cobertura em relação à infiltração de água pluvial no aterro sanitário de Seropédica (RJ), durante a fase de operação*. 2015. 215 f. **Tese** (Doutorado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

JOAQUIM JUNIOR, G. O.; RITTER, E.; CAMPOS, J. C.; FIGUEIREDO, G. C. *Curva de retenção de água e condutividade hidráulica saturada em solos compactados para cobertura final de resíduos sólidos em aterros sanitários*. In.: **7º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental**, 2015.

JUCÁ, J. F. T.; MARIANO, M. O. H.; MELO, V. L. A. *Recalques e decomposição da matéria orgânica em aterros de resíduos sólidos da região metropolitana do Recife*. In.: **2º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, 1999.

KHIRE, M. V.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. *Field data from a capillary barrier and model predictions with UNSAT-H*. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 125, p. 518-527, 1999.

KHIRE, M. V.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. *Capillary barriers in semi-arid e arid climates: desing variables and the water balance*. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 8, p. 695-708, 2000.

LOPES, R. L. *Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. 2011. 250 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MACIEL, F. J. *Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE*. 2003. 173 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MARIANO, M. O. H. *Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos*. 2008. 243 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

MINIPA – Termômetros MT-455 Disponível em: < <http://www.minipa.com.br/5/92/169-Minipa-Termometros-MT-455>> Acesso em: 10 de Agosto de 2015.

MONSTER, J.; SAMUELSSON, J.; KJELDSSEN, P.; SCHEUTZ, C. *Quantification of methane emissions from 15 Danish landfills using the mobile tracer dispersion method*. **Waste Management & Research**, p. 177-186, 2015.

MOSHER, B. W.; CZEPIEL, P. C.; SHORTER, J.; ALLWINE, E.; HARRISS, R. C.; KOLB, C.; LAMB, B. *Mitigation of methane emissions at landfill sites in New England*. **Energy Conversion & Management**, v. 37, n. 6-8, p. 1093–1098, 1996.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. *Assessment of the Performance of Engineered Waste Containment Barriers*, 2007. Disponível em <<http://www.nap.edu/catalog/11930.html>> Acesso em: 23 de Outubro de 2015.

OLIVEIRA, A. C. E. *Diagnóstico e avaliação de emissões fugitivas de biogás na camada de cobertura final da central de tratamento de resíduos de Nova Iguaçu e do lixão de Seropédica, Rio de Janeiro*. 2013. 142 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

PARK, J. K.; KANG, J. Y.; KANG, J. H.; LEE, N. H. *Method Development for Measurement of Methane Emissions From Valley-Type Landfills*. **Proceedings Sardinia 2013**. 14^o International Waste Management and Landfill Symposium, Italy, 2013.

PARK S.; LEE, C.; RYU, SUNG, K. *Biofiltration for Reducing Methane Emissions from Modern Sanitary Landfills at the low methane generation stage*. **Water Air Soil Pollute**. v. 196, p. 19–27, 2009.

PENG, S.; JIANG, H. *A review on soil cover in waste and contaminant containment: desing, monitoring, and modeling*. **Earth Sci China**, v. 3, n. 3, p. 303-311, 2009.

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, Brasil*. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, n. 68, p. 148-154, 2002.

PLANO DIRETOR DO MUNICÍPIO DE SEROPÉDICA. **Lei nº. 328/06**. Dispõe sobre a criação do Plano Diretor de Seropédica – RJ. 03 de Setembro de 2006.

PMGIRS - PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO: DIAGNÓSTICO 2012. **Daijo Gráfica Editora**: Rio de Janeiro, 2012.

PNRS - PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Ministério do Meio Ambiente**: Brasília, 2011.

REGATTIERI, C. R. *Quantificação da emissão de biogás em aterro sanitário – Estudo de caso do aterro sanitário de São Carlos*. 2009. 138 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental do Aterro Sanitário de Seropédica, **S. A. Paulista**: Vereda, p. 60, 2007.

ROCHA, G. G. *Condições eletroresistivimétricas do embasamento cristalino e dos sedimentos da formação Piranema, na região de Santa Rosa, município Seropédica, RJ*. 2011. 48 f. **Projeto de Graduação** (Título de Geologia) – Curso de Geologia, Departamento de Geociências, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, T. F. L. *Estudo experimental da camada de cobertura do aterro morro do céu, Niterói-RJ*. 2009. 145 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SCHARFF, H.; JACOBS, J.; OONK, H.; HENSEN, A. *Methods to ascertain methane emission of landfills*, 2005.

SCHEUTZ, C.; BOGNER, J.; CHANTON, J. P.; BLAKE, D.; MORCET, M.; KJELDSSEN, P. *Comparative oxidation and net emissions of CH₄ and selected non-methane organic compounds in landfill cover soils*. **Environ. Sci. Technol.**, n. 37, p. 5150-5158, 2003.

SCHEUTZ, C.; KJELDSSEN, P.; BOGNER, J.; VISSCHER, A.; GEBERT, J.; HILGER, H. A.; HUBER-HUMER, M.; SPOKAS, K. *Microbial methane oxidation process and technologies for mitigation of landfill gas emissions*. **Waste Management & Research**, v. 27, p. 409-433, 2009.

SHACKELFORD, D. C.; BENSON, C. H.; BOUAZZA, A.; MELO, M.; BOSCOV, M. E.; BOWERS, J.; KATZENBACH, R.; MOON-YOUNG, H.; ZIMMIE, R.; ZORNBERG, J. G. *Traditional and innovative barriers technologies and materials*. Part 2 – **Innovative Barriers**. 5^o ICEG Environmental Geotechnics, 2006.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. *Integrated Solid Waste Management – Engineering principles and management issues*. **MCGraw-Hill International Editions**, p. 978, 1993.

TEIXEIRA, P. F. *Oxidação biológica do metano em coberturas de aterros de resíduos sólidos urbanos: Dinâmica do processo e aspectos geotécnicos*. 2008. 150 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

TEIXEIRA, C. E.; TORVES, J. C.; FINOTTI, A. R.; FEDRIZZI, F.; MARINHO, F. A. M.; TEIXEIRA, P. F. *Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil*. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 14, n. 1, p. 99-108, 2009.

UBALDO, M. O.; BORMA, L. S.; BARBOSA, M. C. *Gestão de resíduos sólidos geradores de drenagem ácida de minas com o uso de coberturas secas*. **Cetem-MTC**: Rio de Janeiro, 2007.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet*. **Solid Waste and Emergency Response**, EPA 542-F-03-015, v. 5102G, September, p. 12, 2003.

VIEIRA, A. M. *Estudo de Barreiras Capilares como Cobertura Final de Aterro de Resíduos*. 2005. 210 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ZORNBERG, J. G., LAFOUNTAIN, L.; CALDWELL, J. A. *Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill*. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 6, p. 427-438, 2003.

ZORNBERG, J. G.; McCARTNEY, J. S. *Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment*. In: Delleur, J.W. *The Handbook of Groundwater Engineering*. **Boca Raton**: CRC Press, 2 ed., 2007.

APÊNDICE

APÊNDICE A - ENSAIOS DE PLACA DE FLUXO

ENSAIO C'1

Data: 07/08/2014		Placa: 0,16 m ² / 8,3 L			N° do ensaio: 1			
Hora de início - 11:35		Fissura: Sim	Clima: Ensolarado		Camada: Convencional			
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	20,6	35,0	28,7	0	1014,5
11:40:00	5	5,0	4,6	18,1	35,6	29,0	0	1014,5
11:45:00	10	5,7	5,4	17,9	36,0	29,4	0	1014,5
11:50:00	15	6,1	5,8	17,2	36,0	28,2	0	1014,3
11:55:00	20	6,7	6,4	16,1	36,2	28,9	0	1014,1
12:00:00	25	8,1	8,0	16,0	36,3	29,5	0	1014,1
12:05:00	30	8,6	8,4	15,6	36,6	30,1	-4	1013,9
12:10:00	35	8,8	8,5	15,3	36,7	31,4	0	1013,8
12:15:00	40	10,1	10,6	14,6	36,8	30,1	-4	1013,7
12:20:00	45	10,9	11,0	14,3	37,0	30,3	0	1013,7
12:25:00	50	11,5	11,9	14,1	37,1	31,6	-4	1013,6
12:30:00	55	11,6	11,9	14,1	37,0	30,6	0	1013,4
12:35:00	60	11,6	12,0	13,9	37,2	29,8	-4	1013,1

ENSAIO BC1

Data: 13/11/2014		Placa: 0,16 m ² / 8,3 L			N° do ensaio: 2			
Hora de início - 09:35		Fissura: Sim	Clima: Ensolarado		Camada: Barreira Capilar			
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	20,6	34,2	27,9	0	998,8
09:40:00	5	14,0	14,5	11,3	34,7	28,8	0	998,8
09:45:00	10	14,0	15,0	12,1	35,7	28,4	4	998,7
09:50:00	15	16,2	17,0	9,0	36,1	29,5	0	998,8
09:55:00	20	19,5	20,0	7,6	37,0	29,7	0	998,8
10:00:00	25	20,5	20,5	7,5	37,4	29,4	0	998,9
10:05:00	30	18,0	18,5	8,0	37,8	29,7	5	998,7
10:10:00	35	18,0	16,0	7,5	38,1	30,1	0	998,7
10:15:00	40	21,0	21,0	7,2	38,7	30,6	4	998,7
10:20:00	45	21,5	18,0	7,0	39,0	30,6	0	998,7
10:25:00	50	22,5	22,0	6,6	39,7	30,9	4	998,7
10:30:00	55	26,0	24,5	5,8	40,2	32,0	4	998,7
10:35:00	60	26,0	24,0	5,3	40,6	32,0	5	998,7

ENSAIO C1

Data: 13/11/2014		Placa: 0,16 m ² / 8,3 L			N° do ensaio: 3			
Hora de início - 10:55		Fissura: Sim	Clima: Ensolarado		Camada: Convencional			
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	20,6	39,8	36,4	0	998,6
11:00:00	5	0,3	0,4	20,2	40,7	37,0	0	998,6
11:05:00	10	0,3	0,4	19,7	41,4	36,3	0	998,6
11:10:00	15	0,4	0,6	19,4	42,2	36,5	0	998,6
11:15:00	20	0,4	0,6	19,0	42,5	37,5	0	998,5
11:20:00	25	0,5	0,8	18,7	42,8	36,0	0	998,5
11:25:00	30	0,6	0,8	18,5	43,1	36,2	0	998,4
11:30:00	35	0,7	0,9	18,4	43,4	36,9	0	998,4
11:35:00	40	0,7	1,0	18,1	43,3	37,3	0	998,4
11:40:00	45	0,8	1,0	17,8	43,7	38,8	0	998,3
11:45:00	50	1,0	1,2	17,7	44,6	39,0	0	998,2
11:50:00	55	1,0	1,2	17,3	45,5	38,5	0	998,1
11:55:00	60	1,0	1,2	17,0	45,7	38,7	0	998,1

ENSAIO ET1

Data: 13/11/2014		Placa: 0,16 m ² / 8,3 L			N° do ensaio: 4			
Hora de início - 12:15		Fissura: Não	Clima: Ensolarado		Camada: Evapotranspirativa			
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	20,6	37,8	38,4	0	998,6
12:20:00	5	0,2	0,3	20,0	38,7	38,7	0	998,6
12:25:00	10	0,2	0,3	19,5	39,4	38,5	0	998,6
12:30:00	15	0,3	0,5	19,3	40,9	38,8	0	998,6
12:35:00	20	0,4	0,6	19,0	41,2	39,0	0	998,5
12:40:00	25	0,5	0,7	18,5	42,1	38,7	0	998,5
12:45:00	30	0,6	0,8	18,3	42,0	38,9	0	998,4
12:50:00	35	0,7	0,9	18,1	42,3	38,9	0	998,4
12:55:00	40	0,7	1,0	17,9	42,8	37,9	0	998,4
13:00:00	45	1,0	1,5	17,4	43,3	38,4	0	998,3
13:05:00	50	1,1	1,6	17,3	44,2	38,7	0	998,2
13:10:00	55	1,2	1,8	17,1	45,2	39,0	0	998,1
13:15:00	60	1,2	2,0	17,0	45,4	38,7	0	998,1

ENSAIO C'2

Data: 27/11/2014		Placa: A = 1m ² e V= 50L			Nº do ensaio: 5			
Hora de início - 09:25		Fissura: Sim		Clima: Ensolarado		Camada: Convencional		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	20,6	27,1	25,6	0	1003,4
09:27	2	9,1	4,1	17,0	27,4	26,0	0	1003,4
09:29	4	15,2	9,3	14,4	27,5	25,7	0	1003,4
09:31	6	19,3	13,5	13,1	27,5	26,4	0	1003,6
09:33	8	22,6	17,7	12,5	27,9	26,2	0	1003,6
09:37	12	25,4	20,4	10,7	28,3	26,1	0	1003,5
09:41	16	28,5	22,0	9,7	28,7	26,1	0	1003,5
09:45	20	29,0	22,5	9,5	29,2	26,1	0	1003,5
09:49	24	28,0	22,0	9,7	29,9	26,2	0	1003,5
09:53	28	29,5	23,5	9,0	30,4	26,2	0	1003,5
09:57	32	29,0	23,0	9,2	31,0	26,3	0	1003,5
10:01	36	28,5	22,5	9,5	32,4	26,3	0	1003,5
10:05	40	26,1	21,0	10,2	33,3	25,5	0	1003,5
10:09	44	27,0	21,5	9,9	33,7	25,6	0	1003,5
10:13	48	26,0	20,5	10,3	34,2	26,0	0	1003,5
10:17	52	25,0	20,0	10,7	35,0	26,1	0	1003,4
10:21	56	25,5	20,0	10,8	35,4	26,0	0	1003,4
10:25	60	26,0	20,5	10,6	35,9	26,1	0	1003,4

ENSAIO ET2

Data: 27/11/2014		Placa: A = 1m ² e V= 50L			Nº do ensaio: 6			
Hora de início - 11:45		Fissura: Não		Clima: Ensolarado		Camada: Evapotranspirativa		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	20,6	30,8	24,8	0	1003,4
11:47:00	2	2,1	1,4	19,8	31,2	25,2	0	1003,4
11:49:00	4	5,9	4,6	18,1	31,4	24,8	0	1003,5
11:51:00	6	2,6	2,0	19,7	31,1	24,7	0	1003,4
11:53:00	8	3,9	2,8	19,0	31,5	24,6	0	1003,4
11:57:00	12	4,0	3,0	18,9	31,8	24,3	0	1003,4
12:01:00	16	4,2	3,3	18,8	31,6	24,3	0	1003,4
12:05:00	20	4,4	3,5	18,7	32,0	24,0	0	1003,4
12:09:00	24	4,6	3,6	18,6	32,5	23,7	0	1003,4
12:13:00	28	4,6	3,8	18,6	32,7	24,1	0	1003,4
12:17:00	32	4,5	3,7	18,5	33,2	23,6	0	1003,4
12:21:00	36	4,2	3,6	18,5	33,7	23,8	0	1003,4
12:25:00	40	5,1	4,0	18,4	34,3	23,6	0	1003,4
12:29:00	44	5,3	4,2	18,3	34,9	24,0	0	1003,4
12:33:00	48	5,6	4,4	18,2	35,4	24,3	0	1003,4
12:37:00	52	6,4	5,2	17,8	35,7	24,7	0	1003,4
12:41:00	56	6,3	5,4	17,8	36,0	25,3	0	1003,4
12:45:00	60	6,3	5,4	17,0	36,5	25,7	0	1003,4

ENSAIO BC2

Data: 16/12/2014		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 7			
Hora de início - 09:00		Fissura: Sim		Clima: Ensolarado		Camada: Barreira Capilar		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,6	27,4	24,4	0	1009,9
09:02:00	2	14,8	11,4	15,4	27,0	24,0	0	1010,0
09:04:00	4	17,0	13,5	14,3	27,3	26,4	0	1010,0
09:06:00	6	18,5	15,0	13,5	27,9	25,9	0	1010,0
09:08:00	8	20,0	16,0	12,7	28,2	27,6	0	1009,9
09:12:00	12	24,0	19,5	10,9	28,4	24,7	0	1009,9
09:16:00	16	27,0	21,0	9,7	27,8	27,2	0	1009,8
09:20:00	20	29,5	23,5	8,5	27,5	26,7	0	1009,9
09:24:00	24	31,0	25,0	7,7	28,4	28,4	0	1009,9
09:28:00	28	33,0	27,0	6,9	28,9	30,3	0	1010,0
09:32:00	32	34,0	28,0	6,2	28,2	30,8	0	1010,0
09:36:00	36	35,0	29,0	5,6	28,1	31,1	0	1010,0
09:40:00	40	37,0	30,0	5,0	28,2	31,8	0	1010,1
09:44:00	44	38,0	32,0	4,4	28,3	32,3	0	1010,1
09:48:00	48	39,0	33,0	4,0	28,3	30,8	0	1010,0
09:52:00	52	40,0	33,0	3,6	28,3	29,2	0	1010,0
09:56:00	56	40,2	33,2	3,3	28,3	30,4	0	1010,0
10:00:00	60	40,4	33,3	3,0	28,3	30,7	0	1010,0

ENSAIO C2

Data: 16/12/2014		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 8			
Hora de início - 10:30		Fissura: Sim		Clima: Ensolarado		Camada: Convencional		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	20,5	35,5	30,2	0	1009,8
10:32:00	2	1,5	0,8	19,8	34,7	29,9	0	1009,9
10:34:00	4	1,6	0,8	19,8	34,4	29,9	0	1009,9
10:36:00	6	1,7	1,0	19,7	35,3	30,1	0	1009,8
10:38:00	8	1,6	1,2	19,6	33,9	30,3	0	1009,8
10:42:00	12	1,8	1,2	19,4	34,1	30,0	0	1009,8
10:46:00	16	1,8	1,4	19,3	33,8	30,0	0	1009,7
10:50:00	20	1,5	1,2	19,2	34,7	30,2	0	1009,7
10:54:00	24	1,9	1,5	19,2	35,0	33,4	0	1009,8
10:58:00	28	2,0	1,6	19,0	35,9	31,5	0	1009,8
11:02:00	32	1,9	1,6	18,7	36,4	30,2	0	1009,8
11:06:00	36	1,9	1,6	18,5	38,4	30,1	0	1009,8
11:10:00	40	2,0	1,7	18,2	39,6	30,1	0	1009,7
11:14:00	44	2,0	1,8	17,9	38,8	30,2	0	1009,8
11:18:00	48	2,5	2,2	17,3	37,0	30,1	0	1009,7
11:22:00	52	2,2	2,0	17,0	40,6	30,1	0	1009,7
11:26:00	56	2,2	2,0	17,0	38,7	30,3	0	1009,6
11:30:00	60	2,2	2,0	16,9	42,5	30,2	0	1009,6

ENSAIO ET3

Data: 16/12/2014		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 9			
Hora de início - 11:50		Fissura: Não		Clima: Ensolarado		Camada: Evapotranspirativa		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,6	32,5	36,4	0	1009,8
11:52:00	2	0,4	0,8	20,3	33,3	37,6	0	1009,9
11:54:00	4	0,4	0,8	20,2	36,8	34,3	0	1009,9
11:56:00	6	0,4	1,0	20,0	41,5	37,7	0	1009,8
11:58:00	8	0,4	1,2	19,8	41,7	36,2	0	1009,8
12:02:00	12	0,4	1,2	19,7	41,4	37,9	0	1009,8
12:06:00	16	0,4	1,2	19,6	41,3	38,1	0	1009,7
12:10:00	20	0,4	1,4	19,4	41,1	40,0	0	1009,7
12:14:00	24	0,4	1,6	19,1	41,3	41,7	0	1009,8
12:18:00	28	0,4	1,6	18,8	42,2	41,3	0	1009,8
12:22:00	32	0,5	2,0	18,6	40,6	40,8	0	1009,8
12:26:00	36	0,5	2,0	18,5	39,3	40,5	0	1009,8
12:30:00	40	0,5	2,0	18,3	41,2	39,5	0	1009,7
12:34:00	44	0,4	1,8	18,5	39,3	39,8	0	1009,8
12:38:00	48	0,6	2,1	18,2	39,9	39,7	0	1009,7
12:42:00	52	0,6	2,1	18,0	39,8	39,5	0	1009,7
12:46:00	56	0,6	2,1	17,9	40,3	39,5	0	1009,7
12:50:00	60	0,6	2,1	17,7	40,5	39,7	0	1009,7

ENSAIO BC3

Data: 16/01/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 10			
Hora de início - 09:20		Fissura: Sim		Clima: Ensolarado		Camada: Barreira Capliar		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	20,6	35,8	34,6	0	1008,2
09:22:00	2	3,2	2,8	19,2	35,7	34,6	0	1008,1
09:24:00	4	3,6	3,2	18,7	35,6	35,1	0	1008,1
09:26:00	6	4,2	4,0	18,3	35,7	34,1	0	1008,2
09:28:00	8	4,8	4,6	17,8	35,7	34,1	0	1008,2
09:32:00	12	5,7	5,8	17,0	35,8	35,0	0	1008,2
09:36:00	16	6,4	6,8	16,3	35,9	35,9	0	1008,2
09:40:00	20	7,0	7,4	15,8	36,0	36,6	0	1008,3
09:44:00	24	7,6	8,4	15,1	36,1	36,5	0	1008,3
09:48:00	28	8,0	9,0	14,6	36,2	36,7	0	1008,2
09:52:00	32	8,6	9,6	14,1	36,3	36,7	0	1008,3
09:56:00	36	9,0	10,2	13,7	36,4	36,4	0	1008,3
10:00:00	40	9,4	10,8	13,3	36,3	36,3	0	1008,3
10:04:00	44	9,8	11,4	12,9	36,4	36,1	0	1008,3
10:08:00	48	10,2	12,0	12,5	36,4	34,8	0	1008,3
10:12:00	52	10,3	12,1	12,2	36,5	38,3	0	1008,3
10:16:00	56	10,4	12,2	11,8	36,5	37,0	0	1008,3
10:20:00	60	10,4	12,2	11,5	36,7	39,0	0	1008,3

ENSAIO C3

Data: 16/01/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 11			
Hora de início - 10:42		Fissura: Sim		Clima: Ensolarado		Camada: Convencional		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,4	39,0	41,0	0	1008,4
10:44:00	2	0,4	0,6	20,5	40,0	42,3	0	1008,4
10:46:00	4	0,4	0,6	20,3	41,3	43,0	0	1008,4
10:48:00	6	0,5	0,8	20,2	42,0	42,8	0	1008,4
10:50:00	8	0,6	0,8	20,0	42,2	42,3	0	1008,4
10:54:00	12	0,7	1,0	19,6	41,3	39,9	0	1008,4
10:58:00	16	0,9	1,2	19,2	40,6	38,4	0	1008,4
11:02:00	20	0,9	1,4	18,9	39,8	37,2	0	1008,4
11:06:00	24	0,9	1,6	18,6	39,4	35,3	0	1008,3
11:10:00	28	1,0	1,8	18,3	39,9	37,6	0	1008,3
11:14:00	32	0,9	2,0	18,0	40,6	40,0	0	1008,1
11:18:00	36	0,9	2,2	17,6	41,0	43,9	0	1008,2
11:22:00	40	0,9	2,2	17,2	41,4	45,2	0	1008,2
11:26:00	44	1,0	2,6	16,9	41,6	45,8	0	1008,2
11:30:00	48	1,0	2,8	16,6	41,3	46,6	0	1008,2
11:34:00	52	1,0	3,0	16,4	41,1	46,8	0	1008,1
11:38:00	56	1,0	3,0	16,3	40,2	42,6	0	1008,1
11:42:00	60	1,0	3,0	16,3	40,3	46,3	0	1008,1

ENSAIO BC4

Data: 26/01/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 12			
Hora de início - 09:46		Fissura: Sim		Clima: Ensolarado		Camada: Barreira Capilar		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,6	36,1	33,0	0	1005,4
09:48:00	2	0,2	0,4	20,9	36,1	33,2	0	1005,4
09:50:00	4	0,2	0,6	20,6	36,2	33,2	0	1005,4
09:52:00	6	0,3	0,6	20,2	36,4	33,5	0	1005,3
09:54:00	8	0,3	0,6	19,7	36,5	33,0	0	1005,3
09:58:00	12	0,4	0,8	19,6	36,7	33,2	0	1005,2
10:02:00	16	0,4	1,0	19,4	36,8	33,4	0	1005,3
10:06:00	20	0,5	1,0	19,2	36,9	34,0	0	1005,3
10:10:00	24	0,5	1,0	19,0	37,0	33,5	0	1005,3
10:14:00	28	0,6	1,2	18,8	36,9	32,8	0	1008,3
10:18:00	32	0,7	1,4	18,7	37,0	34,2	0	1005,2
10:22:00	36	0,7	1,4	18,6	37,2	33,3	0	1005,3
10:26:00	40	0,8	1,6	18,5	37,2	34,8	0	1005,2
10:30:00	44	0,8	1,6	18,3	37,3	35,3	0	1005,3
10:34:00	48	0,9	1,8	18,0	37,3	34,3	0	1005,2
10:38:00	52	0,9	1,8	17,8	37,3	34,6	0	1005,3
10:42:00	56	1,0	1,9	17,5	37,5	35,2	0	1005,3
10:46:00	60	1,0	1,9	17,3	37,7	35,5	0	1005,3

ENSAIO C4

Data: 26/01/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 13			
Hora de início - 11:10		Fissura: Sim		Clima: Ensolarado		Camada: Convencional		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,7	41,7	35,8	0	1005,3
11:12:00	2	0,7	0,0	21,3	42,9	35,5	0	1005,5
11:14:00	4	0,4	0,0	21,4	42,9	35,2	0	1005,4
11:16:00	6	0,4	0,6	21,3	43,0	35,8	0	1005,4
11:18:00	8	0,5	0,7	21,3	42,9	34,5	0	1005,4
11:22:00	12	0,4	0,7	21,3	42,7	33,9	0	1005,4
11:26:00	16	0,4	0,8	20,7	42,5	33,5	0	1005,4
11:30:00	20	0,5	0,8	20,5	42,7	33,5	0	1005,4
11:34:00	24	0,5	0,9	20,3	43,0	33,5	0	1005,4
11:38:00	28	0,6	1,0	19,8	43,1	34,0	0	1005,4
11:42:00	32	0,6	1,0	19,7	43,3	33,8	0	1005,4
11:46:00	36	0,7	1,1	19,0	43,7	33,9	0	1005,4
11:50:00	40	0,7	1,1	19,0	44,0	34,3	0	1005,4
11:54:00	44	0,7	1,1	18,8	44,0	34,5	0	1005,4
11:58:00	48	0,7	1,1	18,8	44,2	34,9	0	1005,4
12:02:00	52	0,7	1,1	18,6	44,5	35,1	0	1005,4
12:06:00	56	0,7	1,1	18,5	44,9	35,3	0	1005,4
12:10:00	60	0,7	1,1	18,5	45,0	35,4	0	1005,4

ENSAIO ET4

Data: 26/01/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 14			
Hora de início - 11:40		Fissura: Não		Clima: Ensolarado		Camada: Evapotranspirativa		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,8	39,3	38,0	0	1005,3
11:42:00	2	4,9	3,6	18,9	39,5	38,0	0	1005,3
11:44:00	4	4,4	3,4	19,2	40,0	38,1	0	1005,4
11:46:00	6	3,4	2,4	19,7	40,2	38,0	0	1005,4
11:48:00	8	5,6	4,4	18,2	40,5	38,2	0	1005,4
11:52:00	12	4,5	3,2	19,3	40,7	38,3	0	1005,4
11:56:00	16	6,5	5,4	17,6	41,1	38,5	0	1005,3
12:00:00	20	4,1	3,0	19,0	41,4	38,5	0	1005,4
12:04:00	24	3,5	2,4	19,4	41,7	38,4	0	1005,4
12:08:00	28	1,6	1,0	20,4	42,0	38,5	0	1005,4
12:12:00	32	4,2	3,0	18,8	42,4	38,7	0	1005,2
12:16:00	36	4,5	3,6	18,9	42,8	39,0	0	1005,2
12:20:00	40	7,2	6,2	16,9	43,0	39,1	0	1005,2
12:24:00	44	2,9	2,0	19,4	43,3	39,1	0	1005,2
12:28:00	48	3,8	2,6	19,1	43,7	39,3	0	1005,2
12:32:00	52	2,9	2,0	19,0	43,9	39,4	0	1005,2
12:36:00	56	4,7	3,6	18,5	44,2	39,7	0	1005,2
12:40:00	60	4,2	3,2	19,0	44,5	40,0	0	1005,2

ENSAIO C5

Data: 10/02/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 15			
Hora de início - 11:00		Fissura: Sim		Clima: Ensolarado		Camada: Convencional		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,6	33,7	32,8	0	1005,2
11:02:00	2	0,3	0,0	20,7	33,7	32,1	0	1005,2
11:04:00	4	0,3	0,0	20,7	33,8	32,6	0	1005,2
11:06:00	6	0,3	0,4	20,6	34,1	32,5	0	1005,3
11:08:00	8	0,4	0,4	20,4	34,8	33,0	0	1005,3
11:12:00	12	0,4	0,4	20,3	35,3	32,5	0	1005,3
11:16:00	16	0,5	0,5	20,0	35,4	32,0	0	1005,3
11:20:00	20	0,6	0,7	19,7	35,6	34,2	0	1005,3
11:24:00	24	0,6	0,7	19,5	35,8	33,4	0	1005,3
11:28:00	28	0,7	0,9	19,5	35,8	32,3	0	1005,3
11:32:00	32	0,8	1,0	19,2	35,9	33,1	0	1005,3
11:36:00	36	0,9	1,1	19,0	35,9	32,3	0	1005,3
11:40:00	40	0,9	1,2	18,8	35,9	32,1	0	1005,3
11:44:00	44	1,0	1,2	18,7	35,9	32,1	0	1005,3
11:48:00	48	1,1	1,3	18,7	36,2	33,1	0	1005,3
11:52:00	52	1,1	1,3	18,6	36,8	33,2	0	1005,3
11:56:00	56	1,1	1,3	18,6	36,7	31,5	0	1005,3
12:00:00	60	1,1	1,3	18,6	36,9	32,7	0	1005,3

ENSAIO ET5

Data: 10/02/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 16			
Hora de início - 12:30		Fissura: Não		Clima: Ensolarado		Camada: Evapotranspirativa		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,8	32,3	30,2	0	1005,2
12:32:00	2	1,7	1,0	20,4	32,7	30,0	0	1005,2
12:34:00	4	2,7	2,0	19,4	32,9	30,1	0	1005,2
12:36:00	6	2,9	2,0	19,4	33,0	30,0	0	1005,3
12:38:00	8	3,3	2,4	19,3	33,1	30,1	0	1005,3
12:42:00	12	3,4	2,4	19,3	33,6	30,1	0	1005,3
12:46:00	16	3,8	2,6	19,1	33,8	30,3	0	1005,3
12:50:00	20	4,0	3,0	19,0	34,0	30,4	0	1005,3
12:54:00	24	4,1	3,0	18,9	34,2	30,3	0	1005,3
12:58:00	28	4,2	3,2	18,7	34,4	30,5	0	1005,3
13:02:00	32	4,3	3,2	18,4	34,7	31,0	0	1005,3
13:06:00	36	4,4	3,4	18,3	35,0	31,2	0	1005,3
13:10:00	40	4,5	3,6	18,2	35,4	31,3	0	1005,3
13:14:00	44	4,7	3,6	18,0	36,3	31,2	0	1005,3
13:18:00	48	4,9	3,6	17,6	36,7	31,3	0	1005,3
13:22:00	52	5,6	4,4	16,8	37,0	31,5	0	1005,3
13:26:00	56	5,6	4,4	16,6	37,5	32,0	0	1005,3
13:30:00	60	5,6	4,4	16,5	37,9	32,3	0	1005,3

ENSAIO C'3

Data: 01/09/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 17			
Hora de início - 09:58		Fissura: Sim	Clima: Ensolarado		Camada: Convencional			
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,7	29,5	28,7	0	1007,5
10:00:00	2	1,5	0,8	20,9	29,7	28,7	0	1007,8
10:02:00	4	1,9	1,0	20,5	29,7	28,7	0	1007,7
10:04:00	6	2,0	1,0	20,5	29,8	28,9	0	1007,7
10:06:00	8	2,1	1,2	20,4	30,1	28,9	0	1007,7
10:10:00	12	2,4	1,4	19,9	30,0	29,0	0	1007,7
10:14:00	16	3,1	1,8	19,5	30,3	29,0	-4	1007,7
10:18:00	20	3,6	2,2	19,2	30,3	29,1	0	1007,7
10:22:00	24	4,3	2,6	18,8	30,5	29,3	-5	1007,8
10:26:00	28	4,3	2,8	18,7	30,5	29,3	-4	1007,7
10:30:00	32	4,3	2,8	18,6	30,7	29,3	-7	1007,7
10:34:00	36	4,6	3,0	18,4	31,0	29,6	-9	1007,7
10:38:00	40	5,3	3,4	18,0	31,2	29,7	-7	1007,7
10:42:00	44	6,0	4,4	17,4	31,5	29,9	-8	1007,7
10:46:00	48	6,0	4,4	17,2	31,7	29,9	-5	1007,7
10:50:00	52	6,8	5,2	16,8	31,7	30,1	-7	1007,8
10:54:00	56	7,4	6,0	16,4	31,8	30,1	-7	1007,7
10:58:00	60	7,4	6,0	16,3	32,0	30,1	-5	1007,8

ENSAIO BC5

Data: 01/09/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 18			
Hora de início - 11:37		Fissura: Sim	Clima: Ensolarado		Camada: Barreira Capilar			
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,6	30,5	30,0	-10	1007,5
11:39:00	2	3,0	2,0	19,2	30,5	30,0	-11	1007,4
11:41:00	4	3,2	3,0	18,3	30,5	30,0	-10	1007,4
11:43:00	6	3,6	3,6	17,7	30,6	29,9	-11	1007,4
11:45:00	8	4,0	4,2	17,2	30,6	30,0	-10	1007,3
11:49:00	12	4,8	5,4	16,2	30,7	30,1	-11	1007,2
11:53:00	16	5,5	6,4	15,2	30,8	30,1	-11	1007,2
11:57:00	20	5,8	7,2	14,7	31,0	30,2	-10	1007,1
12:01:00	24	5,8	7,6	14,3	31,1	30,3	-14	1007,0
12:05:00	28	6,0	8,0	14,0	31,3	30,4	-13	1007,0
12:09:00	32	6,6	8,8	13,6	31,4	30,3	-15	1007,0
12:13:00	36	6,6	8,6	13,2	31,5	30,5	-15	1007,0
12:17:00	40	7,0	9,6	13,0	31,7	30,6	-10	1007,0
12:21:00	44	7,4	9,6	12,7	32,0	30,7	-10	1006,9
12:25:00	48	7,8	10,4	12,3	32,2	30,9	-10	1006,8
12:29:00	52	8,0	11,2	12,0	32,5	30,8	-11	1006,7
12:33:00	56	8,0	11,2	11,9	32,7	30,9	-14	1006,6
12:37:00	60	8,0	11,3	11,9	33,0	31,0	-11	1006,6

ENSAIO BC6

Data: 22/10/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 19			
Hora de início - 10:20		Fissura: Não		Clima: Nublado		Camada: Barreira Capilar		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,1	0,0	20,6	25,5	23,4	0	1003,9
10:22:00	2	1,4	1,0	20,3	25,5	23,4	0	1003,8
10:24:00	4	1,7	1,4	20,0	25,5	23,3	0	1003,8
10:26:00	6	1,8	1,6	19,8	25,7	23,5	0	1003,8
10:28:00	8	1,8	1,6	19,8	25,7	23,5	0	1003,8
10:32:00	12	2,1	1,8	19,3	25,8	23,5	0	1003,8
10:36:00	16	2,5	2,2	18,8	26,0	23,4	0	1003,8
10:40:00	20	2,9	2,8	18,3	26,3	23,4	0	1003,8
10:44:00	24	3,4	3,4	17,7	26,7	23,5	0	1004,0
10:48:00	28	3,7	3,8	17,3	26,7	23,6	-4	1004,2
10:52:00	32	4,2	4,4	16,8	26,9	23,6	-7	1004,1
10:56:00	36	4,5	4,8	16,3	27,0	23,7	-8	1004,0
11:00:00	40	5,0	5,6	15,8	27,2	23,7	-10	1004,0
11:04:00	44	5,4	6,2	15,2	27,3	23,8	-7	1003,9
11:08:00	48	6,0	6,8	14,6	27,5	23,8	-7	1003,9
11:12:00	52	6,2	7,4	14,2	27,7	23,8	-8	1003,7
11:16:00	56	6,8	8,0	13,8	27,8	23,8	-11	1003,7
11:20:00	60	6,8	8,0	13,7	28,0	24,0	-10	1003,7

ENSAIO C6

Data: 22/10/2015		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 20			
Hora de início - 12:00		Fissura: Sim		Clima: Nublado		Camada: Convencional		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,2	0,0	21,3	25,0	24,2	0	1003,7
12:02:00	2	0,8	0,8	19,5	25,1	24,2	0	1003,6
12:04:00	4	0,8	1,2	19,1	25,3	24,2	0	1003,6
12:06:00	6	0,9	1,4	18,6	25,5	24,3	0	1003,6
12:08:00	8	1,0	1,4	18,3	25,8	24,3	0	1003,6
12:12:00	12	1,0	1,8	17,6	26,0	24,3	0	1003,6
12:16:00	16	1,1	2,2	17,0	26,4	24,4	0	1003,7
12:20:00	20	1,1	2,4	16,6	26,7	24,5	0	1003,7
12:24:00	24	1,2	2,8	16,0	27,0	24,5	0	1003,5
12:28:00	28	1,2	3,0	16,0	27,2	24,5	0	1003,5
12:32:00	32	1,3	3,4	15,5	27,2	24,6	0	1003,6
12:36:00	36	1,2	3,6	15,5	27,5	24,6	0	1003,6
12:40:00	40	1,2	3,6	15,5	27,9	24,7	0	1003,6
12:44:00	44	1,2	3,6	15,4	28,2	24,7	0	1003,6
12:48:00	48	1,3	3,7	15,2	28,5	24,7	0	1003,6
12:52:00	52	1,3	3,8	15,1	28,7	24,8	0	1003,6
12:56:00	56	1,4	3,8	15,0	29,0	24,8	0	1003,6
13:00:00	60	1,4	3,8	14,8	29,4	25,0	0	1003,6

ENSAIO BC7

Data: 03/02/2016		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 21			
Hora de início - 12:38		Fissura: Não		Clima: Ensolarado		Camada: Barreira Capilar		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,6	38,6	38,8	-8	1005,5
12:40:00	2	3,0	1,2	20,4	39,3	38,8	-8	1005,6
12:42:00	4	3,4	1,4	20,1	40,2	38,7	-8	1005,7
12:44:00	6	3,7	1,4	20,0	40,7	38,8	-8	1005,5
12:46:00	8	4,1	1,6	19,8	41,3	38,9	-9	1005,5
12:50:00	12	4,5	1,8	19,6	41,9	39,0	-13	1005,5
12:54:00	16	5,2	2,2	19,3	42,5	39,3	-10	1005,5
12:58:00	20	5,8	2,6	18,9	43,3	39,7	-10	1005,5
13:02:00	24	6,5	3,0	18,6	44,2	40,0	-11	1005,4
13:06:00	28	6,6	3,2	18,5	45,3	40,2	-10	1005,4
13:10:00	32	7,0	3,4	18,3	46,2	40,1	-11	1005,4
13:14:00	36	7,4	3,4	18,2	46,9	40,3	-13	1005,4
13:18:00	40	7,6	3,8	18,0	47,4	40,2	-13	1005,4
13:22:00	44	8,2	4,0	17,8	48,1	40,1	-10	1005,3
13:26:00	48	8,6	4,2	17,6	48,8	40,2	-11	1005,4
13:30:00	52	8,7	4,4	17,4	49,5	40,2	-13	1005,4
13:34:00	56	8,8	4,4	17,4	50,6	40,3	-11	1005,3
13:38:00	60	8,8	4,4	17,4	51,1	40,4	-9	1005,3

ENSAIO C'4

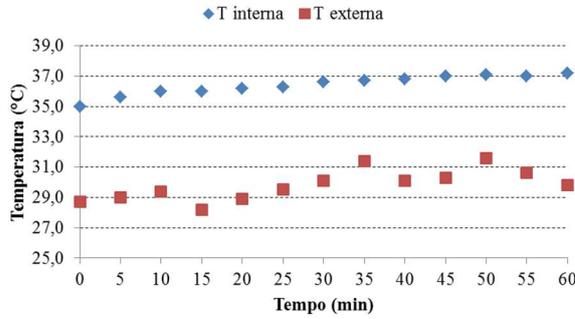
Data: 03/02/2016		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 22			
Hora de início - 14:00		Fissura: Sim		Clima: Ensolarado		Camada: Convencional		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,2	0,0	21,5	38,4	38,5	-13	1005,3
14:02:00	2	2,7	2,0	18,7	39,1	38,5	-9	1005,3
14:04:00	4	3,1	2,4	18,2	40,0	38,4	-11	1005,2
14:06:00	6	3,7	3,0	17,6	40,4	38,5	-15	1005,2
14:08:00	8	4,4	3,6	16,9	41,0	38,6	-16	1005,2
14:12:00	12	5,5	5,2	15,7	41,6	38,6	-15	1005,1
14:16:00	16	6,5	6,4	14,7	42,4	38,9	-17	1005,1
14:20:00	20	7,0	7,2	14,0	43,2	39,3	-15	1005,1
14:24:00	24	8,0	8,2	13,0	43,9	39,7	-14	1005,0
14:28:00	28	8,6	9,0	12,3	45,0	39,9	-16	1005,0
14:32:00	32	9,2	10,0	11,8	45,9	39,8	-15	1005,0
14:36:00	36	9,4	10,2	11,6	46,3	40,0	-17	1005,0
14:40:00	40	9,8	10,8	11,3	47,0	40,1	-16	1005,0
14:44:00	44	10,2	11,4	10,8	47,5	40,0	-19	1005,0
14:48:00	48	10,2	11,5	10,5	48,4	39,8	-17	1004,9
14:52:00	52	10,3	11,6	10,3	49,1	39,8	-15	1004,9
14:56:00	56	10,3	11,7	10,2	49,9	39,9	-15	1004,9
15:00:00	60	10,3	11,7	10,1	50,4	40,0	-16	1004,9

ENSAIO ET6

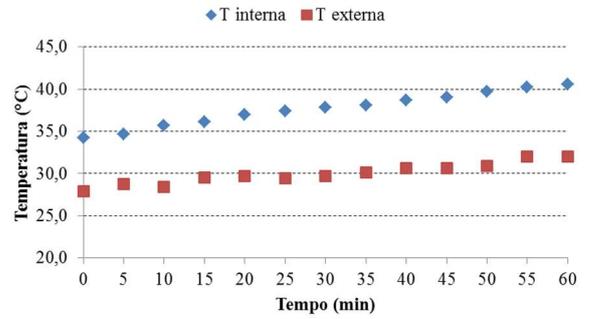
Data: 03/02/2016		Placa: A = 1m ² e V= 50L			N° do ensaio: 23			
Hora de início - 15:25		Fissura: Não		Clima: Ensolarado		Camada: Evapotranspirativa		
Hora	Intervalo	Concentrações			Temp. int.	Temp. ext.	Pressão	Pressão
	Tempo (min)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	°C	°C	interna (Pa)	atm. (hPa)
Início	0	0,0	0,0	21,8	39,7	38,2	-8	1005,3
15:27:00	2	2,6	2,2	19,8	40,5	38,0	-9	1005,3
15:29:00	4	3,0	3,0	19,3	40,8	38,1	-11	1005,2
15:31:00	6	3,5	3,6	19,1	42,2	38,0	-15	1005,2
15:33:00	8	4,1	4,2	18,7	42,6	38,4	-10	1005,2
15:37:00	12	4,7	5,0	18,4	43,1	38,4	-11	1005,1
15:41:00	16	5,1	5,6	18,0	43,8	38,0	-13	1005,1
15:45:00	20	5,5	6,0	17,5	44,2	38,1	-13	1005,1
15:49:00	24	6,1	6,6	17,1	44,7	38,0	-10	1005,0
15:53:00	28	6,6	7,0	16,7	44,9	37,4	-16	1005,0
15:57:00	32	7,0	7,4	16,4	45,0	37,9	-15	1005,0
16:01:00	36	7,3	7,6	16,1	45,0	37,1	-11	1005,0
16:05:00	40	7,4	8,0	15,9	45,2	37,2	-13	1005,0
16:09:00	44	8,0	8,8	15,6	45,1	37,1	-10	1005,0
16:13:00	48	8,8	9,4	15,3	45,1	36,0	-11	1004,9
16:17:00	52	9,4	10,3	15,1	45,3	36,2	-13	1004,9
16:21:00	56	9,6	10,6	15,1	45,6	36,1	-15	1004,9
16:25:00	60	9,6	10,7	15,0	45,5	35,7	-13	1004,9

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE TEMPERATURAS INTERNA E EXTERNA NOS ENSAIOS DE CAMPO

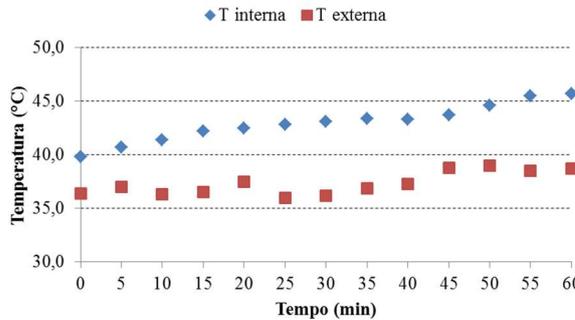
ENSAIO C'1



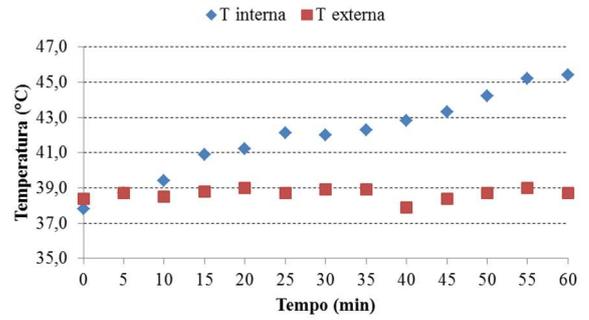
ENSAIO BC1



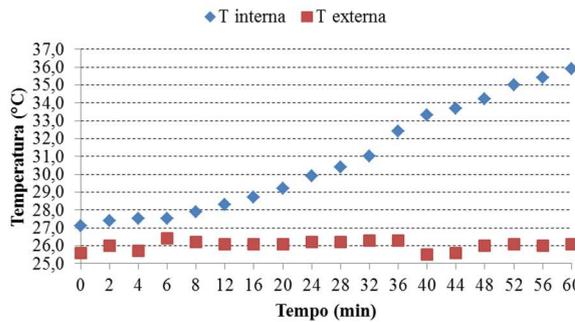
ENSAIO C1



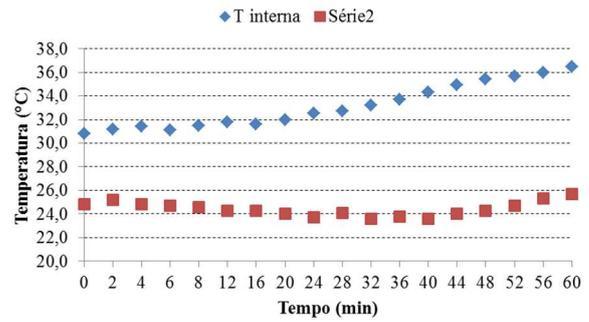
ENSAIO ET1



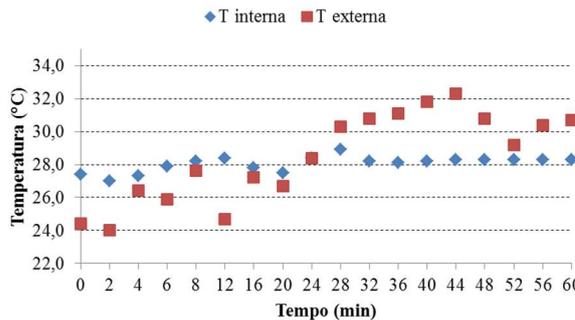
ENSAIO C'2



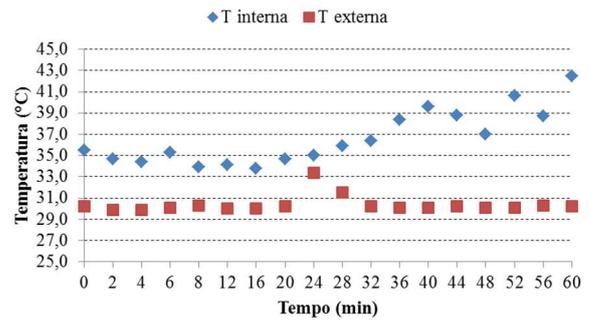
ENSAIO ET2



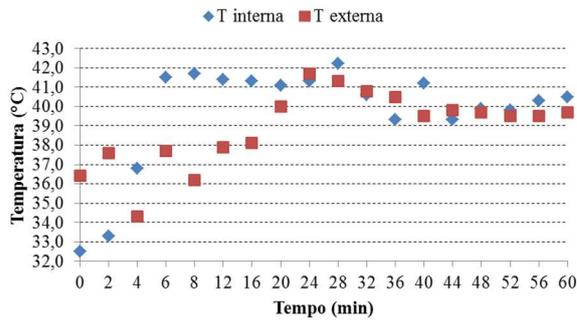
ENSAIO BC2



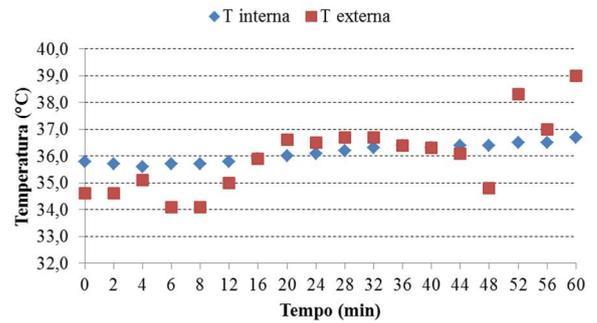
ENSAIO C2



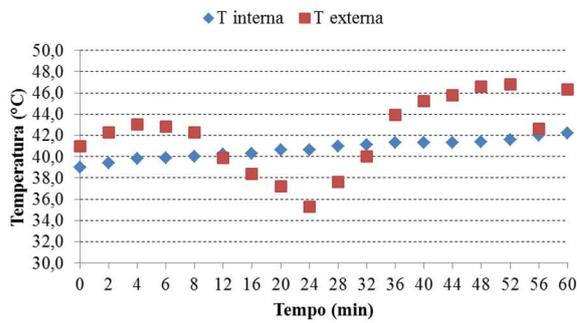
ENSAIO ET3



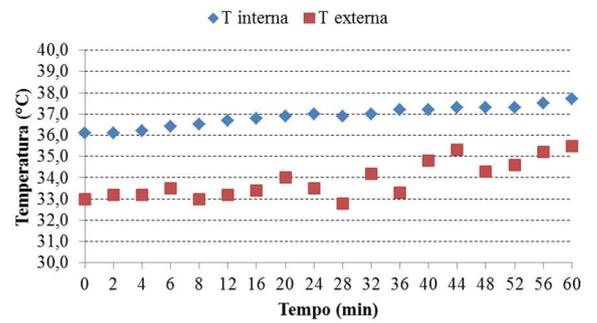
ENSAIO BC3



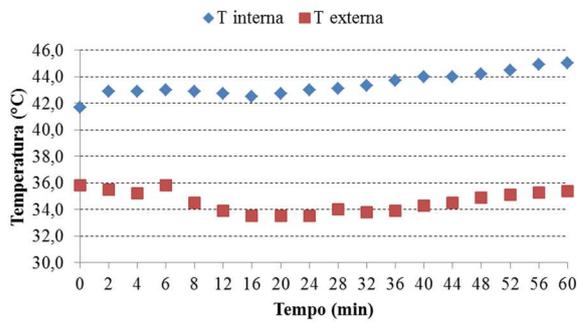
ENSAIO C3



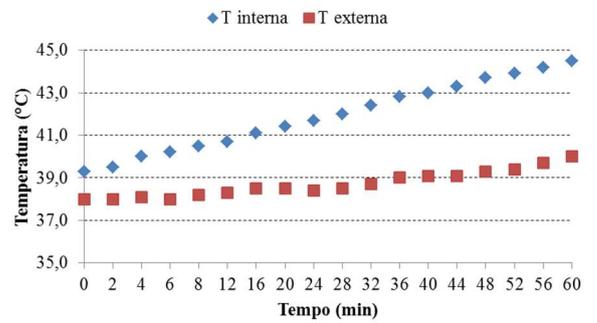
ENSAIO BC4



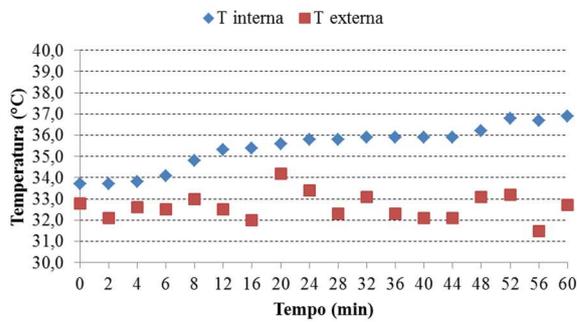
ENSAIO C4



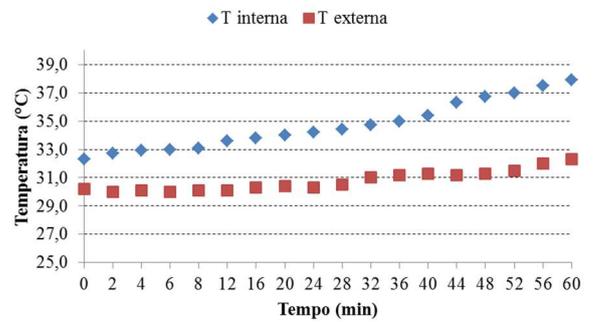
ENSAIO ET4



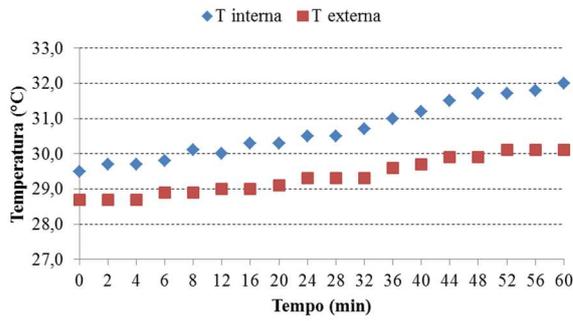
ENSAIO C5



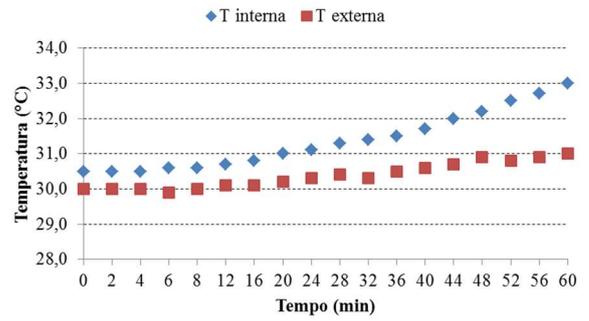
ENSAIO ET5



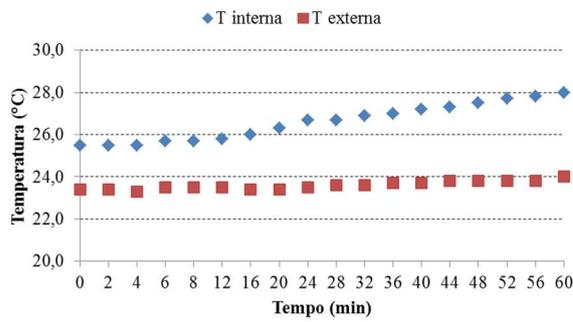
ENSAIO C'3



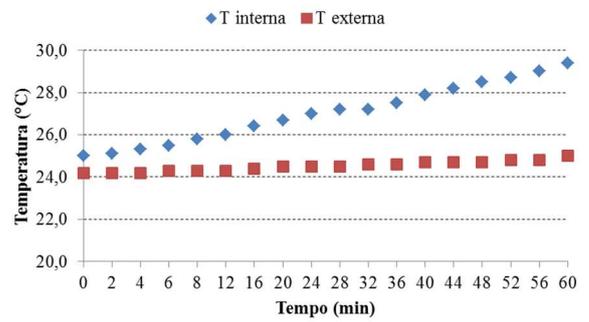
ENSAIO BC5



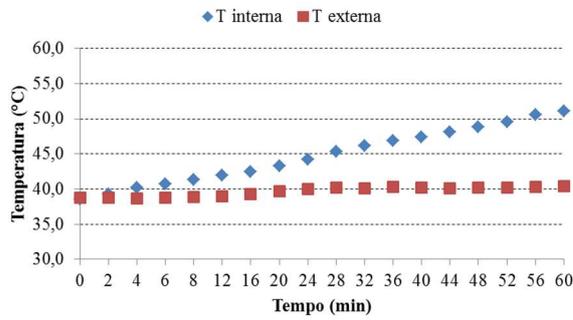
ENSAIO BC6



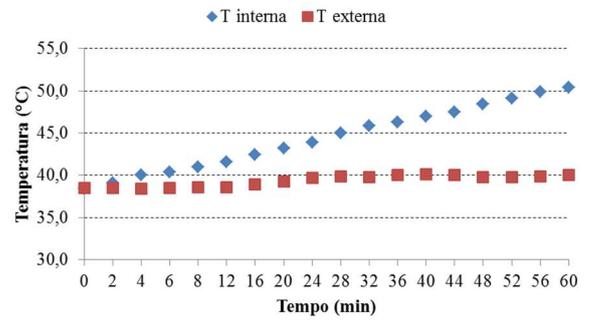
ENSAIO C6



ENSAIO BC7



ENSAIO C'4



ENSAIO ET6

