



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE GEOTECNIA**

LEILA BARROS ARAUJO

**ESTUDO DE EMISSÕES DE GASES EM COLUNAS DE SOLO
SIMULANDO CAMADAS DE COBERTURA OXIDATIVA DE ATERRO
SANITÁRIO**

Recife, 2014

LEILA BARROS ARAUJO

**ESTUDO DE EMISSÕES DE GASES EM COLUNAS DE SOLO
SIMULANDO CAMADAS DE COBERTURA OXIDATIVA DE ATERRO
SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Profº. Dr. José Fernando Thomé Juca

Recife, 2014

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

A663m Araujo, Leila Barros.

Estudo de emissões de gases em colunas de solo simulando camadas de cobertura oxidativa de aterro sanitário / Leila Barros Araujo. - Recife: O Autor, 2014.

75 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2014.

Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Camada de cobertura. 3. Biogás.
4. Bactérias metanotróficas. 4. Ensaio em coluna. I. Jucá, José Fernando Thomé.(Orientador). II.Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2014-316



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DE EMISSÕES DE GASES EM COLUNA DE UM SOLO
SIMULANDO CAMADAS DE COBERTURA OXIDATIVA DE ATERRO
SANITÁRIO**

defendida por

Leila Barros Araujo

Considera a candidata APROVADA

Recife, 29 de julho de 2014

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá - UFPE
(orientador)

Prof.^a Dr.^a Régia Lúcia Lopes – IFRN
(examinadora externa)

Prof.^a Dr.^a Maria Odete Holanda Mariano – UFPE
(examinadora externa)

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos
não é senão uma gota de água no mar. Mas o
mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.*

(Madre Teresa de Calcuta)

AGRADECIMENTOS

A Deus por iluminar e guiar minha vida, dando-me força e perseverança nas horas mais difíceis.

Aos meus pais, José Alberto e Elizabeth, pelo amor incondicional e esforços realizados para que não me deixasse faltar nada.

Aos meus irmãos, Lara e Alberto, pelo carinho e apoio dedicados, a minha alegria de sobrinha, e a toda a minha família.

Ao meu amor Ítalo, pelo companheirismo, carinho, dedicação, em todos os momentos e aos meus sogros Ivysen e Maria José pelo apoio, e a toda sua família.

Ao meu orientador, José Fernando Jucá pelos ensinamentos, compreensão e incentivo durante o desenvolvimento da pesquisa.

À minha companheira de pesquisa, Magdalena, por sua dedicação, incentivo e apoio dados para a execução deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil pela competência e dedicação ao curso, que me beneficiaram direta ou indiretamente na elaboração da dissertação.

À secretaria do curso pelo apoio e cobranças. Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia Antônio Brito, Gutemberg e Seu Severino.

Aos colegas da minha turma de mestrado, em especial aos colegas do GRS, pelo bom convívio e apoio.

Aos amigos, que me estimularam e colaboraram para o meu ingresso na pós graduação Natali, Lívia, Derovil e Laís, assim como todos os colegas de graduação.

Aos amigos de intercambio, Gustavo e Victor, pela convivência durante o período de viagem e à amizade construída.

Às eternas amigas de colégio que me apoiam e alegram os meus dias durante tantos anos, e às novas amigas Cintia, Vanessa e Juliana.

A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse mestrado.

RESUMO

Os aterros sanitários são grandes emissores de gás metano, por isso, devem possuir sistemas capazes de diminuir as emissões através do aproveitamento, queima e/ou drenagem do metano. Neste sentido, as camadas de cobertura contribuem para reduzir as emissões fugitivas que escapam por elas. Assim, são realizados estudos para encontrar camadas alternativas com o uso de compostos orgânicos, que através das bactérias metanotróficas, podem oxidar o metano, aumentando a eficiência da camada, como realizado nessa pesquisa. O presente trabalho objetivou analisar a eficiência da oxidação do metano, através da amostragem dos gases em diferentes pontos de uma coluna experimental, simulando a camada de cobertura utilizada em uma célula experimental de um aterro sanitário. A coluna foi confeccionada com segmentos de tubo plástico rígido com diâmetro interno de 15 cm e altura total de 75 cm. A coluna foi preenchida com 30 cm de solo compactado sobreposta com 30 cm de mistura de 50% de solo mais 50% de composto orgânico e instrumentada com sensores para medir temperatura, condutividade elétrica e umidade, com os dados armazenados em *datalogger*. O fluxo de gás metano injetado foi de 0,5 NL/h controlado por rotâmetros e feita leitura dos gases com o detector portátil de gases. Após os ensaios, foi verificado que a mistura de solo+composto utilizada mostrou-se adequada para a oxidação, mas não se pode concluir que todo o gás metano foi oxidado, e sim que há uma tendência de oxidação na camada, onde a coluna reteve, em média, 60% do gás metano injetado.

Palavras-chave: Camada de cobertura. Biogás. Oxidação do metano. Bactérias metanotróficas. Ensaio em coluna.

ABSTRACT

Landfills are major emitters of methane gas, so they must have systems capable of reducing emissions by harnessing, burning and/or drainage of methane. However, the outer layers contribute to fugitive emissions escaping through them. Thus, studies are performed to find alternate layers using organic compounds that can oxidize methane, using methanotrophic bacteria, increasing the efficiency of the layer, as performed in this study. The objective of this study was to analyze the efficiency of methane oxidation, through the sampling of gases at different points on an experimental pilot column, simulating the cover layer used in an experimental cell of a landfill. The column was made with segments of rigid plastic pipe with 15 cm of internal diameter. The pieces were overlapped with the first step with 15 cm and two with 30 cm, thus totaling at a column height of 75 cm. The column was filled with 30 cm of compacted soil with 30 cm overlying of mixture of 50% soil plus 50% organic compound and instrumented with sensors to measure temperature, conductivity and moisture, with the data stored in the datalogger. The flow of methane gas was injected 0.5 NL/h controlled by rotameter and the reading taken with a gases portable gas detector. After the tests, it was found that the mixture of soil+compost used proved to be adequate for the oxidation, but it cannot be concluded that all the methane was oxidized, but it can be said that there is a trend in the oxidation in the layer, where the column retained an average of 60% of methane injected.

Keywords: Landfills. Biogas. Methane oxidation. Methanotrophic bacteria. Column test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Coluna experimental (Humer e Lechner, 2001)	26
Figura 2. Coluna experimental adaptado de Wilshusen et al. (2004).....	26
Figura 3. Coluna experimental de Kettunen et al. (2006).....	27
Figura 4. Visão geral das colunas oxidativas	28
Figura 5. Coluna experimental de Rachor et al. (2011).....	28
Figura 6. Coluna experimental de Salim (2011).....	29
Figura 7. Coleta do solo da jazida.....	33
Figura 8. Coleta do composto	33
Figura 9. A. Permeametro de parede flexível; B. Corpo de Prova	36
Figura 10. A. Segmentos da coluna; B. Detalhe para o-ring	39
Figura 11. A. Datalogger; B. Sensor	40
Figura 12. Sensores 5TE da DECAGON	41
Figura 13. Gráfico da calibração de condutividade	41
Figura 14. Gráfico da calibração para temperatura.....	42
Figura 15. Gráfico da calibração para umidade	42
Figura 16. Montagem da coluna experimental de simulação da camada de cobertura	43
Figura 17. A. Detalhe da base da coluna; B. Detalhe da manta e grade; C. Montagem da base; D. Detalhe para montagem com solo	44
Figura 18. Desenho esquemático da coluna.....	44
Figura 19. Desenho esquemático dos sensores	45
Figura 20. Coluna experimental montada	46
Figura 21. A. Gás metano; B. Rotâmetro para controle de fluxo de entrada; C. Entrada do gás (base da coluna); D. Saída do gás (topo da coluna)	47
Figura 22. Desenho esquemático da coluna experimental	48
Figura 23. Sistema completo da pesquisa	48
Figura 24. Sistema completo	50
Figura 25. Coluna com tampa aberta.....	51
Figura 26. Gráfico do ensaio de granulometria	52
Figura 27. Compactação.....	54
Figura 28. Permeabilidade ao ar	55
Figura 29. Variação da umidade	56

Figura 30. Gráfico da concentração de metano	57
Figura 31. Gráfico da concentração do gás carbônico.....	58
Figura 32. Gráfico da concentração de oxigênio.....	59
Figura 33. Concentração do CH ₄ nos diferentes ciclos	60
Figura 34. Concentração do O ₂ nos diferentes ciclos	61
Figura 35. Concentração do CO ₂ nos diferentes ciclos	62
Figura 36. Concentração do CH ₄ nos diferentes ciclos	63
Figura 37. Concentração do O ₂ nos diferentes ciclos	63
Figura 38. Concentração do CO ₂ nos diferentes ciclos	64
Figura 39. Eficiência de retenção do CH ₄	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variações da composição típica do biogás	18
Tabela 2. Fluxo de metano medido através de camadas de cobertura	19
Tabela 3. Parâmetros ideais para oxidação (HUBER-HUMER, 2004).....	24
Tabela 4. Temperaturas do ensaio de estabilização.....	34
Tabela 5. Parâmetros avaliados e normas.....	35
Tabela 6. Emissão de CH ₄ em aterros de RSU brasileiros	49
Tabela 8. Limites de consistência de Atterberg para os materiais	53

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
2.REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Camadas de cobertura.....	14
2.2 Emissões de gases em aterros sanitários	18
2.3 Metano	20
2.4 Ensaios com colunas	24
3.9 Determinação da eficiência de oxidação do metano	30
3.METODOLOGIA.....	32
3.1 Simulação da camada de cobertura em laboratório	32
3.2 Caracterização dos materiais	34
3.3 Ensaios de permeabilidade	35
3.4 Confeção das colunas	38
3.5 Instrumentação da coluna	39
3.6 Montagem das colunas	40
3.7 Fluxo de gás.....	45
3.8 Ensaios: Leitura das colunas.....	49
4.ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	52
4.1 Ensaios preliminares – Caracterização dos substratos.....	52
4.2 Ensaios de oxidação	56
5.CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES	66
REFERÊNCIAS.....	68

1. INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 (Brasil, 2010) trata de temas como gerenciamento de resíduos sólidos, responsabilidade dos geradores e órgãos responsáveis, entre outros. Ao reforçar a gestão integrada dos resíduos, competência do Distrito Federal e dos Municípios, o desafio é lançado principalmente para os pequenos municípios. A predominância de municípios de pequeno porte no Brasil com população inferior a 50 mil habitantes é de aproximadamente 90% (IBGE, 2011). Estes possuem limitações na gestão de resíduos e o quadro atual para a disposição final são os conhecidos “lixões”.

Porém, de acordo com a Política, até 2014 todos os resíduos sólidos devem ser depositados em aterros de sanitários e os vazadouros (lixões), erradicados. Com isso, os municípios de pequeno porte tem a necessidade de resolver o problema da forma mais adequada e econômica possível.

Nesse contexto, é necessária a otimização na construção desses aterros, atendendo às exigências estabelecidas, mas diminuindo o fator econômico. Um dos pontos a ser estudado, sendo o foco desse trabalho, é a escolha do tipo de camada de cobertura.

As camadas de cobertura servem como um isolante dos resíduos sólidos para o meio externo (MARIANO, 2008), garantindo o controle de infiltrações e das emissões de biogás. As camadas convencionais e as camadas alternativas são os dois tipos de camadas para aterros sanitários. As convencionais são compostas por solo natural argiloso e as alternativas por solos e materiais que não são geossintéticos. Apesar do tipo de camada escolhido, a eficiência no controle das emissões de gases e na percolação da água deve ser alcançada, garantindo o bom funcionamento do sistema como um todo.

Segundo o IPCC (2007) as camadas oxidativas, tipo de camada alternativa que utiliza materiais orgânicos, representam uma alternativa economicamente viável para o tratamento de emissões fugitivas do metano. Porém, a utilização de biocoberturas implica na necessidade de avaliação de sua eficiência tanto durante a fase de planejamento quanto em toda a operação, pois a capacidade de oxidação do solo é controlada por vários fatores (IPCC, 2007).

A oxidação biológica é realizada por bactérias metanotróficas, as quais, em meio aeróbio, oxidam o metano em CO₂, H₂O, biomassa e calor (HUMER e LECHNER, 2001).

A avaliação da eficiência das camadas de cobertura pode ser realizada com ensaios prévios realizados em laboratório. Neste sentido, os ensaios de coluna são desenvolvidos com a intenção de estudar o comportamento de diferentes tipos de materiais utilizados na verificação da eficiência da camada em termos de retenção de gases, oxidação do metano e/ou infiltração de águas, buscando condições relativamente semelhantes aos aterros sanitários, com a inserção de ar atmosférico e de biogás, em uma coluna preenchida com o substrato escolhido.

Esses ensaios geralmente são realizados com a injeção de ar atmosférico ou mistura de gases com concentrações similares às encontradas em aterros, em colunas preenchidas com o substrato a ser estudado.

O propósito deste trabalho é estudar a eficiência da oxidação do metano, através de ensaios de laboratório realizados em coluna de solo, simulando a camada de cobertura utilizada em uma célula experimental de um aterro sanitário.

1.1 Objetivos

O objetivo geral dessa pesquisa é simular em laboratório camadas de cobertura de aterros através de ensaios de coluna de solo, avaliando a eficiência em relação à redução das emissões de metano. Esta camada de cobertura foi configurada a partir da célula experimental situada no Aterro controlado de Resíduos Sólidos da Muribeca (Projeto CHESF/ANEEL).

Entre os objetivos específicos podem-se destacar:

- a) Avaliar as emissões de metano (CH₄) em camada de cobertura oxidativa, em função das características do material utilizado;
- b) Estudar a eficiência da camada de cobertura com respeito às emissões gasosas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Camadas de cobertura

As camadas de cobertura servem como um isolante dos resíduos sólidos para o meio externo (MARIANO, 2008). O desempenho de um aterro de resíduos sólidos é vinculado a um sistema de cobertura eficiente e duradouro, devendo-se ser projetados adequadamente.

Para um aterro de resíduos sólidos, no Brasil, não existe um padrão definido de como se deve construir um sistema de cobertura final. Porém, são adotadas como regras o que ditam as NBR 8419 (ABNT, 1992) e NBR 13896 (ABNT, 1997).

A cobertura final atua diretamente na efetividade do processo da retenção do biogás gerado pelos resíduos sólidos, sendo um dos pontos críticos de um projeto de aterro sanitário. Os projetos de aterros de resíduos são variados e dependem das condições locais da área de instalação, porém devem cumprir com suas funções.

De acordo com Huse (2007), a camada de cobertura é um sistema que tem como objetivo principal impedir a entrada de líquidos no interior do corpo do aterro.

Segundo Vieira (2005), a cobertura tem basicamente quatro funções principais: a diminuição da infiltração de água, diminuição da proliferação de vetores e odores, proteger contra a ação antrópica e controlar o fluxo de gás para a atmosfera.

Existem duas maneiras de mitigar a emissão de CH_4 , já que segundo Teixeira et al. (2009), uma parte do biogás gerado em aterros sanitários, composto por 50 a 60% de CH_4 , pode atravessar a barreira de cobertura e escapar para a atmosfera, mesmo no caso dos aterros dotados de sistema de captação de biogás. A primeira é a construção de sistemas de captação do gás para serem queimados ou aproveitados para a geração de energia. A segunda é a utilização do potencial microbiológico no solo de cobertura dos aterros, através da oxidação do metano. Esse tipo de camada funciona como habitat para os microrganismos metanotróficos, além de ser uma solução eficiente que pode valorizar materiais alternativos.

2.1.1 Componentes da camada de cobertura

Para definição da camada de cobertura, as características geotécnicas e climatológicas devem ser continuamente estudadas.

Assim, para um sistema de camadas de cobertura, existem algumas recomendações. Saarela (1997) descreve que as seguintes camadas podem estar presentes:

- Camada de controle de gás: direciona os gases produzidos pela massa de lixo, em consequência da degradação da matéria orgânica, para a atmosfera.
- Camada de proteção: separa o material fino dos grossos, prevenindo o entupimento da parte de granulometria grossa pelos finos. Portanto, previne a mistura dos materiais de diferentes.
- Camada de proteção inferior: isola a barreira hidráulica da massa de lixo e serve também como suporte para as demais camadas do sistema. Essa camada impede danos químicos e mecânicos que a massa de lixo pode provocar na barreira hidráulica.
- Barreira hidráulica: muda a direção e/ou impede a percolação de qualquer forma de precipitação que entre em contato com esta camada. É importante que essa camada não sofra danos causados por raízes de plantas ou pela presença de animais, para que não perca sua função.
- Camada drenante: intercepta a percolação de precipitação, conduzindo-a lateralmente para fora do sistema.
- Barreira biótica: impede que as raízes da vegetação e a presença de animais danifiquem as camadas inferiores, especialmente a barreira hidráulica.
- Camada superficial: A vegetação planejada e controlada dessa camada previne a erosão, expõe parte da água do sistema de cobertura através da evapotranspiração, além de trazer melhorias estéticas ao ambiente.

Os sistemas de cobertura utilizados nos aterros podem ser de diferentes tipos: camada homogênea de argila, de vários tipos/graduações de solo, argilosa com diferentes geossintéticos e mais recentemente aquelas formadas com materiais alternativos, tais como, solos orgânicos, lodos, etc. No Brasil, a

grande maioria dos aterros possui cobertura com camada homogênea de argila compactada (MACIEL, 2003).

Para Rose (2009), existem dois tipos de sistemas camadas de cobertura. Os convencionais, constituídos de camadas de solo argiloso ou de camadas de solo e geossintéticos, e os sistemas alternativos, que se utilizam de outros materiais que não o solo para constituição de algumas das camadas do sistema de cobertura.

Segundo Maciel (2003), a vegetação é um elemento que deve sempre estar associado à superfície das camadas, independentemente do sistema adotado, para evitar problemas de erosão e contração do solo. Além da função de minimizar a infiltração de líquidos para o interior da massa de lixo e com isto evitar a geração excessiva de percolado sob várias condições climáticas (Kamon et al., 2001), a cobertura serve para minimizar a liberação aleatória de poluentes gasosos para o meio ambiente e as entradas de ar atmosférico no lixo.

2.1.2 Importância da camada de cobertura

A camada de cobertura final é de grande importância, seja para minimizar as emissões de gases para a atmosfera, prevenir a proliferação de vetores, diminuir a formação de lixiviados, reduzir maus odores. Assim, é necessário prever o comportamento geotécnico e biológico da mesma para poder definir os parâmetros de projeto e operação desta camada.

O sistema deve ser projetado de forma a minimizar a infiltração e a erosão do material de cobertura. É fundamental que esse sistema seja inspecionado e reparado, para assim garantir sua durabilidade.

Entre outros fins, o sistema de cobertura também tem a função de proteger as células de lixo, minimizando os impactos ao meio ambiente através da eliminação de vetores, reduzindo a exalação de odores, eliminando a queima de resíduos e a saída descontrolada de gases. Além disso, evita o espalhamento do lixo e/ou poeira e melhora a estética do local onde o aterro se encontra (HUSE, 2007).

2.1.3 Uso de solo na camada de cobertura

O solo pode ser utilizado como camada de cobertura de um aterro de resíduos sólidos, e, para isso, devem ser considerados seus aspectos geotécnicos.

Alguns dos fatores importantes para o uso dos solos são: a granulometria, compactação, condutividade hidráulica, pois influencia o processo de infiltração da precipitação na massa de lixo.

Segundo Dwyer (2003), a cobertura de solo deverá isolar efetivamente os resíduos, reduzindo os fenômenos de erosão e infiltração, e deve proporcionar o desenvolvimento da biota.

No encerramento de um aterro sanitário, ou seja, diante da sua incapacidade de receber resíduos sólidos urbanos, uma camada de solo deve ser colocada sobre o aterro desativado.

2.1.4 Camadas oxidativas

Um dos métodos que pode ser aplicado para o controle de emissão de gases pela camada de cobertura é a utilização de potencial microbiológico residente no solo de cobertura para realizar a oxidação do metano. Segundo Rose (2009), embora este método não reduza o volume de biogás que passa por essa camada, ele ao menos minimiza os efeitos danosos ao ambiente, provocados pela liberação em grandes quantidades de CH_4 .

É necessário que o biogás gerado atravessasse a camada de cobertura, para que ocorra a oxidação do metano.

A oxidação do CH_4 é realizada por bactérias metanotróficas ocorre naturalmente em solos e aterros sanitários e podem ser promovidos por meio da otimização de parâmetros ambientais e físicos (EINOLA et al., 2008).

A capacidade de oxidação do CH_4 depende de diversas propriedades físicas do material de cobertura, com destaque para a porosidade, a qual afeta o coeficiente de difusão de gás (HILGER e HUMER, 2003; HILGER et al., 2000; KETTUNEN et al., 2006), disponibilidade de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo (HILGER e HUMER, 2003) e as taxas de produção de CH_4 .

Segundo Scheutz et al. (2007) um benefício secundário da oxidação do CH₄ nos solos de cobertura é a oxidação de outros compostos orgânicos, especialmente compostos aromáticos e clorados.

Segundo Lopes (2011), a camada com as mesmas configurações que a usada nessa pesquisa, com mistura de composto orgânico e solo na proporção de 1:1, apresentou eficiência média de oxidação de 64,9%, verificada em campo.

2.2 Emissões de gases em aterros sanitários

O biogás de aterro sanitário é o produto final dos processos que levam a decomposição dos resíduos. O biogás é uma mistura de espécies gasosas gerada pela volatilização de compostos químicos e pela biodegradação exotérmica da matéria orgânica, devido a ação das bactérias, fungos e protozoários na ausência de oxigênio.

O biogás apresenta além do metano (CH₄), uma parcela representativa de dióxido de carbono (CO₂) e em menor escala o oxigênio (O₂), ácido sulfídrico (H₂S), amônia (NH₃), hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂), dentre outros. Segundo Nikiema et al. (2007), as variações da composição típica de biogás gerado em aterro sanitário são variáveis, como a seguir (Tabela 1).

Tabela 1. Variações da composição típica do biogás

Componentes	Concentração média (%)
Metano (CH ₄)	30 - 70
Dióxido de Carbono (CO ₂)	20 - 50
Nitrogênio (N ₂)	1-5
Oxigênio (O ₂)	0,1 - 1,0
Amônia (NH ₃)	0,1 - 1,0
Compostos sulfúricos (H ₂ S)	0 - 0,2
Hidrogênio (H ₂)	0 - 0,2
Monóxido de Carbono (CO)	0 - 0,2
Outros gases traços	0,01 - 0,06

Fonte: NIKIEMA et al., (2007)

O gás proveniente de aterros é gerado através da decomposição anaeróbia da matéria orgânica e contém cerca de 50% a 60% de metano (IPCC, 2007). Humer e Lechner (1999) estimaram um potencial específico de geração de metano da ordem de 80 a 120m³CH₄/tonRSU úmidos (resíduos sólidos urbanos úmidos). Além disso, estes autores estimam que para um aterro sanitário em funcionamento e com 20m de espessura, o fator de emissão de CH₄ é de aproximadamente 242gCH₄/m²dia para os 10 primeiros anos de funcionamento do aterro.

A Tabela 2 apresenta os valores de fluxo de CH₄ medidas em alguns estudos através de placa de fluxo estática, indicando a espessura da camada.

Tabela 2. Fluxo de metano medido através de camadas de cobertura

Referência	Camada de Cobertura	Fluxo de CH ₄ (g/m ² dia)
Borjesson e Svensson (1997)	0,1 m a 0,8 m de solo arenoso	-0,3 a 18,4
Park e Shin (2001)	0,5 m a 0,7 m de areia siltosa	0 a 14.794
Maciel (2003)	0,25 m a 0,90 m de solo compactado	102 a 363
Huber-Humer (2004)	0,3 m de composto de lodo de esgoto sobre 0,3 m de solo compactado	0,2 a 173,9
McBain et al. (2005)	0,5 m a 1,5 m de argila compactada	7,0 a 39,0
Yamada et al (2005)	1-2 m de solo	-0,03 a 384
Abichou et al. (2006)	0,15 m a 0,3 m de solo (cobertura diária)	0 a 521
Chanton et al (2007)	Geomembrana+argila	13,8 a 26
Scheut et al. (2007)	0 a 1,4 m (0,2 m pedregulho+1,0 argila+0,2 solo vegetal)	0,1 a 78
Mariano (2008)	0,25 m a 0,9 m de solo areno argiloso	0,0 a 401,0

Apesar da maior geração de biogás nos primeiros 30 anos, as emissões podem continuar a ocorrer por 60 anos ou mais (USEPA, 2006).

A geração de biogás em aterros de RSU é afetada por diversos fatores, tais como: composição e idade do resíduo (disponibilidade de matéria orgânica), teor de umidade, temperatura, pH, disponibilidade de bactérias e nutrientes, e presença de agentes inibidores dentro do sistema (El-Fadel et al., 1997 apud MACIEL, 2009).

2.3 Metano

O biogás de aterro sanitário é constituído de vários gases e possui uma relação direta com a característica do resíduo depositado. Porém o gás encontrado em maior quantidade é o metano.

O metano é um composto químico com a fórmula molecular CH_4 , é o hidrocarboneto (alcano) mais simples e o principal componente do gás natural (aproximadamente 97% em volume) (ROSE, 2009).

A geração é proveniente de processos naturais e/ou antrópicos. Os níveis de emissão de CH_4 por uma fonte geradora variam de região para região, e depende de vários fatores, como clima, produção industrial, características de agricultura, tipo de matriz e gerenciamento de resíduos. A variação de temperatura e da umidade tem impacto significativo no processo de digestão anaeróbia, pois limitam o processo microbiológico de fontes naturais e antrópicas (USEPA, 2002).

2.3.1 Oxidação do Metano

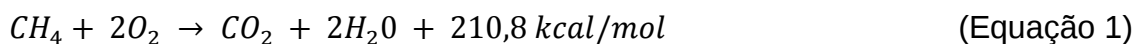
A oxidação biológica do metano é um processo natural mediado pela ação microbiana que ocorre em ambientes onde o metano e o oxigênio são encontrados juntos.

Através da ação de bactérias metanotróficas, capazes de utilizar o metano como fonte de carbono e energia, a oxidação biológica do gás metano acontece, principalmente, quando próximo à superfície, onde existe um aporte maior de oxigênio (McDonald et al., 2008 apud Teixeira et al., 2009). Segundo Einola et al. (2008) a oxidação do CH_4 realizada por bactérias metanotróficas

ocorre naturalmente em solos de aterros sanitários e podem ser promovidos por meio da otimização de parâmetros ambientais e físicos.

Assim, as coberturas de aterros de RSU são um excelente meio para que esse processo ocorra.

A reação de oxidação do metano é dada pela Equação:



2.3.2 Fatores que influenciam para oxidação do metano

A oxidação do metano é influenciada por fatores bióticos e abióticos. Os bióticos são relacionados com os organismos vivos e os abióticos são as condições físico-químicas do ambiente, incluindo os fatores climáticos e os antrópicos.

Além das propriedades físicas, depende também de variáveis climáticas, tais como a pressão atmosférica, a qual afeta o fluxo de advecção e entrada de O_2 , a precipitação, a qual afeta o teor de água, influenciando o conteúdo de ar e temperatura, que afeta não apenas a distribuição de gás, mas principalmente a atividade microbiana (CABRAL et al, 2007; EINOLA et al, 2008; HILGER E HUMER, 2003).

De acordo com Huber-Humer e Lechner (1999), as bactérias metanotróficas são organismos bastante adaptáveis, porém só alcançam altas taxas de consumo de CH_4 quando estão em ambiente onde se tenha adequado pH, porosidade do solo, temperatura, umidade, suprimento de nutrientes, suprimento de oxigênio e metano, e quando os níveis de substâncias inibidoras tais como amônia, nitrito e vários sais, sejam baixos.

Dentre os fatores que influenciam na oxidação, são eles:

2.3.2.1 Bactérias metanotróficas

Os seres que vivem no ambiente que só podem ser observados ao microscópio são definidos como microrganismo. De acordo com a definição geral, as bactérias, fungos, protozoários, vírus e bacteriófagos, são considerados microrganismos. Além desses grupos, a microbiologia do solo trata também as algas telúricas (DROZDOWICZ, 1987).

Os microrganismos não são distribuídos no solo de maneira contínua. A existência de focos dispersos no solo onde há concentração de bactérias é relatada ao observar microscopicamente uma amostra (DROZDOWICZ, 1987). Os microrganismos presentes no solo têm como atividades a produção de húmus, a decomposição de matéria orgânica, participam de quase todos os ciclos de nutrientes existentes (do carbono, nitrogênio, enxofre, ferro, fósforo e magnésio), entre outras. Para os aterros sanitários, os microrganismos são utilizados nos processos de degradação de lixo, assim como na oxidação do metano.

As bactérias metanotróficas formam um grupo único e fisiologicamente distinto pela sua habilidade de utilizar o gás metano como única fonte de carbono e energia. São, portanto, importantes reguladores do fluxo do gás metano para a atmosfera. As metanotróficas são bactérias Gram-negativas e possuem uma elevada eficiência de crescimento sob condições aeróbias (BORJESSON et al., 2004).

A utilização do metano pelas bactérias metanotróficas como fonte de carbono e de energia é possível devido à ação da enzima metano monoxigenase que oxida o metano produzindo metanol com geração de duas moléculas de água (TEIXEIRA, 2008).

O aumento da matéria orgânica do solo fornece nutriente para as bactérias, gerando o aumento da atividade oxidativa. Além disso, um solo rico em matéria orgânica apresenta uma maior porosidade. Estudos comprovaram a elevada capacidade de oxidação de CH_4 em um composto maduro e bem estruturado (WILSHUSEN et al., 2004).

As bactérias metanotróficas estão presentes naturalmente em muitos ecossistemas onde existe a presença de metano e são particularmente abundantes nas regiões de interface de zonas úmida aeróbia e anaeróbia. Foram encontradas em abundância na camada de cobertura de aterros sanitários (HUBER-HUMER et al., 2008). A presença de bactérias metanotróficas em solos de cobertura de aterros é favorecida pela alta concentração de CH_4 proveniente da biodegradação dos resíduos (HE et al., 2008, AIT-BENICHOU et al., 2009).

A atividade de bactérias metanotróficas em aterros de solos de cobertura é influenciada por fatores ambientais, como teor de água, textura do solo e mineralogia, porosidade e vegetação (VISVANATHAN et al., 1999).

Segundo Teixeira (2008), os microrganismos em questão são divididos em dois grupos: tipo I (Methylomonas, Methylocaldum, Methylosphaera, Methyломicrobium e Methylobacter) e tipo II (Methylocystis e Methylosinus). O tipo I assimila o formaldeído produzido na oxidação do metano (via metanol) utilizando a rota da monofosforibulose. O tipo II utiliza a rota da serina para a assimilação do formaldeído (TEIXEIRA et al., 2009).

Gebert et al. (2003) observaram em seus biofiltros que as bactérias metanotróficas podem sobreviver a um período de privação de CH₄ e retomar a atividade uma vez que a taxa de fluxo de metano se torna suficientemente elevada. Após uma interrupção de 25 semanas de biogás, o reinício do sistema de abastecimento alcançou taxas de oxidação obtidas antes da interrupção da alimentação.

Porém, segundo Bahr et al (2006), estes microrganismos são sensíveis a determinados fatores, como pH, temperatura e teor de umidade.

2.3.2.2 Grau de saturação e porosidade

O aumento da saturação, acréscimo no volume de água nos poros, provoca uma diminuição na permeabilidade do solo ao ar tendo em vista que a quantidade e a continuidade dos poros aerados ficam reduzidos. De acordo com Marinho (1994), a presença dos gases nos vazios do solo na forma contínua ou eclusa é função também da trajetória de secagem e umedecimento e da saturação inicial da amostra.

O solo com alta porosidade e elevado teor de oxigênio disponível, apresenta alta taxa de oxidação do metano.

De acordo com Huber-Humer (2004), existem parâmetros ideais e de tolerância para ocorrência da oxidação, resumidos a seguir (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros ideais para oxidação (HUBER-HUMER, 2004)

Parâmetros	Ideais	Tolerância	Observações
Temperatura	25°C – 35°C	10°C – 40°C	Processo exotérmico
pH	5 - 8,5 5,8 - 7,5	4 - 9	Muito tolerante
Umidade	40 - 80% da CC	< 80% da CC	Limite superior definido pela interação entre o volume de poros preenchidos por ar e água.
Metano	100 - 10.000 ppm	> 2 ppm	Relativamente flexível em uma variedade de concentrações.
Oxigênio	Razão estequiométrica $\text{CH}_4:\text{O}_2 = 1:2$		Microrganismos sobrevivem a partir de 2% de O_2 no ar.
Solo	Porosidade e capacidade de campo com bom aporte de nutrientes.		Se possível porosidade elevada e grande capacidade de campo.
Inibidores			
- Amônia	< 350 ppm (BS)		
- Nitrito	Abaixo do limite de detecção		
- Cobre	< 720 ppm		
- Sais	< 2%		
Nutrientes	Aporte de nutrientes suficiente TOC > 8% BS		Altas razões especialmente de nitrogênio e fósforo

BS = Base Seca | CC = Capacidade de Campo

A oxidação biológica do metano é baseada em vários fatores determinantes, como apresentado acima, que devem ser analisados para a utilização de biocoberturas. Essas análises podem ser realizadas em ensaios com colunas de solos.

2.4 Ensaios com colunas

Diversos autores realizaram estudos de oxidação em colunas para investigar a eficiência de determinados substratos se usados como camada de

cobertura de aterro sanitário com a entrada de biogás na parte inferior, em condições controladas em laboratório.

As pesquisas em coluna buscam simular as condições de campo, porém com o controle de entrada de gases e análises em diferentes profundidades, assim verificando a tendência de oxidação na camada de cobertura. Essa tendência é verificada através do cálculo da taxa de oxidação, que depende das variáveis utilizadas na pesquisa, como concentração do gás utilizado na entrada do experimento, concentração do gás na saída, entre outros.

Dentre os estudos realizados, destacam-se:

- Kightley et al. (1995) – Considerado um dos pioneiros no estudo, o objetivo foi verificar a capacidade de desenvolvimento da comunidade metanotrófica em alguns solos. Para isso, colunas de 15 cm de diâmetro e 100 cm de altura foram preenchidas com areia grossa, uma argila de cobertura e uma areia fina. A cada 10 cm existia um ponto de amostragem de gás. A taxa de oxidação máxima atingida foi de 166 g CH₄/m²dia para a areia grossa.

- Humer e Lechner (2001) – Os ensaios foram realizados em uma coluna de 70cm de altura com fonte de metano a uma vazão entre 3 e 9 mL/min, com amostras de gases realizadas a 10, 30 e 50 cm (Figura1). Os substratos utilizados foram compostagem de lodo de esgoto, composto de resíduos sólidos e argila compactada. A taxa de oxidação máxima foi de 107 g CH₄/m²dia.

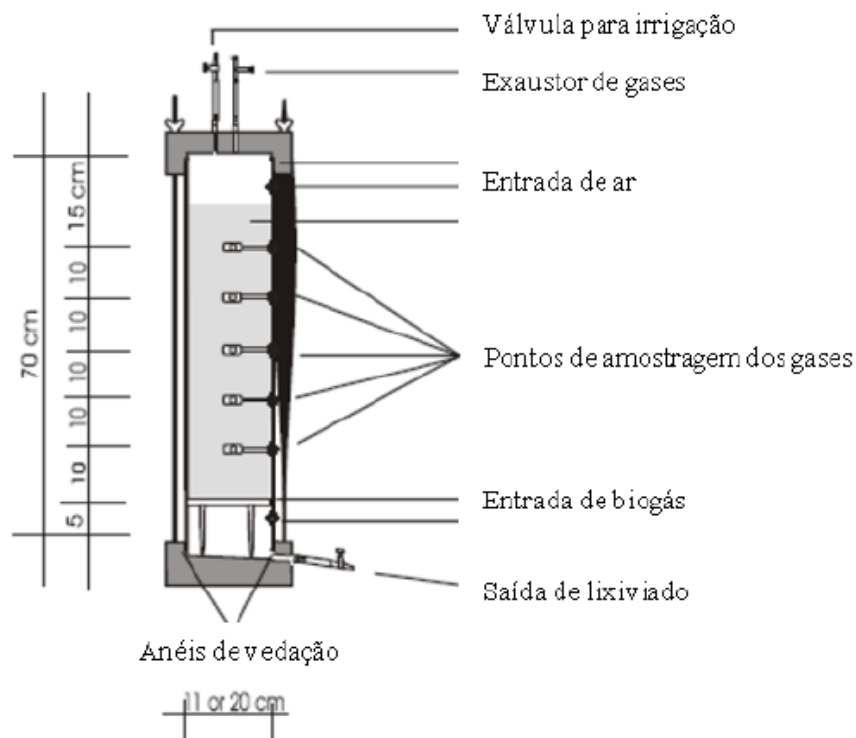


Figura 1. Coluna experimental (Humer e Lechner, 2001)

- Wilshusen et al. (2004) – Foram estudadas seis colunas de acrílico com 100 cm de altura e 14 cm de diâmetro com amostragem de gás a cada 5 cm. A vazão de metano variou entre 7,5 e 8 mL/min. Foram utilizados composto de folhagem, de jardim, de serragem de madeira e composto de RSU. A taxa de oxidação máxima foi de 400 g $\text{CH}_4/\text{m}^2\text{dia}$ para o substrato de composto de folhas (Figura 2).

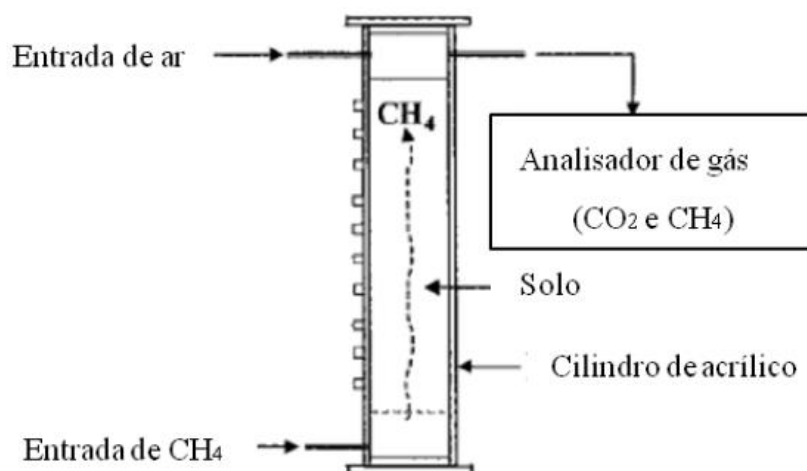


Figura 2. Coluna experimental adaptado de Wilshusen et al. (2004)

- Kettunen et al. (2006) – Os dois substratos utilizados eram constituídos de composto de lodo, compostagem de resíduos e areia para a primeira coluna e o segundo por composto de lodo, compostagem de resíduos e cascas de árvore. As colunas de PVC tinham 50 cm de altura e 30 cm de diâmetro (Figura 3). O gás composto por 50/50 CH_4/CO_2 foi injetado a uma vazão entre 4 e 6 ml/min. A taxa de oxidação máxima foi de 50 g $\text{CH}_4/\text{m}^2\text{dia}$ para a primeira coluna.

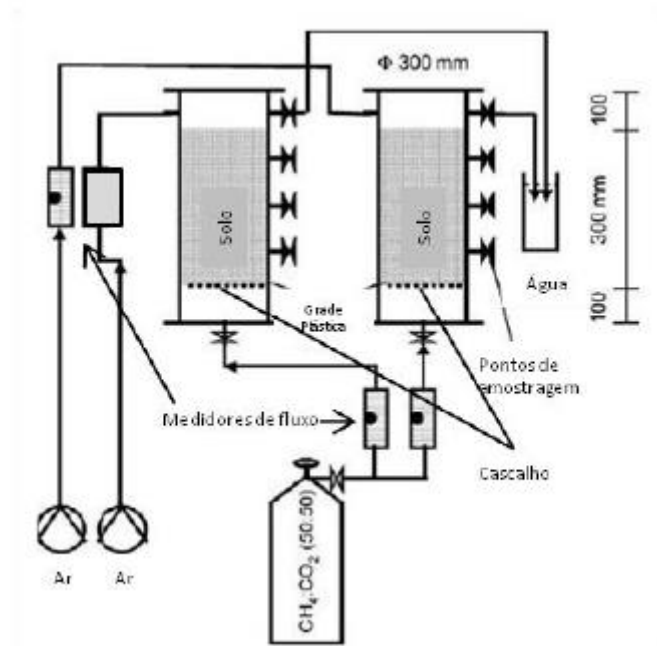


Figura 3. Coluna experimental de Kettunen et al. (2006)

- Rose (2007) – Foram estudadas quatro colunas com 60 cm de PVC com diâmetro interno de 9,9 cm. O gás metano foi misturado a ar comprimido, e alimentaram a coluna por fluxo ascendente de 150 L/min. Os materiais utilizados foram solo, solo+composto (3:1), solo+composto (1:1) e composto. O composto foi oriundo da compostagem de resíduos sólidos, e o solo, da área de empréstimo de um aterro sanitário. A capacidade oxidante do composto, 990 g $\text{CH}_4/\text{m}^2\text{dia}$ foi a maior, comparada com os outros substratos. A Figura 4 demonstra como a pesquisa foi desenvolvida.

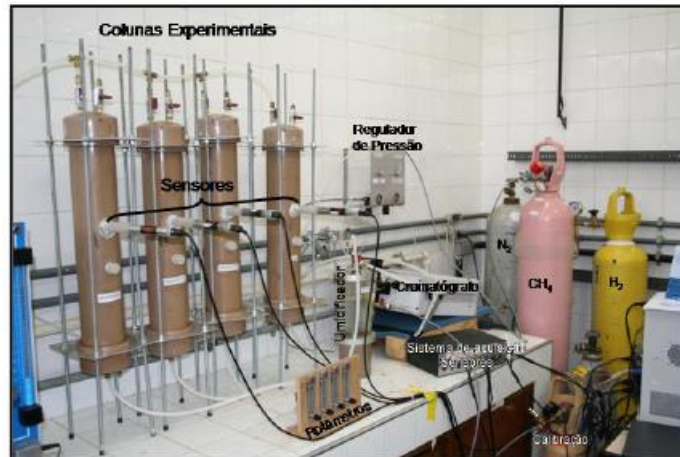


Figura 4. Visão geral das colunas oxidativas

- Einola et al. (2008) – As colunas de PVC foram construídas com 50 cm de altura e 30 cm de diâmetro. O gás utilizado, 50/50 de CH_4/CO_2 , foi inserido com uma vazão entre 2 e 5,5 mL/min. A taxa de oxidação máxima foi de 82 g $\text{CH}_4/\text{m}^2\text{dia}$.

- Rachor et al. (2011) – As colunas de PVC foram construídas com 107 cm de altura e 19 cm de diâmetro (Figura 5). As colunas foram montadas com cinco tipos de materiais, com variação de silte e argila. O gás utilizado era composto de 60/40 de CH_4/CO_2 , com vazões variando entre 25 e 100 g/ m^3dia . A taxa máxima de oxidação variou entre 20 e 95 g $\text{CH}_4/\text{m}^2\text{dia}$.

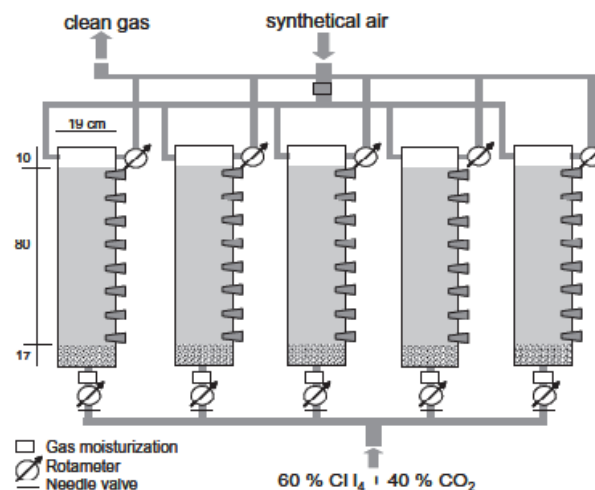


Figura 5. Coluna experimental de Rachor et al. (2011)

- Salim (2011) – As dimensões da coluna foram 60 cm de altura e 15 cm de largura, possuindo 5 pontos de amostragem de gás a cada 10 cm e uma saída de gases na parte superior da coluna (Figura 6). Os substratos utilizados

foram o solo de cobertura do aterro sanitário de Biguaçu - SC; uma mistura de solo com lodos de estações de tratamento de esgoto e água e 15%, em peso, de cal; e uma mistura de solo com lodo de estação de tratamento de esgoto e 30%, em peso, de cal. Foi inserida uma mistura gasosa de 50% CH₄ e 50% CO₂ na parte inferior da coluna e ar atmosférico na parte superior da coluna. A taxa de oxidação máxima de CH₄ dos ensaios variou de 19,8 a 107,6 g CH₄/m²dia.



Figura 6. Coluna experimental de Salim (2011)

Os resultados de Rachor et al. (2010), mostraram que o teste laboratorial é altamente recomendado para avaliar a capacidade de um material de solo para oxidar metano e, assim, a sua adequação para uso em uma camada de cobertura de aterro.

Nikiema et al. (2007), apresentam diferentes trabalhos, que desenvolveram estudos sobre a oxidação do metano em diferentes materiais e sistemas. A forma mais usual de expressar a taxa de oxidação é grama de metano convertido por metro quadrado por dia, porém não menciona como os parâmetros são obtidos. Os valores de oxidação biológica do metano variaram de 5 g m⁻²d⁻¹ a 1500 g m⁻²d⁻¹.

Em laboratório, em ensaios com colunas, Roncato (2009) determinou a eficiência de oxidação de 10% a 96% com a utilização de materiais com composto orgânico, assim como Huber-Humer e Lechner (2001) determinaram eficiência de até 100% em camada de material de baixa densidade, como o caso da camada utilizada nessa pesquisa.

No estudo desenvolvido por Maldaner (2011), a coluna de solo foi preenchida com material utilizado na camada oxidativa de um aterro, composta por composto orgânico e areia de resíduos de construção e demolição (1:3 – composto:areia), conseguiu uma eficiência de oxidação abaixo de 30%. Porém, para o segundo biofiltro utilizado, na proporção de (1:3 – composto:areia), composto de aterro sanitário, a eficiência foi de 100% na redução do metano. Embora tenha sido verificada baixa oxidação de metano em laboratório para a mistura oxidativa utilizada no primeiro biofiltro, no campo o material apresentou-se com alto potencial oxidativo.

De acordo com Lopes (2011), a partir da avaliação do desempenho das camadas experimentais se propõe um dimensionamento de camada de cobertura para aterros sanitários que leve em consideração o uso de uma camada drenante na base, uma camada homogênea intermediária de solo fino, e uma camada de proteção compactada, com mistura de solo e composto. Assim, em estações chuvosas, a umidade será retida, propiciará o crescimento de vegetação ao longo de todo ano, maiores taxas de oxidação de CH_4 nas estações secas serão alcançadas, pelo maior ingresso de O_2 , e terá a proteção final da camada de cobertura.

No trabalho desenvolvido por He et al. (2008), a capacidade de oxidação de material de compostagem foi dez vezes maior que o solo argiloso.

No mesmo estudo, as bactérias do tipo I foram predominantes no solo argiloso, enquanto que a do tipo II foi predominante no solo de compostagem. Os resultados apresentaram maior atividade microbiana no solo de compostagem, e concluiu-se que o solo com composto orgânico, quando comparado a camada de cobertura convencional (argila), pode reduzir a emissão para a atmosfera em aproximadamente 37,4 kg de CH_4/m^2 anualmente.

3.9 Determinação da eficiência de oxidação do metano

3.9.1 Balanço de massa do CH_4

O balanço de massa do gás metano é utilizado para o cálculo da taxa de retenção dos ensaios de coluna. A partir das medições dos fluxos de entrada e

saída dos gases e das concentrações em cada ponto de amostragem, foram determinadas a massa de entrada (M_{entr}) e a massa de saída (M_{said}). A eficiência de retenção (Ef_{ret}) foi calculada através da Equação 2.

$$Ef_{ret} = [(M_{entr} - M_{said}) \times 100] \div M_{entr} \text{ (Equação 2)}$$

em que,

Ef_{ret} —eficiência de retenção (%);

M_{entr} —massa de entrada (%);

M_{said} — massa de saída (%).

Segundo Teixeira (2009), esta diferença é um indicativo que está havendo oxidação do metano, mas a mesma não serve para estabelecer uma taxa de oxidação, a qual depende de uma vazão de entrada de metano no sistema em uma unidade de tempo.

Entretanto, diversos autores consideram esse cálculo para a taxa de oxidação e apresentam seus valores para oxidação do metano (KIGHTLEY et al. (1995), STREESE e STEGMANN (2003), KETTUNEN et al. (2006), ROSE (2009), SALIM (2011) e LOPES (2011)).

Para esta pesquisa, o cálculo foi realizado para apresentar a tendência de oxidação da camada de cobertura através da equação 2 como um indicativo da eficiência da mesma, em reter o gás metano.

3. METODOLOGIA

Com o objetivo de verificar a eficiência de um tipo de camada de cobertura de aterro sanitário, em condições controladas, quanto às emissões gasosas, executaram-se experimentos em uma coluna de solo instrumentada.

A metodologia dos ensaios de coluna seguiu o trabalho desenvolvido por Vieira (2005), na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, local onde ocorre vários trabalhos desse porte.

3.1 Simulação da camada de cobertura em laboratório

Para o preenchimento da coluna foram utilizados materiais com as mesmas configurações de uma das quatro camadas de cobertura utilizada na célula experimental da Muribeca – PE. Maciel (2009) e Lopes (2011) demonstram os detalhes desta célula experimental que fez parte da pesquisa desenvolvida para seus trabalhos. Os perfis das camadas de cobertura da célula da Chesf foram denominados de:

Perfil 1 – camada metanotrófica: MET 1 (1:1) - camada composta por 30 cm de solo compactado sobreposta com mistura de 50% de solo mais 50% de composto oriundo da unidade de compostagem existente no aterro, com espessura variando de 40 a 75 cm; MET 2 (1:3) - camada composta por 30 cm de solo compactado sobreposta com mistura de 75% de solo mais 25% de composto oriundo da unidade de compostagem existente no aterro, com espessura variando de 40 a 75 cm;

Perfil 2 – camada barreira capilar: camada composta por 20 cm de pedra rachinha sobreposta com solo compactado com espessura variando de 45 a 60 cm. Na interface entre o solo e a camada de pedra, foi utilizado geotêxtil tipo tecido-não-tecido ou agulhado;

Perfil 3 - camada convencional: solo compactado, com espessura variando de 50 a 90 cm.

O perfil escolhido para o estudo foi o Perfil 1 – camada metanotrófica (1:1), chamada, atualmente, de camada oxidativa, por utilizar maior quantidade de material de compostagem, visando adotar esse tipo em aterros de municípios de pequeno porte.

Os materiais utilizados no experimento foram coletados no aterro experimental construído no Aterro Sanitário da Muribeca localizado no município de Jaboatão dos Guararapes - PE. O solo é o mesmo encontrado na célula experimental, retirado da jazida localizada no aterro com o uso de retroescavadeira, armazenado e transportado ao Laboratório de Geotecnia da UFPE (Figura 7).



Figura 7. Coleta do solo da jazida

O composto orgânico utilizado na composição da camada de cobertura oxidativa foi coletado também no Aterro Controlado da Muribeca, na área de compostagem (Figura 8) e, juntamente com o solo, foi transportado para o laboratório da UFPE.



Figura 8. Coleta do composto

O composto orgânico para ser utilizado juntamente com o solo, deve encontrar-se estabilizado, evitando assim, a geração de danos ao solo

interferindo na biota residente com a produção de toxinas. Para isso, após a coleta, a temperatura do material foi verificada, sem apresentar variações significativas, ou seja, encontra-se estável. A verificação foi realizada através do acompanhamento da temperatura (indicativo de atividade microbiológica) do composto armazenado em recipiente hermeticamente fechado, com um termômetro introduzido, por cinco dias.

As temperaturas foram verificadas na amostra de composto dentro do recipiente, assim como a temperatura externa, a cada 24h (Tabela 4).

Tabela 4. Temperaturas do ensaio de estabilização

Dias	Temperatura (°C)	
	Composto	Sala
1	23	24
2	23	25
3	25	26
4	25	25
5	24	25

As temperaturas internas e externas permaneceram próximas, com isso não houve atividade microbiológica de compostagem durante o período de análise. Portanto, o composto foi considerado estabilizado e os ensaios foram realizados.

Essa pesquisa selecionou um perfil para as análises, o perfil 1 (1:1), simulado em uma coluna de solo, que possui as seguintes configurações adequadas: camada oxidativa - coluna preenchida com 30cm de solo compactado sobreposta com 30cm de mistura de 50% de solo mais 50% de composto orgânico. Na base foi colocada uma camada de 5cm de brita zero para uniformizar a distribuição do fluxo no interior da coluna.

3.2 Caracterização dos materiais

Os parâmetros das caracterizações físicas e geotécnicas dos materiais foram obtidos segundo as metodologias da ABNT (Tabela 5). Foram separados três tipos de materiais para as devidas caracterizações sendo eles: solo puro, solo com composto orgânico na proporção 1:1 e composto orgânico.

Tabela 5. Parâmetros avaliados e normas

Ensaio	Normas
Preparação de amostras	NBR-6457/86
Análise granulométrica	NBR-7181/88
Limite de Liquidez	NBR-6459/84
Limite de Plasticidade	NBR-7180/88
Massa específica dos grãos	NBR-6508/84
Compactação	NBR-7182/88

3.3 Ensaios de permeabilidade

3.3.1 Permeabilidade a água

O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D5084-10 (ASTM, 2010), em permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE. Os procedimentos são os mesmos adotados por Maciel (2003), Mariano (2008) e Lopes (2011).

Os corpos de prova (solo puro e mistura de solo com composto orgânico 1:1) foram moldados através da energia do Proctor normal, na umidade ótima, no formato do cilindro. O cilindro tem as dimensões conhecidas de 10 cm de diâmetro e altura de 12,7 cm. Em contato com o solo encontra-se o conjunto de papel filtro, tanto na base como no topo, pedras porosas e uma tampa de acrílico chamada “top cap”. O corpo de prova é coberto com uma membrana e ligas de borracha, evitando o contato com a água na sua lateral. Com isso o corpo de prova é inserido na célula de acrílico (Figura 9). A célula de acrílico é conectada ao equipamento por tubulações.

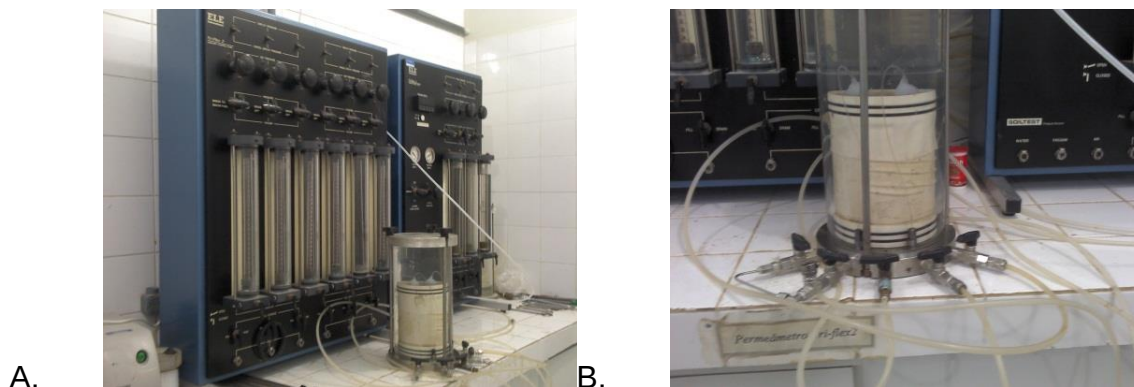


Figura 9. A. Permeametro de parede flexível; B. Corpo de Prova

O ensaio foi iniciado com a abertura da válvula lateral, permitindo a entrada de água até preencher a célula, sendo necessário verificar a ausência de bolhas na superfície. Após o preenchimento com água destilada, aplicou-se uma pressão confinante de 50 kPa para a retirada de bolhas de ar das pedras porosas, da superfície e das linhas de tubulação. Em seguida, as buretas foram preenchidas com água até atingirem o nível desejado, sendo as mesmas também desareadas. Com isso, a pressão confinante foi aumentada para 108 kPa até a saturação, sendo então fechada a válvula de entrada de pressão no topo e na base do corpo de prova, posicionam-se as válvulas de comando em “pressure” (no equipamento) para então serem aplicadas as pressões de base e de topo.

Posteriormente, todas as válvulas de entrada de pressão foram abertas e após 24h verificou-se se o corpo de prova estava saturado, considerando saturado quando o volume que entra pela base da amostra fosse igual ao volume que sai pelo topo, na aplicação de um gradiente de pressão constante de 30 kPa. Após a constatação da saturação do corpo de prova, em média 1 a 2 dias, iniciou-se o ensaio de permeabilidade propriamente dito, em que as válvulas de pressão do topo e da base foram fechadas, colocando-se um gradiente de fluxo ascendente que dependeu das características da amostra, podendo ser de 30 kPa, 50 kPa ou 100 kPa. Em seguida, abriu-se as válvulas de topo e de base e mede-se o tempo necessário para percolar 5cm^3 pela amostra. O procedimento foi repetido até a obtenção de pelo menos três leituras de tempo com variação de até $\pm 5\%$. Com isso, o coeficiente de permeabilidade foi calculado.

Para o cálculo do coeficiente de permeabilidade (K) a partir dos dados do ensaio utiliza-se a Equação 3.

$$K = \frac{V \times L}{\Delta P \times t \times A_{cp}} \text{ (Equação 3)}$$

em que,

K - coeficiente de permeabilidade a água (m/s);

V - volume do líquido percolado (m³);

L - altura do corpo de prova (m);

ΔP - variação da pressão (m);

t - tempo necessário para percolar o volume de 5mL (s);

A_{cp}- área do corpo de prova (m²).

3.3.2 Permeabilidade ao ar

Os procedimentos para realização desse ensaio foram desenvolvidos por Ignatius (1999), Springer et al. (1998) e Stylianou e DeVantier(1995) e com adaptações ao sistema do permeâmetro de parede flexível, Tri-flex 2 - Soil Test – ELE realizadas por Maciel (2003) e Lopes (2011).

Os mesmos corpos de prova compactados sob energia do Proctor Normal utilizados para determinar o coeficiente de permeabilidade saturada, foram os usados para determinar o coeficiente de permeabilidade ao ar. A metodologia de montagem do corpo de prova no equipamento seguiu os mesmos procedimentos adotados para a determinação da permeabilidade saturada, trocando-se o fluido confinante e percolante por ar atmosférico.

Para o início do ensaio de permeabilidade ao ar, posicionou-se o corpo de prova entre pedras porosas e papel filtro na base da câmara, sendo colocada uma membrana de borracha látex e o-rings no corpo de prova. Abraçadeiras metálicas foram instaladas e conectadas aos tubos plásticos no cap acrílico superior, onde a célula encontrava-se pronta para ser preenchida com água. Após essas etapas seguiu-se os mesmos procedimentos do ensaio de permeabilidade saturada, substituindo o fluido percolante por ar comprimido.

As pressões aplicadas pelo permeâmetro foram de um compressor de ar e foram reguladas no quadro de comando do equipamento. Para cada amostra foram feitas leituras de vazão de ar para gradientes de pressões diferentes. A leitura da vazão de ar percolado através da amostra, para cada gradiente de pressão aplicado, foi feita diretamente em um rotâmetro modelo série 1900 da AppliTech, tubo 2300, com faixa de leitura 0 a 10 NL/h e erro de 5%.

Os coeficientes de permeabilidade ao fluido percolante foram calculados a partir da equação formulada da Lei de Darcy que considerando o peso específico do ar (γ_{ar}) para o cálculo do gradiente de pressão (Equação 4).

$$K_{ar} = \frac{q \times L}{A \times \Delta p} \text{ (Equação 4)}$$

em que,

K_{ar} - Permeabilidade ao ar (m/h);

q - Vazão (Nm³/h);

A - Área (m²);

L - comprimento da amostra (m);

Δp - gradiente de pressão (m), considerando $\gamma_{ar} = 0,012 \text{ kN/m}^3$.

Depois de calculada a permeabilidade ao ar para leituras de vazão de ar para gradientes de pressões diferentes foi traçado um gráfico: permeabilidade ao ar x gradiente de pressão.

3.4 Confeção das colunas

A metodologia dos ensaios de coluna seguiu o trabalho desenvolvido por Vieira (2005), em que foi estudado o comportamento de barreiras capilares submetidas a condições climáticas simuladas, a fim de verificar a eficiência da camada de cobertura de aterro sanitário. O experimento obedeceu a metodologia desenvolvida na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, orientada pelo professor Marinho.

A coluna foi confeccionada com segmentos de tubo PVC rígido com diâmetro interno de 15 cm. Foram feitas peças de alturas de 15 e 30cm para

melhor manuseio das colunas. As peças foram sobrepostas com a primeira etapa de 15cm e duas de 30cm, assim totalizando em uma altura de 75 cm para a coluna. Ambos os lados dos tubos foram fechados com tampas de placa de PVC contendo O-rings de borracha que são pressionados por parafusos contra as placas, assim assegurando vedação e estanqueidade (Figura 10). A placa inferior da coluna foi perfurada uma vez para a introdução do gás metano nas colunas. Já a superior foi furada duas vezes para introdução de duas válvulas, para propiciar a coleta de amostras de gás.

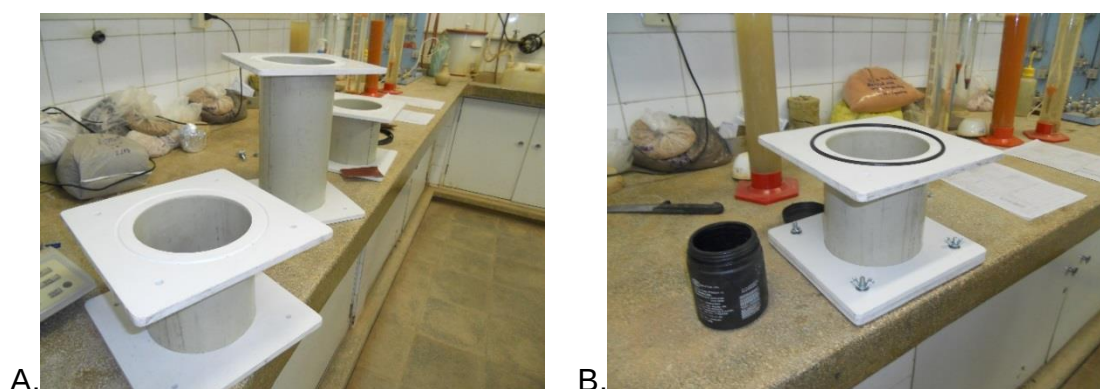


Figura 10. A. Segmentos da coluna; B. Detalhe para o-ring

3.5 Instrumentação da coluna

A instrumentação da coluna foi realizada com sensores que medem temperatura, condutividade elétrica e umidade. Para o experimento, apenas os de umidade e temperatura são relevantes. Os dados foram armazenados em datalogger e acompanhados durante os experimentos. O datalogger utilizado foi o Em50 que é um gravador de dados de 5 canais, projetado para armazenar dados dos sensores da DECAGON (Figura 11 A).

Os sensores de temperatura, condutividade elétrica e umidade utilizados foram os sensores 5TE da DECAGON que medem simultaneamente os três parâmetros. Os sensores são compostos por sondas triplas de 5 cm, que medem a permissividade dielétrica do solo e determina o conteúdo volumétrico de água no solo. A temperatura é verificada através do contato de uma sonda e um termistor, enquanto que os traços de ouro na superfície do sensor formam um arranjo de 4 polos medindo a condutividade elétrica (Figura 11 B).

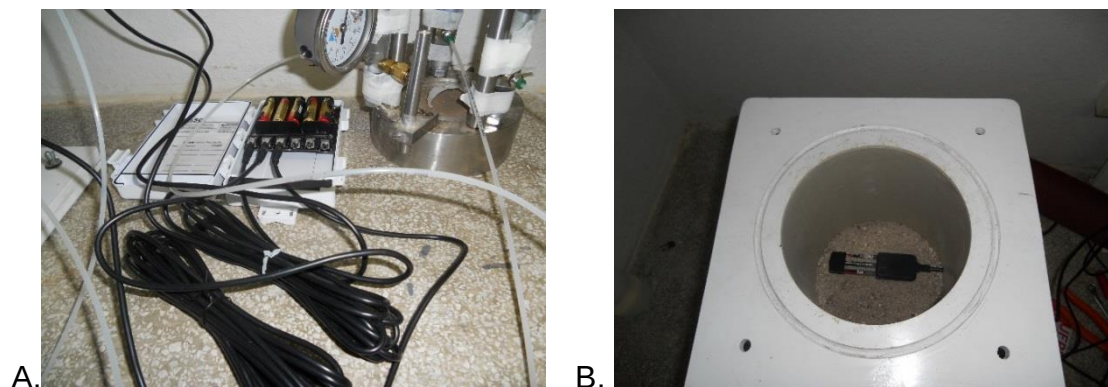


Figura 11. A. Datalogger; B. Sensor

3.6 Montagem das colunas

3.6.1 Coluna teste

A primeira coluna montada foi para calibração dos equipamentos e para testar o conjunto como um todo. Primeiramente, foi verificada a estanqueidade, com a adição de água e fechamento de toda a coluna. Com a apresentação de resultados positivos, a coluna foi furada nos locais de inserção dos sensores e preenchida com areia média, a fim de obter resultados rapidamente, já que o material é bastante permeável à água e ao ar.

Os testes iniciaram-se com a montagem do sistema, composto pela coluna e sensores. Os sensores foram calibrados a partir da leitura da condutividade elétrica, temperatura e umidade, assim verificando a eficiência dos equipamentos.

Para comparação dos resultados de condutividade elétrica, foi utilizado o aparelho condutivímetro do Laboratório de Resíduos Sólidos da UFPE inserido em soluções de diferentes concentrações molares de cloreto de potássio (KCl), assim como os sensores 5TE da DECAGON (Figura 12). O KCl foi escolhido devido aos valores padrões de medição da condutividade elétrica do sal com suas concentrações e respectivas molaridades.



Figura 12. Sensores 5TE da DECAGON

Na Figura 13 estão apresentados os dados coletados com os sensores e com o condutivímetro na forma de gráfico, juntamente com a equação da reta e o coeficiente de determinação (R^2).

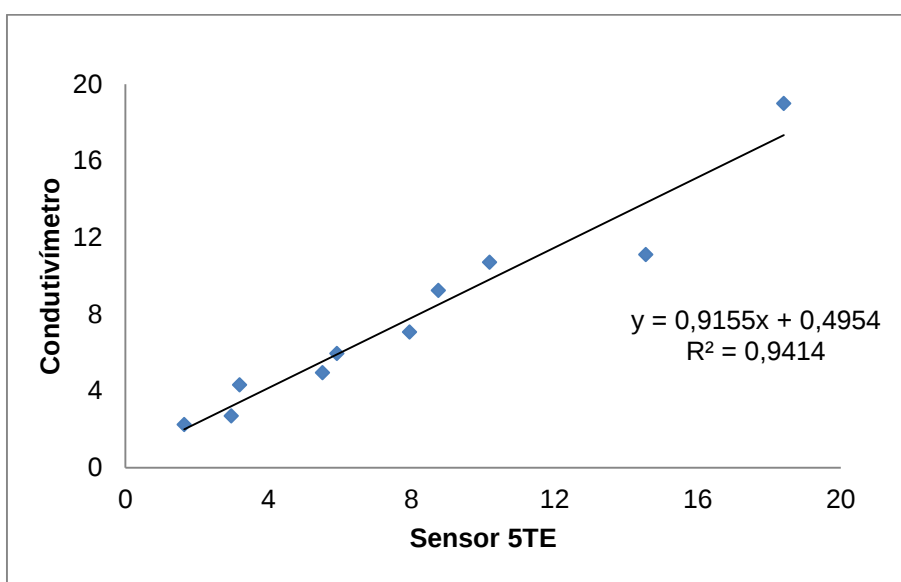


Figura 13. Gráfico da calibração de condutividade

A verificação da temperatura foi realizada com a imersão dos sensores em água destilada com temperaturas diferentes e com a leitura de um termômetro comum (Figura 14).

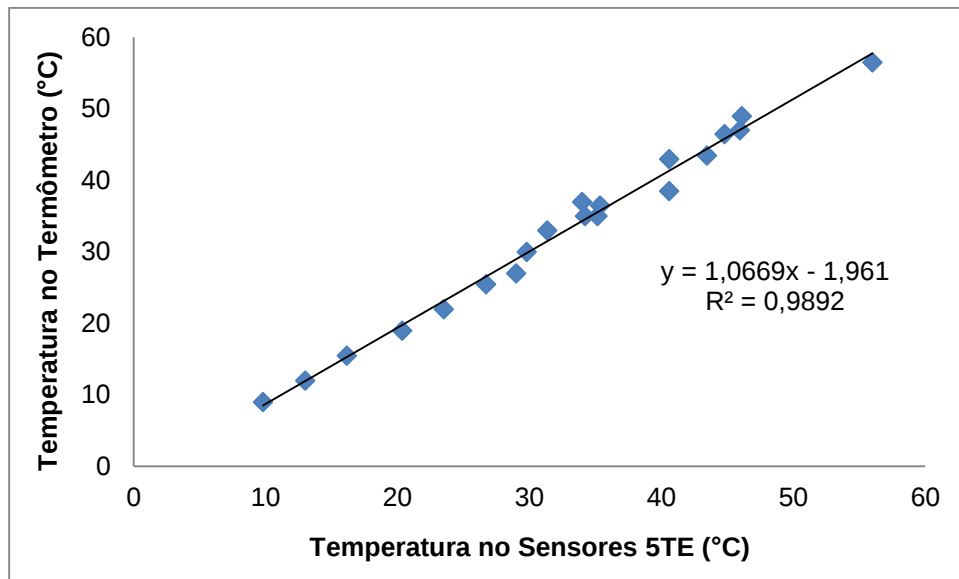


Figura 14. Gráfico da calibração para temperatura

A verificação da umidade foi realizada com a imersão dos sensores em amostras de solo umidificadas com água destilada em diferentes quantidades (Figura 15).

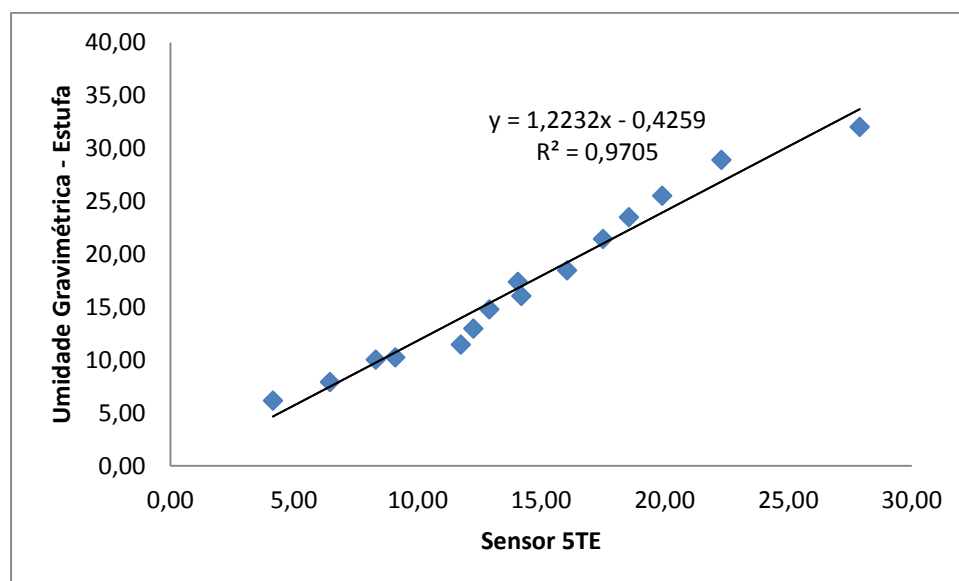


Figura 15. Gráfico da calibração para umidade

Na Figura 16 está sendo demonstrado o processo de montagem da coluna teste com areia para calibração do sistema.

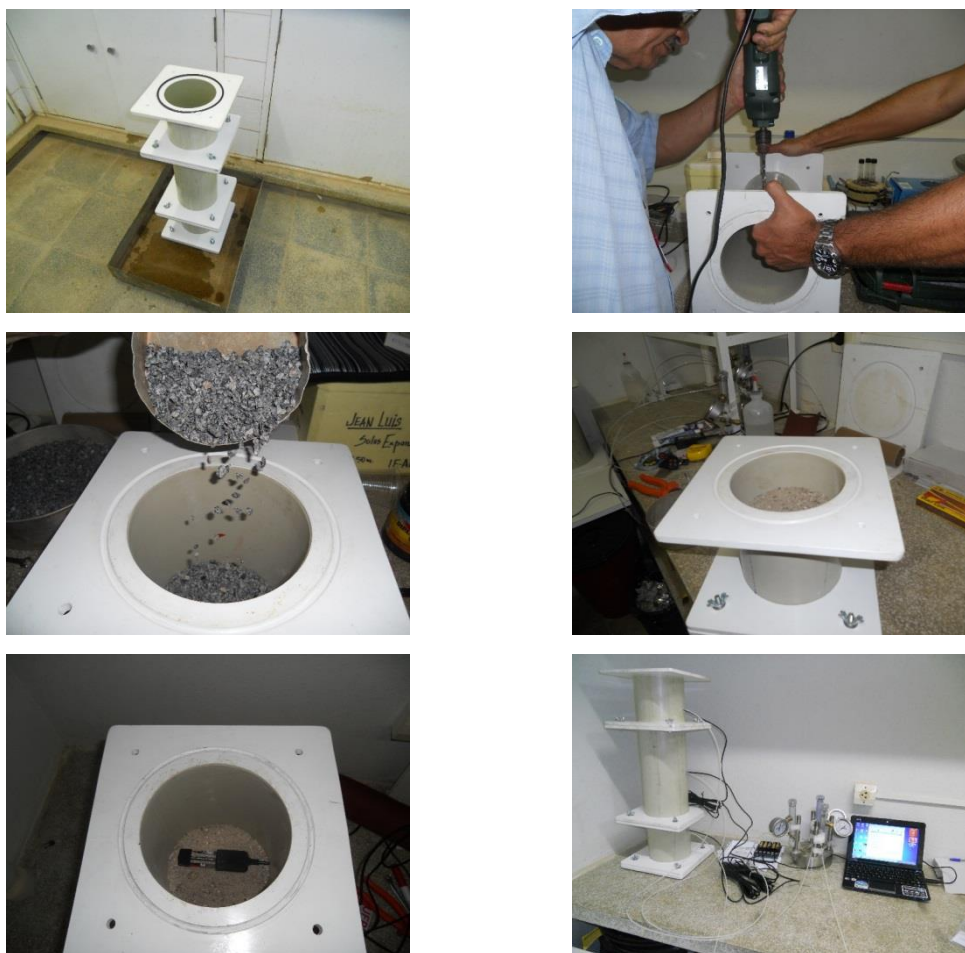


Figura 16. Montagem da coluna experimental de simulação da camada de cobertura

Como dito anteriormente, as montagens do perfil na coluna seguiu a configuração da camada de cobertura do Aterro Experimental da Muribeca. A coluna foi montada com três segmentos de PVC, uma de 15 cm, e mais duas de 30 cm, totalizando 75 cm de altura.

A coluna, semelhante ao perfil 1- camada oxidativa na composição de 1:1, foi montada com 5 cm de brita zero, tela galvanizada e geotêxtil na base. Acima desta camada de distribuição foi introduzido 30cm de solo compactado sobreposta com 30cm de mistura de 50% de solo mais 50% de composto orgânico, deixando 10 cm de espaço para o fechamento com a placa superior (Figura 17 e Figura 18).

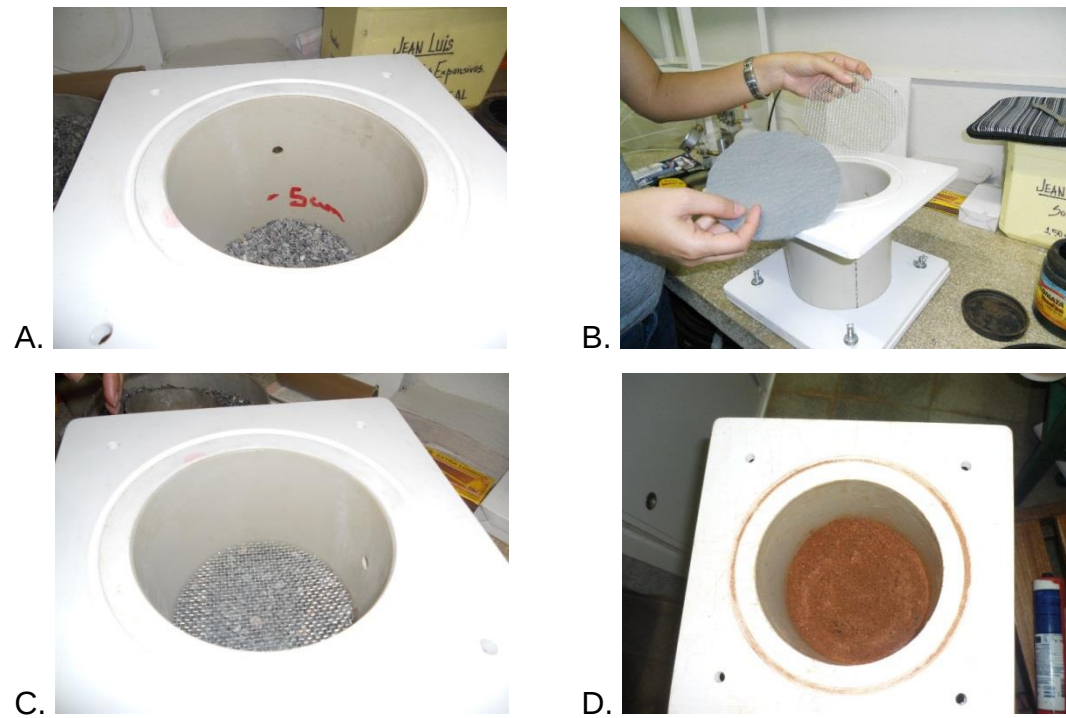


Figura 17. A. Detalhe da base da coluna; B. Detalhe da manta e grade; C. Montagem da base; D. Detalhe para montagem com solo

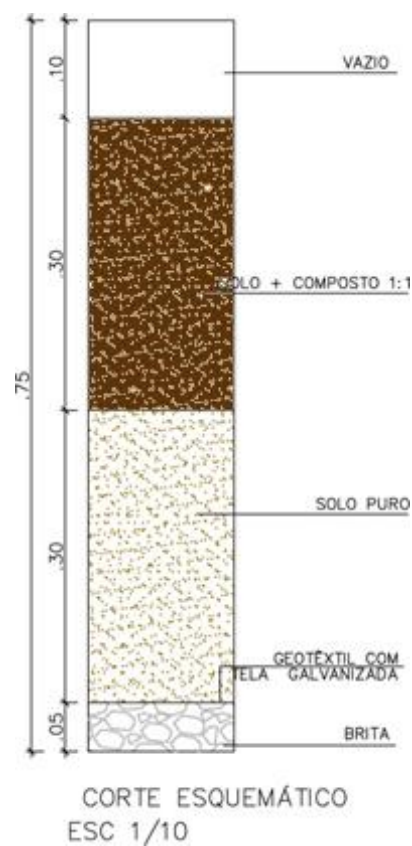


Figura 18. Desenho esquemático da coluna

Os sensores para verificação da temperatura, condutividade elétrica e umidade (5TE da DECAGON), foram introduzidos em quatro pontos a fim de analisar o comportamento ao longo das colunas. O primeiro foi introduzido a 10cm da base da coluna, atingindo a primeira camada de solo após a camada de distribuição do gás. O segundo foi introduzido a uma distância de 15 cm do primeiro, para analisar o intermédio da camada e acima desse, a uma distância de 15 cm e o outro distante mais 15 cm como apresentado no desenho esquemático (Figura 19).

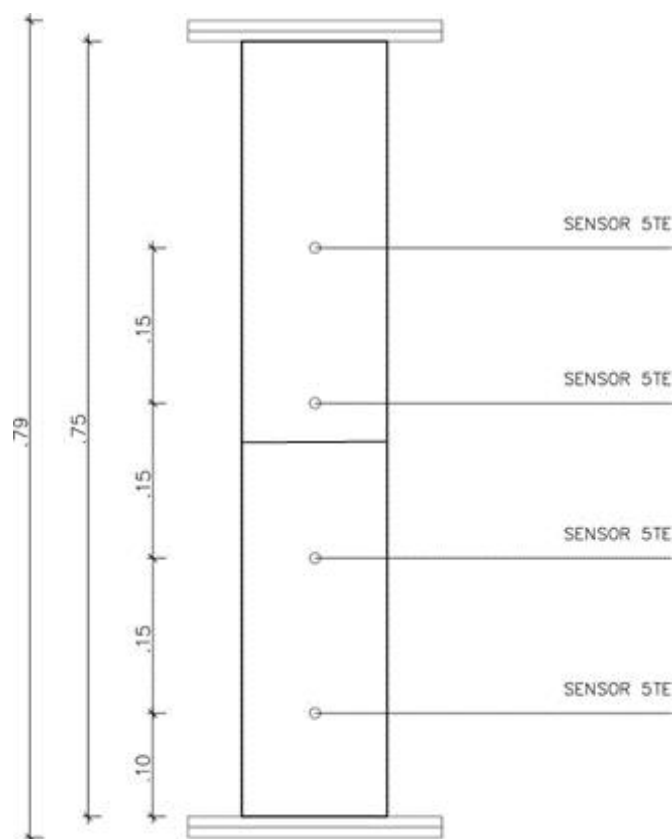


Figura 19. Desenho esquemático dos sensores

3.7 Fluxo de gás

O gás utilizado para avaliação das emissões gasosas foi o gás metano com pureza de 99,99%.

A vazão de entrada do gás, armazenado em uma coluna de gás metano, foi controlada por rotâmetros série 1900 da Applitech com medição de vazão entre 0,5 e 12 NL/h. Os rotâmetros, medidores de vazão, operam de acordo

com o princípio de áreas variáveis. São constituídos, normalmente, por um tubo transparente com escala, onde um flutuador fica suspenso pela vazão do fluido.

Para a análise do fluxo de gás, foram inseridos tubos de aço inoxidável de 1/4" a 20 cm e, o outro, a 50 cm da base, chamados de primeiro nível e segundo nível. A concentração na saída da coluna é verificada no topo da mesma, sendo o 3º nível de medição. O gás foi armazenado na saída da coluna (placa superior de PVC) em sacos amostradores para biogás do kit biogás da Alfakit desenvolvido para Embrapa Aves e Suínos.

A seguir verifica-se o sistema completo desenvolvido nessa pesquisa, desde o gás metano que foi encaminhado para o rotâmetro, a fim de controlar o fluxo de entrada, e dele distribuído para a coluna, através de uma mangueira de silicone ligada à torneira inserida na placa de PVC inferior, como também os pontos de medição de gás, os fios dos sensores (na cor preta) ligados ao *datalogger*, os sacos coletores e o desenho esquemático (Figuras 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23).

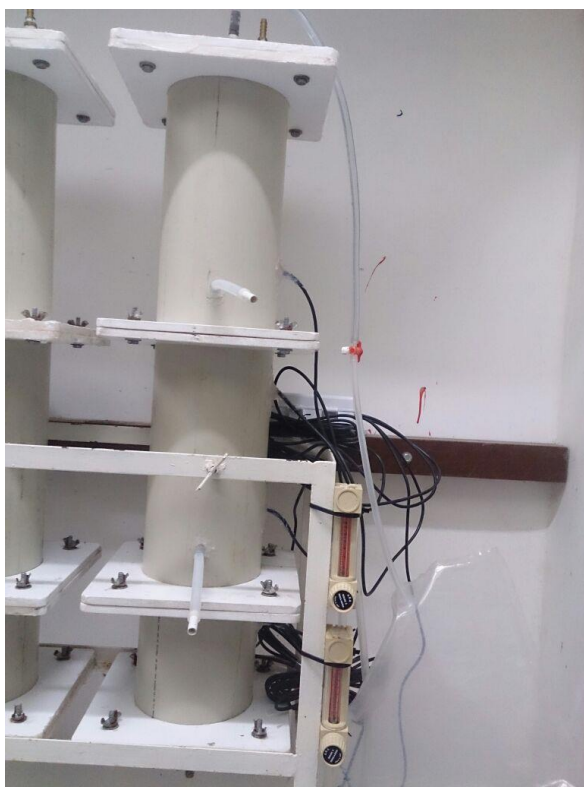


Figura 20. Coluna experimental montada



Figura 21. A. Gás metano; B. Rotâmetro para controle de fluxo de entrada; C. Entrada do gás (base da coluna); D. Saída do gás (topo da coluna)

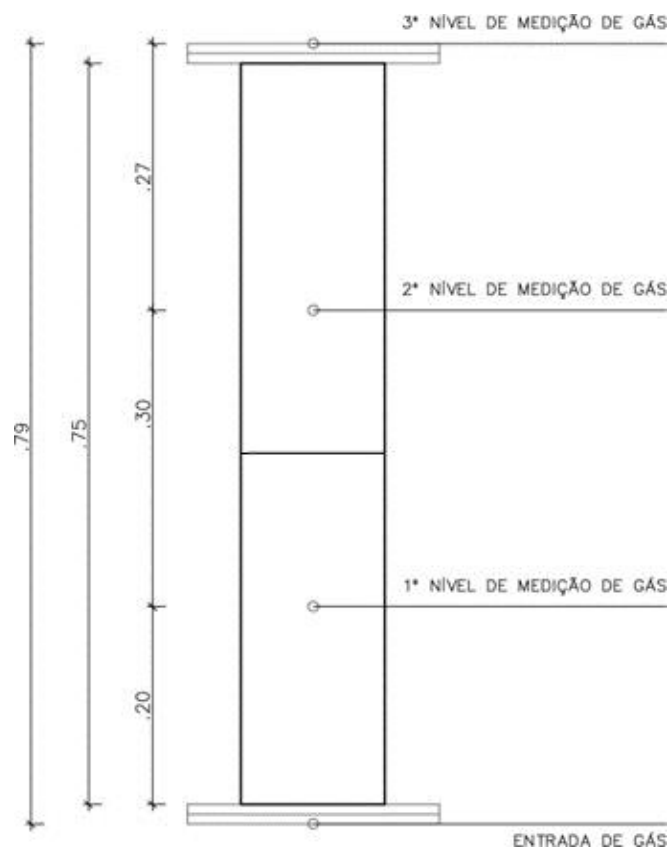


Figura 22. Desenho esquemático da coluna experimental



Figura 23. Sistema completo da pesquisa

Para leitura da concentração dos gases foi utilizado o detector portátil DrägerX-am 7000 que é um detector simultâneo e contínuo de até 5 gases. A

quantificação com esse equipamento é baseada na absorção de cada espécie no infravermelho. Os limites de quantificação de cada gás medido pelo equipamento são de 0,1% (v/v) para o CH₄, CO₂ e O₂. Este equipamento foi programado para leituras dos gases Metano (CH₄), Dióxido de Carbono (CO₂), Oxigênio (O₂) e Sulfeto de Hidrogênio (H₂S).

Em aterros sanitários, as emissões de gases formadores do biogás variam de acordo com os tipos de resíduos, condições climáticas, tipos de camada de cobertura, sistema coletor de gás, entre outros. Para a escolha do fluxo utilizado para o experimento estudado nessa dissertação, seguiu-se uma média dos estudos realizados na mesma região, como o de MARIANO (2008), com emissão de 400 g/m².dia. O valor foi controlado nos rotâmetros utilizados, e mantido o fluxo de 0,5 L/h (8,3 mL/min ou 486 g/m².dia). De acordo com a literatura, a emissão de metano é variável como pode ser observado a seguir (Tabela 6).

Tabela 6. Emissão de CH₄ em aterros de RSU brasileiros

Referência	Emissão (g/m ² .dia)
MACIEL (2003)	103-363
GUEDES (2007)	547
MARIANO (2008)	400
LOPES (2011)	250

3.8 Ensaios: Leitura das colunas

Os ensaios foram realizados em três etapas, denominadas de Etapa 1, Etapa 2 e Etapa 3.

3.8.1 Etapa 1

A primeira etapa foi realizada com o fluxo contínuo do gás metano na coluna experimental, durante 30 dias, com fluxo contínuo de 0,5 L/h (486 g/m².dia).

As concentrações dos gases foram verificadas de 3 a 5 vezes por semana, nos três pontos de análise, sendo eles: a 20 cm da base da coluna, na camada de solo compactado, ponto mais próximo à entrada do gás metano, a 50 cm da base, na camada da mistura solo+composto, e no topo da coluna, na placa de PVC utilizada para fechar a mesma (Figura 24).



Figura 24. Sistema completo durante leitura das concentrações dos gases

3.8.3 Etapa 2

Para melhor reação do gás com o material utilizado, foram realizados ciclos com o fluxo de gás metano fechado durante 4, 8, 16 e 24 horas. Durante um ciclo e outro, o gás foi injetado na coluna por 12 horas. Antes de cessar o fluxo, para o início desta etapa, a concentração dos gases foi verificada, assim

como, entre os ciclos. Durante o ensaio, as placas de PVC, utilizadas para fechar a coluna, tanto na base como no topo, foram mantidas fechadas. As etapas se distinguem pelo sistema, sendo esta primeira, com o sistema fechado, ou seja, as duas placas de PVC, do topo e da base da coluna, foram mantidas fechadas durante toda a etapa.

3.8.4 Etapa 3

Essa etapa foi realizada novamente com ciclos de fechamento e abertura do gás na coluna, mas foi realizada com o sistema aberto. Ou seja, com a placa de PVC, utilizada para fechar a coluna (no topo da mesma) mantida aberta, assim criando a situação natural de um aterro sanitário, no qual, a camada de cobertura sofre influências da atmosfera (Figura 25).

Após 24 horas de fluxo contínuo do gás metano, a concentração dos gases foi verificada e o fluxo foi fechado. Os ciclos também foram realizados durante 4, 8, 16 e 24 horas.



Figura 25. Coluna com tampa aberta

Semanalmente os dados dos sensores de umidade, temperatura e condutividade elétrica que foram armazenados no *datalogger* Em50, foram salvos em computador para as devidas análises.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A discussão dos resultados foi dividida entre os ensaios geotécnicos para a caracterização dos materiais e os resultados das colunas experimentais.

4.1 Ensaios preliminares – Caracterização dos substratos

4.1.1 Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado no solo coletado, no composto orgânico e na mistura de solo mais composto na proporção de 1:1.

Os resultados podem ser observados na Figura 26.

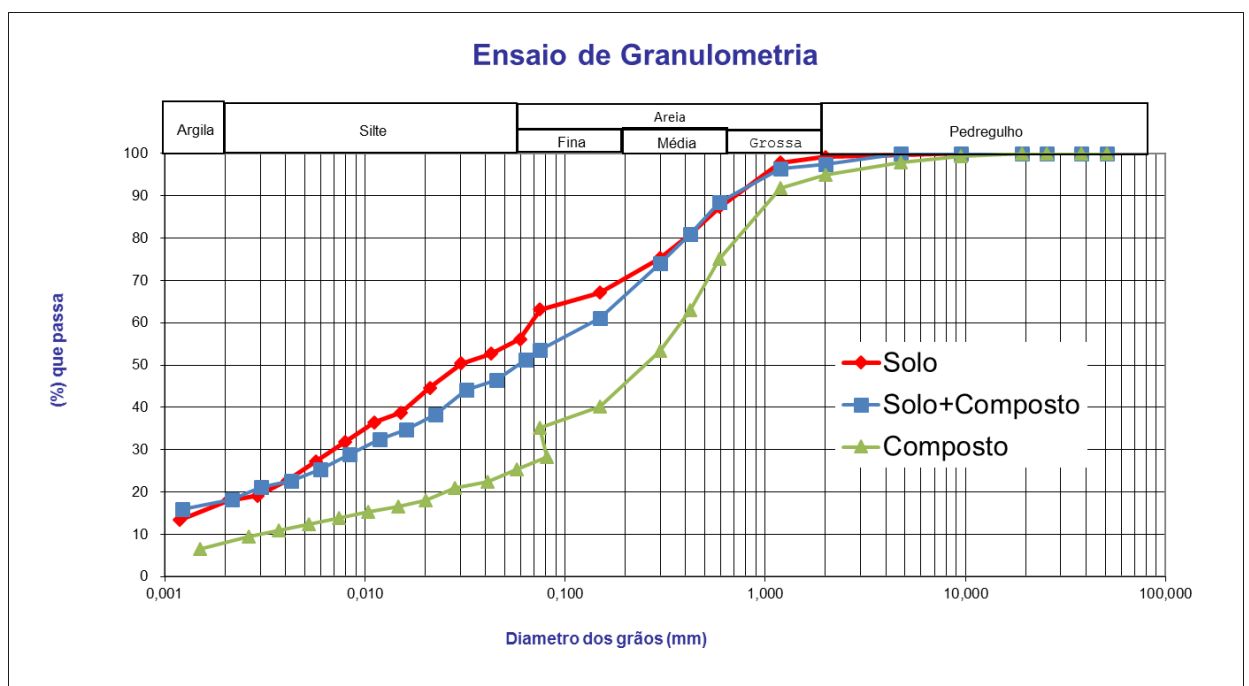


Figura 26. Gráfico do ensaio de granulometria

De acordo com a curva granulométrica, o solo possui 11,64% de diâmetro equivalente à areia grossa, 38,58% de silte, 17,63% de argila, 17,63% de areia média, 13,68% de areia fina, 0,84% de pedregulho e 63,14 de materiais finos (< 0,075mm).

O solo mais composto na proporção de 1:1 possui 8,9% de diâmetro equivalente à areia grossa, 32,44% de silte, 17,87% de argila, 23,02% de areia

média, 15,21% de areia fina e 2,55% de pedregulho e 53,47 de materiais finos (< 0,075mm).

E o composto apresenta 19,56% de diâmetro equivalente à areia grossa, 17,76% de silte, 7,84% de argila, 30,66% de areia média, 19,13% de areia fina, 5,05% de pedregulho e 35,10 de materiais finos (< 0,075mm).

4.1.2 Limite de Atterberg

Na Tabela 8 podem ser observados os valores dos limites de Atterberg para os materiais da coluna. Assim, ao analisar a carta de plasticidade elaborada por Casagrande (SOUZA PINTO, 2002), este solo pode ser classificado, do ponto de vista da mecânica dos solos, como pertencente ao grupo do silte.

Tabela 7. Limites de consistência de Atterberg para os materiais

Parâmetros (%)	Solo	Solo+Composto
Limite de liquidez	49,78	43,71
Limite de plasticidade	33,16	33,02
Índice de plasticidade	16,62	10,69

Através do método do picnômetro (NBR-6508/84) determinou-se o peso específico do grão de 2,72 g/cm³ para o solo e 2,12 g/cm³ para a mistura de solo+composto.

A adição de solo ao composto confere à mistura uma possível redução de permeabilidade em relação ao solo, uma vez que as partículas menores ocupam os espaços deixados pelas maiores, o que confere menor compressibilidade e maior resistência ao da mistura.

Quando o meio é menos permeável, a oxidação ocorre com mais dificuldade, uma vez que o oxigênio pode ser insuficiente. A retenção, por um determinado tempo, dos gases que percolam pelo material é necessária, para que as bactérias sejam capazes de metabolizá-los (ROSE, 2009).

4.1.3 Compactação

A compactação é realizada para aumentar mecanicamente a densidade, estabilidade e resistência de um solo. Os vazios são diminuídos com o processo.

Os ensaios de compactação foram realizados no solo e na mistura de solo mais composto (1:1).

Para o solo, analisando-se a curva de compactação (Figura 25), com energia de compactação normal, determinou-se a massa específica aparente de $1,62 \text{ g/cm}^3$ e que a umidade ótima é de 20%.

A curva de compactação (Figura 27) para a mistura de solo com composto apresenta uma massa específica aparente de $1,42 \text{ g/cm}^3$ em uma umidade ótima de 26%.

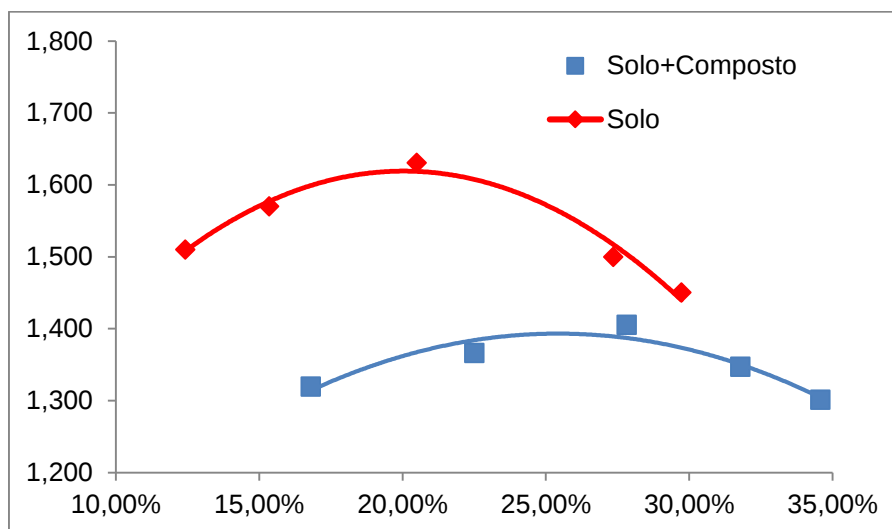


Figura 27. Compactação

A condutividade do gás, através do material utilizado no experimento, está relacionada com a densidade. Portanto, a determinação da densidade ótima, em que os vazios interferem, é de suma importância. Quanto mais compacto o material, menor a permeabilidade ao gás. Por isso, o solo+composto apresentou uma permeabilidade um pouco menor que a do solo puro, como verificado na Figura 28.

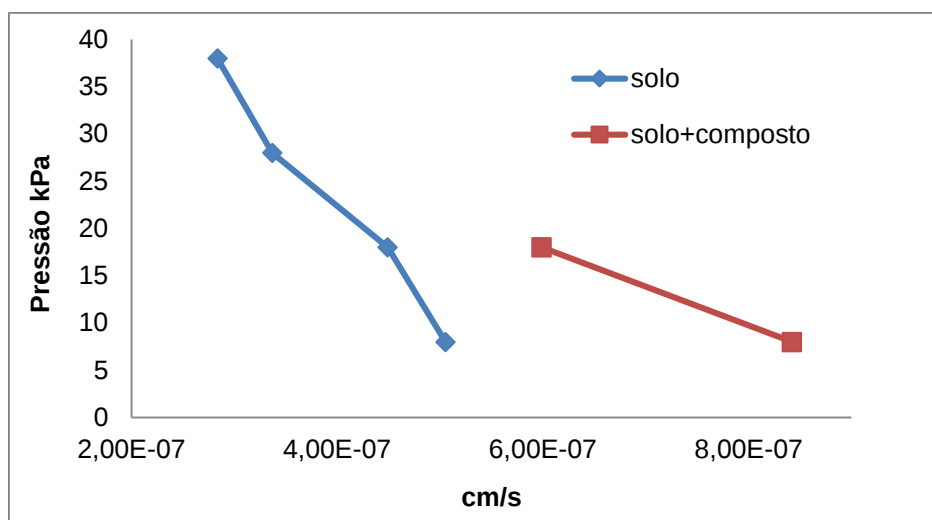


Figura 28. Permeabilidade ao ar

Com a análise dos resultados obtidos com os materiais, pode-se observar que com o aumento da proporção de composto ao solo, maior é a umidade ótima do material resultante, devido a maior retenção de líquido pelo composto, porém diminuiu o peso específico, aumentando assim a porosidade. O aumento de porosidade na mistura é verificado com a adição do composto orgânico, e provavelmente na condutividade hidráulica, na estabilidade da estrutura do solo e na capacidade de retenção de água, além da diminuição da densidade do solo.

De acordo com Maia et al. (2005), a matéria orgânica exerce uma ação indireta sobre o teor de umidade retido pelo solo, uma vez que a matéria orgânica, em função das suas cargas negativas e da alta superfície específica, é hidrófila, o que lhe confere um alto poder de retenção de água.

4.2 Ensaios de oxidação

4.2.1 Sensores de Temperatura e Umidade

Durante os ensaios de verificação da concentração dos gases na coluna experimental, os dados dos sensores foram salvos para análise e verificação da umidade e temperatura.

De acordo com a Figura 29 a umidade variou entre 24 e 26%. Essa variação é explicada pelo comportamento do material na coluna, onde o ponto mais baixo da coluna teve a tendência de ficar mais úmida.

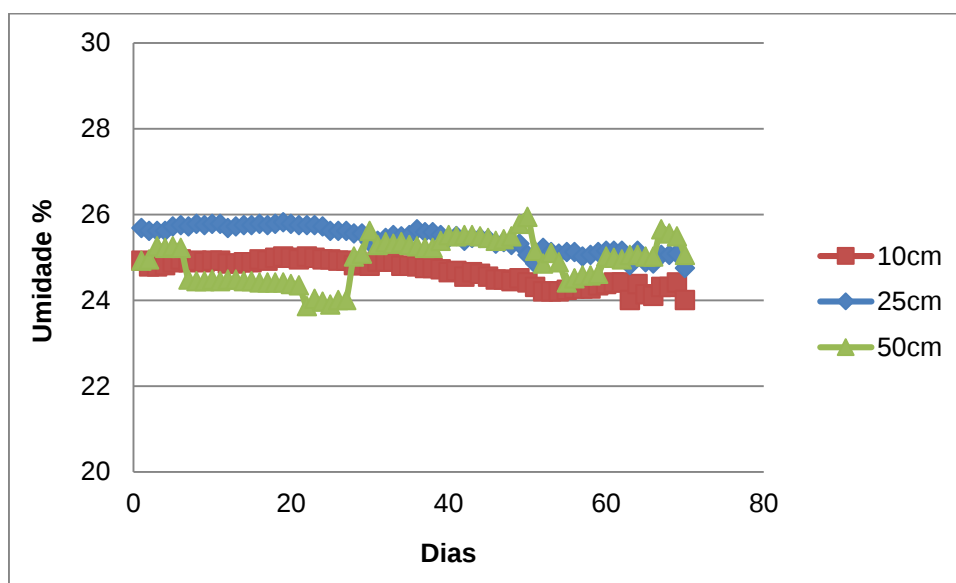


Figura 29. Variação da umidade

Como não houve altos valores de oxidação da coluna o solo não teve grande variação no teor de umidade já que um dos subprodutos da oxidação é a água. Zhang, 2013, afirma que o teor de umidade influencia no teor de O_2 no solo, afetando as atividades metanotróficas em camadas de cobertura.

4.2.2 Oxidação

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, serão apresentados os resultados e análises de acordo com os ensaios realizados, conforme apresentado na metodologia (Etapa 1, Etapa 2 e Etapa 3).

4.2.2.1 Etapa 1: Fluxo contínuo

A primeira etapa do ensaio de oxidação ocorreu com fluxo contínuo de 0,5 L/h (8,3 mL/min ou 486 g/m²dia) durante 30 dias. O fluxo empregado à coluna é considerado um fluxo alto, criando uma condição desfavorável para o sistema, uma vez que esse fluxo ocorre de forma pontual em aterro, não sendo um fluxo comum em aterros sanitários.

Conforme a Figura 30, durante os primeiros dias, o fluxo de gás metano era mais elevado no topo da coluna, chamado de 3º nível. Assim, caracterizando que o gás injetado na coluna apenas passava pelo material. Após a saturação, pode-se observar a retenção do gás metano ao longo da coluna, caracterizando uma estabilização da concentração do gás nas diferentes profundidades da coluna e menor variação da concentração de metano na base, meio e topo da coluna.

A retenção do gás é verificada, pois a concentração no topo da coluna diminui em relação ao meio (ponto 2 na Figura 30). A retenção mínima é de 40% na maioria dos dias, indicando a diminuição da emissão do gás metano para o topo da coluna.

A diferença do comportamento da coluna é verificada na Figura 30, antes da saturação e após 15 dias, com a saturação do gás metano no sistema.

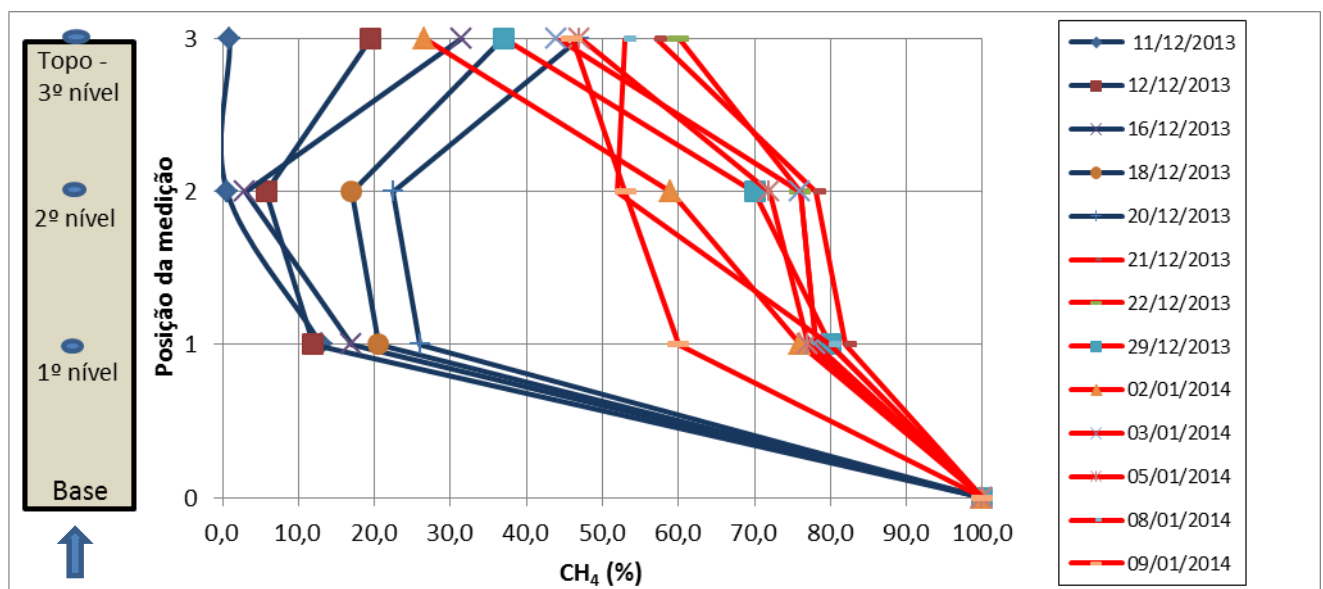


Figura 30. Gráfico da concentração de metano

De acordo com a Figura 31, verifica-se o comportamento do CO₂ na coluna experimental. Pode-se notar que a concentração é verificada no meio e no topo da coluna, local em que se encontra o material orgânico, e por ser mais próximo à superfície, onde em estudos realizados, a máxima oxidação é verificada a 30 cm da superfície (Huber-Humer (2004), Abichou et al (2006), Park et al (2009)).

A concentração do gás carbônico, quando da estabilização da coluna, não variou mais que 2%. Portanto, foi decidido realizar as mudanças no experimento, a fim de verificar maior presença desse gás na coluna, indicando maior eficiência da mesma na oxidação do gás metano, e na retenção do mesmo.

A diminuição da concentração de CH₄ e o aumento da concentração de CO₂ na coluna experimental indica a tendência de oxidação do gás metano. Como a coluna em laboratório mostrou-se eficiente na retenção e tendência de oxidação em laboratório, essa camada em campo pode revelar-se também eficiente.

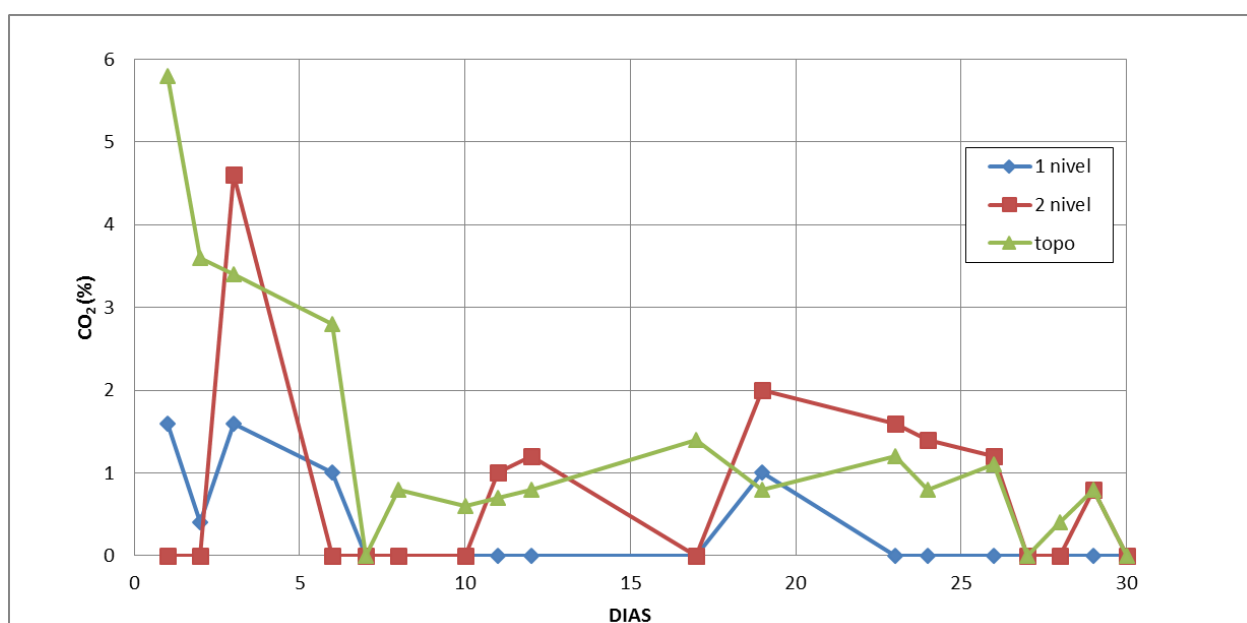


Figura 31. Gráfico da concentração do gás carbônico

A Figura 32 apresenta a concentração de O₂ nas profundidades da coluna. Neste gráfico observa-se que o comportamento do oxigênio é inverso

ao do gás metano, ou seja, no início do experimento, a concentração de oxigênio foi maior, variando entre 12 e 20% na base e no meio da coluna e com menos de 10% no topo. Com a saturação da coluna, a concentração do oxigênio estabilizou, apresentando maior concentração no topo, mas não passando de 10%.

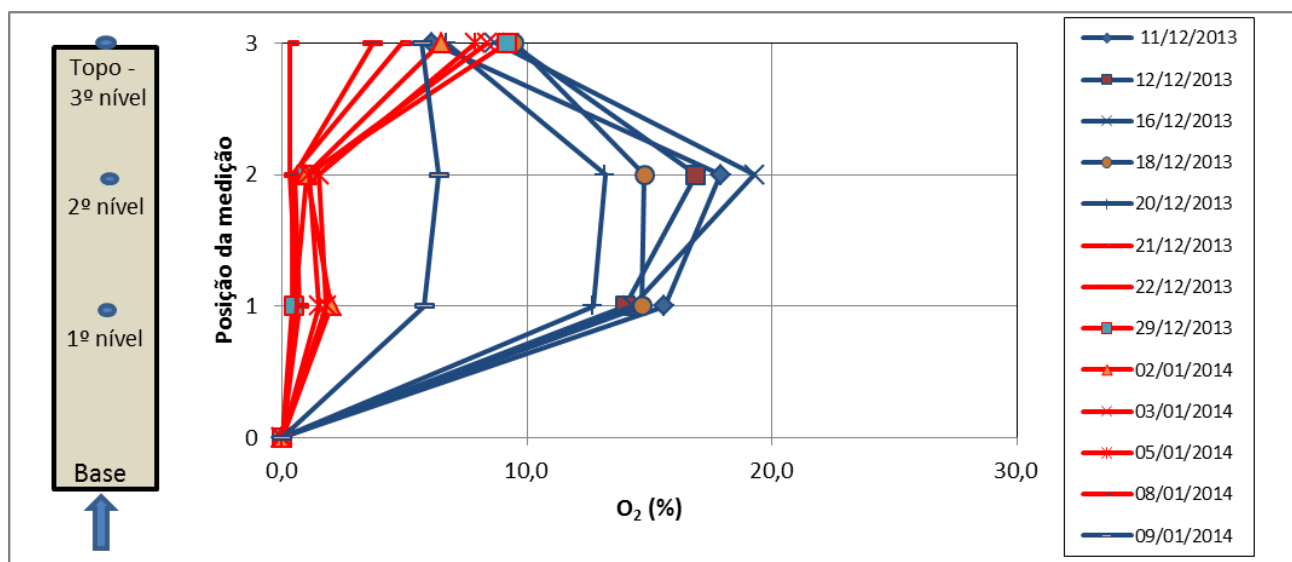


Figura 32. Gráfico da concentração de oxigênio

4.2.2.2 Etapa 2: Fluxo não contínuo com tampa fechada

Como discutido na metodologia, para a melhor interação do gás metano no interior da coluna e reação do gás com o material utilizado, foram realizados ciclos com o fluxo de gás fechado durante 4, 8, 16 e 24 horas. Antes de cessar o fluxo para o início da etapa a concentração dos gases foi verificada, assim como, entre os ciclos e após o fluxo contínuo de, no mínimo, 12 horas, para garantir que o metano esteja em toda coluna. As etapas se distinguem pelo sistema, sendo esta primeira, com o sistema fechado, ou seja, as duas placas de PVC foram mantidas fechadas durante o experimento.

Na Figura 33 está sendo mostrado o comportamento da coluna durante os ciclos, podendo-se notar que no primeiro dia a concentração de metano foi maior no topo da coluna. No segundo ciclo, o comportamento da base foi similar, porém no meio da coluna a concentração foi maior e no topo menor. Após o ciclo de 16 horas, a concentração na base foi diminuída, em torno de

55%, manteve-se constante no meio e diminuiu no topo para 45%, mostrando a interação do gás na coluna com o composto. Para o último ciclo, o comportamento foi semelhante ao anterior, porém ocorreu aumento da concentração do metano, que ficou em torno de 60%.

Observa-se, pela Figura 33, o comportamento da coluna nos 4 ciclos, no primeiro nível, segundo nível e no topo. Com o ciclo de 24 horas, a concentração do gás metano na coluna estabilizou nos três níveis com as concentrações em torno de 60%.

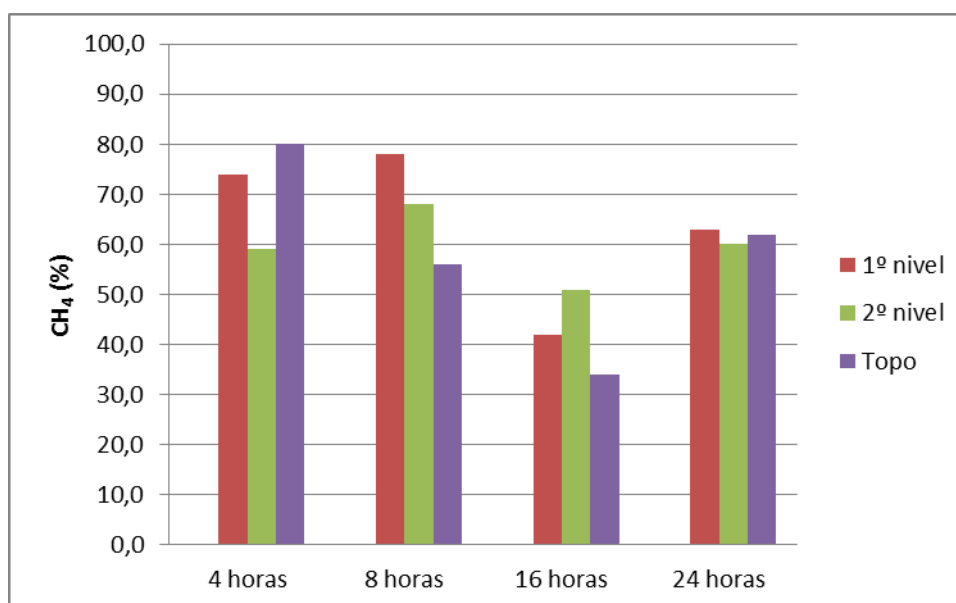


Figura 33. Concentração do CH_4 nos diferentes ciclos

Pode-se notar pela Figura 34, o comportamento da coluna nos 4 ciclos, no primeiro nível, segundo nível e no topo com as concentrações de O_2 . Essas não ultrapassaram 10% nos ciclos. No primeiro ciclo, a concentração foi mais elevada no segundo nível da coluna, o que justifica a menor concentração do metano nesse nível, no mesmo ciclo, como verificado no gráfico anterior. No segundo ciclo, 8 horas, a maior concentração é observada no topo da coluna e diminuída nos outros dois níveis. Já com o ciclo de 16 horas, foi apresentada a maior concentração no primeiro nível, aumento no segundo nível e topo com relação ao ciclo anterior. No ciclo de 24 horas, ocorreu a estabilização do gás metano nos níveis da coluna, que ficou em torno de 60% e com isso a

diminuição e estabilização do O_2 nos níveis da coluna, que não passaram de 5%.

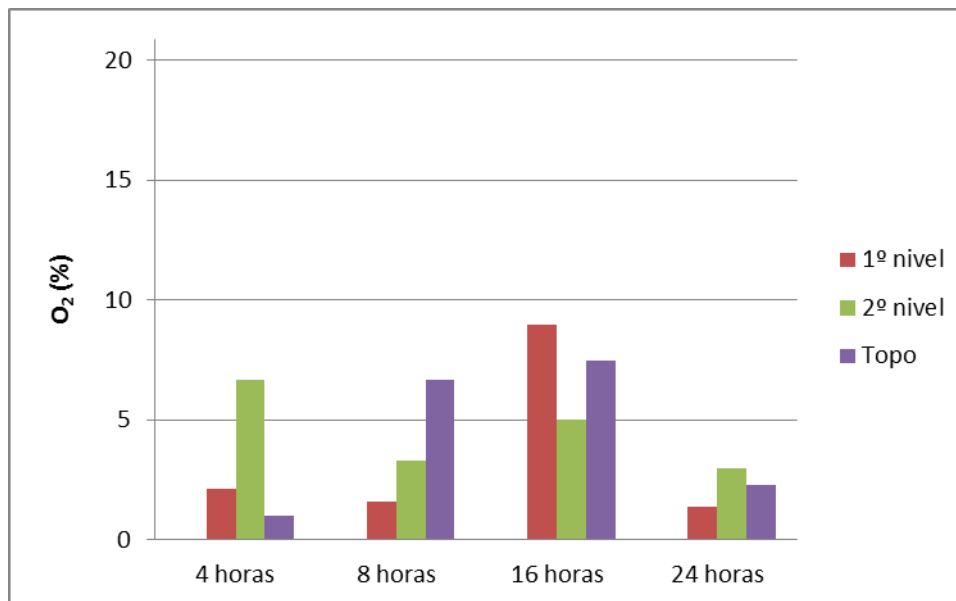


Figura 34. Concentração do O_2 nos diferentes ciclos

Pode-se notar pela Figura 35, o comportamento da coluna nos 4 ciclos, no primeiro nível, segundo nível e no topo com as concentrações de CO_2 . Pode se ver que com o passar do tempo há uma maior interação do gás metano com o oxigênio, havendo uma tendência de oxidação. O tempo também é um fator para que haja reações no interior da coluna, mesmo com o sistema fechado, sem a interferência da atmosfera.

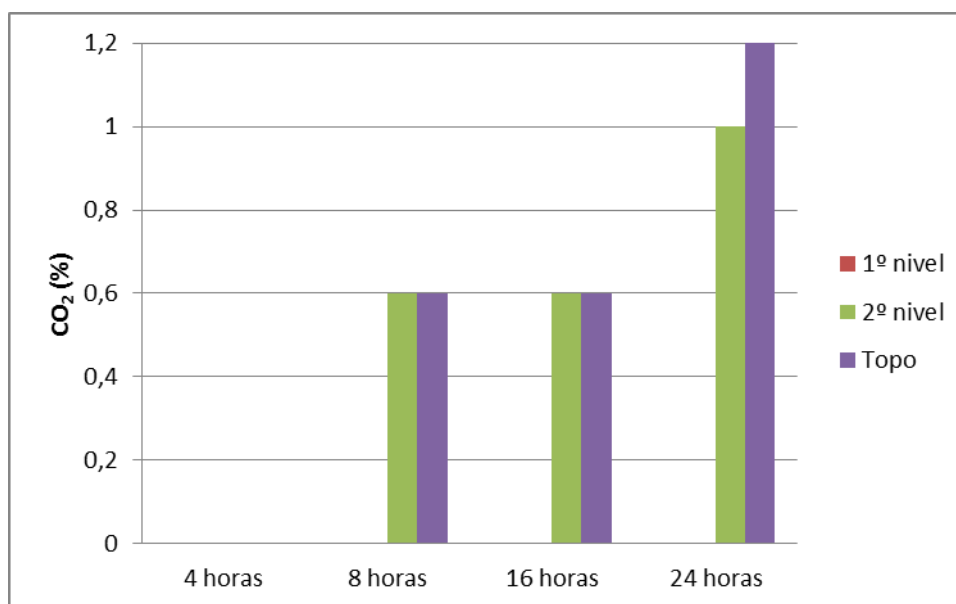


Figura 35. Concentração do CO₂ nos diferentes ciclos

4.2.2.3 Etapa 3: Fluxo não contínuo com tampa aberta

A última etapa dos ensaios foi realizada novamente com ciclos de fechamento e abertura do gás na coluna, mas foi realizada com o sistema aberto.

Após 24 horas de fluxo contínuo, a concentração dos gases foi verificada e o fluxo foi fechado. Os ciclos também foram realizados durante 4, 8, 16 e 24 horas, porém, para esta etapa, o sistema foi aberto, ou seja, a placa de PVC superior foi aberta para a atmosfera.

A maior concentração do gás metano foi após o ciclo de 4 horas com gás fechado e tampa superior aberta, na base da coluna e com valores pequenos no meio e topo. Durante o ciclo de 8 e 16 horas, o comportamento foi semelhante, o pico de concentração do metano na base, em torno de 30% e com diminuição nos outros pontos.

Observa-se na Figura 36 a diminuição da concentração do gás metano durante os diferentes ciclos.

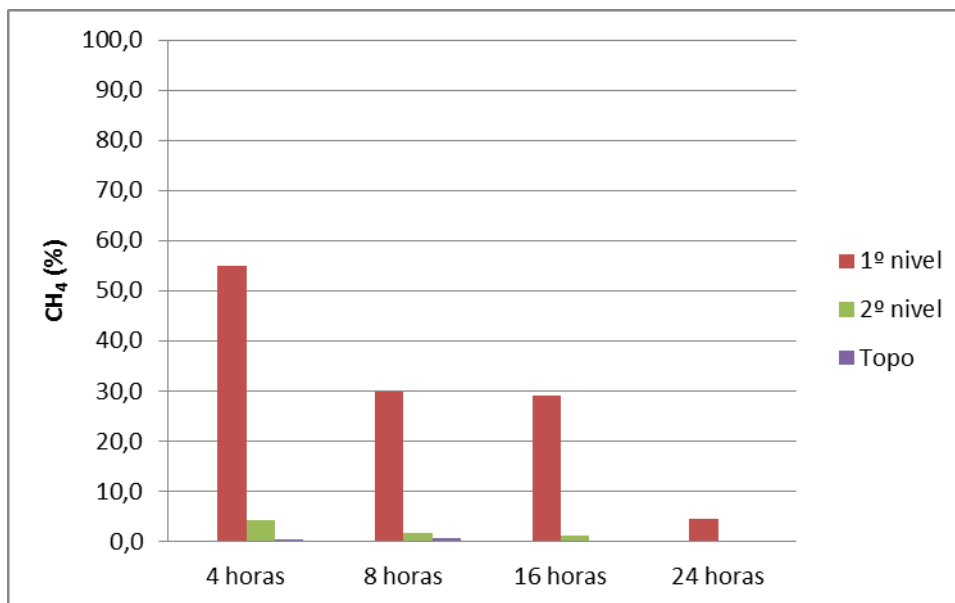


Figura 36. Concentração do CH₄ nos diferentes ciclos

Como a concentração do metano foi baixa no meio e no topo da coluna, a concentração de oxigênio nos mesmos locais foi alta, como verificado na Figura 37. Enquanto isso, no primeiro nível (base), a concentração foi pequena, pela presença do gás metano em alta concentração.

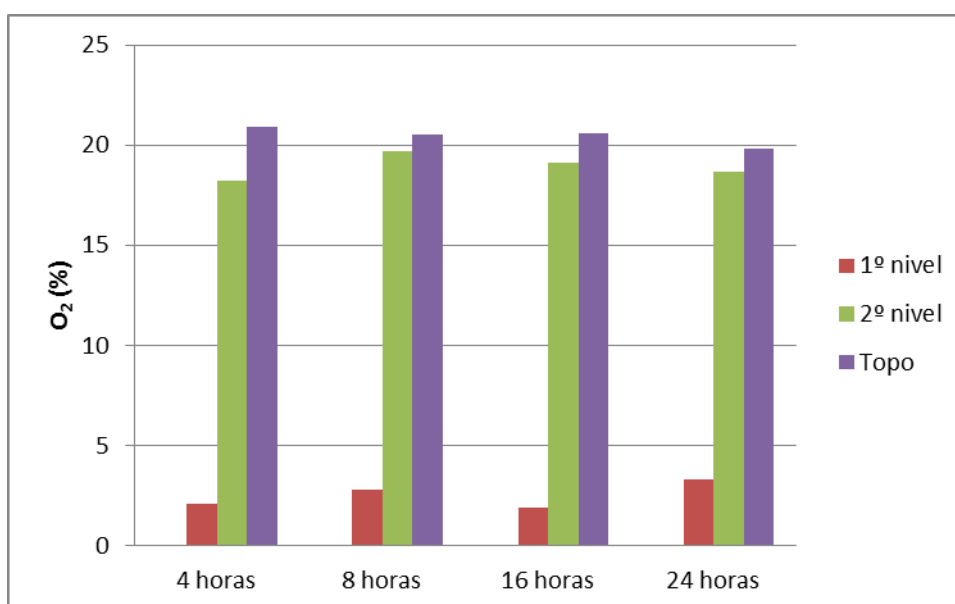


Figura 37. Concentração do O₂ nos diferentes ciclos

A concentração de gás carbônico foi mais elevada no ciclo de 16 horas, chegando a aproximadamente 2%, o que pode caracterizar a presença de

oxidação do gás metano, e sendo um indicativo da tendência de oxidação na camada (Figura 38).

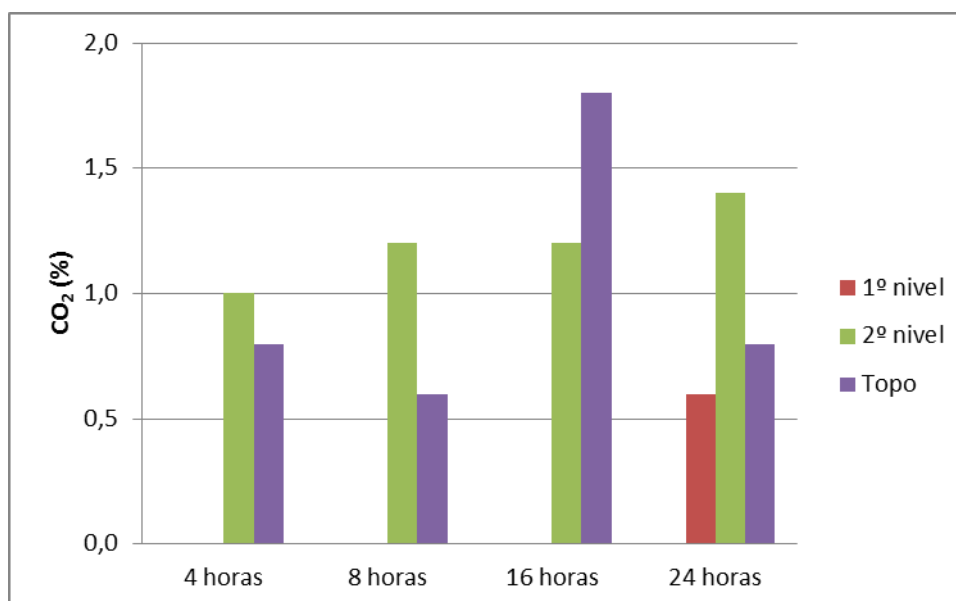


Figura 38. Concentração do CO₂ nos diferentes ciclos

Com a interação da atmosfera no sistema aberto pode se observar a tendência de oxidação do metano principalmente com o passar do tempo. É importante que haja um tempo para que as bactérias metanotróficas consigam interagir com o gás metano e que reações com a troca de gases sejam permitidas, objetivo da etapa 3 do experimento, com o sistema aberto à atmosfera.

4.2.2.4 Retenção do gás metano

Os gráficos obtidos de acordo com os ensaios realizados, mostrando as tendências de oxidação e comportamento da coluna experimental, serão apresentados a seguir.

Os estudos em laboratório sobre colunas de oxidação indicam a variação do comportamento de acordo com o tempo e suas fases de adaptação, aumento da taxa de oxidação, estabilização e declínio.

Com base nos dados obtidos pode-se dizer que o sistema apresentou uma diminuição da concentração volumétrica do metano nos pontos e datas amostradas. Esta diminuição da concentração volumétrica do metano em

relação à concentração de entrada do gás no sistema foi de aproximadamente 40% na saída da coluna. É necessário ressaltar que esta diferença é um indicativo que está havendo oxidação do metano, mas a mesma não serve para estabelecer uma taxa de oxidação, a qual depende de uma vazão de entrada de metano no sistema em uma unidade de tempo. Porém o cálculo foi realizado, também comprovando a tendência de oxidação na camada utilizada.

Ao utilizar a equação 2, obtivemos a taxa de eficiência mínima de 40% e uma média de 60%. Como não podemos afirmar que o que passou pela coluna foi oxidado, é preferível chamar de eficiência de retenção. O comportamento da eficiência de retenção do gás metano é apresentado a seguir, onde pode-se notar a eficiência mínima em torno de 40% e máxima em torno de 80% e uma média de 60%. Esse gráfico serve como indicativo da eficiência da camada oxidativa em reter o gás metano, minimizando a emissão do gás metano (Figura 39).

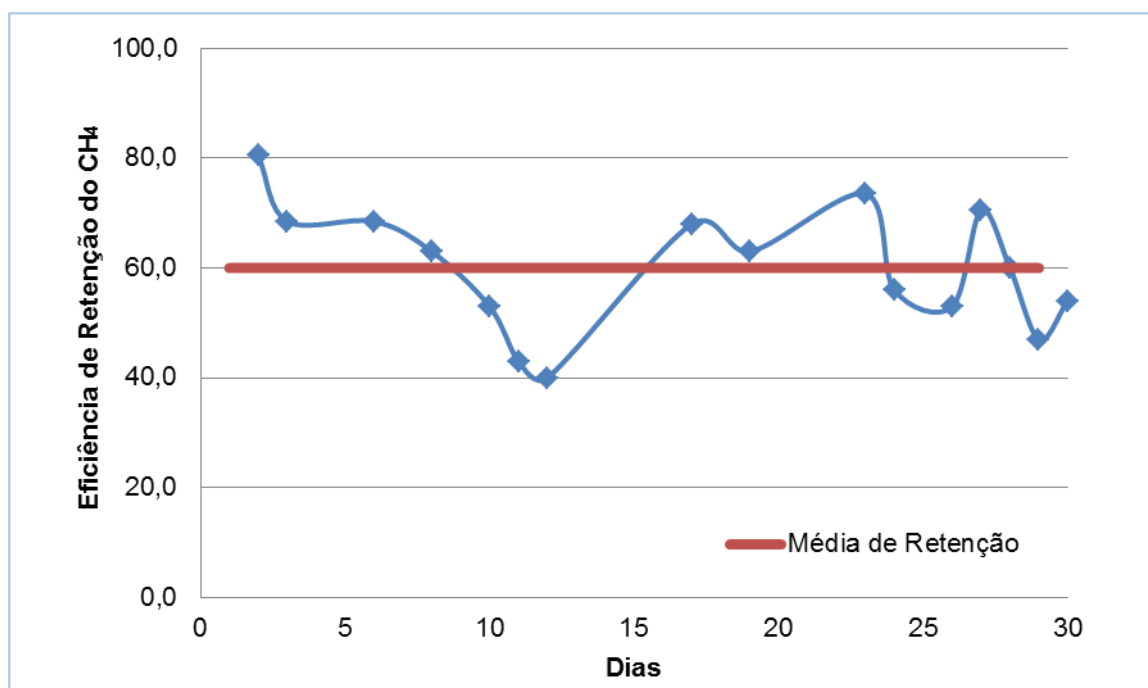


Figura 39. Eficiência de retenção do CH_4

5. CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES

As colunas de solos são um sistema de testes, no qual é possível controlar o fluxo de gás e realizar o devido monitoramento do comportamento, assim como simular as condições de campo em laboratório (relativas à espessura da camada, teor de água e compactação). Assim, eles fornecem valiosas informações sobre a adequação de um solo de cobertura considerado como camada de oxidação do metano.

Esta pesquisa de mestrado visou desenvolver um experimento em escala laboratorial para um sistema alternativo de camada de cobertura, formado por uma mistura de solo e composto orgânico. O objetivo geral do trabalho foi alcançado com a análise da eficiência da camada proposta, que reteve o gás metano injetado na coluna e apresentou uma tendência de oxidação através das bactérias metanotróficas encontradas no composto orgânico.

O uso de camadas alternativas podem amenizar o impacto gerado pelas emissões de gás metano através da oxidação do mesmo, diminuindo a quantidade de gás metano que escapa para a atmosfera.

A diminuição da concentração de CH_4 e o aumento da concentração de CO_2 na coluna experimental indica a presença de oxidação do gás metano. Pode-se dizer que ocorreu oxidação e/ou retenção do gás metano, já que o volume de saída da coluna é menor ao de entrada, como foi verificado. A existência de uma tendência de oxidação é observada com a diminuição da concentração de metano e aumento da concentração de gás carbônico, ambos verificados na saída da coluna experimental.

Porém, não pode se concluir que todo o gás metano foi oxidado, e sim que há uma existência de oxidação do mesmo na pesquisa realizada. Portanto, a mistura de solo+composto utilizada mostrou-se adequada para a oxidação.

A coluna reteve, em média, 60% do gás metano injetado na coluna, e esse tipo de camada é indicada para municípios de pequeno porte, que podem utilizar a compostagem dos resíduos dos seus municípios e utilizarem na composição do sistema, diminuindo o custo e garantindo a diminuição de emissão fugitiva na camada.

Para futuras pesquisas nesta área têm-se as seguintes recomendações:

- Realizar testes por um período mais longo de análises, assim garantindo a adaptação das bactérias;
- Utilizar biogás produzido naturalmente em aterros sanitários de resíduos sólidos;
- Analisar as características dos substratos após as análises;
- Analisar os gases através de cromatógrafo gasoso;
- Realizar ensaios que verifiquem ações inibitórias;
- Realizar análise qualitativa e quantitativa das bactérias metanotróficas existentes.

REFERÊNCIAS

ABICHOU, T.; CHANTON, J.; POWELSON, D.; FLEIGER, J.; ESCORIAZA, S.; YUAN, L.; STERN, J. Characterization of Methane flux and oxidation at Solid Waste landfill covers. **Journal of Environmental Engineering**. Feb. pp. 220-228, 2006.

AIT-BENICHO, S.; JUGNIA, LOUIS-B.; GREER, C.W.; CABRAL, A.R. Methanotrophs and methanotropic activity in engineered biocovers. **Waste Management**, v. 29, p. 2509-2517, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– ABNT. **NBR 13.896**: aterros de resíduos não perigosos – critérios de projeto, implantação e operação - procedimentos. Rio de Janeiro, 1997. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS– ABNT. **NBR 8.419**: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1984a) NBR 6.459/84 –Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1984b) NBR 6.508/84 – Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica dos grãos. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1984c) NBR 7.180/84 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1984d) NBR 7.181/84 – Análise granulométrica para solos, com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1986a) NBR 6.457/86 – Amostra de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, RJ.

_____ (1986b) NBR 7.182/86 – Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal. Rio de Janeiro, RJ.

BAHR, T., FRICKE, K., HILLEBRECHT, K., KOLSCH, F. e REINHARD, B. Clean development mechanism – tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões. I Simpósio de Tecnologias e Tratamento de Resíduos Sólidos – I SITTRS. Rio de Janeiro, RJ. 28-30 de abril, 2006.

BORJESSON, G.; SUNDH, I.; SVENSSON, B. Microbial oxidation of CH₄ at different temperatures in landfill cover soils. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 48, p.305-312, 2004.

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

CABRAL, A.R., K. ARTEAGA, D. RANNAUD, S. AÏT-BENICHOUE, M.F. POUËT, S. ALLAIRE, L.-B. JUNGIA ET C.W. GREER "Analysis of methane oxidation and dynamics of methanotrophs within a passive methane oxidation barrier," IN: R. COSSU, and R. Stegman, Eds., 11th International Waste Management and Landfill Symposium. Sta. M. di Pula, Italy, 2007.

CHANTON, J., HATER, G.; GOLDSMITH, D.; GREEN, R.; ABICHOUE, T.; BRALAZ, M.A. (2007) Comparison of a tunable diode laser approach with static chambers for determination of surface methane emission. 2007. 11th International Waste Management and Landfill Symposium. Sta. M. di Pula, Italy.

DROZDOWICZ, A.G. Microbiologia do solo. In: ROITMAN, I.; TRAVASSOS, L.R.; AZEVEDO, J.L. (Ed.). **Tratado de Microbiologia**. São Paulo: Editora Manole, 1987.

DWYER, S.F. **Water balance measurements and computer simulations of landfill covers**. 2003. 250 p. Thesis (Degree of Doctor in Engineering) - University of New Mexico, Civil Engineering Department, 2003.

EINOLA, J.M.; KARHU, A.E.; RINTALA, J.A. Mechanically-biologically treated municipal solid waste as a support medium for microbial methane oxidation to mitigate landfill greenhouse emissions. **Waste Management**, v. 28, n. 1, p. 97-111, 2008.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A.; MIEHLICH, G. Kinetics of Microbial Landfill Methane Oxidation in Biofilters. **Wast Management**, v. 23, p. 609-619, 2003.

GUEDES, V. P. **Estudo do fluxo de gases através do solo de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007. 117p.

HE, R.; RUAN, A.; JIANG, C.; SHEN, D.S. Responses of oxidation rate and microbial communities to methane in simulated landfill cover soil microcosms. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 15, p. 7192-7199, 2008.

HILGER, H.; HUBER-HUMER, M. Biotic Landfill Cover Treatments for Mitigating methane Emissions. **Environ. Monit. Assess.**, v.84, p. 71-84, 2003.

HILGER, H.A.; CRANFORD, D.F.; BARLAS, M.A. Methane oxidations and microbial exopolymer production in landfill cover soil. **Soil. Biol. Biochem.**, v.32, n.4, p.457-467, 2000.

HUBER-HUMER, M.; LECHNER, P. Alternative Approach to the Elimination of Greenhouse Gases from Old Landfills. **Waste Manag. Res.**, v.17, p. 443-452, 1999.

HUBER-HUMER, M. **Abatement of landfill methane emissions by microbial oxidation in biocovers made of compost**. 2004. 279 p. PhD Thesis – University of Natural Resources and Applied Life Sciences Vienna, Institute of Waste Management, Viena, 2004.

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

HUMER, M.; LECHNER, P. Microbial methane oxidation for the reduction of landfill gas emissions. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 27, n. 3-4, p. 146-151, 2001.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de betonita em um solo arenoso para uso como cobertura de aterros**. 126 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

IGNATIUS, S. G. **Fluxo unidirecional de gás através de um solo compactado – determinação laboratorial de parâmetros**. 337 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

IPCC. **Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

KAMON, M.; KATSUMI, T.; BENSON, C. H.; FOOSE, G. J. Performance-based design of landfill liners. **Engineering Geology**, v. 60, n.1/4, p. 139-148, 2001.

KETTUNEN, R.; EINOLA, J. K. M.; RINTALA, J. Landfill Methane Oxidation in Engineered Soil Columns at Low Temperature. **Water Air Soil Pollution**, v. 117, n. 1-4, p. 313-334, 2006.

KIGHTLEY, D., D.B. Nedwell, M. Cooper. Capacity of methane oxidation in landfill cover soils measured in laboratory-scales oil microcosms. **Appl. Environ. Microbiol.**, Vol. 61, pp 592-601, 1995.

Lei Federal nº 12,305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil, 2010.

LOPES, R.L. **Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. 250 p. Tese (Doutorado 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**. 329 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MACIEL, F.J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 355 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MAIA, C.E.; MORAIS, E.R.C.; MEDEIROS; J.F. Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível para as plantas em função de doses de vermi composto. **Caatinga**, v. 18, n. 3, p. 195-199, 2005.

MALDANER, L. S. **Cobertura para oxidação biológica do metano em aterros de resíduos sólidos urbanos**. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MARIANO, M.O.H. **Avaliação da retenção de Gases em Camadas de Cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos**. 243 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

MARINHO F. A. M. Medição da Sucção com o Método do Papel Filtro. Anais do X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Foz do Iguaçu, v. 2, p. 515-522, 1994.

MARINHO, F. A. M. & PINTO, C. S. Investigating the Water Retentions in Iron Ore. Proceedings of the third international conference on unsaturated soils. UNSAT 2002. Vol. 3 – pp. 1143 – 1146. Recife – Brasil, 2002.

McBAIN, M. C.; WARLAND, J. S.; MCBRIDE, R. A.; WAGNER-RIDDLE, C. (2005) Micrometeorological measurements of N₂O and CH₄ emissions from a municipal solid waste landfill. **Waste Management Research**, Vol. 23. pp. 409–419.

NIKIEMA, J.; BRZEZISNKI, R.; HEITZ, M. Elimination of methane generated from landfills by biofiltration: a review. **Environmental Science Biotechnology**, v. 6, p. 261-284, 2007.

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**. 196:19–27, 2009.

PARK, J.W; SHIN, H.C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. **Atmospheric Environment**, nº35, pp.3445-3451, 2001.

RACHOR, I.; GEBERT, J.; GRÖNGRÖFT, A.; PFEIFFER, E.M. Assessment of the methane oxidation capacity of compacted soils intended for use as landfill cover materials. **Waste Management**, v. 31, p. 833–842, 2011.

RONCATO, C. **Étude des taux d'oxydation du méthane dans des colonnes expérimentales simulant un biorecouvrement de site d'enfouissement**. 133 p. Mémoire de Maîtrise. Faculté de Génie. Université de Ssherbrooke, Canada, 2009.

ROSE, J. L. **Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camadas oxidativas experimentais**. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2009.

SAARELA, J. **Hydraulic approximation of infiltration characteristics of surface structures on closed landfills**. 139 p. Monographs of the Boreal Environment Research, 3. Finnish Environment Institute, Finland, 1997.

SALIM, K.G. **Oxidação passiva do metano em ensaios de coluna simulando camadas de cobertura de aterros sanitários**. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

SCHEUTZ, C.; BOGNER, J.; CHANTON, J.P.; BLAKE, D.; MORCET, M.; ARAN, C.; KJELDSEN, P. Atmospheric emissions and attenuation of non-methane organic compounds in cover soils at a French landfill. **Waste Management**, 2007. Article in press.

SOUZA PINTO, C.S. Ed. In: Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas. São Paulo: Oficina dos textos, 2^aed. 2002.

SPRINGER, D. S.; LOAICIGA, H. A.; CULLEN, S.J. E EVERETT, L. G. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions. **Ground Water**, Ground Water Publisingh CO, Westerville, vol. 36, nº 4, 1998.

STYLIANOU, C.; DeVANTIER, B. A. Relativy air permeability as function of saturation in soil venting, **Journal of Environmental Engineering**, vol. 121, nº 4, 1995.

TEIXEIRA, C.E.; TORVES, J.C.; FINOTTI, A.R.; FEDRIZZI, F.; MARINHO, F.A.M.;TEIXEIRA, P.F. Estudo sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**,v. 14, n. 1, jan/mar, p. 99 – 108, 2009.

TEIXEIRA, P.F. **Oxidação biológica do metano em coberturas de aterros de resíduos sólidos urbanos: Dinâmica do processo e aspectos geotécnicos**. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

US Environmental Protection Agency – USEPA (2002). **Cover up with compost**. 2002. Disponível em: <http://www.epa.gov/climatechange/climate-change-waste/>. Acesso em: 10/12/2013.

_____. **Methane: Sources and Emissions**. 2006. Disponível em: <http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/sources.html>. Acesso em: 10/12/2013.

VIEIRA, A.M. **Estudo de barreiras capilares como cobertura de aterro de resíduos**. 265 p. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) –Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

VISVANATHAN, C.; POKHREL, D.; CHEIMCHAI SRI, W.; HETTIARATCHI, J.P.A.; WU, J.S. Methanotrophic activities in tropical landfill cover soils: effects of temperature, moisture content and methane concentration. **Waste Manage. Res.**, v. 17, p. 313-323, 1999.

WILSHUSEN, J.H.; HETTIARATCHI, J.P.A.; STEIN, V.B. Long-term behavior of passively aerated compost methanotrophic biofilter columns. **Waste Management**, v. 24, n. 7, p. 643-653, 2004.

YAMADA, M.; ISHIGAKI, T.; ENDO, K.; INOUE, Y.; NAGAMORI, M.; ONO, Y. Distribution of temperature and methane flux on landfill surface, In: **Proceedings Sardinia 2005**, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Itália, 2005. CD.

ZHANG, H.; YAN, X.; CAI, Z.; ZHANG, Y. Effect of rainfall on the diurnal variations of CH₄, CO₂, and N₂O fluxes from a municipal solid waste landfill. **Science of the Total Environment** 442 (2013) 73–76.