



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DE EMISSÕES FUGITIVAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA
EM CÉLULA DE ATERRO SANITÁRIO EM CAMPINA GRANDE-PB**

JORDAN CARNEIRO MARTINS DE SOUZA

Orientadora: Profa. Dra. Veruschka Escarião
Dessoles Monteiro.

Coorientadora: Jeovana Jisla das Neves Santos

Campina Grande-PB

Dezembro de 2018.

**ANÁLISE DE EMISSÕES FUGITIVAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA
EM CÉLULA DE ATERRO SANITÁRIO EM CAMPINA GRANDE-PB**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB,

Dezembro de 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

JORDAN CARNEIRO MARTINS DE SOUZA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande
como requisito para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Sub-área: Geotecnia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Veruschka Escarião
Dessoles Monteiro.

Coorientadora: Jeovana Jisla das Neves Santos

Campina Grande – PB,

Dezembro de 2018

JORDAN CARNEIRO MARTINS DE SOUZA

**ANÁLISE DE EMISSÕES FUGITIVAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA
EM CÉLULA DE ATERRO SANITÁRIO EM CAMPINA GRANDE-PB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande
como requisito para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Sub-área: Geotecnia Ambiental.

Aprovado em ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Nota _____

Professora Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro - UFCG

(Presidente – Orientadora)

Nota _____

Jeovana Jisla das Neves Santos

(Coorientadora)

Nota _____

Professora Dra. Dayse Luna Barbosa – UFCG

(1ª Examinadora - Avaliadora interna)

Nota _____

Ms. Tuilly de Fátima Macedo Furtado Guerra

(2ª Examinadora - Avaliador externo)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus, quem me salvou e ensinou o caminho que devo trilhar, e a meus pais, que de uma forma diferente fizeram o mesmo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Deus e Pai de nosso Senhor Jesus Cristo, soberano sobre todas as coisas, sem o qual nada em minha vida seria possível, porque Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas; aos meus pais, José Pedro e Marinalva, por todo apoio, suporte e amor que tiveram comigo, assim como minha tia Natividade e primos Nielson, Neiry e Nailson, que também tiveram sua participação nessa história;

A todos os professores que tive na vida, dentro e fora da universidade, que contribuíram com meu desenvolvimento.

A minha orientadora professora Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, por ter me recebido de portas abertas como aluno no seu grupo de pesquisa e me acolhido e orientado; à professora Dra. Dayse Luna Barbosa que acompanhou alguns pontos importantes na minha trajetória na universidade e gentilmente aceitou fazer parte da banca avaliadora; ao professor Milton, instrutor e conselheiro de muitos de seus alunos e ao professor Simplicio que me ajudou a reconhecer o valor das perdas como oportunidades.

Ao Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA/UFCG) e todos os seus membros, especialmente a mestranda Jeovana Jisla, que muito me ajudou sendo coorientadora deste trabalho, também a Kellianny, pelas instruções em trabalhos e pesquisa. Bem como aos membros dos “subgrupos de gases”, representado na pessoa de Tuilly, a qual também gentilmente aceitou participar da banca avaliadora, e o “subgrupo de solos” liderado por Pablo. Assim também a Luís, Renan, Lucas, Auriberto, Ivan, Danilo, Anny, Marbara, Petrov, Libania, Elisa, Josicleide, Gleson, Isabelle e todos os outros membros com quem desenvolvi bons vínculos. Assim como a Ladjane, por todo café e atenção com todos, e a Netinho, Ildinho e Jadilson, colaboradores nos laboratórios do CT.

Aos demais amigos, colegas e irmãos em Cristo, que sempre estiveram comigo, mesmo que à distância, principalmente aos da Missão Federal, grupo cristão existente na universidade que sempre acolheu e se preocupando com o crescimento espiritual, em especial a Tarciso, Tulio, Jorge, Juninho, Genilson, Neto, Vitor, Luiz, Jamile, Rebeca, Isa, Fernanda, Elyziane, Helyangela, Esllayne, Jeovana, Ana e Fernanda.

Aos companheiros de curso Gustavo, Ericles e Fabiano, pelas incontáveis noites de estudos ao longo do curso, a João, por sua insistência em sempre almejar melhores resultados, que resultou em muitas discussões e aperfeiçoamento. Bem como Luís, Sinvaldo, Rodrigo,

Nicolas, Ana, Vanessa, Natália, Alana, Renato, João, Robson, Anderson, Fluanderson, Augusto, Erivan, Tainá. E aos amigos e vizinhos Pedro, Patrícia e Airton, pelo companheirismo e atenção nesses dias em Campina. E também Sandro, Vinícios, John Pafutes, Ismayane, Diego e Filipe, outros irmãos em Cristo.

Aos companheiros de longa data Matheus, Acenereide e Jamile, amigos de todas as horas desde o IF. Agradeço Edivan e Lica, meus queridos benfeitores em campina grande, que muito me ajudaram sem nada pedir em troca. E amigos Ely, Klayton, Thiago e demais companheirismo de infância.

E todos os outros amigos e companheiros de jornada adquiridos ao longo deste tempo, os quais não foram todos aqui descritos, mas que tive a honra e alegria em conhecê-los.

EPÍGRAFE

“Se o Senhor não edificar a casa, em vão trabalham os que a edificam; se o Senhor não vigiar a cidade, em vão vigia a sentinela. Inútil vos será levantar de madrugada, repousar tarde, comer o pão que penosamente granjeastes; aos seus amados Ele o dá enquanto dormem”.

(Salmo 127:1-2)

Portanto, “[...] seja bendito o nome de Deus, de eternidade a eternidade, porque Dele é a sabedoria e o poder”.

(Daniel 2.20)

RESUMO

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) dispostos em aterros sanitários geram como subprodutos de sua degradação lixiviados e gases. Estes gases constituem uma significativa fonte de emissões antropogênicas de Gases de Efeito Estufa (GEE), causando prejuízos em escala local e global. As emissões nos aterros sanitários podem ocorrer naturalmente por meio dos drenos verticais, que quando bem dimensionados direcionam toda saída de gases do interior do maciço de RSU, podendo ser realizado seu aproveitamento energético ou queima. Porém uma parcela significativa denominada emissões fugitivas ocorrem de maneira não controlada através da camada de cobertura final, denominada *liner*, sendo seu correto dimensionamento e execução indispensáveis na mitigação dessas emissões. Nesse contexto, este trabalho objetiva analisar as emissões fugitivas de GEE na Célula 2 do Aterro Sanitário em Campina Grande-PB. Como metodologias foi feito uma avaliação do solo da camada e o monitoramento dos gases nos drenos verticais, na interface de transição solo-resíduo e a quantificação do fluxo ao longo da camada de cobertura com o emprego de placa de fluxo estática, culminando com a avaliação da eficiência de retenção dos gases pela camada. Os resultados apontaram que os gases produzidos são compatíveis ao estado metanotrófico de biodegradação dos resíduos, com uma média de 57,2% para o CH₄, 39% para CO₂ e 1,3% para o O₂, com fluxos observados pelo *liner* em 3,30 NL.h⁻¹.m⁻² para o CH₄ e 3,83 NL.h⁻¹.m⁻² para CO₂, apresentando-se em conformidade com normativas internacionais, apresentando boa eficiência de retenção aos gases pela camada de solo compactado, variando de 80 a 100%, sendo apoiada por condições geotécnicas, morfológicas e climáticas. O que permite concluir que para os pontos avaliados as emissões fugitivas apresentaram-se em conformidade com os limites estabelecidos em normativas internacionais, de modo que a camada de cobertura apresentou características geotécnicas adequadas ao uso como camada de cobertura de aterro sanitário, apresentado resultados que servem como parâmetros para estudos e projetos realizados em aterros sanitários com condições climáticas e geotécnicas semelhantes às observadas no Aterro Sanitário em Campina Grande-PB.

Palavras-chave: Solo compactado; Biogás; *Liner*; Ensaio de placa de fluxo; Metano.

ABSTRACT

The Municipal Solid Waste (MSW) disposed in landfills generate as by-products of their degradation leachate liquids and gases. These gases constitute a significant source of anthropogenic emissions of Greenhouse Gases causing losses on a local and global scale. Emissions from landfills can occur naturally through vertical drains, which, when properly dimensioned, direct all the exhaust gases inside the solid mass of the MSW, which can be used for energy recovery or burning. However, a significant portion denominated fugitive emissions occurs in an uncontrolled way through the final cover layer, called liner, and its correct sizing and execution are indispensable in the mitigation of these emissions. In this context, this work aims to analyze the fugitive emissions of Greenhouse Gases in Cell 2 of the Landfill in Campina Grande-PB. As methodologies, a soil evaluation of the layer and the monitoring of the gases in the vertical drains, at the soil-residue transition interface and the quantification of the flow along the cover layer were done using static flow chamber, culminating with the evaluation of the gas retention efficiency by the layer. The results indicated that the gases produced are compatible with the methanotrophic state of biodegradation of the residues, with an average of 57.2% for CH₄, 39% for CO₂ and 1.3% for O₂, with flows observed through the liner in 3, 30 NL.h⁻¹.m⁻² for CH₄ and 3.83 NL.h⁻¹.m⁻² for CO₂, complying with international regulations, presenting good gas retention efficiency by compacted soil layer, varying from 80 to 100%, being supported by geotechnical, morphological and climatic conditions. This leads us to conclude that for the evaluated points the fugitive emissions were in compliance with the established limits, so that the cover layer presented geotechnical characteristics suitable for use as a landfill cover layer, presenting results that serve as parameters for studies and projects carried out in landfills with climatic and geotechnical conditions similar to those observed in the Landfill in Campina Grande-PB.

Keywords: Compacted Soil; Biogas; Liner; Flow chamber teste; Methane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases da biodegradação dos resíduos sólidos	3
Figura 2 – Fluxograma da Metodologia	10
Figura 3 – Localização do ASCG.....	11
Figura 4 – (a) Configuração das Células do ASCG; (b) Célula 2.	12
Figura 5 – Drenos verticais na Célula 2	13
Figura 6 - Medição de concentração de gases nos Drenos Verticais.....	13
Figura 7 – Medição de concentração de gases na Interface solo-resíduo.....	14
Figura 8 - Ensaio de Placa de Fluxo tipo estática.....	15
Figura 9 – Curva granulométrica do solo da camada de cobertura da Célula 2	20
Figura 10 - Concentrações de CH ₄ nos Drenos Verticais.....	21
Figura 11 - Concentrações de CO ₂ nos Drenos Verticais.....	21
Figura 12 - Concentrações de O ₂ nos Drenos Verticais	22
Figura 13 - Concentração de Gases CO ₂ e CH ₄ na interface solo-resíduo	23
Figura 14 - Fluxos volumétricos de CH ₄ e CO ₂	25
Figura 15 – Retenção de gases pela camada de cobertura.....	26

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Concentrações de Gases	4
Quadro 2 – Resumo das técnicas quantitativas para medição das emissões de biogás em aterros sanitários.....	7
Quadro 3 – Descrição dos ensaios e respectivas normas.....	12
Quadro 4. Parâmetros do solo da camada de cobertura da Célula 2 e valores permissíveis. ...	19
Quadro 5 - Resumo do monitoramento de gases.....	27

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASCG – Aterro Sanitário em Campina Grande

CH₄ – Gás Metano

CNTP – Condições Normais de Temperatura e Pressão

CO₂ – Gás dióxido de Carbono

GEE – Gases de Efeito Estufa

ha – hectare

O₂ – Gás Oxigênio

m.s⁻¹ – metros por segundo

NBR – Norma Brasileira

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Fases biodegradativas dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	3
2.2 Composição do biogás	4
2.3 Camada de cobertura de aterros sanitários.....	5
2.4 Tipos de Fluxo de gases em camadas de cobertura de aterros sanitários.....	6
2.5 Determinação do fluxo de gases em camadas de coberturas de aterros sanitários	6
3. METODOLOGIA	10
3.1 Campo Experimental.....	10
3.2 Caracterização geotécnica do solo da camada de cobertura	12
3.3 Monitoramento em profundidade - concentrações de gases nos drenos verticais	13
3.4 Monitoramento na interface solo-resíduo	14
3.5 Monitoramento de emissões superficiais	14
3.6 Retenção de gases pela camada de cobertura de solo compactado	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1 Caracterização geotécnica do solo da camada de cobertura	18
4.2 Monitoramento em profundidade - concentrações de gases nos drenos verticais	21
4.3 Monitoramento na interface solo-resíduo	23

4.4	Monitoramento de emissões superficiais	24
4.5	Retenção de gases pela camada de cobertura de solo compactado	25
4.6	Resumo dos resultados de monitoramento de gases	27
5.	CONCLUSÕES	28
5.1	Recomendações para Trabalhos Futuros.....	28
	REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários constituem-se como uma das principais alternativas à disposição de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), entretanto, caso estes empreendimentos não sejam corretamente projetados ou monitorados, podem apresentar riscos à saúde pública e ao meio ambiente, em decorrência da falta de controle nas emissões de lixiviados e gases (biogás), poluentes que segundo Boscov (2008) são resultantes dos processos físicos, químicos e biológicos de degradação do RSU.

De acordo com *Bogner* et al. (2008) os gases provenientes das decomposições de RSU consistem em uma relevante fonte de emissões antropogênicas de Gases de Efeito Estufa (GEE). Dentre os gases produzidos nos aterros sanitários, o metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) são apontados como os principais gases intensificadores do efeito estufa, sendo o metano cerca de 20 vezes mais poluente do que o dióxido de carbono, conforme SOLOMON et al. (2007).

De acordo com Maciel (2003) aterros sanitários devem ser estabelecidos baseados em critérios de engenharia de modo a evitar, além de contaminações dos recursos hídricos e geológicos, contaminações atmosféricas. Ainda segundo o mesmo autor, as emissões descontroladas de biogás constituem um grave problema de poluição atmosférica em níveis locais e globais que precisam ser mitigado. Nesse contexto as camadas de cobertura funcionam como uma importante estrutura na mitigação e controle das emissões GEE, uma vez que funciona como uma barreira separadora entre os resíduos sólidos e o meio externo.

1.1 Justificativa

Diante da relevância no controle das emissões de Gases de Efeito Estufa, especialmente no contexto de aterros sanitários, vê-se a importância do seu monitoramento continuado, principalmente no que se refere às emissões fugitivas através da camada de cobertura de solo compactado, em paralelo a estudos quanto aos fatores intervenientes dessas emissões, garantindo subsídios ao melhoramento de estruturas de cobertura de solo compactado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar as emissões fugitivas de Gases de Efeito Estufa pela camada de cobertura de solo compactado na Célula 2 do Aterro Sanitário em Campina Grande-PB.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Analisar o solo empregado na camada de cobertura da Célula 2 do Aterro Sanitário em Campina Grande quanto a influência de suas propriedades para o fim empregado;
- ✓ Monitorar concentrações de gases nos Drenos Verticais da Célula 2 do Aterro Sanitário em Campina Grande;
- ✓ Analisar concentrações dos gases metano, dióxido de carbono e oxigênio na interface entre o solo compactado da camada de cobertura e os resíduos depositados;
- ✓ Quantificar emissões pontuais de gás metano e dióxido de carbono através da camada de cobertura de solo compactado da Célula 2;
- ✓ Verificar a eficiência da camada de cobertura de solo compactado quanto à retenção de Gases de Efeito Estufa.

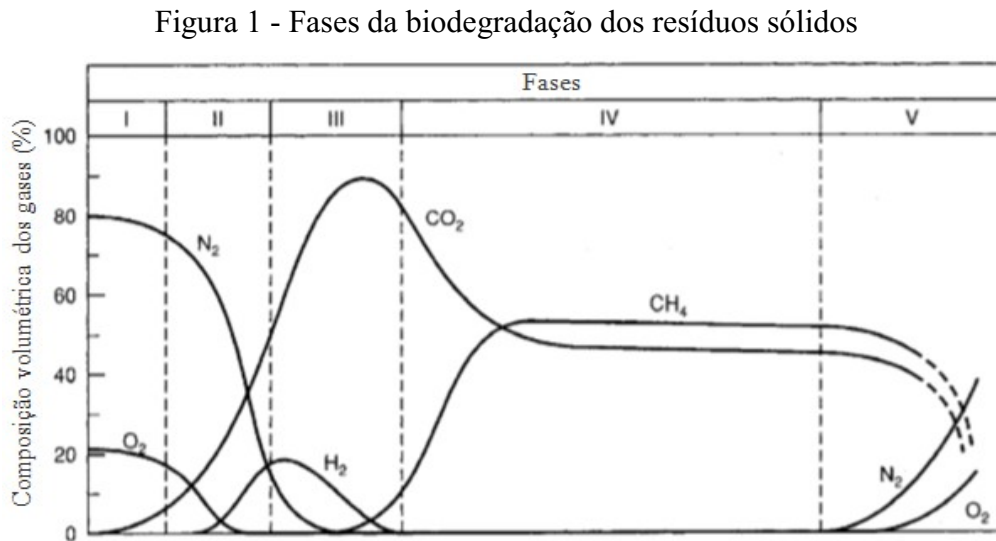
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho alguns conceitos são necessários para uma melhor compreensão do assunto em discussão. Esta fundamentação teórica visa abordar um pouco das características que envolvem o tema do fluxo de gases em aterros sanitários como as fases biodegradativas do resíduo, a composição do biogás gerado, características da camada de cobertura e os tipos de fluxo de gás.

2.1 Fases biodegradativas dos Resíduos Sólidos Urbanos

De acordo com Tchobanoglous et al. (2002) e Moreira (2018), aterros sanitários funcionam como reatores bioquímicos, os quais tem como principais entradas resíduos sólidos e água, resultando como subprodutos biogás e lixiviado.

Ainda de acordo com Tchobanoglous et al. (2002), a geração desses gases varia com o tempo e recursos disponíveis, podendo ser dividida em cerca de cinco fases, como observado na Figura 1:



Fonte: adaptado de Tchobanoglous et al. (2002)

A fase I, denominada ajuste inicial, é caracterizada por processos de decomposição aeróbia. A fase II, ou fase de transição, corresponde ao esgotamento do oxigênio (O₂) do maciço confinado, dando início a processos anaeróbicos, produzindo ácidos e outros subprodutos. Na Fase III, ou fase ácida, a produção de ácidos é intensificada, inicia-se a produção de metano (CH₄) e a produção de dióxido de carbono (CO₂) atinge seu máximo. Fase IV, ou metanogênica, a produção de CO₂ reduz, ficando um pouco abaixo da produção

de CH₄, que atinge seus valores máximos nessa fase e se estabiliza. Por fim na fase V, ou de maturação, quando a matéria orgânica tiver sido consumida em sua maior parte, a produção de CO₂ e CH₄ caem consideravelmente.

2.2 Composição do biogás

Segundo Lopes (2012) os gases gerados pelos processos biodegradativos são constituídos basicamente de CH₄, CO₂ e gás sulfídrico (H₂S), sendo também identificados outros gases em menores concentrações.

O percentual relativo a cada um desses gases pode ser identificado no Quadro 1, de acordo com Tchobanoglous et al. (2002):

Quadro 1 – Concentrações de Gases

COMPONENTE	PERCENTUAL VOLUMÉTRICO (%)
Metano	45 – 60
Dióxido de Carbono	40 – 60
Nitrogênio	2 – 5
Oxigênio	0,1 – 1,0
Amônia	0,1 – 1,0
Sulfetos, dissulfetos, mecaptanos etc.	0 – 1,0
Hidrogênio	0 – 0,2
Monóxido de carbono	0 – 0,2
Vestígios de outros componentes	0,01 – 0,6

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous et al. (2002)

2.3 Camada de cobertura de aterros sanitários

A camada de cobertura de aterros sanitários tem a função de isolar os resíduos do meio externo e com isso impedir a entrada de água no maciço e a saída de gases à atmosfera. Deste modo, segundo Guedes (2018) para que a camada de cobertura cumpra este papel deve ser constituída de material de baixa permeabilidade a água e ao ar, além de apresentar durabilidade ao longo do tempo.

A camada de cobertura final se caracteriza como um importante mecanismo para a mitigação de emissões fugitivas, atuando como filtro biológico, físico-químico e geotécnico, controlando a saída de gases e limitando a infiltração de água nos resíduos, podendo ser constituída de solo compactado, misturas solo-composto, materiais geotêxteis e outros, sendo imprescindível seu estudo e dimensionamento adequado, tanto por questões ambientais quanto econômicas. Moreira (2018) destaca alguns dos principais tipos de camadas de cobertura: Camada Convencional ou Resistiva, Camada Evapotranspirativa ou Monolítica, Barreira capilar, Camada Metanotrófica ou Oxidativa e Camadas alternativas. Sendo a camada convencional de solo compactado estudada neste trabalho.

A NBR 13896 (ABNT, 1997) estabelece que no local de instalação do aterro é desejável a existência de uma reserva natural extensa e homogênea de solo com coeficiente de permeabilidade igual ou menor a 10^{-8}m.s^{-1} e uma zona não saturada com mais de 3 m de espessura.

Neste contexto as camadas de coberturas de solo compactado são comumente construídas visando atender aos parâmetros de permeabilidade mínimos estabelecidos por norma. No entanto, segundo Araújo (2017) outros fatores interferem no desempenho da camada de cobertura, como tipo de solo, grau de compactação, espessura mínima e metodologia de execução dessa camada. Entretanto pouco é mencionado nas normativas nacionais, o que ocasiona a pouca padronização na execução deste tipo de obra de engenharia, além da falta de diretrizes para concepção de projetos, fiscalização e monitoramento.

Dessa forma, estudos mais aprofundados na área de Geotecnia Ambiental, especificamente no que diz respeito às camadas de impermeabilização de cobertura, são indispensáveis para um maior esclarecimento dos fatores envolvidos nas obras de Engenharia de Aterros, possibilitando uma maior variedade de parâmetros de projeto e com melhor qualidade.

2.4 Tipos de Fluxo de gases em camadas de cobertura de aterros sanitários

De acordo com Bouazza e Rahman (2007) o movimento dos gases em meios porosos, como camadas de cobertura de solo compactado, pode ocorrer de duas maneiras: através de fluxo advectivo ou por fluxo difusivo:

O fluxo advectivo ocorre devido à existência de um gradiente de pressão interna, havendo transferência de gases de uma zona de maior pressão para uma de menor, sem que haja variações de sua concentração.

O fluxo difusivo, por sua vez, ocorre em decorrência de um gradiente de concentração existente no interior do maciço, acarretando uma migração do gás das regiões de maior concentração para as de menor, sem, contudo, haver diferenças de pressão.

Nesse contexto, uma série de fatores podem interferir no fluxo de gases através da camada de cobertura, como características geotécnicas (tipo de solo, permeabilidade, grau de compactação, umidade, saturação, sucção, presença de fissuras etc.), ambiente interno ao maciço (características do resíduo, estágio de decomposição, drenagem dos gases etc.), condições climáticas (precipitação, pressão atmosférica, temperatura, velocidade dos ventos etc.) (GUEDES, 2018; MOREIRA, 2018; MACIEL, 2003; LOPES, 2011).

2.5 Determinação do fluxo de gases em camadas de coberturas de aterros sanitários

Para uma adequada compreensão do funcionamento do fenômeno de fluxo de gases através das camadas de cobertura é necessário sua quantificação por meios de ensaios de campo, os quais variam seu tipo e metodologia empregada, de acordo com a tecnologia e recursos disponíveis, bem como a precisão e tipos de dados que se espera obter, conforme pode ser observado no Quadro 2.

Diante da variedade de técnicas disponíveis para medição das emissões de gases, ter o conhecimento dos principais benefícios e limitações no uso de cada método é fundamental na escolha da técnica mais adequada a ser seguida para as circunstâncias propostas (MACIEL, 2003).

Destaque especial a metodologia de Placa de fluxo estática empregadas por alguns autores como Maciel (2003), Mariano (2008), Mariano e Jucá (2011), Lopes (2011), Park et al (2016), Moreira (2018), Guedes (2018), os quais embasaram o presente trabalho.

Quadro 2 – Resumo das técnicas quantitativas para medição das emissões de biogás em aterros sanitários.

MÉTODO	DESCRIÇÃO
<p>Placa de fluxo estática</p>	<p>Técnica mais utilizada para medição de emissões de biogás em liners. Consiste na instalação de placa de fluxo na superfície do aterro sanitário, onde o acúmulo de concentração de CH₄ com o tempo, no interior da placa, permite a determinação do fluxo num ponto específico.</p> <p>Vantagens: maior precisão na determinação de emissões pontuais; baixo custo, simples instalação, necessita mão de obra pouco especializada. Possibilidade de determinar parâmetros do solo de cobertura (permeabilidade, densidade, umidade, temperatura etc). Permite avaliação simultânea de diversos gases. Adequada para quantificar fluxos muito baixos, tanto positivos quanto negativos. Não é sensível a medição de CH₄ oriundo de fontes externas.</p> <p>Limitações: demanda tempo e trabalho intensivo na realização do ensaio. Exige um grande número de ensaios para que se obtenha uma representatividade estatística das emissões globais de aterros. Deve-se aplicar técnicas geoestatísticas adequadas para se determinar fluxos em áreas maiores. Provoca perturbação temporária da superfície do solo (modificação das características da cobertura na cravação da placa).</p>
<p>Placa de fluxo dinâmica</p>	<p>Medições pontuais na superfície do solo usando uma placa que é lavada continuamente com ar ou um gás de fluxo. Mede a emissão de CH₄ com base no fluxo de gás e na diferença entre as concentrações de CH₄ de entrada e de saída da placa.</p> <p>Vantagens: mesmas vantagens que a placas estáticas.</p> <p>Limitações: As mesmas desvantagens que as placas estáticas, além de não ser possível quantificar fluxos muito baixos devido à diluição do gás da câmara com o gás de fluxo e não pode quantificar os fluxos negativos.</p>
<p>Gradiente subsuperficial</p>	<p>Método baseado na 1^o Lei de Fick. A difusividade do gás no solo pode ser calculada empiricamente ou medida <i>in situ</i> e a variação da concentração do gás com a profundidade da camada pode ser obtida por meio de tubos de inspeção. Dessa forma, realiza-se a medição da concentração de gás abaixo do solo e dos gradientes de pressão com cálculo do fluxo usando equações para fluxo difusivo e impulsionado por pressão.</p>

MÉTODO	DESCRIÇÃO
	<p>Vantagens: Útil para entender a contribuição relativa dos mecanismos de fluxo difusivo e convectivo, incluindo a influência das mudanças de pressão barométrica de curto prazo, frentes de tempestade e fluxo de vento. Medição de gradiente útil como base quantitativa para teste de hipóteses e criação de programas de medição de campo. Perfis de concentração de gás do solo úteis para entender a direção do fluxo difusivo, a presença de fontes subterrâneas e sumidouros, e fornecer dados de suporte para outros métodos de campo.</p> <p>Limitações: As medições de pontos temporais nas configurações de campo são muitas vezes difíceis de interpretar dentro de uma estrutura espacial 3D, especialmente onde há variação da saturação do resíduo e da camada cobertura de solo.</p>
<p>Pluma de contaminação (dispersão gases)</p>	<p>Baseia-se na medição simultânea de CH₄ atmosférico e um gás traçador (geralmente SF₆ ou N₂O). O gás traçador é liberado a uma taxa conhecida; então a taxa de emissão de CH₄ pode ser determinada a partir da proporção entre o CH₄ e o gás traçador medido na pluma na direção do vento.</p> <p>Vantagens: Fornece uma medida integrada de fluxos de Células inteiras ou aterros inteiros, incluindo vazamentos nas extremidades.</p> <p>Limitações: Não é possível quantificar fluxos negativos (absorção de CH₄ atmosférico). Difícil ou impossível aplicar em topografia variável com velocidades de vento altas ou variáveis ou fontes interferentes de CH₄. Os marcadores SF₆ ou N₂O são potentes gases de efeito estufa.</p>
<p>Técnicas micrometeorológicas</p>	<p>Uma família de técnicas que medem a transferência turbulenta de gases entre a superfície terrestre e a parte inferior da atmosfera. Baseia-se em sensores de resposta rápida montados em torre para medir gradientes verticais de velocidade e direção do vento, concentração de CH₄ e outras variáveis que são usadas para determinar o equilíbrio energético da superfície. Inclui correlação turbulenta, razão de Bowen, difusão turbulenta, balanço de massa e outras técnicas.</p> <p>Vantagens: Fornece uma medida integrada de fluxos de escala de paisagem. Melhor para terrenos planos. Não perturba a superfície do solo ou a vegetação. Útil para estudos temporais de curto prazo sob condições atmosféricas variáveis.</p>

MÉTODO	DESCRIÇÃO
	<p>Limitações: Não é possível quantificar os fluxos negativos (absorção de CH₄ atmosférico). Difícil de aplicar em topografia variável ou onde existem outras fontes de CH₄. A pegada da área de medição é determinada a partir de dados experimentais e não está pré-determinada. Técnicas caras que requerem equipamentos especializados e conhecimentos especializados.</p>
<p>Análises por infravermelho</p>	<p>Detecta a concentração do biogás acima da superfície do aterro por processos óticos e/ou térmicos através da passagem de luz infravermelha.</p> <p>Vantagens: Mais preciso na obtenção da emissão total do aterro cobrindo rapidamente vários hectares e passível de localizar dispersão da pluma de contaminação.</p> <p>Limitações: Alto custo, tecnologia nem sempre disponível, necessita mão de obra qualificada. Não identifica as causas reais da emissão de biogás (solo mal compactado, presença de fissuras ou aumento da pressão dos gases sob a camada etc.). Maior susceptibilidade as condições meteorológicas (velocidade do vento, pressão atmosférica). Número de gases analisados limitados (normalmente, só o metano). Não permite determinar as taxas de emissões, apenas localizar as regiões de pico de fluxo no aterro.</p>

Fonte: Modificado de Moreira (2018)

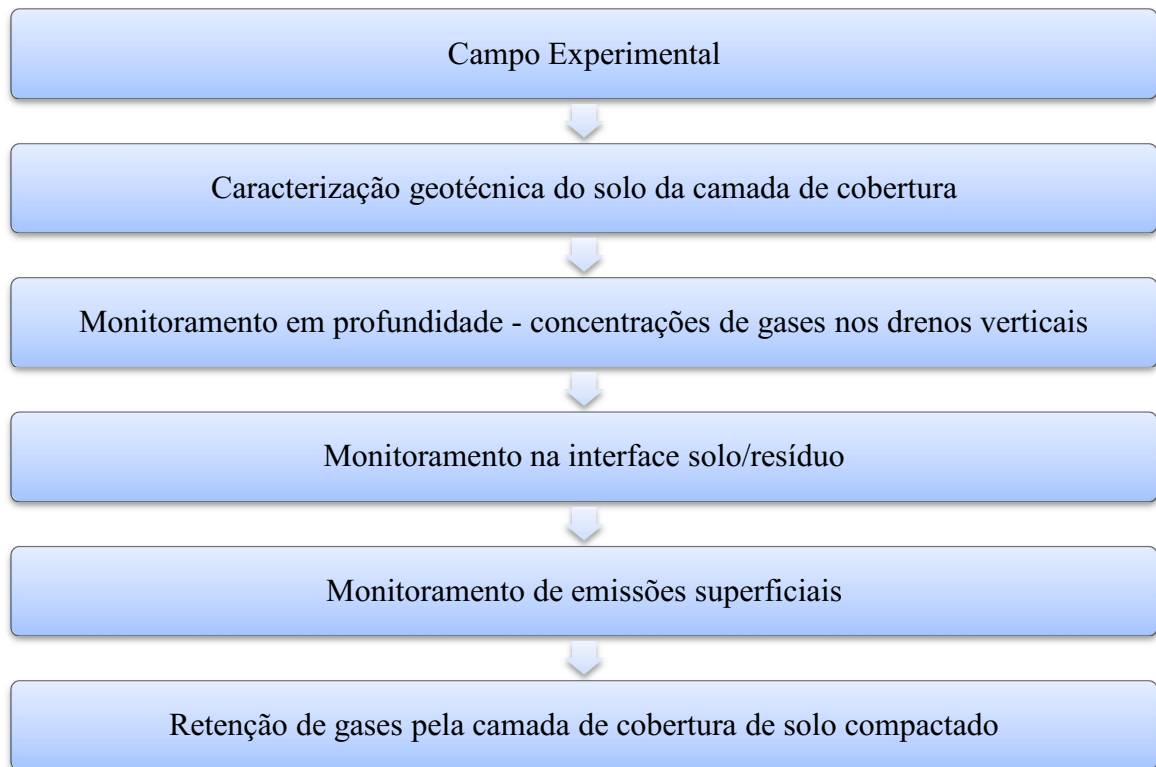
3. METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida neste trabalho se destina à:

- Descrição do método empregado para caracterização do solo da camada de cobertura;
- Monitoramento das concentrações de gases nos drenos verticais, interface solo-resíduo;
- Determinação dos fluxos pontuais de CH₄ e CO₂ de carbono através da camada;
- E a retenção desses gases pela camada de solo compactado.

Seguindo a sequência apresentada Figura 2:

Figura 2 – Fluxograma da Metodologia



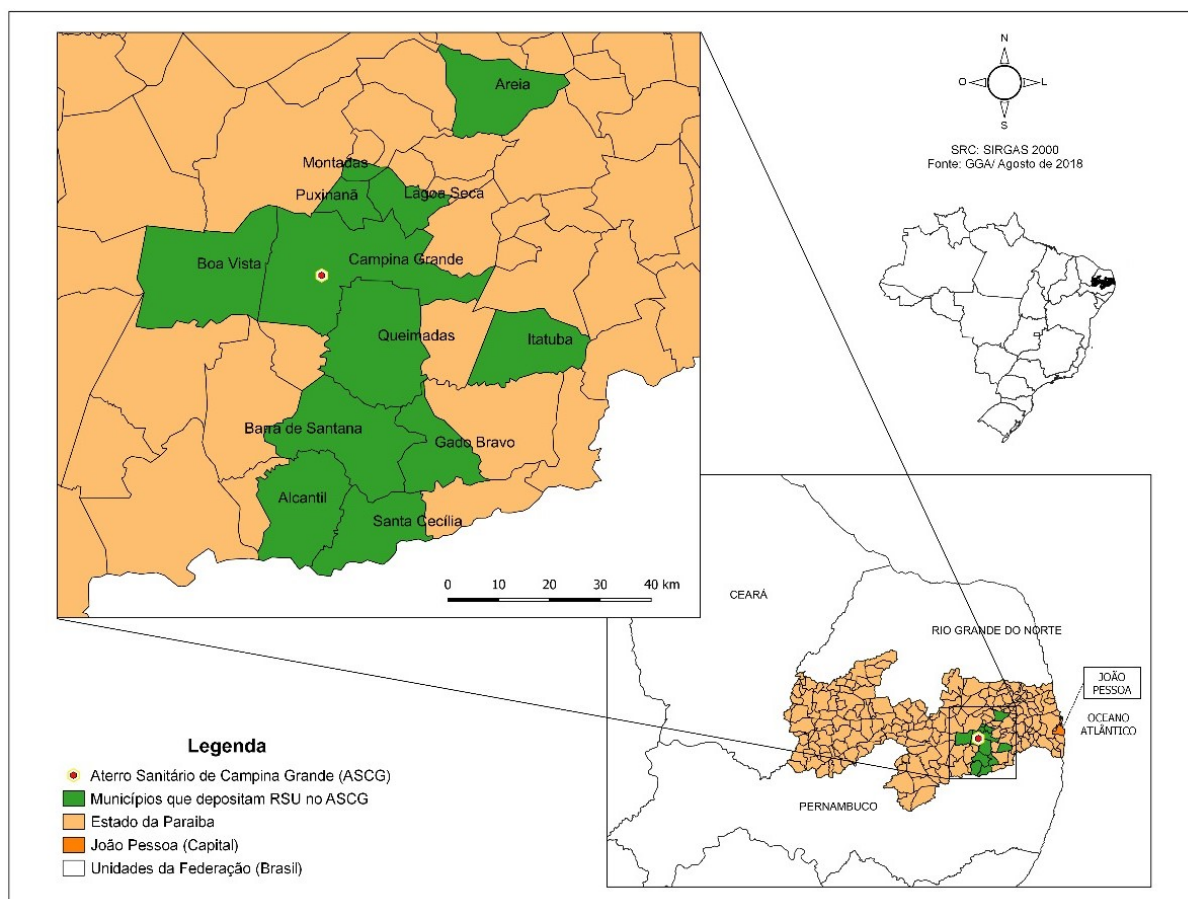
Fonte: Elaborado pelo Autor

3.1 Campo Experimental

Este trabalho foi realizado no Aterro Sanitário de Campina Grande (ASCG) (Figura 3), no sítio Logradouro II, PB-138, Km 10, distrito de Catolé de Boa Vista, localizado no semiárido Paraibano. O ASCG foi projetado para uma vida útil de 25 anos, contando com área

total de 64 ha, das quais 40 ha destinam-se à disposição de RSU, sendo, até a data deste trabalho, provenientes em 96% do município de Campina Grande - PB, e 4% das demais localidades como Lagoa Seca, Montadas, Boa Vista, Puxinanã, Areia, Barra de Santana, Gado Bravo, Itatuba, Santa Cecília, Alcantil e Queimadas.

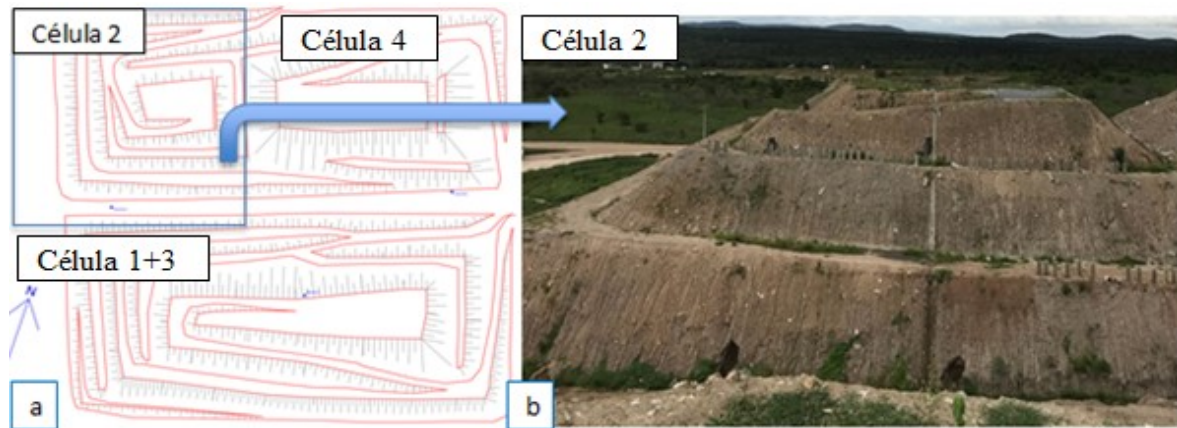
Figura 3 – Localização do ASCG



Fonte: GGA/UFCG (2018)

A Figura 4 ilustra Célula 2, estudada nesta pesquisa, que teve sua operação de dezembro/2015 a maio/2016, com um total de 62.359,44 ton de RSU aterrados, de acordo com informações concedidas pelo Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) da UFCG.

Figura 4 – (a) Configuração das Células do ASCG; (b) Célula 2.



Fonte: a) GGA/UFCG (2018); b) Acervo de pesquisa.

3.2 Caracterização geotécnica do solo da camada de cobertura

A caracterização geotécnica é uma etapa de suma importância para que se conheçam as características do solo utilizado e verificar sua aplicabilidade como material para camada de cobertura de aterro sanitário.

A camada de cobertura analisada nesse estudo teve seu solo caracterizado seguindo os critérios estabelecidos por normativas nacionais de caracterização do solo, conforme ilustrado pelo Quadro 3.

Quadro 3 – Descrição dos ensaios e respectivas normas.

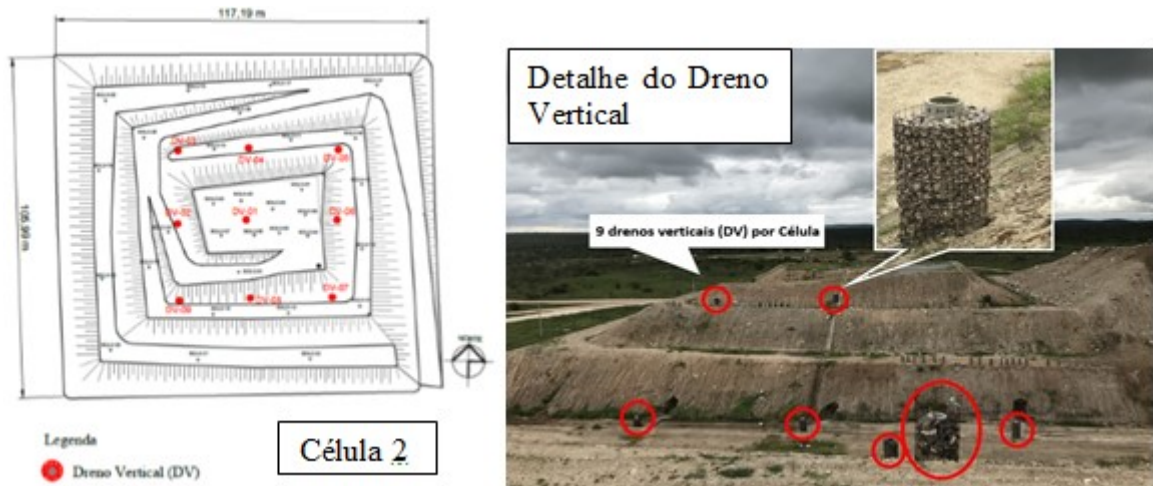
Ensaio	Método
Preparação de amostras e teor de umidade	NBR 6457 (ABNT, 2016) – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.
Massa específica dos grãos	NBR 6458 (ABNT, 2016) – Solo – Determinação da massa específica dos grãos de pedregulho que passam na peneira 4,8 mm.
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016) – Solo – Determinação do Limite de Liquidez.
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016) – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016) – Solo – Ensaio de Compactação.
Granulometria por peneiramento e sedimentação	NBR 7181 (ABNT, 2016) – Solo – Análise Granulométrica.
Permeabilidade à água	NBR 14545 (ABNT, 2000) – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável.

Fonte: Acervo da pesquisa

3.3 Monitoramento em profundidade - concentrações de gases nos drenos verticais

O monitoramento em profundidade das concentrações dos gases, baseado na metodologia empregada por Moreira (2018), foi realizado com leituras nos 9 (nove) drenos verticais (DV) (Figura 5) previamente instalados na Célula 2 durante o período de operação com a finalidade de direcionar a saída dos gases no interior do maciço.

Figura 5 – Drenos verticais na Célula 2



Fonte: GGA/UFCG (2018)

As medições (Figura 6) foram realizadas com o equipamento Dräger modelo X-am 7000, por meio do qual é possível aferir concentrações de CH_4 , CO_2 , O_2 , além de outros gases não estudados neste trabalho.

Figura 6 - Medição de concentração de gases nos Drenos Verticais



Fonte: Acervo da Pesquisa

A frequência de monitoramento foi mensal compreendendo o período de agosto de 2017 a outubro de 2018. Porém, devido a condições de operação no Aterro Sanitário (ASCG),

ocorreram no monitoramento algumas interrupções e redução no número de DVs monitorados ao longo deste período. Sendo monitorados os DV 02, 04, 06, 08 até março/18, o DV 01 até junho/18, o DV 07 até julho/18 e os DV 03, 05 e 09 até outubro/18.

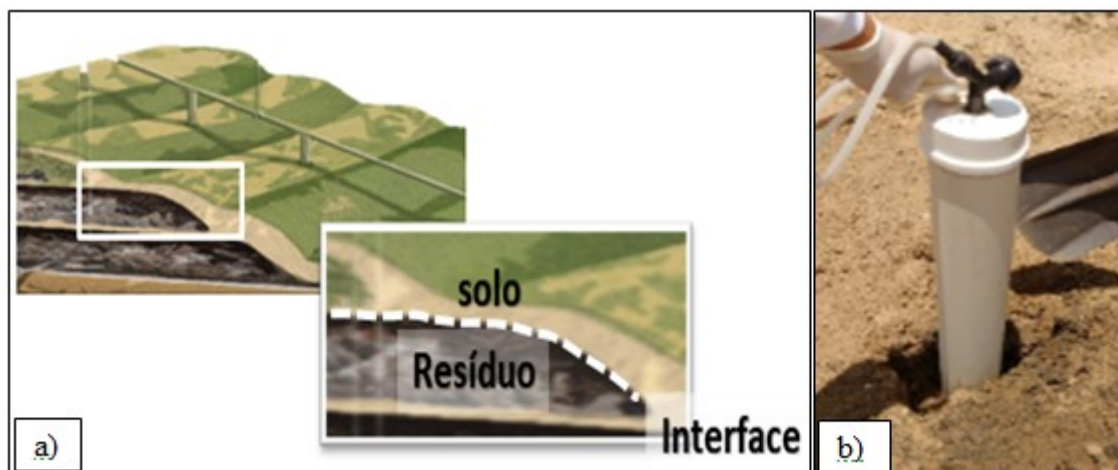
3.4 Monitoramento na interface solo-resíduo

A metodologia para monitoramento das concentrações de gases na interface solo-resíduos baseia-se na mesma descrita por Mariano e Jucá (2011), também empregada por Guedes (2018) na Célula estudada nesta pesquisa em períodos anteriores.

A interface solo-resíduo (Figura 7a) corresponde à área de transição entre o maciço de resíduos sólidos e a camada de cobertura final, tendo sua concentração aferida com o intuito de averiguar as concentrações de gases imediatamente abaixo da camada de cobertura.

Para esta etapa foram instalados Dispositivos de Medição de Concentrações (DMCs) (Figura 7b), constituídos tubos de PVC, de diâmetro de 0,10 m e comprimentos que variaram de acordo com a espessura da camada, apresentando uma torneira acoplada à parte superior para permitir a conexão do mesmo dispositivo portátil de medição de concentração de gases empregado nas medições de concentração de gases nos DVs.

Figura 7 – Medição de concentração de gases na Interface solo-resíduo.



a) Interface solo-resíduo. b) Dispositivo de Medição de Concentração (DMC)

Fonte: GGA/UFCG (2018)

3.5 Monitoramento de emissões superficiais

A metodologia para o monitoramento das emissões superficiais de biogás na camada de solo compactado da Célula 2 do ASCG fundamenta-se em Maciel (2003) e Guedes (2018),

sendo utilizada a placa de fluxo do tipo estática (Figura 8), e o procedimento consiste na instalação de uma câmara metálica fechada, de dimensões conhecidas, na qual deve ser realizada medições da concentração de gases em seu interior ao longo do tempo. A partir destes dados é possível determinar de modo eficiente o fluxo pontual de gases. O equipamento utilizado nesse ensaio corresponde a uma caixa feita em aço galvanizado, quadrada, de dimensões 0,40m×0,40m, área útil de 0,16m² e volume útil de 0,008m³.

Inicialmente a placa deve ser posicionada no local do ensaio (Figura 8a), sendo demarcado seu perímetro no solo, escavando-se uma vala no entorno, com aproximadamente 0,10m, e pressionando-se a placa verticalmente no solo de modo a realizar sua cravação, mantendo as conexões abertas para evitar a concentração de gases no seu interior. Para que ocorra uma melhor vedação da placa a fim de não ocorrer a fuga de gases lateralmente, deve-se colocar solo com bentonita umedecida com água na vala escavada (Figura 8b). A baixa permeabilidade característica da bentonita possibilita a vedação desejada para o ensaio.

Figura 8 - Ensaio de Placa de Fluxo tipo estática



- a) Escavação das valas para cravação da placa; b) Placa cravada e valas preenchidas com solo bentonita;
c) Instalação dos instrumentos de medição; d) Retirada da placa após medições

Fonte: Acervo de pesquisa

Em seguida realiza-se a instalação dos equipamentos de medição na placa (Figura 8b): detector portátil de concentração dos gases – Drager, em duas conexões, entrada e saída,

para circulação interna do gás; manômetro digital portátil (modelo 477-2), para medição de pressão diferencial; termômetro digital portátil (modelo mínima MT-600), para medição da temperatura interna. Externamente à placa utiliza-se o termoanemômetro (IMPAC – IP 720), para medição de temperatura ambiente, e a pressão atmosférica é obtida de dados de estação meteorológica da região. Ao final do Ensaio a placa é removida (Figura 8d) e amostras de solo podem ser coletadas para análises laboratoriais.

As leituras no interior da placa devem ser realizadas em intervalos de 5 a 10 minutos, por um período de monitoramento de no mínimo 30 minutos a um máximo de 3 horas.

O fluxo volumétrico no ponto da camada de cobertura é obtido a partir da Equação 1 desenvolvida por Czepiel et al (1996), tendo seus resultados normalizados para as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP):

$$Q_{ES.CH_4.CO_2} = \frac{V_{placa}}{A_{placa}} \times \frac{\Delta C_{CH_4.CO_2}}{\Delta t} \times \frac{273,15}{273,15 + T_{interna}} \times \frac{P_{atm}}{1000} \quad (1)$$

sendo:

$Q_{ES.CH_4.CO_2}$ - taxa de emissão volumétrica superficial de CH₄ ou CO₂ [NL.s⁻¹.m⁻²];

V_{placa} - volume útil da placa de fluxo [L];

A_{placa} - área coberta pela placa [m²];

$\frac{\Delta C_{CH_4.CO_2}}{\Delta t}$ - variação de concentração de CH₄ ou CO₂ [%v/v] no tempo [s];

$T_{interna}$ - temperatura interna;

P_{atm} - Pressão atmosférica [mbar];

Os ensaios de placa de fluxo descritos neste trabalho compreenderam seis pontos dispostos a uma distância de 1 a 3 metros dos DMCs previamente instalados.

3.6 Retenção de gases pela camada de cobertura de solo compactado

Relacionando-se as concentrações de gases emitidos para a atmosfera (ensaio de placa de fluxo) e as concentrações na interface solo-resíduo (DMCs), é possível estimar a retenção de gases pela camada de cobertura de solo compactado através da Equação 2, descrita por Mariano (2008):

$$\text{Retenção (\%)} = 1 - \frac{\% \text{ gás Placa}}{\% \text{ gás DMC}} \quad (2)$$

Sendo:

Retenção (%) - percentual de retenção do gás pela camada de cobertura;

$\%gás_{\text{placa}}$ - concentração do gás obtido no ensaio de placa de fluxo;

$\%gás_{\text{DMC}}$ - concentração do gás na interface solo-resíduo, obtido nos DMCs.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção destina-se a descrição dos resultados obtidos por meio deste trabalho bem como sua discussão. A ordem adotada segue a mesma sequência da metodologia apresentada na seção anterior.

4.1 Caracterização geotécnica do solo da camada de cobertura

O Quadro 4 apresenta um comparativo entre os parâmetros do solo estudado e os valores mínimos permissíveis em normativas.

Verifica-se que a maioria dos parâmetros obtidos para a camada de cobertura da Célula 2 encontra-se dentro dos valores mínimos permissíveis recomendados pelas normas nacionais, internacionais e regulamentações do saneamento nacional. Havendo divergência para o Limite de Liquidez, conforme regulamentação da CETESB (1993). Por outro lado, em relação ao percentual de finos, houve correspondência ao que está regulamentado pela CETESB (1993).

O coeficiente de permeabilidade à água do solo (Quadro 4) concorda com os valores indicados pelas normas da USEPA (2004), 10^{-7} m.s^{-1} , e pela NBR 13896 (ABNT, 1997) 10^{-8} m.s^{-1} . Além disso, Mariano (2008) obteve resultados semelhantes para solos de camada de cobertura classificados como SC (Areia Argilosa), com coeficientes de permeabilidade variando de 10^{-6} a 10^{-9} para o Aterro de Aguazinha-PE.

Com o ensaio de compactação Proctor Normal do solo da Célula 2, verificou-se umidade ótima de 12,40% e peso específico aparente seco máximo de $18,70 \text{ KN.m}^{-3}$. Valores semelhantes foram observados para outro solo por Almeida et al. (2010) que obtiveram peso específico aparente seco máximo de $18,90 \text{ KN.m}^{-3}$ e umidade ótima de 12,4%. De acordo com Pinto (2006), valores de densidade seca máxima elevada e umidade ótima baixa são representativos de solos grosseiros. Dessa forma, areias finas argilosas, podem apresentar umidades ótimas de 12 a 14% com densidades secas máximas de $18,6 \text{ KN.m}^{-3}$.

O Grau de Compactação (GC) foi de 91,84% indicando que o solo não apresentou sua resistência máxima ou menor permeabilidade e assim há possibilidade de formação de caminhos preferenciais de entrada de água e saída de gás, fato que pode ter sido compensado pela elevada espessura da camada em comparação com o valor mínimo estabelecido no Quadro 4, sendo ainda necessários outros parâmetros a serem observados.

Quadro 4. Parâmetros do solo da camada de cobertura da Célula 2 e valores permissíveis.

PARÂMETRO	MÉTODO UTILIZADO	RESULTADO	VMP*
Massa específica dos grãos	Massa específica dos grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – NBR 6508 (ABNT, 2016a)	2,69 g/cm ³	Não possui regulamentação
Limites de consistência	Limite de liquidez – NBR 6459 (ABNT, 2016b)	25 %	≥ 30% (CETESB, 1993)
	Limite de plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 2016c)	16 %	Não possui regulamentação
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016d)	Wótima= 12,4 % M. específica= 1913 kg.m ⁻³	Não possui regulamentação
Análise granulométrica	Granulometria por peneiramento e sedimentação – NBR 7181 (ABNT, 2016e)	30,14%	≥ 30% de % finos (CETESB, 1993)
Permeabilidade à água	Permeabilidade a carga variável – NBR 14545 (ABNT, 2000)	8,01 x 10 ⁻⁸ m.s ⁻¹	10-7 m.s ⁻¹ (USEPA, 2004) 10-8 m.s ⁻¹ - NBR 13896 (ABNT, 1997)
Classificação	SUCS (ASTM D2487-11)	SC	CL, CH, SC ou OH (CETESB, 1993)
Espessura da camada de cobertura		1,01 m	0,60 m (FEAM, 2006)
Tipo de camada de cobertura		Convencional	Evapotranspirativa (USEPA, 2011)

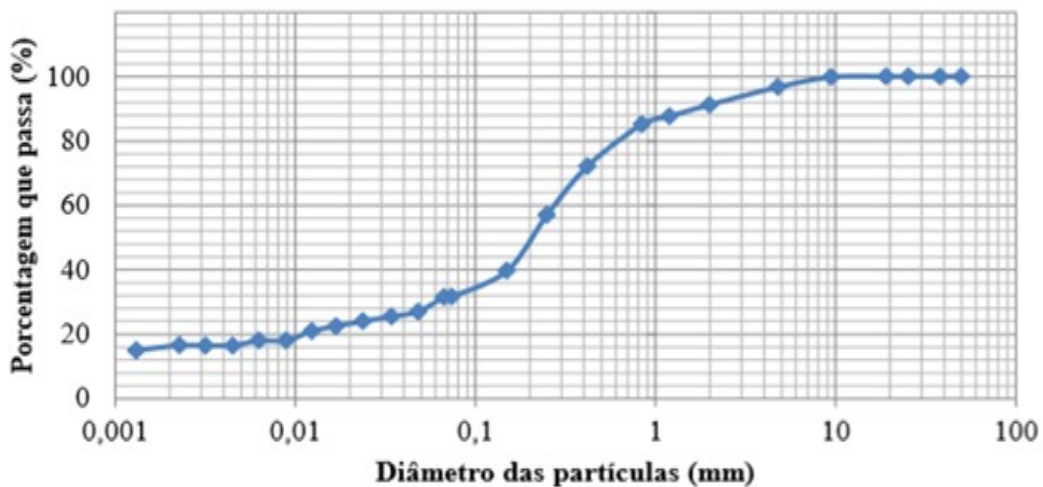
*Valores Mínimos Permissíveis.

Fonte: Acerto da Pesquisa

Na distribuição granulométrica foi verificada a predominância de 69,72% de areia e percentual de silte + argila de 30,14%, indicando um solo caracterizado como de granulação grosseira. Joaquim Jr (2015) e Araujo e Ritter (2016), realizaram a análise granulométrica de dois tipos de solos utilizados em camadas de cobertura de Células experimentais no Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Seropédica-RJ. Esses solos apresentaram teor de areia de 60 e 50%, respectivamente, caracterizando-se, também, como solos de granulação grosseira.

A partir da curva granulométrica (Figura 9) do solo do *liner*, observa-se percentuais de partículas de diferentes tamanhos apresentando variação de pedregulho a argila. Uma característica de solo bem graduado confere ao mesmo um comportamento no qual as partículas menores ocupam os vazios correspondentes às partículas maiores, criando um entrosamento do qual resulta menor compressibilidade e maior resistência (PINTO, 2006), além de contribuir para a formação de uma barreira mais eficiente à passagem de líquidos e gases.

Figura 9 – Curva granulométrica do solo da camada de cobertura da Célula 2



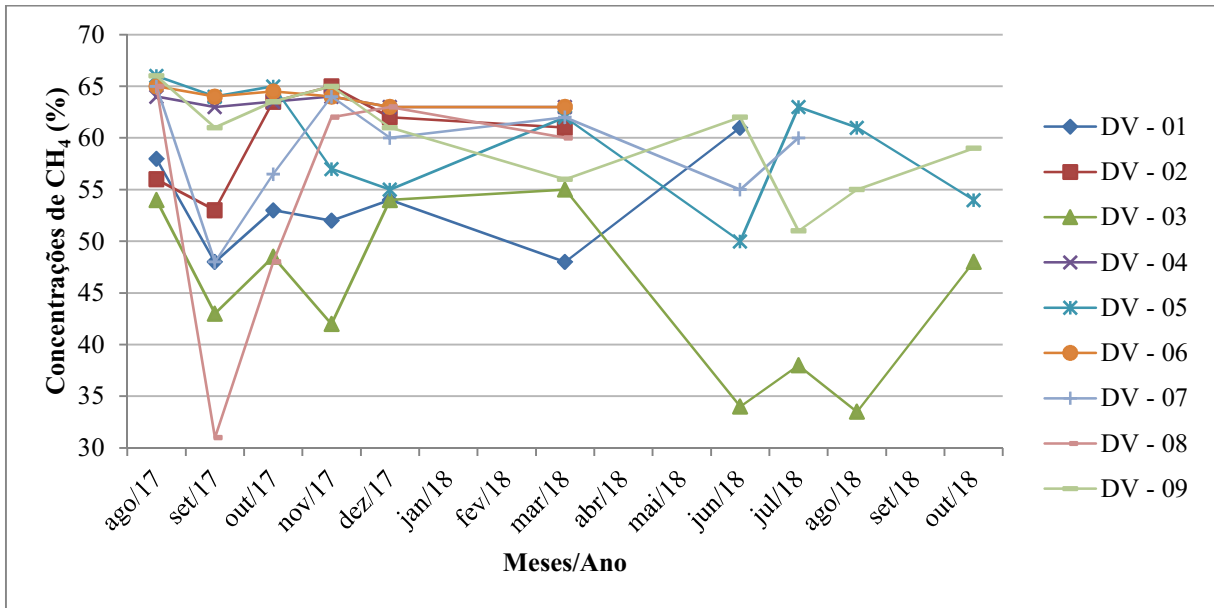
Fonte: Acervo da pesquisa

O solo estudado foi classificado considerando-se a metodologia da SUCS (ASTM D2487-11), como SC (areia argilosa apresentando mistura bem graduada de areia e argila), estando dentro da classificação proposta na CETESB (1993). Solos desse tipo também foram verificados por Mariano (2008) e Oliveira et al. (2013) no Aterro de Aguazinha-PE e na CTR Nova Iguaçu-RJ, respectivamente.

4.2 Monitoramento em profundidade - concentrações de gases nos drenos verticais

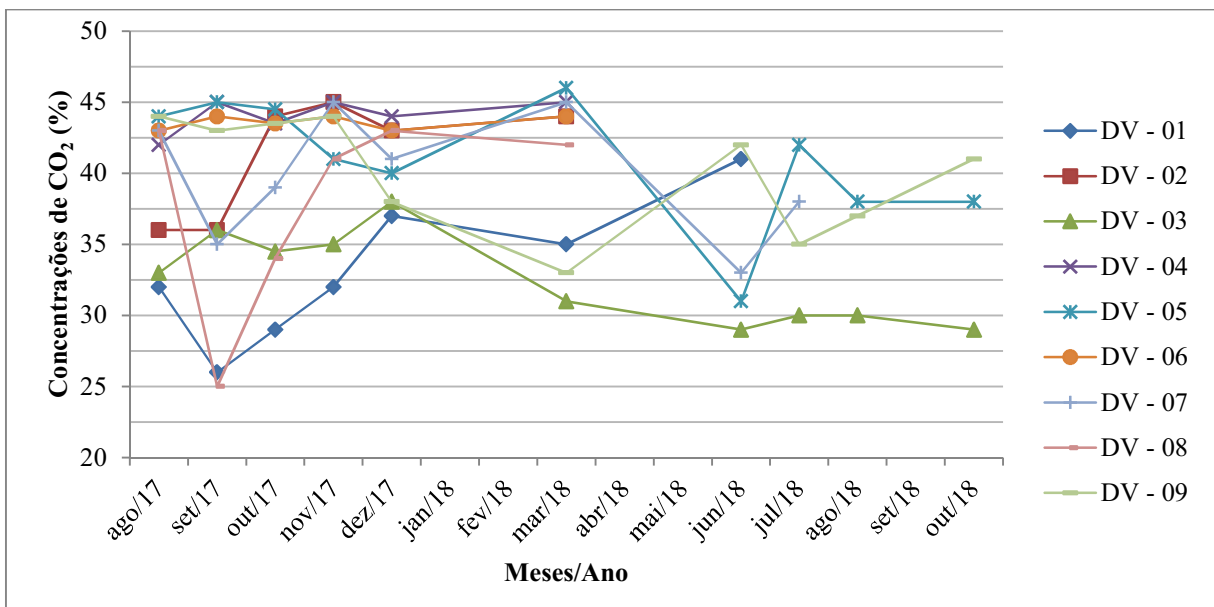
A periodicidade das medições foi mensal. As Figuras 10, 11 e 12 mostram as concentrações dos gases CH₄, CO₂ e O₂, respectivamente, medidas nos drenos verticais (DV) da Célula 2.

Figura 10 - Concentrações de CH₄ nos Drenos Verticais

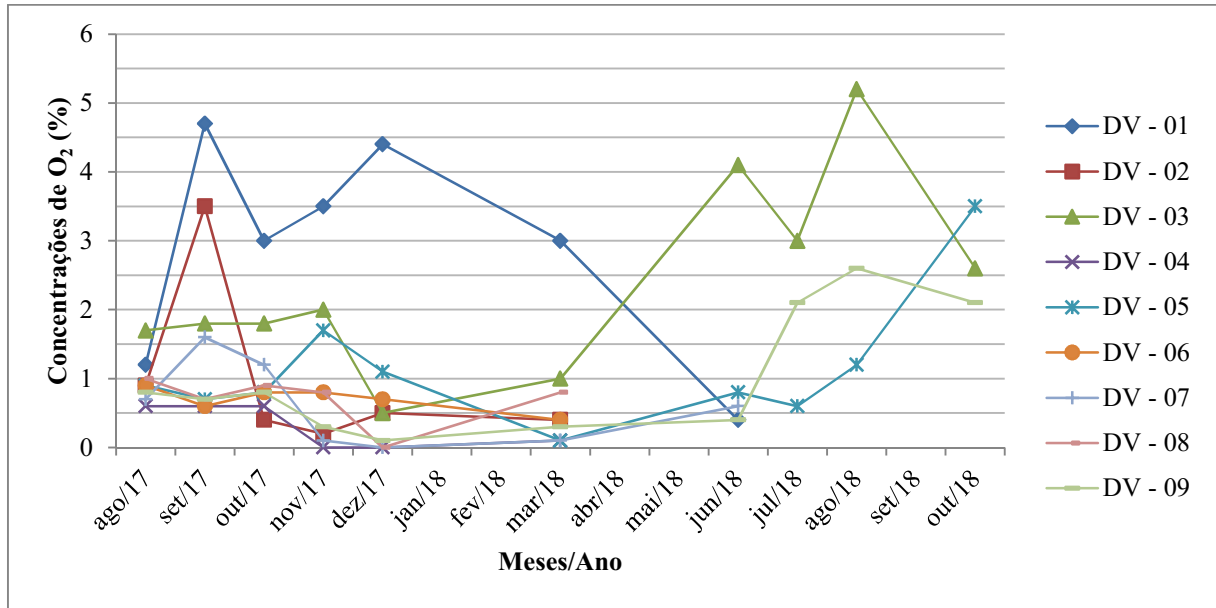


Fonte: Acervo da pesquisa

Figura 11 - Concentrações de CO₂ nos Drenos Verticais



Fonte: Acervo da pesquisa

Figura 12 - Concentrações de O₂ nos Drenos Verticais

Fonte: Acervo da pesquisa

As concentrações de CH₄ nos drenos oscilaram de 31% a 66%, com média de 57,2%. As concentrações de CO₂ nos drenos oscilaram de 25,0 a 46,0%, com média de 39,0%. Quanto ao O₂, as concentrações oscilaram de 0% a 5,2%, com média de 1,3%.

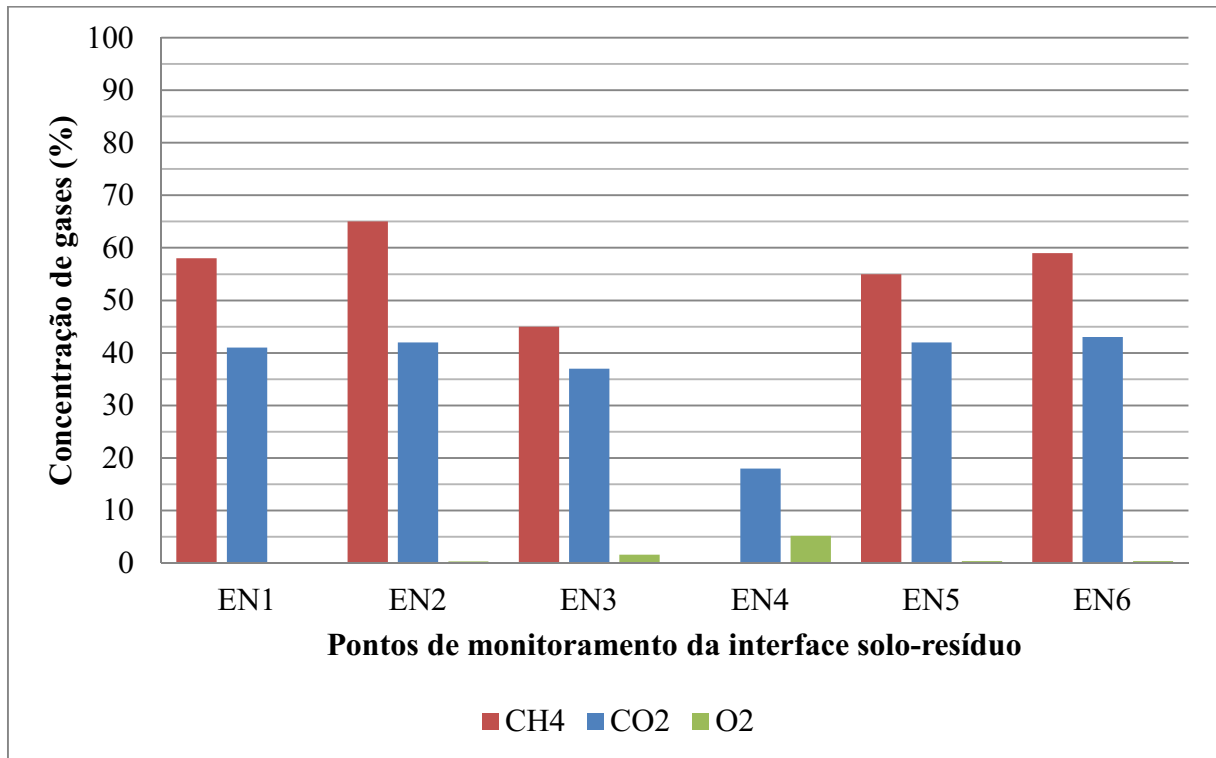
Ocorreram baixos percentuais de CH₄ no DV 08 e de CO₂ nos DV 01 e 08, referente ao mês de setembro de 2017. Para este mês os valores de precipitação foram em torno de 8 mm, segundo dados do INMET (2018), o que pode ter influenciado nos valores mais baixos das concentrações dos gases, considerando que a baixa precipitação implica em menor umidade no interior do maciço sanitário e, conseqüentemente, alterações na produção de biogás. Segundo estudo de Moreira (2018) neste mesmo aterro sanitário, para os meses em que foram verificados maiores valores de precipitação foram também observados maiores valores nas concentrações de CH₄ e CO₂. Porém também não podem ser descartadas as possibilidades de falhas humanas ou do equipamento de medição durante a coleta dos dados que se apresentaram muito distintos dos demais, visto que nos meses seguintes as concentrações retornaram aos valores típicos observados ao longo do monitoramento.

As concentrações médias de gases encontradas na Célula 2 são indicativos de uma fase metanogênica de biodegradação dos resíduos visto que as concentrações de CH₄ prevaleceram acima das concentrações de CO₂ e com baixas concentrações de O₂. Valores bem próximos aos demonstrados por Tchobanoglous et al. (1993), referente à fase metanogênica de biodegradação.

4.3 Monitoramento na interface solo-resíduo

A partir do monitoramento dos DMCs obtiveram-se as concentrações na interface solo-resíduo da Célula 2, sendo apresentadas na Figura 13. O número de ensaios (EN) referente a esta etapa limita-se a mesma quantidade realizada para o ensaio de placa de fluxo que será discutida na próxima seção.

Figura 13 - Concentração de Gases CO₂ e CH₄ na interface solo-resíduo



Fonte: Acervo da pesquisa

Na interface solo-resíduo, com exceção do EN4, as concentrações de gás variaram de 45 a 65% para CH₄ e de 37 a 43% para CO₂, com médias de 56,4% e 41%, respectivamente. Tais valores já eram esperados por conta da produção natural de biogás em decorrência dos processos biodegradativos. Estes valores são similares aos percentuais identificados nos DVs, sendo um indicativo da propagação do gás no interior do maciço até a superfície inferior da camada de cobertura de solo compactado.

Neste estudo a maior concentração de CH₄ foi observada no EN2 e de CO₂ no EN6. Enquanto que valores mínimos foram observados no EN4, fato pode ser explicado pela proximidade do ponto de ensaio a um dos DV, o que justificaria o baixo valor das concentrações, 0% para CH₄ e 18% para CO₂, tendo em vista o efeito da eficiência do dreno,

uma vez que, os fluidos tendem a escoar para os caminhos que apresentem menor resistência ao seu deslocamento.

Moreira (2018) obteve valores variando de 0,4 a 64,3% para CH₄ e de 6,1 a 45% para CO₂, para o monitoramento da mesma Célula estudada nesta pesquisa, durante os meses de agosto e setembro de 2017. Lopes (2011) no aterro da Muribeca, em Jaboatão dos Guararapes-PE, obteve valores de 0,7 a 58% para CH₄ e de 0,8 a 41% para CO₂.

Moreira (2018) observou em seus estudos que nos pontos com maiores concentrações de gases nos ensaios de DMCs não foram identificadas emissões significativas. Dessa forma, não foi verificada uma relação direta entre as concentrações de gases na interface solo-resíduo e o fluxo de gases pelo *liner* de solo compactado. Este mesmo autor destaca que o fluxo advectivo na camada de cobertura de solo compactado não ocorreu devido aos baixos gradientes de pressão na interface solo-resíduo, entretanto nos drenos verticais o fluxo de gás ocorreu de maneira natural. No presente estudo condições semelhantes de concentrações e pressões de gases na interface também foram observadas, o que leva-se na repetição desse fenômeno, contribuindo com o comportamento observado nas emissões superficiais.

4.4 Monitoramento de emissões superficiais

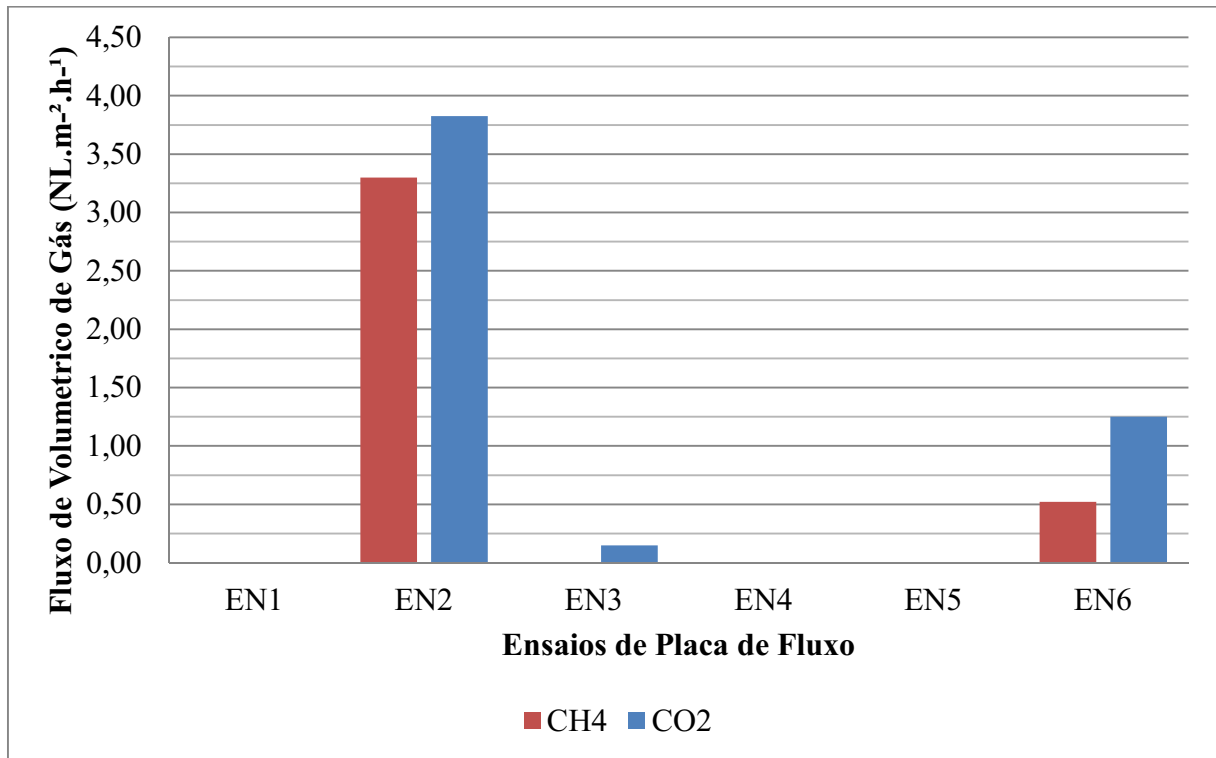
Com a realização dos ensaios de placa de fluxo obteve-se o fluxo volumétrico de CH₄ e CO₂, o qual pode ser observado na Figura 14 para os respectivos pontos ensaiados.

A partir destes resultados observados verifica-se a predominância de valores nulos de fluxo de gases através da camada de cobertura. Condição semelhantemente observada por Guedes (2018) em seus estudos na mesma Célula de aterro sanitário deste trabalho.

Observa-se ainda que os maiores fluxos de CH₄ e CO₂ foram obtidos para o ensaio 2 (EN2), com valores de 3,30 NL.h⁻¹.m⁻² e 3,83 NL.h⁻¹.m⁻², respectivamente. Seguido do Ensaio 6, com valores de 0,52 NL.h⁻¹.m⁻² para o CH₄ e 1,25 NL.h⁻¹.m⁻² para o CO₂. O valor do fluxo de CH₄ nestes pontos, embora elevado quando comparado aos demais, ainda encontra-se dentro limite máximo especificado pela normativa australiana Carbon Farming Initiative (CFI), a qual indica um fluxo máximo de metano de 3,78 NL.h⁻¹.m⁻², o que implica dizer que as emissões estão dentro das amplitudes estabelecidas.

Fluxos abaixo do especificado pela norma também foram encontrados por Park et al (2016), em diversos aterros de cidades italianas, evidenciando o cumprimento dos parâmetros especificados.

Figura 14 - Fluxos volumétricos de CH₄ e CO₂



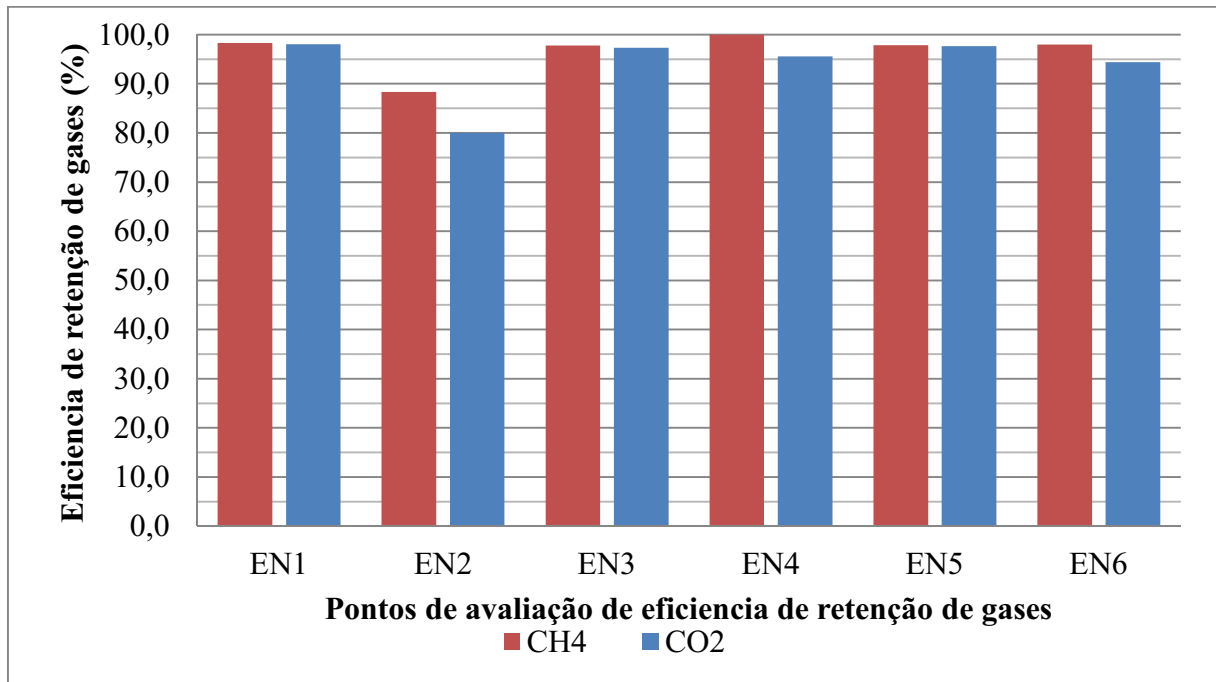
Fonte: Acervo da pesquisa

Em estudos realizados em alguns aterros no semiárido da África do Sul, manuseando a placa de fluxo estática para avaliação de emissões de biogás, Fourie e Morris (2004) constataram que no semiárido Sul Africano camadas de coberturas com baixa permeabilidade à água contribuíram para reduzir substancialmente a pequena taxa de biodegradação dos resíduos, que já era mínima e, em consequência, a geração de gases. Tendo em vista que a camada de cobertura da Célula 2 apresentou um coeficiente de permeabilidade consideravelmente baixo e grau de compactação médio de 93 %, possivelmente esses fatores, dentre outros, como eficiência do sistema de drenagem, espessura da camada de solo compactado, tenham contribuído para os baixos fluxos verificados.

4.5 Retenção de gases pela camada de cobertura de solo compactado

Com base nos dados de concentração na interface e na superfície, pode-se estimar a eficiência de retenção da camada nos pontos monitorados (Figura 15):

Figura 15 – Retenção de gases pela camada de cobertura



Fonte: Acervo da pesquisa

Os percentuais de retenção quantificados nesses pontos variaram de 88,3 a 100% para o CH₄ e de 80 a 98% para o CO₂, apresentando valores de maior retenção no ensaio 4 para o CH₄ e no ensaio 1 para o CO₂, com 100% e 98%, respectivamente.

Observa-se menor eficiência de retenção no ponto de ensaio 2, para ambos os gases, com percentuais de 88,3% para o CH₄ e 80,0% para o CO₂, relacionando-se com os valores mais elevados de fluxos quantificados na camada de cobertura para este ponto. Ainda assim, constituem-se percentuais elevados de retenção.

Guedes (2018), realizando anteriormente estudos nesta mesma Célula, obteve variações de 93,7 a 100% para o CH₄ e 89,9 a 99,3% para o CO₂. Comparando-se ambos os dados observa-se uma continuidade na retenção da camada que apresentou resultados semelhantes em ambos os períodos.

Observa-se ainda, como esperado, que a taxa de retenção é inversamente proporcional ao fluxo de gás, apresentado menor valor nos pontos de maior fluxo, sendo fato que serve como indicativo para os pontos de maior fragilidade à ocorrência de emissões fugitivas. Outro fator que corrobora aos resultados identificados são as características geotécnicas identificadas para o solo da camada de cobertura que, aliadas à sua espessura acima da recomendada no Quadro 4, favorecem a retenção de gases.

4.6 Resumo dos resultados de monitoramento de gases

Esta seção destina-se a apresentar uma síntese dos resultados obtidos com o monitoramento de gases realizado neste trabalho conforme observado no Quadro 5. No que se refere aos resultados de caracterização do solo um resumo dos resultados já foi apresentado no Quadro 4 da seção 4.1.

Quadro 5 - Resumo do monitoramento de gases

GASES	CH ₄		CO ₂		O ₂	
	Amplitude	Média	Amplitude	Média	Amplitude	Média
Drenos Verticais (%)	31 a 66	57,2	25,0 a 46,0	39,0	0 a 5,2	1,3
Interface solo-resíduo (%)*	45 a 65	56,4	37 a 43	41	0,2 a 1,6	0,58
Fluxos pela cobertura (NL.h ⁻¹ .m ⁻²)**	0 a 3,30	0,64	0 a 3,83	0,87	-	-
Retenção (%)**	88,3 a 100	96,7	80 a 98	93,8	-	-

*Valores calculados não levando em conta o ponto de ensaio EN4, por destoar muito dos demais. Considerando este ponto os valores mudam para: CH₄ de 0 a 65%, média de 47%; CO₂ de 18 a 43%, média 37,2%; O₂: de 0,2 a 5,2%, média de 1,35%.

**Valores para O₂ não quantificados para esta pesquisa

Fonte: Acervo da pesquisa

5. CONCLUSÕES

Com base na avaliação das emissões fugitivas de gases de efeito estufa em Célula de Aterro Sanitário em Campina Grande – PB foi possível observar que:

- ✓ O solo utilizado na camada de cobertura apresentou potencial favorável ao uso como *liner* de Aterro Sanitário, com grau de compactação, espessura elevada da camada e granulometria bem distribuída, contribuindo a uma menor permeabilidade, favorecendo a retenção de líquidos e gases.
- ✓ Nos drenos verticais concentrações elevadas dos gases metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), bem como as baixas concentrações de oxigênio caracterizam a fase metanogênica estável de biodegradação na Célula de resíduos.
- ✓ As concentrações de CH₄ e CO₂ na interface solo-resíduo embora apresentem valores próximos aos dos drenos verticais, não se caracterizam como um fator interveniente nas emissões fugitivas para os pontos analisados.
- ✓ Os fluxos de gases através do *liner* apresentaram-se inexistente para alguns pontos analisados, sendo ainda para os demais abaixo dos valores máximos recomendados por normativas internacionais, sendo favorecidos pelas condições climáticas e geotécnicas.
- ✓ A eficiência de retenção de gases pela camada de cobertura de solo compactado nos pontos estudados foi elevada, apresentando valores de até 100% para o metano, favorecida pelos baixos fluxos e pressões existentes.

Conclui-se que a camada de cobertura apresentou características geotécnicas adequadas ao uso como camada de cobertura de aterro sanitário para a condição analisada, apresentado resultados que servem como parâmetros para estudos e projetos realizados em aterros sanitários com condições climáticas e geotécnicas semelhantes às observadas no Aterro Sanitário em Campina Grande-PB.

5.1 Recomendações para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros recomenda-se o estudo das emissões em outras células de aterro sanitário. Primeiramente para avaliação dos comportamentos analisados neste trabalho nas demais estruturas e em segundo lugar devido as constantes operações no Aterro que culminaram na retirada de instrumentação necessária a algumas análises.

Recomenda-se também o estudo com um número maior de pontos analisados, em especial no monitoramento das emissões fugitivas, de modo a atender aos critérios da estatística visando uma maior representatividade dos dados obtidos, bem como a espacialização dos dados com sistemas de informações georeferenciadas (SIG), quantificação dos volumes de gás emitidos através dos drenos verticais, determinação dos pontos de maiores emissões superficiais bem como o dimensionamento de um sistema de cobertura alternativo para controle das emissões pontuais.

Por último recomenda-se também a associação de trabalhos de automatização do monitoramento em detrimento da grande demanda física exigida do operador durante alguns ensaios, principalmente de campo, bem como a limitação de equipamentos de medição e escassez de referências ao monitoramento remoto, que permitiria maior praticidade de aquisição de dados, além de maior precisão e frequência.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário. Dissertação (Engenharia Civil e Ambiental).** Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2017.
- ARAÚJO, T. T.; RITTER, E. **Avaliação de emissões de biogás em camadas de cobertura de um aterro sanitário.** Ciências Exatas & Engenharia, v. 6, n. 16, 2017, p. 34-49. ISSN 2236885X.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 1997.
- _____. **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 6458:** Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm. Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 6459:** Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 7180:** Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 14545:** Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro, 2000.
- _____. **NBR 7181:** Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental.** Oficinas de Textos. 1. ed. São Paulo, 2008, 248 p. ISBN 978-85-86238-73-4.
- BOGNER, J.; PIPATTI, R.; HASHIMOTO, S.; DIAZ, C.; MARECKOVA, K.; DIAZ, L.; KJELDTSEN, P.; MONNI, S.; FAALJ, A.; GAO, Q.; ZHANG, T.; AHMED, M. A.; SUTAMIHARDJA, R. T.; GREGORY, R. Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). Waste Management & Research, v. 26, 2008, p. 11–32.
- BOUAZZA, A.; RAHMAN, F. **Oxygen diffusion through partially hydrated geosynthetic clay liners.** Géotechnique, v. 57, n. 9, 2007, p. 767–772. DOI: 10.1680/geot.2007.57.9.767.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos Sólidos Industriais.** 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.
- CZEPIEL, P. M., MOSHER, B., CRILL, P. M., HARRISS, R. C. **Quantifying the effect of oxidation on landfill methane emissions.** Journal of Geophysical Research, v. 101, p. 721-729, 1996.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos**. Editado por FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de. Jaguariúna-SP: Embrapa Meio Ambiente, 2006, 1. ed., 169p. il. ISBN 85-85771-43-7.

FOURIE, A. B.; MORRIS, J. W. F. **Measured gas emissions from four landfills in South Africa and some implications for landfill design and methane recovery in semi-arid climates**. Waste Management & Research, v. 22, p. 440–453, 2004.

GGA/UFCG – Grupo de Geotecnia Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande. **Acervo**. 2018.

GUEDES, M. J. F. **Estudo das emissões de biogás em aterro de resíduos sólidos urbanos no semiárido brasileiro**. (Tese de Doutorado em Recursos Naturais). Campina Grande/PB. Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.

INMET – **Instituto Nacional de Meteorologia**. Estações automáticas. Dados meteorológicos – Campina Grande-PB. INMET, 2018. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 14 de jan. 2018.

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

LOPES, R. L.; MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. **Avaliação da emissão de metano em aterro experimental de resíduos sólidos na Muribeca/PE – Brasil**. REVISTA AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, v. 5, n. 1, 2012, p. 107-116. ISSN 0718-378X.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca - PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2003.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da Retenção de Gases em Camadas de Cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos, 2008**. Tese (doutor em Engenharia Civil) -Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

MARIANO, M. O. H., JUCÁ, J. F. T. **Eficiência das camadas de cobertura na retenção de emissões de biogás em aterros sanitários: estudo de caso em Olinda-PE, Brasil**. Revista Águas & Resíduos, v. 15, p.26-31, 2011.

MOREIRA, F. G. S. **Emissões fugitivas de biogás em Célula de aterro sanitário**. (Dissertação de Mestrado). Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. 2018.

OLIVEIRA, A. C. E.; RITTER, E.; MANNARINO, C. F. **Diagnóstico e avaliação de emissões fugitivas de biogás na camada de cobertura final da central de tratamento de resíduos de Nova Iguaçu e do lixão de Seropédica**, Rio de Janeiro. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 27, 2013, Goiânia-GO. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013, p. 1-8.

PARK, J. K.; KANG, J. Y.; Lee, N. H. **Estimation of methane emission flux at landfill surface using laser methane detector: influence of gauge pressure.** Waste Management & Research, v. 34, n. 8, p.784–792, 2016.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2006. 367p.

SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.** Cambridge University Press, Cambridge, U.K. and New York, NY, U.S, 2007

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of solid waste management.** 2. ed. Estados Unidos, 2002. DOI: 10.1036/0071356231.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Monitoring Approaches for Landfill Bioreactors**, eds. Tolaymat, T., Kremer, F., Carson, D. e Hoover, W.D., National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Cincinnati, Ohio, EPA/600/R-04/301, 2004a.

_____. Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers. **Office of solid waste and emergency response.** Washington DC.: USEPA, EPA-540-R-04-007, 2004b, 421p.