



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

GLAUBER GALDINO SANTOS

**AVALIAÇÃO DA RETENÇÃO DE GASES NA CAMADA DE COBERTURA
DO ATERRO SANITÁRIO MUNICIPAL DE CARUARU**

Caruaru

2021

GLAUBER GALDINO SANTOS

**AVALIAÇÃO DA RETENÇÃO DE GASES NA CAMADA DE COBERTURA
DO ATERRO SANITÁRIO MUNICIPAL DE CARUARU**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Orientadora: Profa. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello
Coorientadora: Profa. Dra. Maria Odete Holanda Mariano

Caruaru

2021

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Nasaré Oliveira - CRB/4 - 2309

S237a Santos, Glauber Galdino.
Avaliação da retenção de gases na camada de cobertura do aterro
sanitário municipal de Caruaru. / Glauber Galdino Santos. – 2021.
143 f.; il.: 30 cm.

Orientadora: Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello.
Coorientadora: Maria Odete Holanda Mariano.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco,
CAA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental,
2021.
Inclui Referências.

1. Aterro sanitário 2. Biogás. 3. Aterros - Lixiviação 4. Cobertura
dos solos. 4. Gases - Retenção. I. Bello, Maria Isabela Marques da
Cunha Vieira (Orientadora). II. Mariano, Maria Odete Holanda
(Coorientadora). III. Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2021-300)

GLAUBER GALDINO SANTOS

**AVALIAÇÃO DA RETENÇÃO DE GASES NA CAMADA DE COBERTURA
DO ATERRO SANITÁRIO MUNICIPAL DE CARUARU**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Aprovada em: 27 / 12 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Maria Odete Holanda Mariano (Coorientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gilson Lima da Silva (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Eduardo Antônio Maia Lins (Examinador externo)
Instituto Tecnológico de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por toda força e orientação que me forneceu, possibilitando essa que é até então a minha maior e mais difícil conquista.

A minha orientadora a Profa. Dra. Maria Isabela Marques Bello que aceitou a difícil missão de me ajudar nesse trabalho e que não poupou esforços para que eu pudesse finalizá-lo, que me surpreendeu com sua dedicação e reafirmou todas as qualidades que eu já havia visto desde o primeiro contato que tivemos ainda na graduação, sendo uma das melhores profissionais com que já tive a honra de conviver em toda minha vida acadêmica e profissional.

A minha coorientadora, Profa. Dra. Maria Odete Mariano, pela assistência, paciência, disponibilidade, pelas instruções, suporte na elaboração desse trabalho, pela grande pessoa que é e pela profissional exemplar a qual tenho como modelo, sem seu apoio nada disso seria possível.

Aos meus pais, que durante toda minha vida foram um suporte e nunca duvidaram da minha capacidade, acreditando no meu potencial, muitas vezes mais que eu mesmo.

A minha esposa, Rafaela, pelo apoio incondicional, incentivo e paciência durante toda a realização desse sonho e que em nenhum momento deixou de estar ao meu lado.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação, em especial aos que tive a oportunidade de conhecer por meio do programa de pós-graduação da Universidade Federal de Pernambuco, por todo apoio, conselhos, ensinamentos, amizade e incentivo nos âmbitos acadêmico, profissional e pessoal. São sem sombra de dúvida, grandes exemplos e por todos tenho uma estima indescritível.

A Gutenberg e Sávio pela ajuda com os ensaios e pela amizade.

A Prefeitura Municipal de Caruaru por permitir que essa pesquisa fosse realizada no aterro sanitário municipal da cidade.

“Não há felicidade senão com conhecimento.” (PESSOA, 1982, p. 406)

RESUMO

As camadas de cobertura nos aterros sanitários têm como objetivo principal a cobertura dos resíduos ali dispostos, evitando assim diversos problemas como proliferação de vetores e mau cheiro. Estas camadas também são responsáveis por isolar os resíduos e impedir a entrada de água no maciço, o que geraria quantidades maiores de lixiviado, além de evitar que os gases gerados no processo de biodegradação da matéria orgânica, cheguem até a atmosfera de maneira desordenada. A presente pesquisa avalia a eficiência da camada de cobertura utilizada no Aterro Sanitário Municipal de Caruaru quanto a retenção dos gases gerados no interior da massa de resíduos. Este aterro paralisou suas atividades desde março de 2018. As camadas de cobertura do aterro são compostas em sua maioria por material arenoso, diferentemente do material argiloso usualmente adotado, portanto, optou-se por avaliar as consequências do uso desse tipo de material na composição das camadas. A avaliação se deu inicialmente por uma caracterização geotécnica do solo (classificação, granulometria, grau de compactação, umidade, grau de saturação, índice de vazios e espessura da camada). Em campo foram realizados 20 ensaios com uma placa de fluxo estática para que pudesse ser quantificado a quantidade de gás que chegava até a superfície através da camada de cobertura, sendo uma média de 1.071,76 kg/dia ou 385,83 t/ano. Os ensaios foram realizados em 04 baterias, em 05 pontos diferentes selecionados de acordo com a idade do resíduo ali disposto (02, 04, 06, 08 e 10 anos, respectivamente). Devido às baixas emissões encontradas nos ensaios de placa foi também investigada a geração de gases no interior da massa de lixo através de 20 ensaios de pressão e concentração com o auxílio do Dispositivo de Medição de Pressão e Concentração (DMPC) e analisadas as emissões de gases em 09 drenos que ficavam próximos aos pontos dos demais ensaios de campo. Segundo a análise granulométrica do material, 04 das amostras retiradas em campo eram formadas por materiais arenosos, sendo: areias siltosas, areia argilosa e areia bem graduada (pedregulhosa) e 01 amostra apresentou uma argila arenosa. Os índices de vazios ficaram entre 0,5 e 0,63, os graus de saturação entre 64,4% e 90,6%, os teores de umidade entre 17% e 20,3% e os graus de compactação entre 80% e 90%. A espessura da camada foi medida em 20 pontos diferentes e os valores variaram entre 0,80 e 1,35 metros. Constatou-se baixas concentrações de biogás através do DMPC (0,1% a 7,6%). Na maior parte dos drenos foram identificadas baixas concentrações dos principais gases de efeito estufa encontrados no biogás (metano e dióxido de carbono), porém, em 02 drenos foram medidas concentrações consideráveis (17,5% e 56%). Ao final das análises constatou-se que atualmente cerca de 22,36% das emissões de gases chegam até a atmosfera através da camada de cobertura. Esses valores devem ter sido mais elevados durante o período de atividade do aterro, pois como constatado, em alguns pontos já não havia geração de biogás. Isso representa prejuízos econômicos e principalmente, um significativo dano ambiental.

Palavras-chave: aterro sanitário; camada de cobertura; fluxo de gases; placa de fluxo; retenção de gases; biogás.

ABSTRACT

The covering layers in landfills have as main objective the covering of the waste disposed there, thus avoiding several problems such as proliferation of vectors and bad smell. These layers are also responsible for isolating waste, preventing water from entering the massif, which would generate larger amounts of leachate, and preventing the gases generated in the organic matter biodegradation process from reaching the atmosphere in a disorderly manner. This research evaluates the efficiency of the covering layer used in the Municipal Sanitary Landfill of Caruaru regarding the retention of gases generated inside the waste mass. This landfill has stopped its activities since March 2018. The landfill cover layers are composed mostly of sandy material, unlike the clayey material usually adopted, therefore, it was decided to evaluate the consequences of the use of this type of material in the composition of the layers. The evaluation was initially carried out by a geotechnical characterization of the soil (classification, granulometry, degree of compaction, moisture, degree of saturation, void index, and layer thickness). In the field, 20 tests were carried out with a static flow plate so that the amount of gas that reached the surface through the cover layer could be quantified. The tests were carried out in 04 batteries, in 05 different points selected according to the age of the waste disposed there (02, 04, 06, 08 and 10 years, respectively). Due to the low emissions found in the plate tests, the generation of gases within the waste mass was also investigated through 20 pressure and concentration tests with the aid of the Pressure and Concentration Measurement Device (DMPC) and gas emissions were analyzed in 09 drains that were close to the points of the other field trials. According to the granulometric analysis of the material, 04 of the samples taken in the field were formed by sandy materials, namely: silty sand, clayey sand and well graded sand (rocky) and 01 sample presented a sandy clay. The void indexes were between 0.5 and 0.63, the saturation degrees between 64.4% and 90.6%, the moisture contents between 17% and 20.3% and the compaction degrees between 80% and 90%. The layer thickness was measured at 20 different points and values varied between 0.80 and 1.35 meters. Low concentrations of biogas were found through the DMPC (0,1% a 7,6%).). In most of the drains low concentrations of the main greenhouse gases found in the biogas were identified (methane and carbon dioxide), however, in 02 drains considerable concentrations were measured (17,5% e 56%). At the end of the analysis, it was found that currently around 22.36% of gas emissions reach the atmosphere through the cover layer. These values must have been higher during the landfill's period of activity, since, as noted, in some points there was no longer any biogas generation. This represents economic losses and, above all, significant environmental damage.

Keywords: landfill; cover layer; gas flow; static flow plate; gas retention; biogas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Fases de degradação e concentração dos gases.....	24
Figura 02 – Fases de biodegradação e evolução na geração dos gases no aterro.....	25
Figura 03 – Fluxograma do processo de digestão anaeróbia.....	26
Figura 04 – Fatores que afetam a geração de gases em aterros de RSU.....	29
Figura 05 – Relação entre o tempo de decomposição e a geração de gases de diferentes tipos de resíduo.....	30
Figura 06 – Perfil das camadas de uma célula de RSU.....	33
Figura 07 – Fluxo da camada de cobertura pela deformação angular.....	34
Figura 08 – Percolação em camadas de argila e camadas compostas.....	36
Figura 09 – Tipos de placas utilizados para o monitoramento de gases na superfície do aterro.....	39
Figura 10 – Ilustração de ensaios com sistema estático e sistema dinâmico.....	40
Figura 11 – Esquema da placa de fluxo.....	41
Figura 12 – Esquema do DMPC.....	42
Figura 13 – Dreno de gás.....	43
Figura 14 – Representação do transporte de uma substância no espaço e no tempo devido.....	45
Figura 15 – Mapa de localização do aterro.....	54
Figura 16 – Layout da primeira ampliação do aterro.....	55
Figura 17 – Aterro Sanitário Municipal de Caruaru.....	56
Figura 18 – Localização dos drenos no aterro.....	57
Figura 19 – Pontos de retirada das amostras de solo.....	59

Figura 20 –	Cravação dos anéis e preparação das amostras.....	60
Figura 21 –	Coleta das amostras de solo “ <i>in situ</i> ”	61
Figura 22 –	Locais dos ensaios com a placa de fluxo.....	63
Figura 23 –	Ensaio com a placa de fluxo.....	64
Figura 24 –	Esquema da localização dos drenos analisados.....	65
Figura 25 –	Realização da medição no dreno sem <i>flare</i>	66
Figura 26 –	Realização da medição no dreno com <i>flare</i>	67
Figura 27 –	Locais dos ensaios com o DMPC.....	68
Figura 28 –	Escavação e medição da espessura da camada de cobertura.....	69
Figura 29 –	Instalação do DMPC e medição das concentrações e da pressão.....	70
Figura 30 –	Instrumentos utilizados nos ensaios (Dräger e termômetro).....	71
Figura 31 –	Instrumentos utilizados nos ensaios (Manômetro e termo- anemômetro).....	71
Figura 32 –	Ensaio de placa A1.....	78
Figura 33 –	Ensaio de placa E1.....	79
Figura 34 –	Massa de CH ₄ durante o ensaio A1.....	81
Figura 35 –	Fluxo de CH ₄ durante o ensaio A1.....	81
Figura 36 –	Massa de CH ₄ durante o ensaio D1.....	82
Figura 37 –	Fluxo de CH ₄ durante o ensaio D1.....	82
Figura 38 –	Massa de CH ₄ durante o ensaio D4.....	83
Figura 39 –	Fluxo de CH ₄ durante o ensaio D4.....	83
Figura 40 –	Massa de CH ₄ durante o ensaio E2.....	84
Figura 41 –	Fluxo de CH ₄ durante o ensaio E2.....	84
Figura 42 –	Massa de CH ₄ durante o ensaio E3.....	85

Figura 43 – Fluxo de CH ₄ durante o ensaio E3.....	85
Figura 44 – Massa de CH ₄ durante o ensaio E4.....	86
Figura 45 – Fluxo de CH ₄ durante o ensaio E4.....	86
Figura 46 – Concentração nos drenos próximos aos ensaios da série A.....	88
Figura 47 – Concentração nos drenos próximos aos ensaios da série B.....	89
Figura 48 – Concentração nos drenos próximos aos ensaios da série C.....	89
Figura 49 – Concentração no dreno próximo aos ensaios da série D.....	89
Figura 50 – Concentração no dreno próximo aos ensaios da série E.....	90
Figura 51 – Fissuras na camada de cobertura.....	94
Figura 52 – Gráfico da produção anual de metano.....	95
Figura 53 – Curvas granulométricas dos solos analisados.....	96
Figura 54 – Ensaio de compactação – Amostra A.....	99
Figura 55 – Ensaio de compactação – Amostra B.....	99
Figura 56 – Ensaio de compactação – Amostra C.....	100
Figura 57 – Ensaio de compactação – Amostra D.....	100
Figura 58 – Ensaio de compactação – Amostra E.....	101
Figura 59 – Comparação entre as densidades secas e umidades de campo e laboratório.....	102
Figura 60 – Faixas dos graus de compactação das amostras.....	103
Figura 61 – Desvio de umidade (Δh) encontrado nos ensaios.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 –	Composição típica do biogás em aterros.....	23
Tabela 02 –	Teor de carbono orgânico em cada componente do RSU.....	51
Tabela 03 –	Composição gravimétrica – Caruaru.....	56
Tabela 04 –	Tipo e quantidade dos ensaios realizados em campo e em laboratório.....	58
Tabela 05 –	Identificação dos pontos de retiradas de solo.....	59
Tabela 06 –	Cronologia dos ensaios e condições climáticas locais.....	62
Tabela 07 –	Modelo de planilha utilizado nos ensaios de campo.....	64
Tabela 08 –	Cronologia e condições climáticas locais nos ensaios de concentração.....	69
Tabela 09 –	Características dos equipamentos utilizados nos ensaios de campo.....	72
Tabela 10 –	Estimativa da população do município por ano.....	73
Tabela 11 –	Índice pluviométrico de Caruaru (Posto Caruaru-IPA).....	74
Tabela 12 –	Resultado dos ensaios de placa de fluxo.....	78
Tabela 13 –	Faixa de fluxo e massa (médios) de CH ₄	80
Tabela 14 –	Fluxo e massa de CH ₄ e projeções de emissões.....	87
Tabela 15 –	Resumo dos ensaios nos drenos de gás.....	90
Tabela 16 –	Fluxo de metano nos drenos de gás.....	91
Tabela 17 –	Resultado dos ensaios com o DMPC.....	92
Tabela 18 –	Análise granulométrica das amostras.....	96
Tabela 19 –	Índices físicos do solo das amostras.....	97
Tabela 20 –	Condições de campo e resultado dos ensaios de compactação no laboratório.....	98

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....	18
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.2.1	Objetivo geral.....	19
1.2.2	Objetivos específicos.....	19
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	22
2.2	GERAÇÃO DO BIOGÁS EM ATERROS.....	23
2.2.1	Fundamentos da digestão anaeróbia.....	25
2.2.2	Fatores que influenciam na geração dos gases.....	27
2.2.3	Processo de biodegradação dos resíduos sólidos.....	29
2.3	CAMADAS DE COBERTURA.....	31
2.3.1	Tipos de camada de cobertura.....	32
2.3.1.1	Camadas de cobertura com argila compactada.....	34
2.3.1.2	Camadas de cobertura com solo e geossintético.....	35
2.3.1.3	Camadas de cobertura alternativas.....	36
2.4	MONITORAMENTO DE ATERROS SANITÁRIOS.....	38
2.4.1	Monitoramento de gases.....	38
2.5	PLACA DE FLUXO.....	40
2.6	DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO E CONCENTRAÇÃO.....	41
2.7	SISTEMA DE DRENAGEM DE GASES.....	42
2.8	MECANISMOS DE TRANSPORTES.....	44

2.8.1	Advecção.....	44
2.8.2	Difusão.....	47
2.9	EQUAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO FLUXO MÁSSICO DE GÁS.....	48
2.10	PARÂMETROS PREPONDERANTES.....	49
2.11	ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE BIOGÁS EM ATERROS.....	50
2.11.1	Composição gravimétrica dos resíduos.....	50
2.11.2	Coeficiente de destinação final dos RSU.....	51
2.11.3	Equação IPCC de estimativa da geração de metano.....	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA A SER ESTUDADA.....	53
3.2	CAMADA DE COBERTURA E SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE GASES.	57
3.3	CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO DO SOLO E DO RESÍDUO DO ATERRO.....	58
3.3.1	Amostragem de solo e cravação de anéis.....	59
3.3.2	Procedimentos de investigação <i>in situ</i>.....	61
3.3.2.1	Determinação de emissões fugitivas por placas de fluxo.....	61
3.3.2.2	Concentração e vazão de biogás nos drenos.....	65
3.3.2.3	Medição de pressão e concentração do biogás sob a camada de cobertura....	67
3.3.3	Instrumentação complementar.....	70
3.4	CÁLCULO DA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES TOTAIS DE BIOGÁS NO ATERRO.....	72
3.4.1	Dados populacionais.....	72
3.4.2	Condições climáticas.....	73
3.4.3	Geração de RSU por habitante e taxa de coleta.....	74
3.4.4	Composição gravimétrica dos resíduos.....	74

3.5	PROCEDIMENTOS DE INVESTIGAÇÃO EM LABORATÓRIO.....	75
3.5.1	Caracterização geotécnica do solo das camadas de cobertura.....	75
3.5.2	Ensaio de compactação.....	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS ENSAIOS.....	77
4.1	APRESENTAÇÃO.....	77
4.2	ENSAIOS DE CAMPO.....	77
4.2.1	Placa de fluxo estática.....	77
4.2.2	Fluxo de CH₄.....	80
4.2.3	Concentração e vazão de biogás nos drenos.....	88
4.2.4	Concentração e pressão do biogás no contato solo-resíduo.....	92
4.2.5	Estimativa da geração de biogás no aterro.....	94
4.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	95
4.3.1	Caracterização granulométrica.....	96
4.3.2	Índices físicos do solo.....	97
4.3.3	Compactação dos solos.....	98
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE FUTURAS PESQUISAS.....	105
5.1	CONCLUSÕES.....	105
5.1.1	Parâmetros geotécnicos do solo do aterro.....	105
5.1.2	Ensaio de placa de fluxo, concentração solo-resíduo e vazão nos drenos.....	105
5.2	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	108
	REFERÊNCIAS.....	109
	ANEXO I - ENSAIOS DE PLACA, DMPC E CURVAS GRANULOMÉTRICAS.....	120

1 INTRODUÇÃO

A disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um dos grandes desafios ambientais a serem enfrentados na atualidade pelos municípios (PAZ E FIRMO, 2018). Esse panorama é ainda pior em locais que passam por um processo acelerado de crescimento populacional, processo esse que acontece muitas vezes sem o devido planejamento.

A preocupação sobre o destino dado aos resíduos sólidos gerados é relativamente nova, sendo a Conferência de Estocolmo em 1972 a primeira reunião com os chefes de estado a tratar sobre o tema. Até então, na maioria dos casos, era escolhida para disposição desses resíduos uma área afastada e pouco habitada, sendo a distância da zona urbana o único critério. Porém, segundo Ribeiro e Mendes (2018) com o crescimento desses centros urbanos muitos desses locais que receberam resíduos, industriais ou urbanos, e que antes estavam afastados em áreas isoladas, vêm recebendo nos últimos anos empreendimentos imobiliários residenciais, como por exemplo a tragédia do morro do Bumba em Niterói-RJ, em 2010.

No Brasil, uma das maneiras ambientalmente adequadas para dispor o rejeito é o aterro sanitário (BRASIL, 2010), entretanto a disponibilidade de áreas ambiental e economicamente adequadas para a instalação de aterros sanitários é cada vez menor (MOREITA, BARBERI E OLIVEIRA, 2018).

Apesar de existir uma tendência mundial na diminuição da utilização de aterros sanitários como técnica final de disposição de resíduos, principalmente se tratando de países europeus, segundo a ABRELPE (2020), em 2019 no Brasil cerca de 59,5% dos resíduos receberam esse tratamento, enquanto, segundo o *The World Bank - TWD* (2012) no início dessa década, na Europa e nos Estados Unidos esses números já eram de 34% e 53% respectivamente.

Essas outras localidades por sua vez, praticamente erradicaram o uso de vazadouros a céu aberto, enquanto no Brasil isso ainda ocorre em muitos municípios. Segundo o relatório do Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco, o estado possui atualmente, cerca de 78 municípios com lixões ativos (TCE - PE, 2021), sendo que esta já era uma realidade que apresentava uma melhoria significativa em relação a anos anteriores. Ainda segundo esse relatório, isso correspondia a 43% dos municípios do estado, sendo esses responsáveis por aproximadamente 31% da geração de resíduos.

Segundo Jucá *et al.* (2005), os municípios têm como principal obstáculo para implantação de aterros sanitários, os custos para operação e manutenção, partindo do pressuposto que o aterro irá tratar de maneira adequada os gases e líquidos efluentes, além dos demais cuidados previstos nas normas técnicas.

Como forma de incentivo para que os municípios invistam em ações ambientais, o governo do estado estabeleceu o ICMS socioambiental através da Lei 11.899/00, que se trata de ajuda financeira que é repassada para as cidades que entre outras coisas, destinam seus resíduos para aterros sanitários. Para municípios pequenos, que tem uma baixa geração de RSU e que não possuam locais adequados para dispor seus resíduos, é proposto a formação de consórcios com cidades circunvizinhas que estejam nas mesmas condições, rateando assim os custos entre os consorciados.

Além de ser utilizado na destinação final de resíduos, os aterros sanitários também podem ser fontes geradoras de energia. É cada vez mais comum, que o biogás gerado na decomposição dos resíduos seja reaproveitado tendo em vista seu potencial energético. Mesmo a queima do biogás por si só já possibilita a redução do potencial de contaminação do ar e a liberação de gases de efeito estufa (GEE).

Uma outra maneira de se obter recursos a partir da disposição dos resíduos em aterros sanitários, é pela venda de créditos de carbono gerados pelo tratamento do biogás. Um dos principais componentes do biogás é o gás metano (CH_4), que segundo Mariano (2008) é o segundo maior contribuinte para o aquecimento global, atrás apenas do dióxido de carbono (CO_2), considerando apenas as emissões de GEE de origem antrópica. De acordo com Yvon-Durocher *et al.* (2014) estima-se que o CH_4 tenha um poder de aprisionamento de calor 30 vezes maior que o do CO_2 .

No ano de 1997, na cidade de Quioto no Japão, foi estabelecido um acordo internacional que trouxe compromissos mais rígidos para a redução na emissão de gases de efeito estufa o Protocolo de Quioto, como ficou conhecido, firmou diretrizes básicas para a implementação de medidas que pudessem conter o processo de degradação do meio ambiente e recuperar áreas degradadas. Com relação aos GEE, o Protocolo de Quioto apresentou três mecanismos que podiam ser usados para o cumprimento dos compromissos de redução nas emissões de gases, porém apenas um desses pode ser aplicado nos países em desenvolvimento, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Segundo Carvalho e Sobrinho (2017) o MDL tem o objetivo principal de ajudar os países em desenvolvimento a implantar novas tecnologias de preservação e recuperação ambiental, além de ajudar os países desenvolvidos a cumprir as suas metas de redução de emissões. Dessa maneira, os grandes poluidores assumem o pagamento de encargos que tem um custo inferior as mudanças que seriam necessárias nos processos operacionais para atingir as metas de redução de GEE.

Em setembro de 2015 a Organização das Nações Unidas – ONU, lançou um conjunto de 17 políticas denominadas Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que de forma resumida, visam melhorar a qualidade de vida da humanidade. Desses 17 objetivos, pelo menos 4 estão diretamente ligados a questão dos resíduos sólidos, sendo eles: Água potável e saneamento (ODS 6), Cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11), Consumo e produção responsáveis (ODS 12) e Ação contra a mudança global do clima (ODS 13).

Em novembro de 2021 ocorreu em Glasgow, na Escócia, a Conferência do Clima das Nações Unidas – COP26, que era vista como uma grande oportunidade para se definir ações que levariam o mundo a conter o impacto das mudanças climáticas a um aumento de 1,5 °C na temperatura média do planeta em comparação com o período pré-industrial. A reunião foi finalizada com a assinatura de um documento pelos países participantes que mantém essa meta viva apesar de não haver garantias. O Brasil se comprometeu a mitigar 50% de suas emissões de GEE até 2030, o que deve impactar diretamente a questão do biogás nos aterros.

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC (2021) fez estimativas das emissões globais de metano e os dados gerados apontam que fontes antropogênicas geram $4,0 \times 10^8$ t/ano de CH_4 , sendo que 5 a 20% (entre $2,0 \times 10^7$ e $8,0 \times 10^7$ t/ano) são oriundas de aterros sanitários.

Diante desse contexto, se torna importante o estudo do processo de decomposição da matéria orgânica presente no RSU, tendo em vista que a geração dos gases está diretamente ligada a esse processo e que suas emissões podem vir a afetar todo o ambiente. Os aterros sanitários para onde os resíduos são enviados, devem por sua vez, estar fundamentados nos critérios das normas técnicas de engenharia para que evitem a contaminação do solo, dos recursos hídricos ou do ar.

A emissão descontrolada do biogás não é só um grave problema de poluição atmosférica. Segundo Maciel (2003), a liberação desses gases pode causar efeitos que vão de um mau odor até possíveis doenças cancerígenas nas comunidades vizinhas ao local de emissão.

Nesse sentido, a camada de cobertura dos resíduos é, em geral, o principal item do projeto para eliminar ou amortizar os efeitos da emissão de gases, pois é este elemento que separa o ambiente interno, também chamado de maciço, e a atmosfera. Segundo Goldenberg e Reddy (2017), o conceito tradicional da camada de cobertura é que ela funcione como barreira de impermeabilização, estando entre os resíduos e o ambiente externo e evitando interação entre os dois, seja impedindo a infiltração de águas pluviais, seja evitando a liberação de gases para a atmosfera.

De maneira geral, a camada de cobertura é colocada diretamente sobre a camada de resíduos e é composta normalmente por solo argiloso, material considerado padrão devido sua baixa condutividade hidráulica saturada (entre 10^{-9} e 10^{-11} m/s). Porém, por este material nem sempre está disponível nas proximidades do aterro e por ter um elevado custo de manutenção, materiais alternativos têm se tornado objetos de estudos.

1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), promulgada em agosto de 2010, estabeleceu um prazo para a extinção dos lixões no território nacional (BRASIL, 2010). O limite que inicialmente era de 4 anos, vem sendo prorrogado a pedido dos municípios que não conseguiram cumprir as metas estabelecidas no PNRS. Porém, mesmo neste cenário de aparente procrastinação do poder público é notada uma certa melhoria no panorama geral do estado de Pernambuco diante do que foi apresentado em anos anteriores, visto que os municípios responsáveis pela maior parcela da geração de RSU já dispõem seus resíduos em aterros sanitários.

Com o fim das prorrogações se aproximando, mesmo que haja novas, acredita-se que em algum momento a situação dos lixões terá seu desfecho de maneira positiva. Então, é esperado que nos próximos anos, novos aterros sanitários sejam construídos para suprir essa necessidade, que em Pernambuco, ultrapassa a capacidade dos 22 aterros que existem no estado atualmente (CPRH, 2021).

No que diz respeito ao reaproveitamento do biogás, um ponto importante que deve ser avaliado é o quão eficiente é a camada de cobertura em relação a retenção dos gases gerados na massa de resíduos. Os materiais utilizados na cobertura dos resíduos são diretamente

responsáveis por essa eficiência (FRANQUETO, 2020). Em Pernambuco, de maneira geral, o material utilizado na cobertura é retirado de jazidas minerais próximas aos locais de disposição.

No Aterro Sanitário Municipal de Caruaru, um dos primeiros do estado, utiliza-se um material para cobertura de seus resíduos que é genericamente chamado de “piçarra ou piçarro”. É bem provável que aterros sanitários que não estiverem locados na Zona da Mata ou na Zona Metropolitana de Recife, utilize desse tipo de solo, que segundo Santos e Zaroni (2019), tem alta permeabilidade. Uma análise detalhada do material usado na camada de cobertura do Aterro Sanitário Municipal de Caruaru pode tanto esclarecer dúvidas quanto a eficiência da retenção do biogás nesse aterro, quanto em outros que usem materiais semelhantes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento da camada de cobertura final do Aterro Sanitário Municipal de Caruaru no que diz respeito as emissões de biogás.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar o fluxo de gases na camada de cobertura em diferentes pontos do aterro.
- Avaliar os parâmetros geotécnicos do solo da camada de cobertura final do Aterro Sanitário Municipal de Caruaru.
- Comparar as emissões de CH₄ pela camada de cobertura em relação as emissões através da drenagem de gás do aterro.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura desta dissertação foi dividida em 5 capítulos, conforme será descrito a seguir. Neste capítulo, foi apresentado a introdução, contendo as considerações iniciais, os objetivos (geral e específicos) e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, é apresentado a revisão da literatura acerca dos estudos relacionados aos resíduos sólidos; ao processo de geração de biogás e seus fundamentos, fatores que influenciam a sua geração e o processo de biodegradação dos resíduos; sobre as camadas de cobertura e os tipos existentes; acerca do tipo de monitoramento realizado no aterro sanitário onde essa pesquisa ocorreu e o equipamento utilizado no mesmo; sobre os mecanismos de transporte utilizado pelo gás e a equação para obtenção do fluxo mássico pela camada.

No Capítulo 3, é descrita a metodologia empregada neste trabalho. Esse capítulo contém um detalhamento da área estudada com todos os aspectos que precisaram ser considerados para uma melhor precisão dos resultados. Apresenta também como foi a execução de cada ensaio e as condições em que cada um foi realizado. Nesse capítulo são apresentados os instrumentos utilizados nos ensaios e a forma como os dados obtidos foram analisados para a obtenção dos resultados.

No Capítulo 4, são apresentados dados de cada ensaio e para cada um dos ensaios realizado, um gráfico foi elaborado para facilitar a visualização e interpretação dos resultados, a partir disso foi feita uma análise individual e em conjunto. As hipóteses para as causas dos resultados obtidos são apresentadas nessa parte do estudo. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados obtidos em outros estudos com a mesma temática. Algumas características do local do estudo foram observadas como possíveis causas para os resultados alcançados. Por conta da grande quantidade de gráficos elaborados a partir dos ensaios, somente os mais relevantes foram deixados nessa parte do estudo, apesar de utilizados nos cálculos e na construção das tabelas, os demais gráficos estão presentes na parte de anexos, após as referências.

No Capítulo 5, por fim, são apresentadas as principais conclusões obtidas ao longo do desenvolvimento deste trabalho a partir das observações dos resultados e das comparações com outros estudos sobre o tema, além de sugestões de para futuras pesquisas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Nos últimos anos, a preocupação com a coleta, destinação e tratamento dos resíduos sólidos gerados pela população têm crescido e esse tema tem sido cada vez mais debatido no meio político, social e acadêmico. No Brasil, têm-se encontrado dificuldades para solucionar de maneira satisfatória a situação em que se encontra o país. De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2019), em 2018 o país gerou um total de 78,4 milhões de toneladas de RSU, que representa um aumento de 1% em relação ao ano anterior. Desse total, 71,6 milhões foram coletados, registrando um índice de 91,2% de eficiência desse serviço. Sendo que a região Nordeste responsável por 20.254.580 toneladas e tendo uma eficiência na coleta de aproximadamente 79,1%.

No tocante à disposição final dos RSU coletados, ainda segundo a ABRELPE (2019), o panorama não demonstrou avanços em relação ao ano anterior, tendo enviado 40,9%, cerca de 29 milhões de toneladas para lixões ou aterros controlados, locais esses que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessárias para proteção do meio ambiente e degradações, podendo trazer danos diretos à saúde de milhões de pessoas. Os 59,1% dos resíduos coletados que tiveram destinação adequada foram em sua maioria para aterros sanitários.

Aterro sanitário é uma obra de engenharia projetada com critérios técnicos com a finalidade de garantir a disposição de resíduos sólidos sem causar danos à saúde pública, a segurança ou ao meio ambiente. No aterro sanitário os resíduos ficam completamente cobertos e confinados na menor área possível e os fluidos gerados são drenados até um local onde são tratados. A NBR 8419/1992 – ABNT (versão corrigida 2016) traz a seguinte definição sobre os aterros sanitários: “Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, que: previne danos à saúde pública; minimiza os impactos ambientais, pois utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível; reduz os resíduos ao menor volume permissível”.

Conforme observado por Marques Junior (2020), após o aterramento dos resíduos cria-se um ambiente isolado da atmosfera. Dentro desse ambiente predominantemente anaeróbio, acontecem uma série de interações físico-químicas e biológicas que, ao longo do tempo, dão

origem entre outras coisas, ao biogás. Contudo, o processo de geração dos gases é complexo, devido a diversidade de materiais e compostos presentes no RSU (KUMAR *et al.*, 2008; HAGOS *et al.*, 2017).

2.2 GERAÇÃO DO BIOGÁS EM ATERROS

O biogás originado da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, é um composto formado por diversos outros gases, entre eles: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), nitrogênio (N_2), entre outros, conforme demonstrado na Tabela 01. Observa-se que os gases com maior concentração são o metano e o dióxido de carbono.

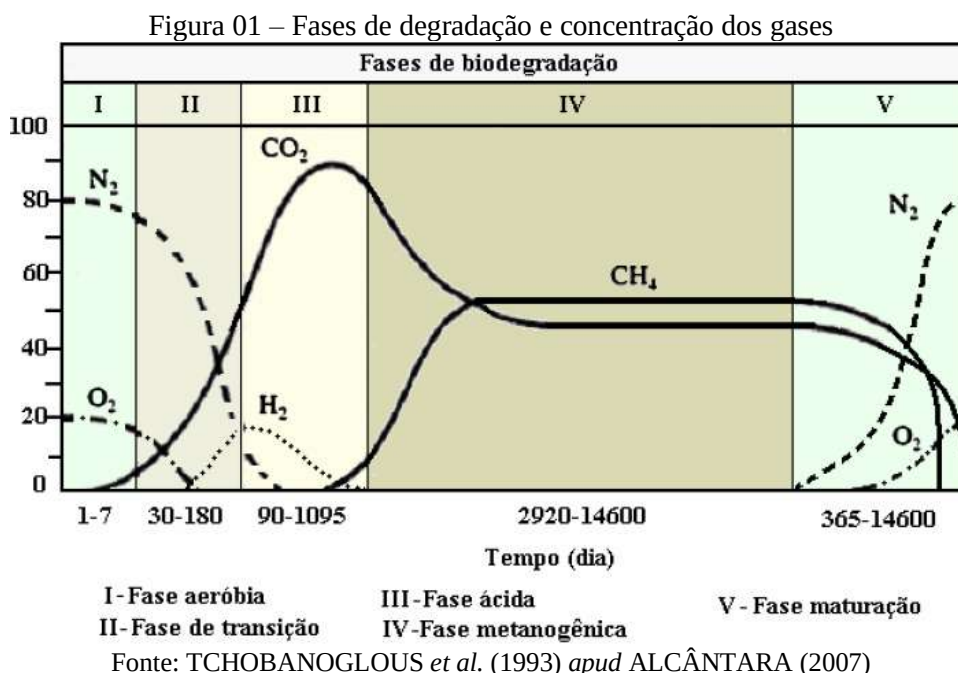
Tabela 01 – Composição típica do biogás em aterros.

Gás	Fórmula	% volume	
Metano	CH_4	45 - 60 ^(a)	40 - 70 ^(b)
Dióxido de carbono	CO_2	40 - 60	30 - 60
Nitrogênio	N_2	2 - 5	3 - 5
Oxigênio	O_2	0,1 - 1,0	0 - 3
Sulfeto de hidrogênio	H_2S	0 - 1,0	-
Amônia	NH_3	0 - 0,2	0 - 50
Hidrogênio	H_2	0 - 0,2	0 - 3
Monóxido de carbono	CO	0,01 - 0,6	0 - 1

Fonte: Adaptado de Alcântara (2007)

A evolução da concentração dos gases durante a vida do aterro pode durar mais de 30 anos (LIMA *et al.* 2018). Segundo Yvon-Durocher et al (2014), esses são os gases que mais contribuem para o aquecimento global, sendo que o CH_4 possui um poder de aprisionamento de calor 30 vezes maior que o CO_2 .

O processo de biodegradação geralmente está associado a cinco fases como demonstra a Figura 01. Verifica-se que além da composição dos resíduos, o estágio de decomposição é um fator determinante para a composição do biogás.

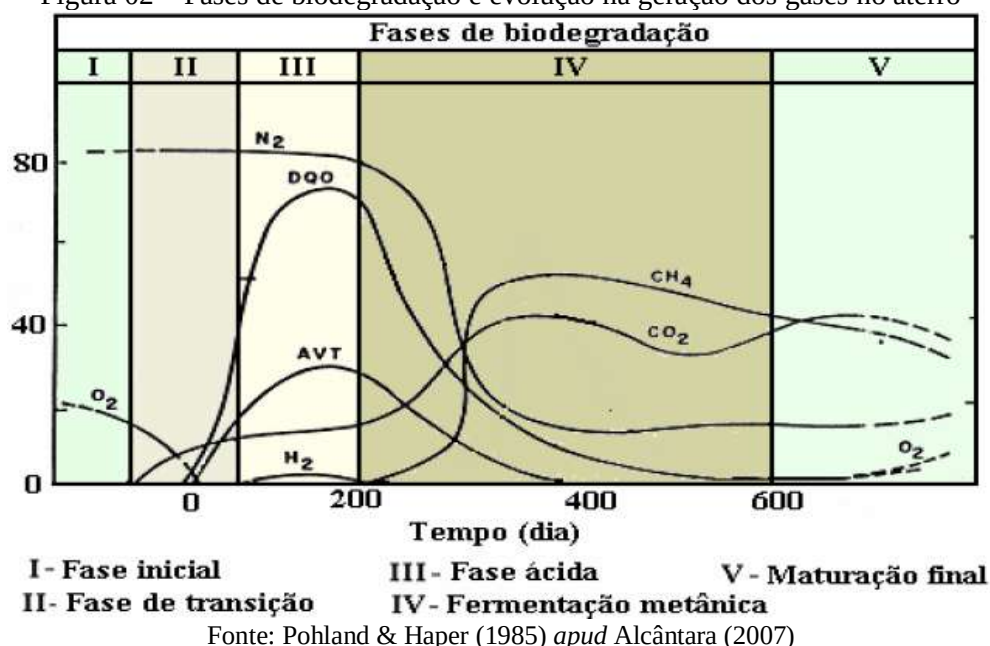


Na primeira fase, o CO_2 é produzido numa taxa proporcional ao consumo de O_2 , enquanto isso, o N_2 tem uma redução relativamente pequena. Na fase de transição, após a redução do oxigênio, as condições anaeróbias são estabelecidas e o consumo de nitrogênio se intensifica, nesse momento a geração de dióxido de carbono já é significativa, porém, nesse momento ainda não se tem geração de metano. Já na fase 3 (ácida), a geração de CO_2 aumenta e, em alguns casos, já há geração de metano. Na fase 4 (metanogênica), o processo de biodegradação já se encontra em estágio avançado, os organismos metanogênicos convertem os ácidos acético em CH_4 e CO_2 . Após a conversão de quase todo material biodegradável em CH_4 e CO_2 na fase metanogênica, inicia-se a fase 5 (maturação) que se caracteriza pela redução na geração dos gases e pelo retorno do N_2 e do O_2 .

Segundo Schalch (1992) *apud* Alcântara (2007), esse modelo foi sugerido por Farquhar & Rovers (1973) e inicialmente apresentava apenas as 4 primeiras fases e a fase de maturação teria sido sugerida posteriormente por Rees (1980).

Existem ainda outros modelos como o apresentado por Pohland & Haper (1985), que também propõe cinco fases de degradação, contudo, este modelo apresenta diferenças quanto a evolução na geração de CH_4 e CO_2 , conforme demonstra-se na Figura 02.

Figura 02 – Fases de biodegradação e evolução na geração dos gases no aterro

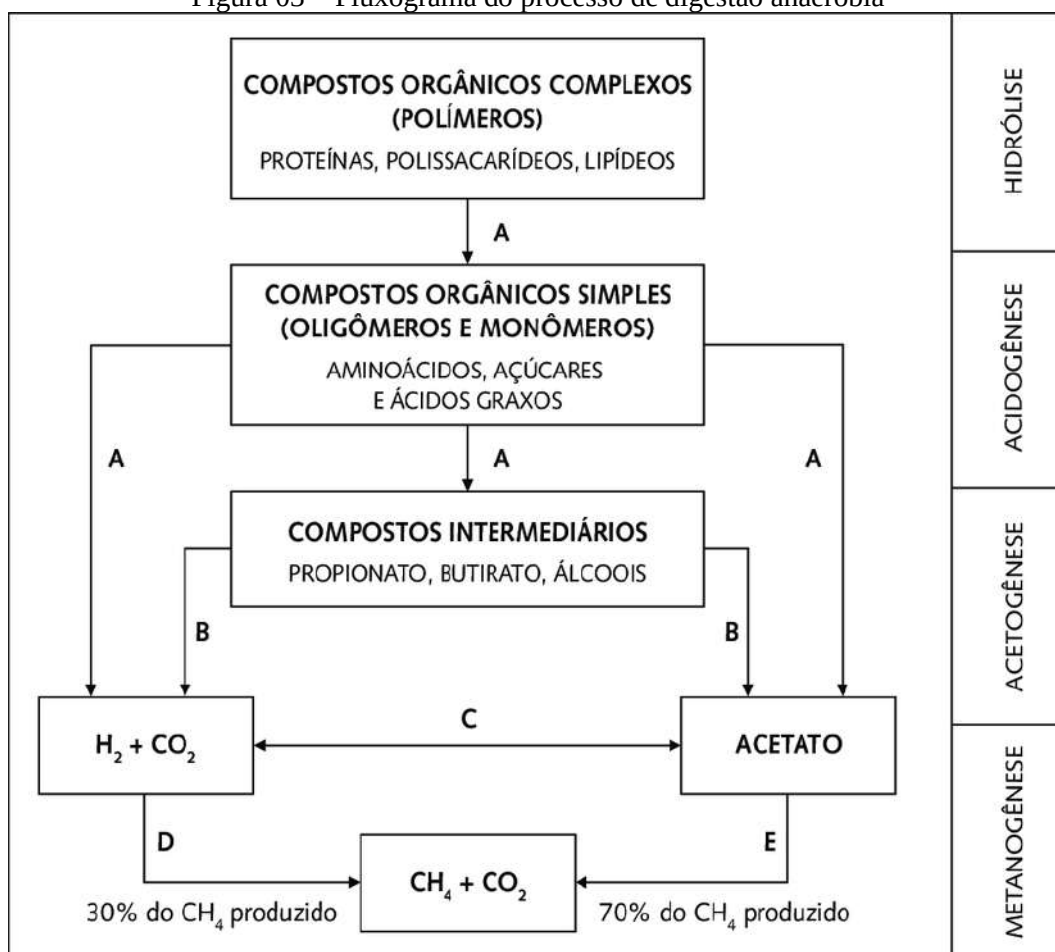


2.2.1 Fundamentos da digestão anaeróbia

Para Foresti (1994), a biodigestão anaeróbia consiste num processo que ocorre em ambientes livres de oxigênio, onde consórcios de microrganismos anaeróbios atuam de maneira simbiótica realizando a quebra de cadeias carbônicas complexas (polímeros), sintetizando-as em cadeias mais simples (monômeros).

O detalhamento do processo de biodegradação da matéria orgânica foi demonstrado por Szyłak-Szydłowski; Kornilowicz-Kowalska (2012), desde macromoléculas até o biogás, e nesse processo vários grupos diferentes de microrganismos se fazem presentes. A digestão anaeróbia da maior parte do material orgânico (proteínas, lipídios e carboidratos) pode ser dividida em quatro fases distintas, sendo elas a hidrólise, a acidogênese, a acetogênese e a metanogênese, conforme exposto na Figura 03.

Figura 03 – Fluxograma do processo de digestão anaeróbia



Fonte: Funes e Garcia (2012)

O primeiro objetivo no processo de digestão anaeróbia é a estabilização do material orgânico presente no substrato submetido ao tratamento, com consequentes redução dos odores, de massa, de volume e eliminação dos microrganismos patogênicos (SOARES, FEIDEN & TAVARES, 2017).

As quatro fases da digestão anaeróbia nas quais atuam os microrganismos seguem a seguinte ordem:

- 1) **Hidrólise ou fase fermentativa:** é a etapa inicial da digestão anaeróbia. Para realizar a quebra de substâncias orgânicas insolúveis e/ou complexas, alguns microrganismos secretam enzimas, chamadas de enzimas extracelulares. Os polímeros são transformados por elas em substâncias mais simples e com tamanho e formas suficientemente reduzidas para permear a parede celular e serem assimiladas pelos microrganismos.

- 2) Acidogênese: logo após a fase fermentativa, a acidogênese é caracterizada pela acidificação do ambiente anaeróbio, tendo em vista que os monômeros produzidos na hidrólise são convertidos em ácidos orgânicos de cadeia curta como ácido butírico, propanoico, acético e álcoois.
- 3) Acetogênese: nessa etapa, os produtos resultantes da acidogênese são utilizados pelos microrganismos como substrato para dar continuidade ao processo. Observa-se nessa fase altos teores de ácido acético, hidrogênio, dióxido de carbono, álcoois e produtos da degradação de ácidos graxos de cadeia longa.
- 4) Metanogênese: nessa fase, a última do processo anaeróbio, atuam as bactérias estritamente anaeróbias, denominadas Arqueas Metanogênicas, que se subdividem em acetoclásticas e hidrogenotróficas. As bactérias acetoclásticas produzem metano e dióxido de carbono a partir da conversão do acetato, num processo denominado, metanogênese acetoclástica. A outra reação, denominada metanogênese hidrogenotrófica, realiza a conversão utilizando o hidrogênio e o dióxido de carbono produzido nas fases anteriores. Do metano produzido nessa fase, cerca de 70% são obtidos através da metanogênese acetoclástica e os 30% restantes através da metanogênese hidrogenotrófica.

2.2.2 Fatores que influenciam na geração dos gases

Vários são os fatores que determinam as condições ideais para que a degradação microbiana dos resíduos proporcione um biogás rico em metano (ABBASI *et al.*, 2012). Entre eles estão:

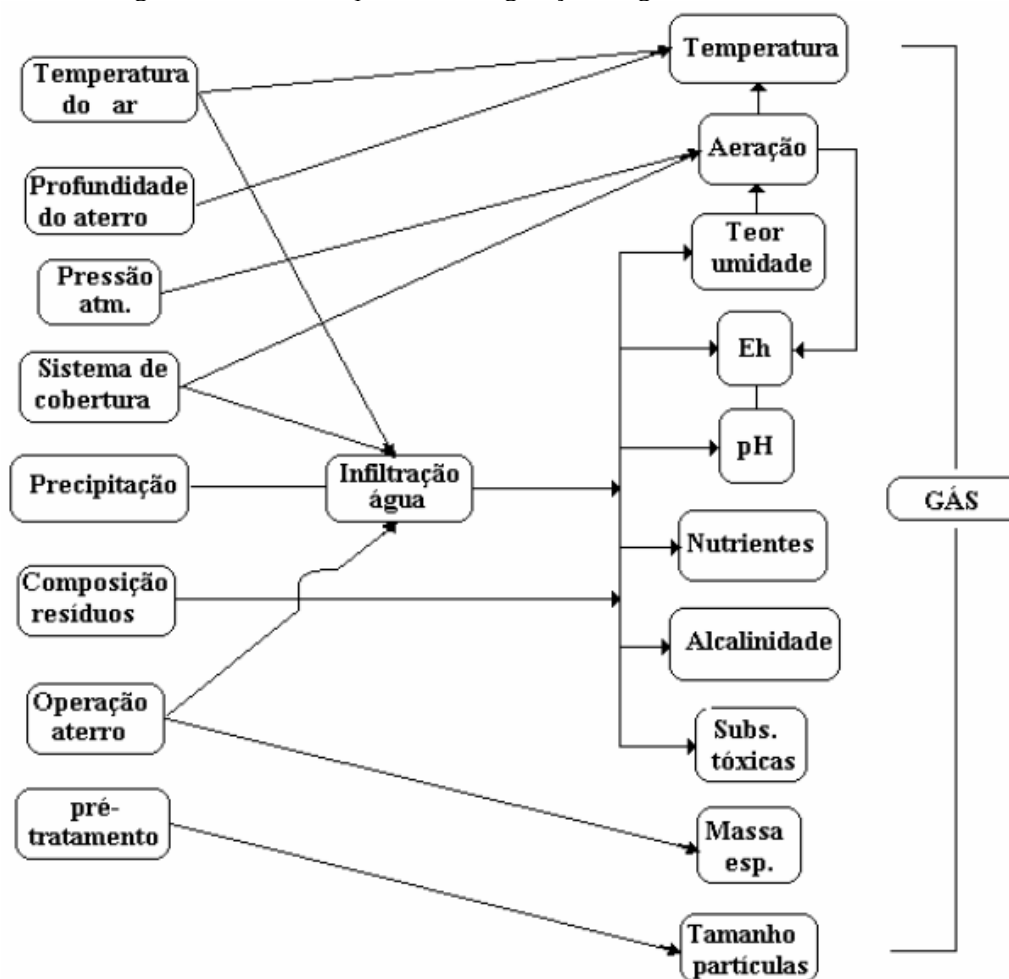
- 1) Superfície específica do substrato: quanto maior a superfície, maior será o contato do microrganismo com o substrato, e portanto, maior a facilidade e rapidez do processo digestivo.
- 2) Relação carbono/nitrogênio (C/N): segundo Yan *et al.* (2015), a proporção entre carbono e nitrogênio é um indicador importante para o controle do tratamento biológico da digestão anaeróbia. A proporção de carbono/nitrogênio considerada ideal é e 25:1 (ESTEVEZ *et al.*, 2012).
- 3) Teor de umidade: a umidade interfere diretamente na possibilidade de contato entre o microrganismo e o substrato assim como no contato substrato-substrato, contato esse,

indispensável para o acontecimento das reações químicas. Além disso, a umidade é essencial para a proliferação dos microrganismos responsáveis pelas reações (KLINK & HAM, 1982; ECK, 2000; AL SEADI, *et al.*, 2008; SAMIR, 2011)

- 4) Potencial hidrogeniônico (pH): Em um ambiente anaeróbio, o comportamento do pH se assemelha ao da temperatura. Os microrganismos presentes na hidrólise e na acidogênese agem sob um pH que varia entre 5,2 e 6,3 (FNR, 2010). Durante as etapas iniciais, há uma grande produção de ácidos orgânicos, o que faz com que o pH caia. Em seguida, com a digestão do nitrogênio, a concentração de amônia se eleva e ocorre assim uma elevação do pH ambiente. Quando a produção de metano se estabiliza, o valor do pH se localiza entre 7,2 e 8,2 (KHANAL, *et al.*, 2004; KIM *et al.*, 2004, AL SEADI *et al.*, 2008; ABBASI *et al.*, 2012).
- 5) Temperatura: Esse fator é um dos que mais influenciam a estabilidade e o desempenho do processo de digestão anaeróbia (LIN *et al.*, 2016). Convencionalmente, na biodigestão anaeróbia, a zona de temperatura mesofílica está situada em temperaturas que variam entre 35-37°C (KIM *et al.*, 2004). Na zona termofílica, a temperatura ideal é 55°C. Contudo, no tocante ao balanço energético, quando feita uma comparação entre as condições termofílica e mesofílica, vê-se que a mesofílica apresenta-se como alternativa mais vantajosa ante a termofílica. É possível mencionar isto, devido às condições termofílicas apresentarem maior dificuldade de controle do processo anaeróbio, além de exigirem maior quantidade de energia na forma de calor, para manutenção da temperatura elevada dos biorreatores (AL SEADI *et al.*, 2008; SAMIR, 2011; ABBASI *et al.*, 2012).
- 6) Ácidos Graxos Voláteis (AGV): este parâmetro indica a ocorrência de estabilização no processo de digestão anaeróbia. Os ácidos graxos voláteis são produzidos durante a fase acidogênica e a instabilidade do processo anaeróbio causa uma acumulação desses componentes, isso por sua vez resulta num decaimento do pH, tornando o ambiente ácido, desfavorável à fase metanogênica (AL SEADI *et al.*, 2008; LEE *et al.*, 2014; SILAS, 2015).

Existem ainda outros fatores que influenciam a geração de gases nos aterros sanitários, destacam-se entre eles a disponibilidade e tipo de microrganismos e a presença de inibidores microbianos, além de fatores externos tais como geometria e operação do aterro, conforme mostrado na Figura 04.

Figura 04 – Fatores que afetam a geração de gases em aterros de RSU

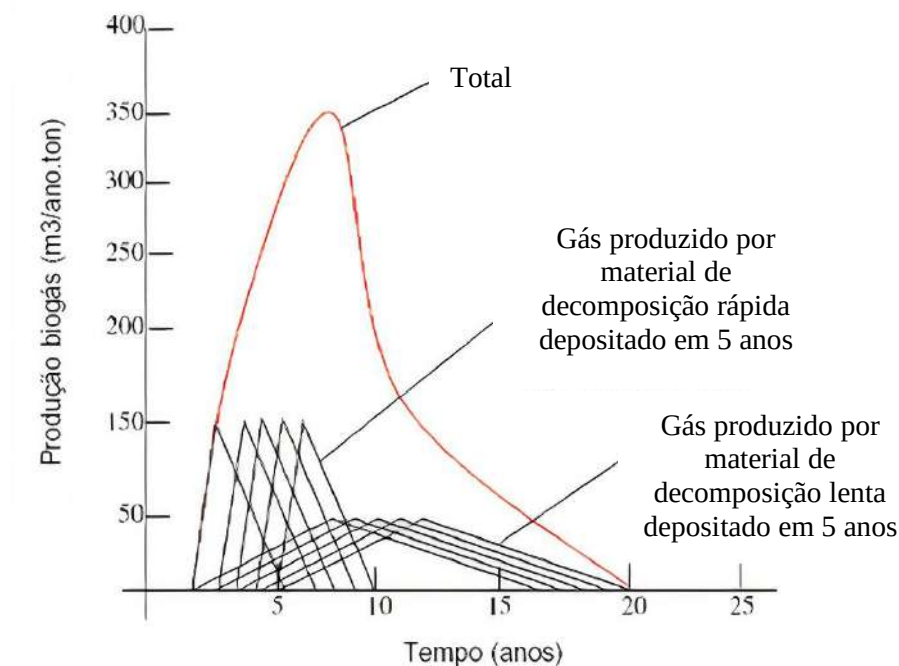


Fonte: (Adaptado de MCBEAN & FARQUHAR, 1980; REES, 1980 *apud* ALCÂNTARA, 2007)

2.2.3 Processo de biodegradação dos resíduos sólidos

A biodegradação dos RSU, se dá num processo deveras longo, devido as diferentes taxas de decomposição dos diferentes resíduos existentes na massa que chega até o aterro (CASTILHO JR. *et al.*, 2003), conforme apresentada na Figura 05.

Figura 05 – Relação entre o tempo de decomposição e a geração de gases de diferentes tipos de resíduo



Fonte: Alves (2008)

Segundo Maciel (2003), há vários fatores que afetam a velocidade com que a biodegradação dos resíduos acontece, entre eles deve-se considerar:

- Características iniciais dos resíduos

Quanto a velocidade com que os resíduos se degradam, pode-se classificá-los como materiais de degradação rápida ou lenta. A matéria orgânica de degradação rápida, por exemplo, pode levar entre 3 e 15 meses para completar este processo e a umidade do resíduo é um fator determinante na velocidade das reações.

- Geometria e operação do aterro

A compactação, as dimensões e impermeabilização, são fatores relacionados a biodegradação dos resíduos. Quanto mais alta for a camada de resíduos, menor a influência da fase aeróbia na decomposição. Essa fase se dá com o oxigênio que fica aprisionado nas células. As reações de oxidação se dão principalmente nos primeiros cinco metros de profundidade, contados a partir da camada mais alta. A impermeabilização diminui a entrada de água e ar na

massa de resíduos, que por sua vez, reduz a influência do ambiente externo na biodegradação. A compactação dos resíduos também dificulta a entrada de ar e água, porém, também aumenta a concentração de gases por metro cúbico e dificulta a saída dos gases do interior da célula.

- Ambiente interno

Segundo KUNZ *et al.* (2019), entre as condições que favorecem a produção de biogás no interior da massa de lixo estão, valores de umidade entre 40% e 60%, pH neutro, temperaturas que possibilitem a atividade microbiana mesofílica (entre 35 °C e 45 °C), a disponibilidade de macronutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P) e micronutrientes como potássio (K) e manganês (Mn), além da presença de bactérias metanogênicas. Por outro lado, um aumento nas concentrações de salinidade e metais pesados podem inibir o processo de biodegradação dos resíduos.

- Ambiente externo

Os fatores externos como a temperatura do ar e o índice pluviométrico por exemplo, são fatores que podem influenciar no processo de biodegradação dos resíduos. Quando a água das precipitações consegue se infiltrar na célula, ela leva consigo oxigênio dissolvido. No que se refere a temperatura, quando há grandes diferenças entre o interior da célula e o ambiente externo cria-se um gradiente de temperatura favorável para troca de energia e o grupo de bactérias metanogênicas é sensível as mudanças desses fatores, podendo assim haver redução na formação de metano.

2.3 CAMADAS DE COBERTURA

O sistema de cobertura final é usado para separar os resíduos do meio ambiente através de uma camada de material disposto e compactado sobre os resíduos. As camadas de cobertura finais atuam para evitar que o biogás chegue até a superfície e a água das chuvas se infiltre na massa de resíduos, reduzindo assim a geração de lixiviado (Chabuk *et al.*, 2018).

Para que sua finalidade seja alcançada, as camadas de cobertura são, sempre que possível, compostas por materiais argilosos. Esses materiais possuem geralmente baixa

permeabilidade à água (10^{-9} m/s ou menos) e boa resistência a intempéries, porém, quando dispostos sobre RSU a camada de material que compõe a camada deve ter pelo menos 0,5 m de espessura. Esses materiais possuem um bom desempenho em locais com clima mais úmido, porém, em locais com clima árido a argila pode formar micro e macro fissuras (EPA, 2003).

A boa execução da camada ainda depende de alguns fatores como a boa compactação e a umidade do material que deve estar entre 100% e 102% (JESSBERGER & STONE, 1991 *apud* MARIANO, 2008).

Tendo em vista que o processo de geração dos gases é predominantemente anaeróbio, a entrada de ar na massa de resíduos pode prejudicar esse processo. O crescimento de vegetação com raízes que causem fissuras na camada pode reduzir significativamente sua permeabilidade (em até 3 ordens de grandeza) e consequentemente seu poder de retenção de gases e líquidos.

O nordeste brasileiro possui uma área significativa onde o clima é predominantemente árido. O agreste pernambucano é um exemplo disso, como fator agravante têm-se na região um histórico de disposição inadequada de RSU e a presença de vazadouros ainda é frequente em muitos locais. Nesses casos, a camada de cobertura é o único elemento que evita o total contato dos resíduos com o meio ambiente.

2.3.1 Tipos de camada de cobertura

Segundo Costa (2015), as camadas de cobertura se dividem basicamente em dois tipos: as convencionais e as alternativas. As convencionais são aquelas compostas por solo natural na sua totalidade ou por camadas de solo natural e de geossintético (geralmente na camada mais alta). As camadas alternativas são compostas por misturas de solos com outros materiais, com exceção dos geossintéticos, que geralmente visam melhorar as propriedades originais do solo utilizado.

O principal fator para utilização de camadas de coberturas alternativas ao invés das convencionais são as particularidades de cada localidade. As pesquisas de Fourie e Moonsammy (2002) revelam que em climas áridos e semiáridos, a eficiência das camadas convencionais é prejudicada devido ao surgimento de fissuras que ocorrem nos longos períodos de estiagem. Além disso, em vários locais onde estão situados os aterros sanitários há dificuldade de ter acesso a uma jazida de solos naturais argilosos e muitas vezes transportar

material da jazida mais próxima seria financeiramente inviável. Porém, independente do material escolhido para compor a camada de cobertura, a NBR 13896/97 estabelece como valor máximo de condutividade hidráulica saturada para a impermeabilização de 10^{-8} m/s, valendo salientar que a norma não estabelece o tipo de material a ser utilizado, características geotécnicas ou mesmo espessura da camada.

A espessura da camada em geral varia de acordo com a situação e com o tipo de material que será utilizado, tendo que ser levado em conta as intempéries que atingem o local. Em todos os casos, algo que irá auxiliar quanto a resistência as intempéries e proteção do sistema de impermeabilização é o emprego de vegetação sobre a camada de cobertura final. A escolha do tipo de vegetação a ser usada deve sempre que possível utilizar espécies locais, por apresentarem uma maior adaptação as características climáticas da região, além de outras condições como solo, relevo e altitude. O uso de vegetação rasteira, em especial gramíneas, é muito comum por apresentarem além dos benefícios anteriormente citados, uma melhoria considerável na parte estética do aterro. A Figura 06 apresenta um modelo com a camada de cobertura de argila compactada, com uso de geossintético e com a cobertura vegetal.

Figura 06 – Perfil das camadas de uma célula de RSU



Fonte: Adaptado de EPA (2003)

Como pode-se observar na imagem, a camada de material que fica entre as camadas de RSU é consideravelmente mais fina que a camada final. Segundo Araújo (2017), as camadas intermediárias precisam ter entre 10 cm e 20 cm, pois elas possuem, além da função de evitar a infiltração de líquidos advindos do ambiente externo e a saída dos gases gerados no interior do maciço, a função de dar estabilidade ao maciço por servir como elemento separador entre as camadas de RSU.

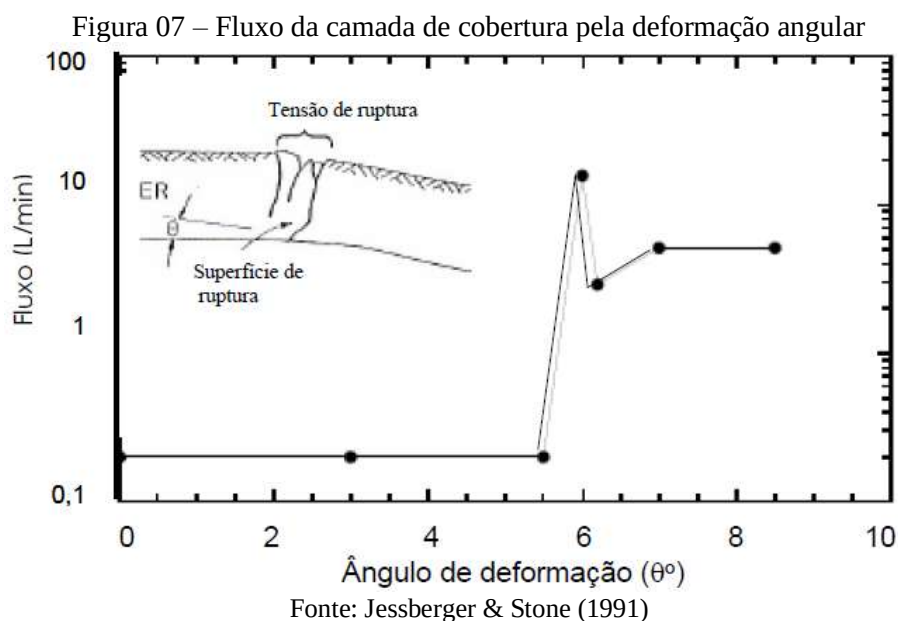
2.3.1.1 Camadas de cobertura com argila compactada

As primeiras camadas de cobertura usadas em aterros sanitários eram constituídas basicamente por argila compactada. A argila compactada funciona de maneira similar a um sistema composto de solo e geomembrana, possuindo baixa condutividade hidráulica e consequentemente alto teor de umidade.

Um estudo realizado por Melchior (1997) constatou que a camada quando composta por materiais argilosos podem sofrer grave fissuração em períodos de estiagem, sendo as raízes de plantas usadas para cobertura vegetal um agravante por penetrarem toda a profundidade da camada. Essas alegações serviram de base para Zornberg *et al.* (2003) afirmar que em regiões áridas o sistema de cobertura de resíduos composto por argila não funcionar adequadamente.

Em regiões onde ocorrem geadas também ocorrem danos na camada de cobertura composta por argila compactada. Nesses casos são a secagem induzida, a movimentação de uma frente de congelamento para baixo e a formação de lentes de gelo os culpados pelas fissuras (OTHMAN *et al.*, 1994). Os danos causados por geadas geralmente ocorrem após três geadas e o aumento na condutividade hidráulica fica em 3 ordens de grandeza (BENSON *et al.*, 2001).

A figura 07 apresenta o aumento do fluxo através de uma camada que sofreu ruptura.



Outro fator que pode interferir no desempenho da camada de cobertura são os recalques diferenciais na massa de resíduo. Devido a heterogeneidade do material, os recalques podem

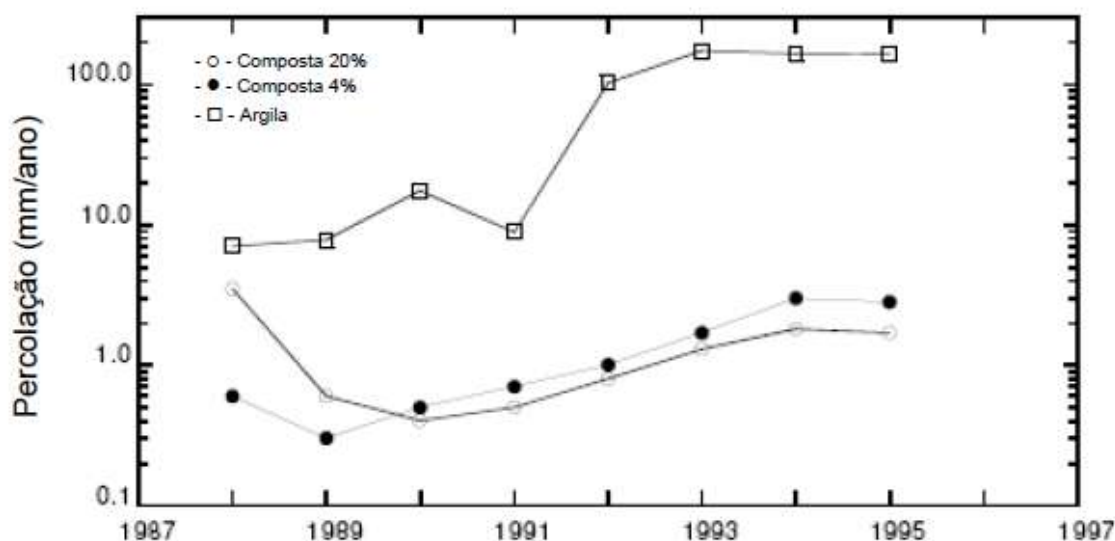
variar entre 5% e 30% e esses recalques afetam a integridade da camada de cobertura gerando rachaduras já que a argila compactada possui baixa resistência ao cisalhamento. Se a distorção (recalque diferencial dividido pelo comprimento ao longo da barreira) for maior que 9,5% haverá fissuras na camada de argila compactada e consequentemente um aumento na permeabilidade da camada, como exposto na Figura 07. Uma maneira de prevenir os efeitos nocivos de uma alta distorção é fazendo uso de geotêxteis ou geomembrana, além do monitoramento da camada de cobertura (JASSBERGER & STONE, 1991 *apud* MARIANO, 2008).

2.3.1.2 Camadas de cobertura com solo e geossintético

O método de camadas composta (argila e geomembrana) apresenta uma alta eficiência na retenção dos gases no interior da massa de resíduos e na impermeabilização da camada referentes a percolação de líquidos para o seu interior, o contato da geomembrana com a argila compactada favorece ambos, pois a geomembrana tem um menor índice de condutividade hidráulica enquanto a camada de argila protege e sela possíveis falhas na geomembrana. Segundo Eweis *et. al* (2018), as geomembranas possuem baixíssima permeabilidade (10^{-12} cm/s) e são fabricadas a partir de resinas virgens e aditivos que incluem termo estabilizantes e antioxidantes que aumentam significativamente a resistência as intempéries.

A geomembrana de PEAD (polietileno de alta densidade) é hoje a mais utilizada em obras de impermeabilização de aterros sanitários e lagoas de estabilização para tratamento de efluentes por possuir elevada resistência aos agentes químicos e biológicos causado pela exposição aos resíduos, em relação aos outros materiais empregados na fabricação de geomembranas (BATHURST *et al.*, 2005). Na Figura 08 está demonstrada uma comparação entre uma camada de argila e uma camada composta em relação a eficiência da impermeabilização referente à percolação.

Figura 08 – Percolação em camadas de argila e camadas compostas



Fonte: Melchior (1997) *apud* Mariano (2008)

Estudos realizados anteriormente aos de Melchior (1997), como o de Montgomery e Parsons (1989), também chegaram as mesmas conclusões, com as camadas compostas atingindo valores de percolação com duas ordens de magnitude menor que os resultados obtidos pelas camadas de cobertura de argila compactada.

2.3.1.3 Camadas de cobertura alternativas

O uso de camadas de cobertura alternativas ainda não é uma prática difundida. Entretanto, a reutilização de resíduos industriais como adições alternativas dentro da engenharia civil vem ganhando bastante espaço e sendo objeto de vários estudos, visando sempre ganhos ambientais por minimizar problemas de geração e disposição somados a melhoria de características da matriz onde o resíduo é incorporado. Contudo, as camadas alternativas devem, no mínimo, alcançar a mesma eficiência das camadas padrões para que seu uso seja justificado e o tipo de camada a ser utilizado deve atender o critério de ser a mais adequada para a região do aterro em questão (SHACKELFORD *et al.*, 2006).

Segundo Simon & Müller (2004), alguns materiais como papéis e resíduos da construção civil tem sido alvo de estudos como materiais alternativos para camada de cobertura, porém o uso desses materiais tem gerado controvérsia e seu uso ainda se limitar a sistemas

provisórios. Outros materiais alternativos utilizados são: GCL (geocomposto bentonítico), uma mistura de argila, bentonita e polímeros conhecida comercialmente como *Trisoplast*, cimento asfáltico e barreiras capilares.

Solos de granulometria mais finas contem a capacidade de armazenar água em seus vazios, essa água pode por sua vez, ser absorvida pela vegetação. As camadas de cobertura que possuem essas características são denominadas evapotranspirativas. O projeto desse tipo de camadas deve envolver a seleção de um solo que armazene água, sem que haja percolação pela base e de uma vegetação que remova de maneira eficaz a água armazenada no perfil (ZORNBERG E McCARTNEY, 2006).

A vegetação utilizada em nesse tipo de camada tem a função de aumentar a evapotranspiração durante sua fase de crescimento, sendo esse sistema mais utilizado em solos de baixa condutividade hidráulica. Além de diminuir a percolação, a vegetação fornece mais estabilidade aos taludes. Segundo Zornberg e McCartney (2006), o desempenho dessas camadas é similar ao de camadas convencionais, em especial em locais de clima árido ou semiárido e seu custo principal é com a vegetação, sendo no geral, relativamente baixo quando comparado com camadas de argila.

Quando há presença de bactérias metanotróficas na camada de cobertura pode ocorrer a oxidação do metano que chega até o ambiente externo. Nesses casos, essas camadas denominadas oxidativas, servem como biofiltros, funcionando como uma barreira biológica. Dentre os fatores que podem influenciar este processo e a velocidade com que o mesmo ocorre estão as concentrações de nutrientes e água no solo, a concentração de metano na camada, a umidade do ar, temperatura, pressões atmosférica e barométrica e características do solo como porosidade, espessura da camada, teor de matéria orgânica entre outros (BERGUER *et al.*, 2005).

No seu estudo, Santos (2015) constatou que uma camada de cobertura alternativa com 60 cm de espessura, sendo 30 cm de solo natural e os outros 30 cm de uma mistura de solo-composto numa proporção de 3:1 apresentou bons resultados, com a condutividade hidráulica abaixo dos 10^{-8} e maior capacidade de retenção de água e resistência ao cisalhamento.

2.4 MONITORAMENTO DE ATERROS SANITÁRIOS

Para que um aterro sanitário possa operar corretamente, sem causar impactos ambientais negativos, é necessário que haja um monitoramento regular e periódico de parâmetros físicos, químicos e biológicos. Pela dificuldade de monitorar todos os aspectos de um aterro, levando em conta toda sua área de influência é comum que, baseado nas exigências legais feitas pelos órgãos fiscalizadores, sejam escolhidos alguns aspectos como prioritários (ALCÂNTARA, 2007).

Para Santos (2011), os parâmetros que normalmente são avaliados nos aterros estão relacionados aos efluentes líquidos e gasosos e aos próprios resíduos sólidos. Essas observações se dão por análises realizadas *in situ* ou através da coleta de amostras para análises em laboratório.

2.4.1 Monitoramento de gases

A geração de gases dentro do maciço de uma célula acontece pelo processo de decomposição da matéria orgânica em um meio anaeróbio. O monitoramento desses gases analisa a evolução desse processo, além de estimar a geração total de gases, a possibilidade do aproveitamento do biogás para geração de energia e emissão de gases liberados para a atmosfera através da camada de cobertura. As medições acontecem no interior do maciço, na superfície do aterro e nos vazios do solo utilizado na camada de cobertura e no entorno do aterro (LOPES, 2011).

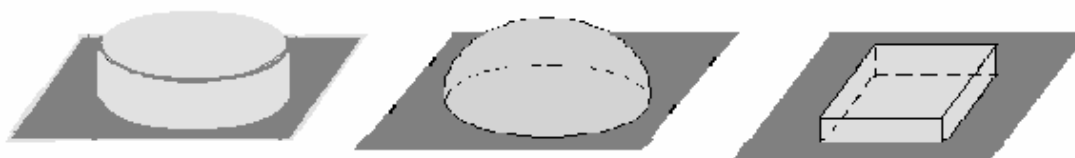
O monitoramento realizado no entorno do aterro tem como principal objetivo verificar se há migração de gases, principalmente metano, para áreas externas. Segundo Tchobanoglous *et al.* (1993), se houver concentrações de metano no ar entre 5% e 15%, já existe risco de explosões. O monitoramento se dá através de sondas ou poços escavados em zonas não saturadas.

O processo de monitoramento no interior da massa de resíduos pode ser feito através de piezômetros. Os piezômetros do tipo Vector são recomendados por possibilitarem a verificação dos gases e dos líquidos separadamente (CEPOLLINA *et al.*, 1994; ANTONIUTTI NETTO *et*

al., 1995). As medições são realizadas *in situ* de maneira periódica e levadas para análise em laboratório. Os resultados das análises permitem o acompanhamento da evolução no processo de degradação da matéria orgânica. É possível determinar no local alguns parâmetros tais como as concentrações de CH₄, CO₂, O₂, CO e H₃S. Para isso é necessário o uso de equipamentos dotados de sensores que realizem tais aferições, como por exemplo: cromatógrafos portáteis. Contudo, para medições mais precisas se recomenda análises laboratoriais.

Para avaliar a eficiência na retenção de gases da camada de cobertura do aterro sanitário, são realizados ensaios na superfície do aterro com equipamentos denominados placas de fluxo, conforme exposto na Figura 09. Essas placas interceptam os gases na superfície do aterro e os retêm em câmaras que podem ter formato cilíndrico, prismático ou cúbico.

Figura 09 – Tipos de placas utilizadas para o monitoramento de gases na superfície do aterro



Fonte: Maciel (2003)

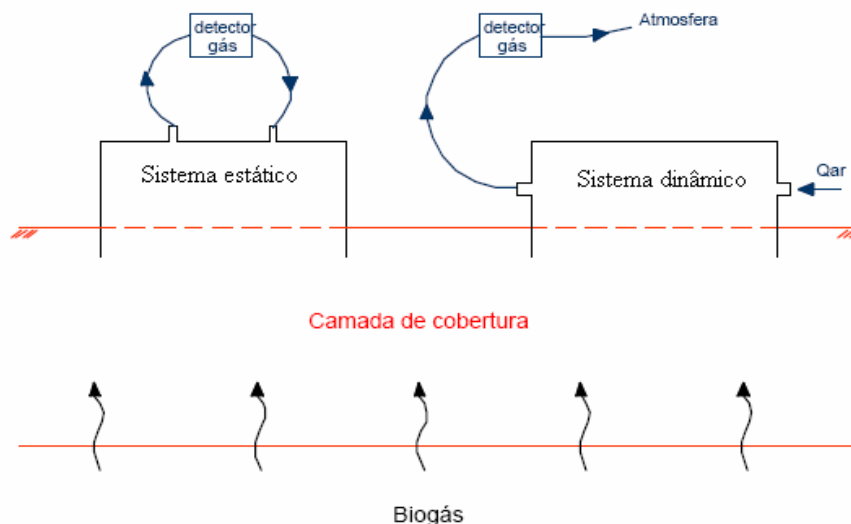
O ensaio de placas pode ser feito por dois métodos: estático e dinâmico, conforme ilustrado na Figura 10. No método estático os gases que entram no interior da câmara passam pelo detector de gás e após isso retorna para a câmara. No método dinâmico, há um fluxo de gás entrando na câmara junto com os gases da camada de cobertura e após passar pelo detector de gás essa mistura é lançada na atmosfera. O método dinâmico requer um maior tempo para realizar o ensaio, além de exigir uma boa calibração baseada no volume interno da câmara e no nível de emissão superficial (COSSU *et al.*, 1997 *apud* LOPES, 2015). Por sua vez, o método estático é mais simples e rápido, sendo mais apropriado para aterros sanitários e locais onde serão necessários vários ensaios em um curto período. No ensaio estático o fluxo pode ser determinado pela equação 2.1 (CZEPIEL *et al.*, 1996 *apud* MOREIRA *et al.*, 2020).

$$F = \frac{V}{A} \cdot \rho \cdot \frac{dC}{dt} \text{ (K} \cdot \text{M}^{-2} \cdot \text{T}^{-1}) \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde:

F = fluxo de gás ; V = volume da câmara (m^3); A = área de captação do gás (m^2); ρ = densidade do gás (kg/m^3); dC/dt = variação da concentração do gás (% volumétrica) com o tempo (s).

Figura 10 -Ilustração de ensaios com sistema estático e sistema dinâmico.



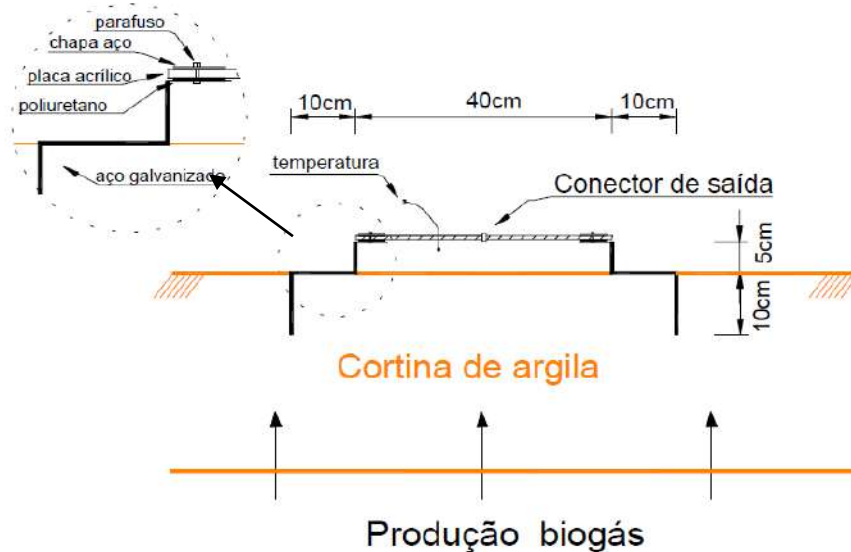
Fonte: (MACIEL, 2003)

2.5 PLACA DE FLUXO

A placa de fluxo é um equipamento constituído por chapas de aço galvanizado com 2 mm de espessura na lateral e por uma placa de acrílico cristal de 8 mm de espessura no topo. A parte de acrílico é fixada na parte de aço por dois parafusos em cada uma das laterais com uma pequena chapa de aço utilizada para distribuir uniformemente a pressão dos parafusos. Para evitar possíveis vazamentos a placa ainda possui uma espuma de poliuretano de alta densidade entre a placa de acrílico e a chapa de aço galvanizado conforme é exposto na Figura 11.

Segundo Maciel (2003), o design da placa foi concebido com o intuito de evitar a entrada de ar atmosférico induzido pelo vento no interior do aparelho, para tal, há um “degrau” na parte superior do dispositivo. Desta maneira o volume total do equipamento é de 44 litros, sendo 36 litros da parte inferior e 8 litros da parte superior (degrau).

Figura 11 – Esquema da placa de fluxo



Fonte: Adaptado de Maciel (2003)

2.6 DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO E CONCENTRAÇÃO

Os dispositivos de medição de pressão e concentração (DMPC) são dispositivos fabricados a partir de tubos de PVC (Policloreto de vinila) com cerca de 0,127 m de diâmetro e com um Cap (tipo de tampão para tubulações) do mesmo material na extremidade superior. No Cap há uma saída pela qual passa um tubo flexível de cerca de 8 mm. Nesse tubo flexível são instalados os equipamentos que realizarão as medições de concentração (Dräger) e pressão (manômetro). A extremidade inferior do DMPC há uma tela de aço para evitar a obstrução do equipamento quando em contato com o resíduo.

Na Figura 12 está apresentado um esquema do DMPC. Pode-se observar que o DMPC é um equipamento mais versátil que a placa de fluxo devido suas dimensões reduzidas e por conta de sua leveza, graças ao material que o compõe. Portanto, os ensaios realizados com o DMPC podem ser locados em locais onde a placa de fluxo teria dificuldades em ser instalada.

Figura 12 – Esquema do DMPC

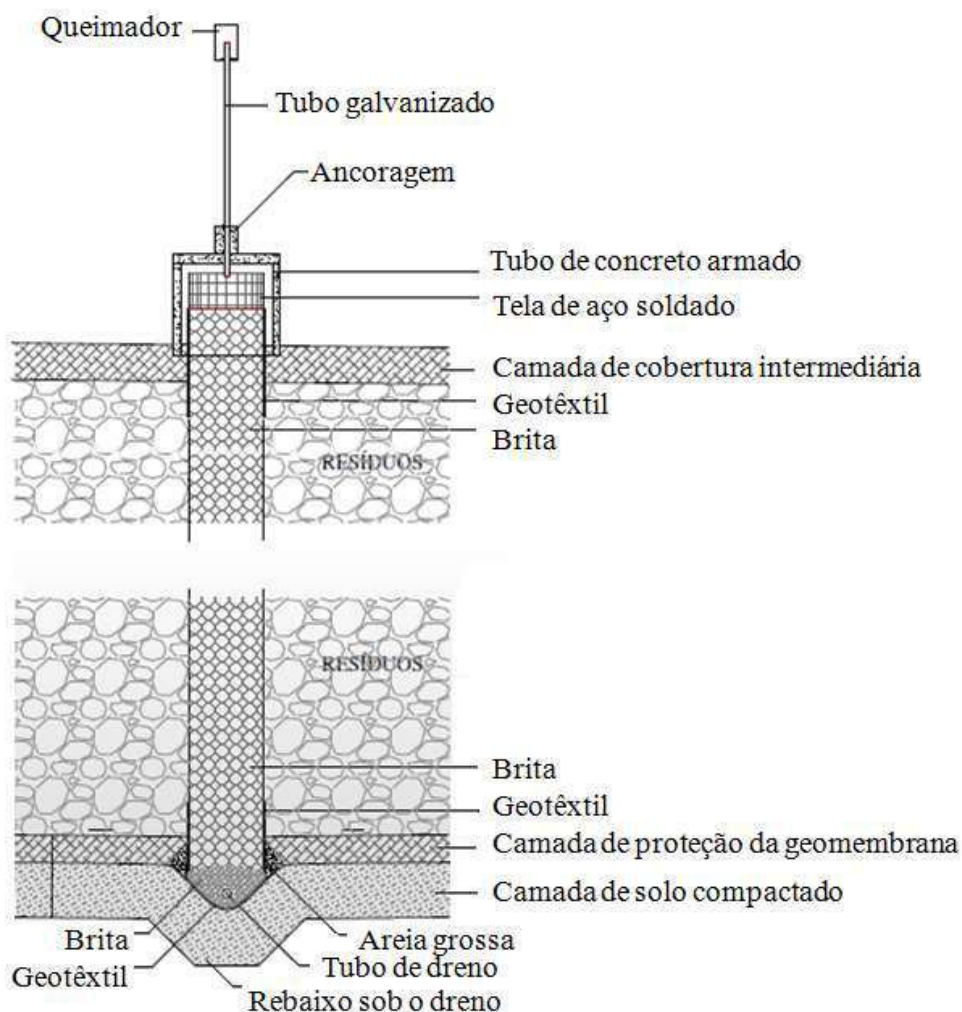


Fonte: Autor (2021)

2.7 SISTEMA DE DRENAGEM DE GASES

Para que o biogás gerado no interior do maciço chegue até a superfície, pode-se utilizar no aterro uma rede de drenos compostos por uma tubulação de concreto armado com cerca de 0,6 m de diâmetro rodeada por brita ou rachão e geotêxtil, que servem para impedir que os resíduos obstruam o dreno, cada um desses drenos vai da base até o topo das células, sendo construídos sobre a malha de drenagem de lixiviado. Ao atingir a superfície, é posto sobre os drenos uma anilha de concreto com cerca de 1,0 m de diâmetro, esse tipo de dreno é conhecido como dreno vertical (RIBEIRO, 2016). Na Figura 13 está apresentada uma seção transversal de um desses drenos.

Figura 13 – Dreno de gás



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2016)

Para que a vazão nos drenos possa ser aferida, Oliveira (2013) propôs uma metodologia aplicando a Norma BSI 1042-2.3 – 19984 – Medição do fluxo de fluídos em condutos fechados. Através da Equação 2.2, pode-se calcular a vazão do biogás, em m³/h.

$$Q = (v \times A) \times 3600$$

Eq. 2.2

Onde: v = velocidade do gás, em m/s; A = área da seção por onde está passando o gás, no caso, seção da anilha ou da saída do queimador (*flare*).

A velocidade do biogás deve ser aferida com o auxílio de um anemômetro. Pode-se ainda utilizar a Equação 2.3 para obter-se a velocidade do gás a partir do diferencial de pressão (ΔP). Essa metodologia foi apresentada por Mariano (2008).

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Onde: ΔP = diferencial de pressão = pressão atmosférica – pressão manométrica; ρ = massa específica do gás (M.L^{-3})

2.8 MECANISMOS DE TRANSPORTES

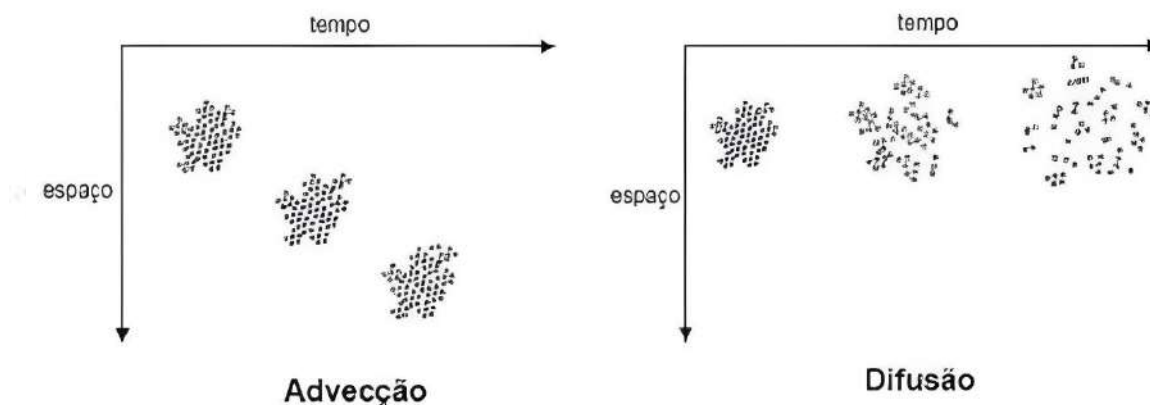
Para Teixeira (2008), o fluxo dos gases através do solo se dá, em geral, de duas maneiras por advecção e por difusão por diferença de concentração, sendo que, quando houver o fluxo advectivo este prevalecerá sobre o difusivo. De forma resumida, o fluxo por advecção de gases ocorre por uma diferença de pressões entre dois pontos, enquanto o fluxo por difusão ocorre por diferença de concentrações.

Geralmente, os processos advectivos e difusivos apresentam o mesmo sentido de fluxo. No entanto, em situações específicas ou para determinados componentes do biogás pode ocorrer dos fluxos apresentarem direções opostas e resultarem numa tendência ao cancelamento. De maneira geral, as taxas de fluxo por advecção são maiores que as taxas por difusão e essa diferença tende a ser maior à medida que a permeabilidade do solo também aumenta. (MENDONÇA, 2007).

2.8.1 Advecção

Para Bouazza e Vangpaisal (2003) *apud* Teixeira (2008), a principal força indutora da migração do gás na camada de cobertura de aterros de resíduos sólidos é a diferença de pressão devida à flutuação da pressão atmosférica. Ainda afirma que caso ocorra uma redução na pressão atmosférica o fluxo de gás pela cobertura tende a aumentar, aumentando a concentração próxima à superfície. Já o fluxo por difusão ocorre devido à interação molecular. Quando o gás está mais concentrado em uma região do que em outra, irá se mover por difusão para a região de menor concentração. Na Figura 14 é apresentado o comportamento de ambos os processos.

Figura 14 – Representação do transporte de uma substância no espaço e no tempo devido.



Fonte:CHAPRA (1997)

O fluxo por advecção foi definido por Daniel (1993) como um movimento de resposta de um soluto para um gradiente hidráulico. Nesse mecanismo o transporte é governado pelo escoamento do fluido, tendo sua velocidade diretamente relacionada a velocidade do mesmo. Esse fluxo por advecção, ocorre por conta da diferença de pressão entre dois pontos. Em aterros sanitários esses dois referenciais são a massa de resíduos e a atmosfera.

Existem alguns processos que podem atenuar o fluxo dos gases pelo maciço, os principais são os mecanismos de sorção e atenuação microbiológica.

O mecanismo de sorção se trata da junção de dois fenômenos acontecendo simultaneamente, sendo eles a absorção e a adsorção. Enquanto na absorção acontece a incorporação de uma substância em um estado para outra em um estado distinto (por exemplo, líquidos de serem absorvidos por um sólido ou gases de ser absorvidos por um líquido), a adsorção é a adesão física ou ligação de íons e moléculas na superfície de uma outra molécula. O processo inverso da sorção é a dessorção (BARIZON, 2004).

Na atenuação microbiológica ocorre uma transformação dos gases ou de compostos de estrutura mais complexa em substâncias mais simples, esse processo acontece através da ação de microrganismos e para que isso ocorra deve existir sempre um agente doador e um receptor de elétrons, sendo as bactérias os agentes para que haja essa troca. A atenuação microbiológica não atua diretamente no fluxo de gás, como ocorre com a sorção, mas na concentração de determinados compostos, por exemplo quando as bactérias metanotróficas quando em ambientes aeróbios, transformam o CH_4 em CO_2 . Esse processo, porém, pode ser influenciado por fatores como: composição do gás, temperatura, umidade, disponibilidade de oxigênio e nutrientes entre outros.

A determinação do fluxo mássico advectivo pode ser dado pelo produto da concentração do gás pela concentração do mesmo, conforme Equação 2.4

$$J_A = kC \quad \text{Eq. 2.4}$$

Onde: J_A = fluxo advectivo; k = condutividade hidráulica; C = concentração do gás

Caso haja condições de escoamento linear (número de Reynolds < 2000), pode-se aplicar a Lei de Darcy, nesse caso, existe uma relação entre a velocidade e o gradiente hidráulico podendo ser expressa pela Equação 2.5

$$v = ki \quad \text{Eq. 2.5}$$

Onde: v = velocidade; k = coeficiente de permeabilidade; i = gradiente hidráulico

A velocidade de advecção por sua vez, também pode ser definida seção como a razão entre a vazão e o produto da porosidade e a área de seção perpendicular ao fluxo. Para que isso seja possível, o sistema água-solo deve estar submetido a um gradiente, nesse sistema o fluido em questão pode estar na forma de água livre, adsorvido ou cristalizado. Assim, o fluxo advectivo numa determinada direção pode ser determinado através da Expressão 2.6.

$$J_A = VnC \quad \text{Eq. 2.6}$$

Onde: J_A = fluxo advectivo; V = velocidade de percolação ou de Darcy; n = porosidade; C = concentração do gás

Segundo Teixeira (2008), o fluxo advectivo está associado à velocidade própria do material ou do meio no qual ele está sendo transportado, baseado nisso, pode-se determinar o fluxo mássico através da Equação 2.7, baseada na Lei de Darcy para fluídos compressíveis.

$$J_A = -\frac{\rho \times k_g}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \quad \text{Eq. 2.7}$$

Onde: J_A = fluxo advectivo; ρ = densidade do gás (kg/m^3); k_g = coeficiente de permeabilidade do solo ao gás; μ = viscosidade dinâmica do fluido ($1,837 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$, $t = 25^\circ\text{C}$);

$\frac{\partial P}{\partial z}$ = gradiente de pressão (Pa)

A condutividade hidráulica em um meio poroso pode ser afetada por diversos fatores do fluido em questão, sendo sua compressibilidade e viscosidade os principais. Quanto a viscosidade, pode-se afirmar que quanto maior a viscosidade de um fluido, menor será a sua condutividade hidráulica e consequentemente a sua permeabilidade (MARIANO, 2008).

Já a permeabilidade ao ar (ou gás) dos solos dependem de fatores relacionados com a porosidade, teor de umidade, granulometria, conectividade dos espaços porosos preenchidos de ar, entre outros. Lopes (2011) cita que fatores relativos à mineralogia do solo e ao fluido percolante também influenciam na permeabilidade, com a composição mineralógica exercendo maior influência em solos argilosos.

2.8.2 Difusão

Na difusão o movimento é impulsionado por um gradiente de concentração através de uma força diretriz no sentido desse gradiente do potencial químico. Neste processo, não é requerido um gradiente hidráulico. Um dos aspectos principais desse movimento é que se trata de um movimento aleatório e proporcional, porém de sinal oposto ao gradiente de concentração e que age diluindo esse gradiente até o ponto de não haver mais diferenças de concentração e consequentemente cesse o movimento (WELTY *et al.*, 1984 *apud* MARIANO, 2008).

Existem alguns aspectos que devem ser considerados na difusão quanto ao seu movimento, pois se trata de um movimento aleatório e proporcional que sempre vai na direção do menor gradiente de concentração e cessa quando os gradientes se anulam.

Segundo Maciel (2009), a difusão dos componentes água e ar a partir do solo e de resíduos não reativos obedece à primeira lei de Fick para o regime estacionário, ou seja, a parcela de um fluxo difusivo no aterro é transportada de uma região de alta concentração (potencial químico) para regiões de baixa concentração química. Neste caso, a atmosfera funciona como elemento de dispersão dos gases. No caso do fluxo unidimensional de gás no

solo, este ocorrerá preferencialmente nos poros preenchidos por ar, conforme apresentado na Equação 2.8.

$$J_D = -D_S \times \frac{\partial C}{\partial z} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Onde: J_D = fluxo difusivo; D_S = Coeficiente de difusão do gás no solo (m^2/s)

$\frac{\partial P}{\partial z}$ = gradiente de concentração no meio (kg/m^4)

2.9 EQUAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO FLUXO MÁSSICO DE GÁS

A partir da realização de ensaios em campo, tal como o ensaio de placa, o fluxo mássico de gás pode ser obtido a partir da Equação 2.9.

$$J = \frac{V_p \rho_{\text{gás}} \Delta C}{A \Delta t} [M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}] \quad \text{Eq. 2.9}$$

Onde: V_p = Volume da placa = $0,008 \text{ m}^3$; A = Área da placa = $0,16 \text{ m}^2$; $\rho_{\text{gás}}$ = Densidade do gás a uma determinada temperatura; $\Delta C/\Delta t$ = Variação da concentração do gás com o tempo

Uma vez que o fluxo (J) decresce com o decorrer do ensaio, é recomendado que as curvas de variação de concentração do gás com o tempo sejam representadas em termos mássicos ($\Delta M/\Delta t$) (MARIANO, 2008). Para tal, utiliza-se a densidade corrigida dos gases (CH_4 e CO_2) em função das temperaturas registradas no interior da placa durante o ensaio (Equações 2.10 e 2.11), considerando que:

$$\rho_{\text{CH}_4}(t) = \frac{\rho_{\text{CH}_4}(\text{°C}) \times 273}{[273 + t(\text{°C})]} \quad \text{Eq. 2.10}$$

$$\rho_{\text{CO}_2}(t) = \frac{\rho_{\text{CH}_4}(\text{°C}) \times PM_{\text{CO}_2}}{PM_{\text{CH}_4}} \quad \text{Eq. 2.11}$$

Onde: $\rho_{CH_4}(t)$ = densidade do CH_4 em função da temperatura ($^{\circ}C$); $\rho_{CH_4} = 0,716 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{CO_2}(t)$ = densidade do CO_2 em função da temperatura ($^{\circ}C$); PM_{CO_2} = Peso Molecular do $CO_2 = 44$
 PM_{CH_4} = Peso Molecular do $CH_4 = 16$

Considerando a Lei de Darcy para fluidos incompressíveis em regime laminar no meio saturado, a velocidade do fluxo é constante e diretamente proporcional ao gradiente de carga hidráulica. Ao tratar de um fluido compressível, a velocidade deixa de ser constante devido a expansão dos gases, aumentando à medida que se aproxima da extremidade de saída. No caso do fluxo de gases em solos, a Lei de Darcy permanece válida desde que seja considerada a compressibilidade, a viscosidade do fluido e a proporcionalidade do gradiente de pressão (IGNATIUS, 1999 *apud* MARIANO, 2008).

2.10 PARÂMETROS PREPONDERANTES

Entre os fatores que influenciam no processo de transporte dos gases se destacam a estrutura do solo, o grau de compactação, grau de saturação, conteúdo volumétrico do ar e umidade. Além de mecanismos que podem atenuar o processo como sorção ou atenuação microbiológica, conforme descrito a seguir:

- Estrutura do solo: a estrutura interna do solo é um dos parâmetros que mais influencia na permeabilidade de um solo. Quando possuem estruturas floculadas, os solos apresentam maior contração, maior expansividade e permeabilidade que os solos de estrutura dispersa. Então mesmo que o número de vazios seja igual, a permeabilidade de um solo pode diferir por causa de sua estrutura. Por sua vez, a permeabilidade ao gás chega a ser de 2 a 3 vezes maior que a permeabilidade a água devido a energia de compactação (MOON *et al.*, 2007).
- Grau de saturação: Segundo Jucá (1990), há pelo menos três cenários possíveis quanto ao grau de saturação. Se o mesmo estiver baixo, a água do solo encontra-se adsorvida nas partículas sólida e conseqüentemente o ar passa livremente pelos vazios em direção aos baixos gradientes. Se o teor de umidade se aproxima do ótimo, encontra-se um estado onde as fases líquida e gasosa coexistem. Já se o grau de saturação aumenta o fluxo do gás cai à medida

que o movimento da água aumenta. Com o total preenchimento dos vazios por água ocorre um corte nas interconexões e o gás fique selado.

- Conteúdo volumétrico do ar: este parâmetro pode ser definido como o percentual de vazios ou poros na matriz do solo que estão efetivamente preenchidos por ar (COSTA, 2015). A permeabilidade ao ar está diretamente ligada com a aeração do solo, então o conteúdo volumétrico do ar pode indicar um aumento da permeabilidade do solo ao ar.

2.11 ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE BIOGÁS EM ATERROS

Uma maneira alternativa de realizar um comparativo entre a geração de biogás no aterro e as emissões fugitivas pela camada de cobertura foi realizar uma estimativa de todo o gás gerado pelo resíduo depositado no aterro ao longo do tempo em que esteve ativo, para que ao final das análises de permeabilidade da camada fosse possível avaliar a quantidade de gás que chegou ao ambiente externo pelos drenos e pela camada de cobertura. O método utilizado neste estudo para a estimar as emissões provenientes do aterro foi o decaimento de primeira ordem, do *Guidelines 1996*, e do *Good Practice Guidance 2000*. Esse método de decaimento, também conhecido por *Tier 2*, caracteriza-se por considerar que a emissão de CH₄ persiste ao longo de uma série de anos, após a disposição do resíduo. Para a sua aplicação, são necessários dados relativos à população, clima (médias anuais de temperatura e chuva), quantidade de resíduo aterrada, composição do resíduo, qualidade de operação do aterro e quantidades de CH₄ recuperada e oxidada (CETESB, 2009).

2.11.1 Composição gravimétrica dos resíduos

A composição gravimétrica identifica o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de lixo analisada. Os componentes mais comuns são: matéria orgânica, metal ferroso, borracha, papel, couro, papelão, alumínio, tecido, vidro, madeira, plástico. Portanto, é possível identificar o aproveitamento tanto das frações recicláveis para comercialização quanto da matéria orgânica para a produção de composto orgânico (Monteiro *et al.*, 2001). Segundo Firmo e Rodrigues (2009), a composição dos resíduos varia entre os

municípios e ao longo do tempo, por estar relacionada também a fatores tais como economia, clima, cultura e outros.

O conhecimento da composição gravimétrica contribui para identificação de outra variável de grande importância para o cálculo de geração de metano que é a quantidade de carbono degradável presente nos resíduos (COD), tendo em vista que as características dos RSU podem variar muito de um local para outro. Conhecer essa variável aproxima o resultado do cálculo com a realidade. A Tabela 02 demonstra o teor de carbono de cada componente dos resíduos.

Tabela 02 – Teor de carbono orgânico em cada componente do RSU	
Componente	Porcentagem de COD (em massa)
A – Papel e papelão	40
C – Restos de alimento	15
T – Tecidos	40

Fonte: Adaptado de Britto (2006)

2.11.2 Coeficiente de destinação final dos RSU

Para estimar a geração de metano seria utilizado um Fator de Correção de Metano (FCM) igual a 1, segundo o IPCC (2006), o uso desse coeficiente de aproximação é recomendado em casos em que o aterro sanitário foi operado corretamente em relação a cobertura adequada dos resíduos.

2.11.3 Equação IPCC de estimativa da geração de metano

Para realizar a estimativa é utilizado um método que foi apresentado pelo IPCC (2000) e adaptado aos dados obtidos. É um método simples para estimativa de emissão de metano em aterros sanitários. Britto (2006) explica que esse método envolve a estimativa da quantidade de carbono orgânico degradável que está presente no resíduo, assim, a quantidade de metano que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo é calculada. A equação 3.2 é semelhante a utilizada pelo método, porém adaptada ao cenário local.

$$Q_{CH4(2002)_{t=1}} = \{ [1 - e^{-k}] * [(TX_{RSU(2002)} * Pop_{(2002)} * TX_{col(2002)} * FCM)] * [(0,4A) + (0,4T) + (0,15C)] * [COD_f * e^{-kt} * F * \frac{4}{3} * (1 - OX)] \}$$

Eq.2.12

Onde:

$Q_{CH4(2002)_{t=1}}$ = emissão de metano em 2002 (tCH₄.ano);

e^{-k} = constante de decaimento (ano);

$TX_{RSU(2002)}$ = taxa de geração de RSU per capita no município em 2002 (t/hab/ano);

$Pop_{(2002)}$ = população do município em 2002 (hab);

$TX_{col(2002)}$ = taxa de coleta do município em 2002 (adimensional);

FCM = fator de correção do metano (adimensional);

A = fração do resíduo correspondente a papel no RSU (adimensional);

T = fração do resíduo correspondente a tecido no RSU (adimensional);

C = fração do resíduo correspondente a resíduos orgânicos alimentares no RSU (adimensional);

COD_f = segundo Birgerner e Crutzen (1987) é a fração de carbono que é disponível para a decomposição bioquímica e varia em função da temperatura na zona anaeróbia do aterro sanitário. Assume-se que a temperatura na zona anaeróbia de um local de disposição de resíduos sólidos (LDRS) permanece constante por volta dos 35°C não obstante da temperatura ambiente (BIRGEMER E CRUTZEN, 1987). Sendo calculada pela equação 3.3:

$$COD_f = 0,014T + 0,28 \text{ (adimensional)} \quad \text{Eq.2.13}$$

e^{-kt} = tempo que relaciona o ano de disposição e o ano de cálculo da emissão (ano);

F = concentração de metano presente no biogás (adimensional);

$4/3$ = fator de conversão de carbono em metano (t CH₄.t C).

OX = fator de oxidação do metano na superfície do aterro sanitário.

Segundo Gracino (2010), o fator oxidação do metano (OX), representa a quantidade do gás que é oxidada ao chegar na superfície ou na camada de resíduos. Ainda não existe um consenso quanto a quantidade exata de metano que oxida nessas circunstâncias, porém Miller *et al.* (2009) utiliza o fator de oxidação como sendo 0,1 para aterros bem operados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

O município de Caruaru está localizado na região agreste do estado de Pernambuco, a $08^{\circ}17'00''$ de latitude sul e $35^{\circ}58'34''$ de longitude oeste, a cerca de 130 km da capital do estado (Figura 15). Possui uma população estimada de 351.686 habitantes (IBGE, 2016).

Caruaru está situada no Planalto da Borborema e na bacia hidrográfica do rio Ipojuca e do rio Capibaribe. Segundo Biondi *et al.* (2011), os tipos de solos mais recorrentes no estado de Pernambuco são os neossolos e os latossolos, com exceção das mesorregiões Zona da Mata e Zona Metropolitana do Recife, sendo que o tipo de solo predominante em Caruaru é o latossolo vermelho-amarelo.

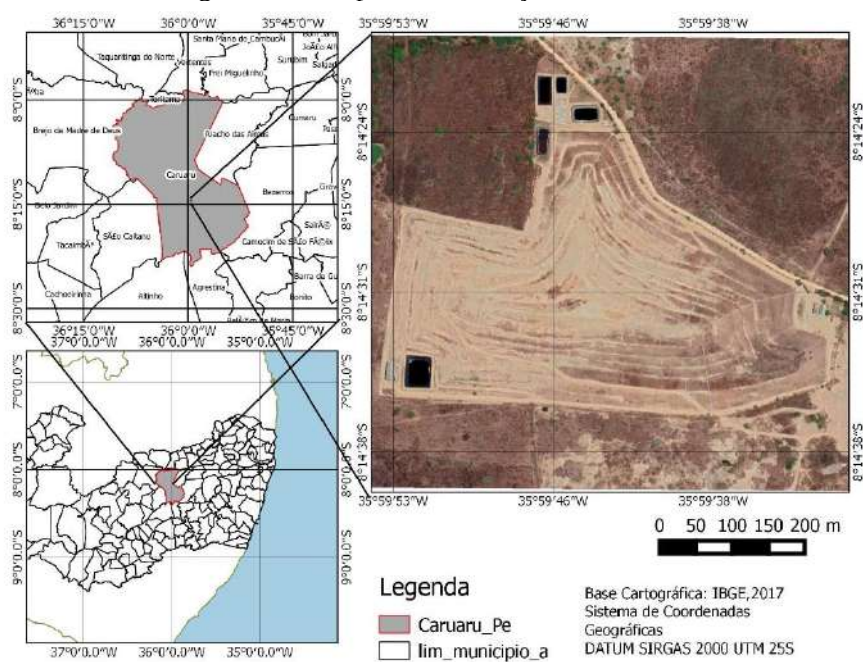
O município de Caruaru situa-se numa região de baixa precipitação, onde segundo dados da APAC (2019), no ano de 2018 choveu o equivalente a 432,3 mm. O baixo índice de precipitação é graças em parte ao clima semiárido da região, que faz com que a média anual do município fique abaixo dos 600 mm.

O aterro sanitário municipal de Caruaru se encontra a aproximadamente 10,8 Km do centro da cidade, no sítio Juriti S/N, na zona rural da cidade, próximo ao Polo Comercial e ao Autódromo Ayrton Senna, que fica as margens da BR 104 conforme exposto na Figura 15.

O aterro sanitário municipal de Caruaru entrou em operação no início 2002. Inicialmente o aterro era composto por 4 células independentes, separadas por vias de tráfego e que ocupavam aproximadamente metade da área atual do empreendimento. Com o passar do tempo e o aumento pela demanda por espaço, foram ocorrendo ampliações. Na Figura 16 apresenta-se o layout de uma nova célula construída em 2012. Pode-se observar que na ocasião, as células iniciais já haviam sido unificadas.

Após a construção da célula, ainda houve uma segunda ampliação em 2017, antes da paralização das atividades em 2018.

Figura 15 – Mapa de localização do aterro



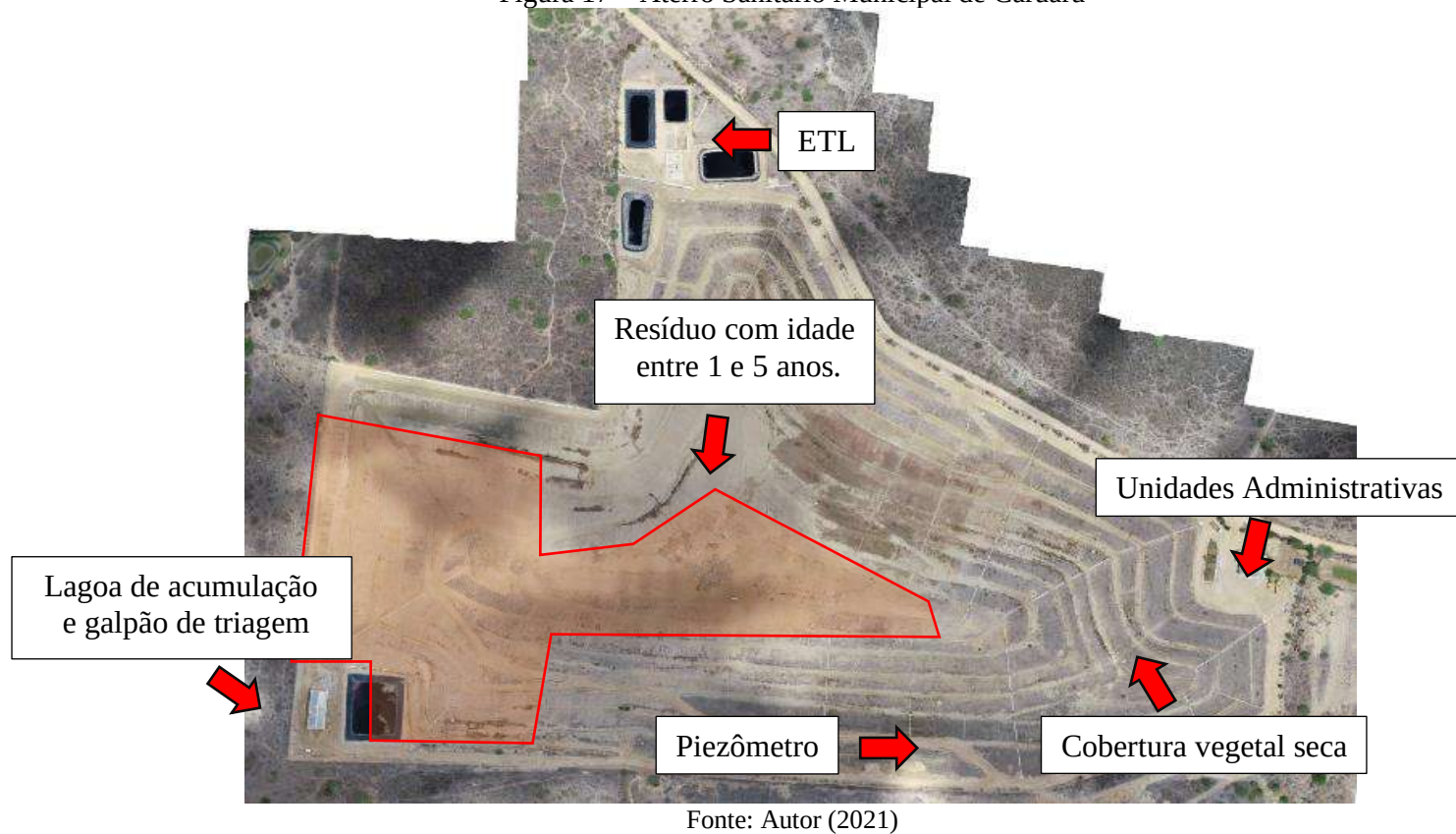
Fonte: Autor (2021)

Atualmente o aterro passa por estudos para uma possível ampliação, enquanto isso os resíduos gerados pelo município são dispostos na CTR Caruaru, empreendimento privado construído na cidade. Durante o período de funcionamento do aterro sanitário municipal foram dispostos aproximadamente 1,65 milhão de toneladas no local.

Na Figura 17 é mostrado o aterro sanitário após a paralização de suas atividades, indicando o local de disposição dos últimos resíduos, os locais das unidades administrativas, da ETL e do galpão de triagem dos resíduos recicláveis.

A coleta de amostras e campanha de ensaios de laboratório e campo realizados nesta pesquisa, ocorreu entre os meses de outubro e dezembro de 2020.

Figura 17 – Aterro Sanitário Municipal de Caruaru



O aterro sanitário municipal de Caruaru recebia diariamente, em média 330 toneladas de resíduos sólidos urbanos totalizando aproximadamente 10.000 t/mês, cuja composição gravimétrica é apresentada na Tabela 03.

Tabela 03 – Composição gravimétrica – Caruaru

Item	Descrição	Porcentagem
1	Papel	12,34%
2	Material Orgânico	33,89%
3	Plástico	8,28%
4	Vidro	11,72%
5	Metal	12,51%
6	Tecido	21,27%
Total		100,0%

Fonte: Adaptado de CARUARU (2018)

3.2 CAMADA DE COBERTURA E SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE GASES

O tipo de camada de cobertura utilizado nos taludes e nas bermas foi o convencional, porém muito espessa, sendo composta em média 96 cm de solo compactado, com esse valor chegando a variar 80 e 135 cm nos pontos analisados. Observa-se que algumas partes do aterro, principalmente nas faces leste, norte e sul do aterro, onde o resíduo foi disposto a mais tempo, há a presença de uma cobertura vegetal irregular formada por gramíneas, conforme mostrado na Figura 17. Por conta do clima semiárido da região, durante os meses de estiagem essa cobertura se torna esbranquiçada e seca, características da caatinga.

O sistema de drenagem de gases é composto por 39 drenos, cada um deles é composto por uma anilha de concreto de 1 m de diâmetro e cerca de 05 drenos possuem queimadores (flares). A Figura 18 apresenta a localização de todos os drenos.



Fonte: Autor (2021)

A distância entre os drenos varia bastante, sendo cerca de 30 metros em alguns pontos e de mais de 130 metros em outros. Durante os últimos meses de atividade do aterro, 04 drenos

possuíam vazão suficiente para se manterem acesos, contudo, após 18 meses do encerramento das atividades apenas 02 se mantinham queimando de gás.

3.3 CAMPANHA DE INVESTIGAÇÃO DO SOLO E DO RESÍDUO DO ATERRO

A campanha de investigação do solo e dos resíduos do aterro de Caruaru foi composta de ensaios de campo e laboratório. Em campo foram realizados ensaios para determinar as emissões de gases na camada de cobertura, vazão de biogás nos drenos, além da cravação dos anéis de adensamento, das verificações das espessuras das camadas de cobertura e da coleta de material. No laboratório foram realizados ensaios com o intuito de caracterizar o solo utilizado na camada de cobertura.

Na Tabela 04 estão apresentados o tipo e a quantidade dos ensaios que foram realizados em campo e no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE (LSI/UFPE), para caracterização do solo.

Tabela 04 – Tipo e quantidade dos ensaios realizados em campo e em laboratório

Ensaio	Quantidade	Local
Placa de Fluxo	20	Campo
Medição de Pressão	20	Campo
Medição de Temperatura	20	Campo
Concentração solo-resíduo	20	Campo
Pressão do gás DMPC	20	Campo
Espessura da camada	20	Campo
Concentração nos drenos	09	Campo
Pressão nos drenos	09	Campo
Temperatura nos drenos	09	Campo
Densidade “ <i>in situ</i> ”	05	Campo
Umidade “ <i>in situ</i> ”	05	Campo
Granulometria	05	Laboratório
Limite de Liquidez	05	Laboratório
Limite de Plasticidade	05	Laboratório
Peso Específico dos Grãos	05	Laboratório
Grau de compactação	05	Laboratório
Proctor Normal	05	Laboratório
Total	187	

Fonte: Autor (2021)

3.3.1 Amostragem de solo e cravação de anéis

Os pontos de coleta das amostras de solo estão mostrados na Figura 19. Os pontos foram escolhidos pela idade do resíduo ali disposto, sendo 5 pontos com 2, 4, 6, 8 e 10 anos respectivamente, conforme apresentado na Tabela 05.

Figura 19 – Pontos de retirada das amostras de solo



Fonte: Autor (2021)

Tabela 05 – Identificação dos pontos de retiradas de solo

Ponto	Tipo de terreno	Idade do resíduo
1	berma	2 anos
2	talude	4 anos
3	berma	6 anos
4	talude	8 anos
5	berma	10 anos

Fonte: Autor (2021)

O primeiro procedimento realizado foi o de cravação dos anéis que foi realizada em cinco diferentes pontos do aterro. Cada um dos de anéis utilizados possuíam dimensões e pesos conhecidos ($\varnothing = 0,10$ m; $h = 0,15$ m). Após a retirada, as amostras eram envoltas em filme plástico e papel alumínio para que suas características fossem preservadas.

Na Figura 20 é apresentado o procedimento de cravação dos anéis e seu posterior armazenamento no laboratório. Após a cravação dos anéis, fez-se a coleta das amostras de solo. Com o auxílio de ferramentas manuais (pás, picaretas e enxadas), foram retirados cerca de 50 Kg de solo de cada um dos pontos escolhidos. Todo o material foi armazenado em sacos marcados, identificando de onde cada amostra foi retirada (Figura 21).

Figura 20 – Cravação dos anéis e preparação das amostras



Fonte: Autor (2021)

Figura 21 – Coleta das amostras de solo “*in situ*”



Fonte: Autor (2021)

3.3.2 Procedimentos de investigação *in situ*

3.3.2.1 Determinação de emissões fugitivas por placas de fluxo

Para determinação do fluxo de gases pela camada final de cobertura foram realizados no total 20 ensaios de placa de fluxo, feitos nos 5 pontos considerados neste estudo. Os ensaios foram divididos em 4 baterias, realizadas em dias diferentes, entre os meses de outubro e dezembro de 2020.

Os pontos onde foram realizados os ensaios estão entre as cotas 4,88 m e 24,81 m, sendo que a menor altitude na área do aterro, usada como base para determinação das cotas dos pontos foi de 562,76 m. As cotas foram determinadas através de um drone da marca DJI modelo Phantom 4 Pro e o processamento das imagens foi realizado pelo software Agisoft Metashape Professional versão 1.0.0.1.

Simultaneamente aos ensaios com a placa de fluxo, foram realizadas as medições das espessuras das camadas e medição das concentrações de gases (CH_4 , CO_2 e O_2) nos drenos que ficam num raio de 25 m dos pontos de cada ensaio.

Na Tabela 06 estão apresentados os dias e condições climáticas em que foram realizadas as 4 baterias de ensaios de placa de fluxo nos 5 pontos. Os ensaios denominados como “A”, são os

realizados onde o resíduo havia sido disposto a 2 anos, os ensaios “B” são onde os resíduos possui a idade de 4 anos e assim sucessivamente.

Tabela 06 – Cronologia dos ensaios e condições climáticas locais

Ensaio	Cota (m)	Data	Condições climáticas
A1	24,81	11/10/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 23 a 31°C
A2	24,85	25/10/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 26 a 30°C
A3	24,86	07/12/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 25 a 28°C
A4	24,78	16/11/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 26 a 30°C
B1	4,88	11/10/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 23 a 31°C
B2	4,83	25/10/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 26 a 30°C
B3	4,81	16/11/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 26 a 30°C
B4	4,76	07/12/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 25 a 28°C
C1	14,08	11/10/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 23 a 31°C
C2	14,12	25/10/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 26 a 30°C
C3	14,05	16/11/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 26 a 30°C
C4	14,09	07/12/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 25 a 28°C
D1	14,76	11/10/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 23 a 31°C
D2	14,53	25/10/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 26 a 30°C
D3	14,68	16/11/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 26 a 30°C
D4	14,91	07/12/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 25 a 28°C
E1	24,81	11/10/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 23 a 31°C
E2	24,85	25/10/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 26 a 30°C
E3	24,86	16/11/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 26 a 30°C
E4	24,78	07/12/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 25 a 28°C

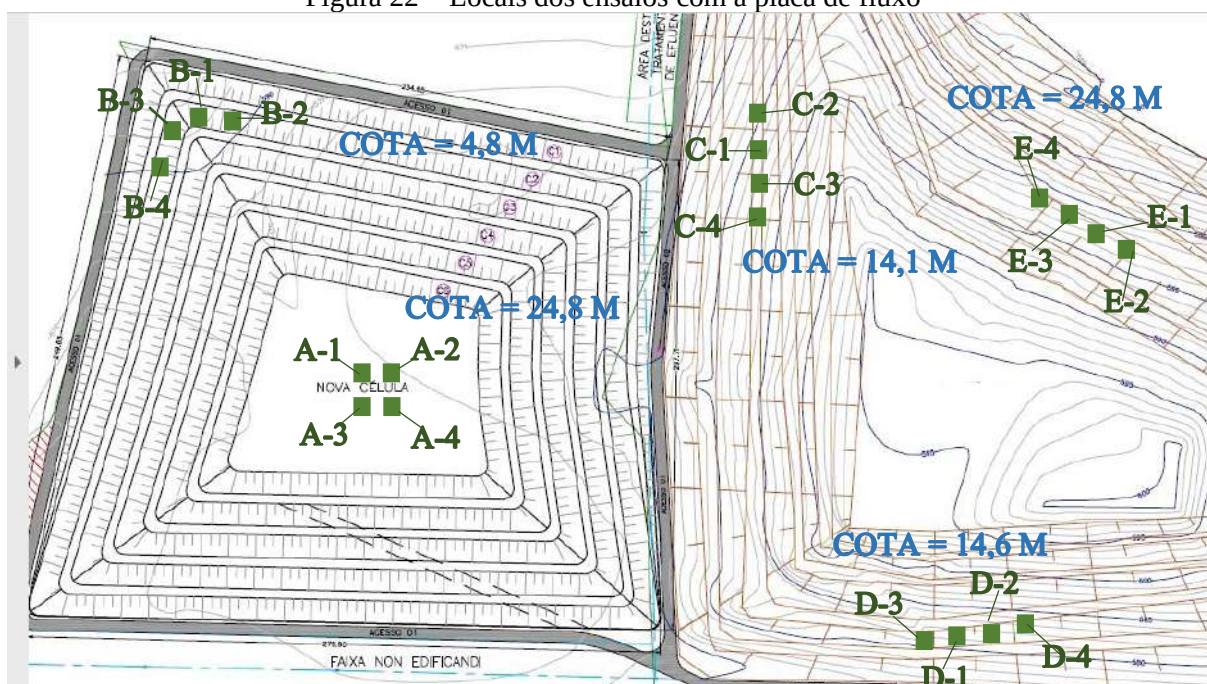
Fonte: Autor (2021)

A determinação do fluxo dos gases avaliados nessa pesquisa (CH_4 , CO_2 e O_2) utilizou a metodologia aplicada para ensaios de placa de fluxo estática descrita por Maciel (2009). No entanto, o procedimento teve como adição de pontos de medição como taludes.

Para execução do ensaio de placa de fluxo o equipamento foi colocado no local selecionado para uma demarcação da área a ser escavada, essa demarcação tinha uma folga de 0,05 m para cada um dos lados, ficando assim com 0,70 x 0,70 m². Após a marcação a placa era removida do local para a escavação que tinha no máximo 0,15 m de profundidade. Depois da execução da vala, a placa era colocada no local novamente e as paredes eram talhadas com cuidado até que fossem atingidas as dimensões da placa (0,60 x 0,60 m). Em seguida, por meio do “degrau”, a caixa era cravada no solo e os tubos de polietileno eram acoplados as conexões de saídas para que não houvesse acúmulo de gases. Após a cravação, a vala era recomposta com o material escavado e compactada manualmente.

Foram realizados 20 ensaios para determinação do fluxo de biogás distribuídos nos 5 locais do aterro com o objetivo de verificar a eficiência da camada nesses pontos e ter um panorama das emissões. Como os locais dos ensaios foram escolhidos a partir da idade do resíduo ali disposto, os pontos se encontram em cotas distintas. A distância entre os ensaios realizados no mesmo ponto era de pelo menos 4 metros. Na Figura 22 estão dispostos os locais dos ensaios com a placa de fluxo.

Figura 22 – Locais dos ensaios com a placa de fluxo



Fonte: Autor (2021)

As leituras se iniciavam 2 minutos após a cravação do equipamento no solo, o intervalo entre as leituras era de 5 minutos. Para efetuar as leituras foi utilizado o detector de gases, já a temperatura do ambiente e do biogás no interior da placa foi averiguada com o auxílio de um termômetro digital e a pressão interna era medida com o auxílio de um manômetro digital, conforme apresentado na Figura 23.

O modelo da planilha utilizada nos ensaios de campo (placa, drenos e DMPC) é apresentado na Tabela 07.

Figura 23 – Ensaios com a placa de fluxo



Fonte: Autor (2021)

Tabela 07 – Modelo de planilha utilizado nos ensaios de campo

Ponto		Bateria				Data	
<u>CAMADA DE COBERTURA</u>							
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
1	Inicial						
2	5 min						
3	10 min						
4	15 min						
5	20 min						
6	25 min						
7	30 min						

Fonte: Autor (2021)

O fluxo mássico foi calculado no início do ensaio para se obter a maior taxa de percolação do gás pela camada de cobertura. O procedimento para determinação do fluxo em cada ensaio foi:

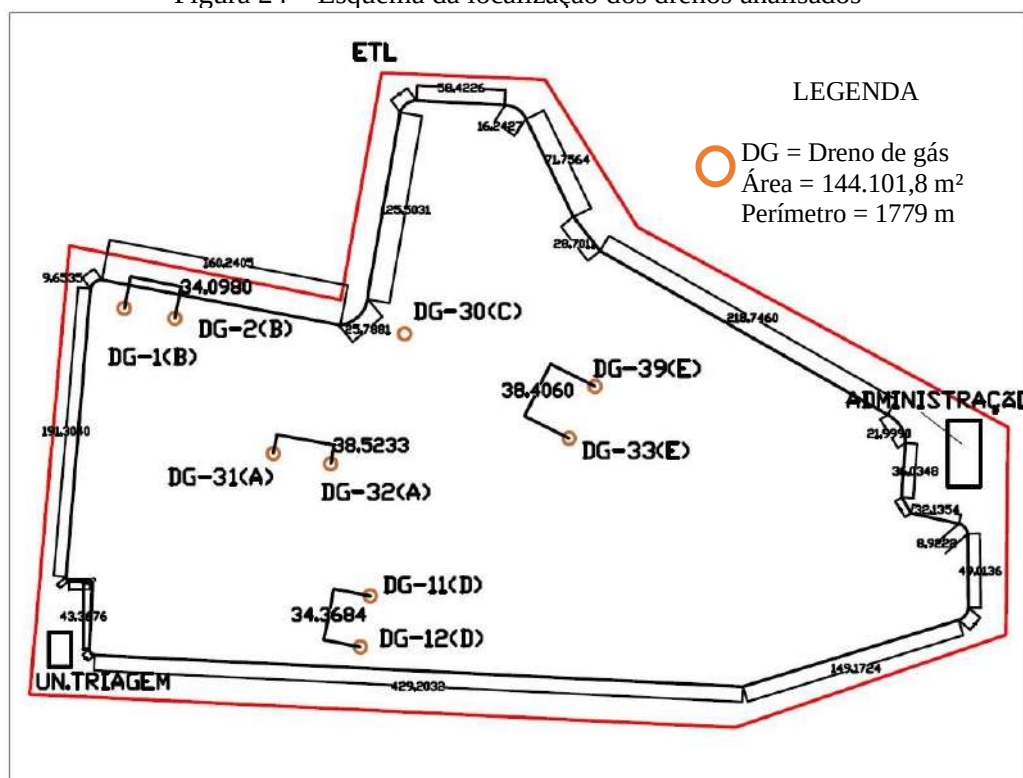
- correção da densidade do gás em função da temperatura no instante “t” do ensaio;
- cálculo da massa para cada tempo “t”;
- construção do gráfico da Massa [M.L⁻²] em função do tempo [T];
- determinação da equação de fluxo considerando o tempo $t_{\text{máx}}$ igual a “t” = 30 minutos;
- determinação da equação de regressão com coeficiente de determinação $\geq 95\%$;
- determinação do fluxo para 1 ano.

3.3.2.2 Concentração e vazão de biogás nos drenos

A medição da concentração dos gases nos drenos do aterro se fez necessário para que fosse conhecida a quantidade de metano que estava sendo gerada em cada um dos pontos analisados e para que a partir do resultado obtido pudesse ser feita alguma correlação com a idade do resíduo disposto naquele ponto e se o material utilizado na camada de cobertura do aterro de Caruaru exerceu alguma influência no processo de biodecomposição, visto que em alguns dos pontos onde há vazão de gás suficiente ocorria a queima.

Foram realizados 27 ensaios, sendo 3 por dreno (concentração, temperatura e pressão do gás), nos drenos mais próximos (até 25 m) dos pontos onde foram realizados os ensaios de placa. Os ensaios foram realizados entre os dias 14 e 29 de dezembro de 2020. Na Figura 24 está apresentado um esquema da localização no aterro dos drenos em que foram realizados os ensaios e a distância entre eles.

Figura 24 – Esquema da localização dos drenos analisados



Fonte: Autor (2021)

O ensaio foi realizado seguindo uma metodologia similar aplicada por Mariano (2008) e por Oliveira (2013), que se deu pelo isolamento da saída do dreno para que o gás pudesse ter uma conexão direta entre o equipamento utilizado para medição (Dräger e Termômetro) e o gás gerado no maciço, sem interferência do ambiente externo. Com o auxílio de uma lona plástica toda a saída do dreno foi recoberta até que se tenha certeza de que a saída do dreno ou do *flare* estava totalmente vedada. O passo seguinte foi a realização da medição, no caso dos drenos que possuíam queimadores, a tubo de poliuretano foi conectado diretamente no aparelho de medição, no caso dos drenos que não possuíam queimadores foi necessário cobrir toda a saída da anilha com uma lona plástica e realizar um furo no centro da lona para que através desse furo fosse passado um tubo flexível de poliuretano, tubo esse que ficou acoplado ao dispositivo de medição. Por último, foi realizada a medição e o equipamento foi desacoplado (Figuras 25 e 26).

Figura 25 – Realização da medição no dreno sem *flare*



Fonte: Autor (2021)

Figura 26 – Realização da medição no dreno com *flare*



Fonte: Autor (2021)

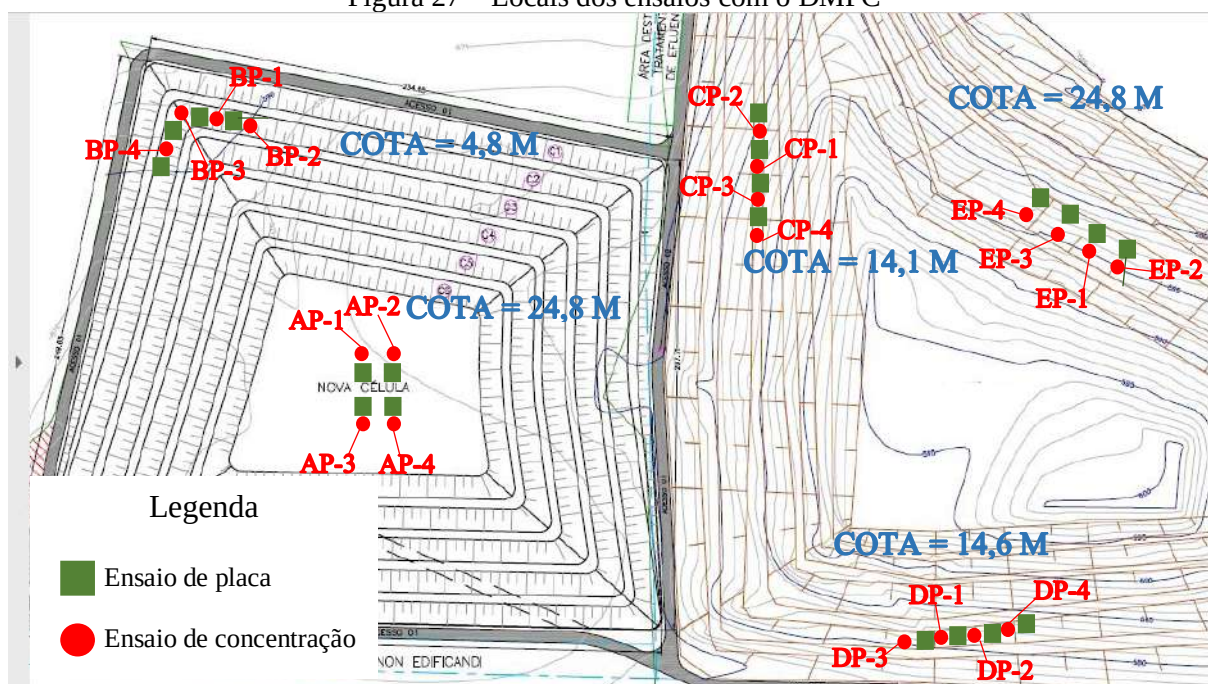
A duração de cada um dos ensaios de vazão e concentração nos drenos foi similar à duração dos ensaios de placa, ou seja, cerca de 30 minutos cada.

3.3.2.3 Medição de pressão e concentração do biogás sob a camada de cobertura

O intuito do ensaio de concentração e pressão no ponto de contato do solo com o resíduo é determinar se sob a camada de cobertura final está havendo geração de biogás e em caso positivo, quais as concentrações dos gases nesse ponto.

O procedimento de investigação realizado com o Dispositivo de Medição de Pressão e Concentração (DMPC) consistiu inicialmente na escolha dos locais para a instalação dos equipamentos (Figura 27). Os locais selecionados para a realização dos ensaios foram, propositalmente, pontos próximos aos locais onde foram realizados os ensaios de placa de fluxo. O objetivo da proximidade dos ensaios foi correlacionar os resultados e obter um prognóstico mais confiável.

Figura 27 – Locais dos ensaios com o DMPC



Fonte: Autor (2021)

Na realização do ensaio, o solo foi escavado até o final da camada de cobertura de forma que o resíduo ficasse exposto. Após a escavação, a espessura da camada era realizada com o auxílio de uma trena de 5 m e precisão de 1 mm, e o dispositivo era colocado no local escavado de forma que ficasse em contato com o resíduo. A saída do Cap era fechada de forma que fosse evitado perdas de pressão e/ou fuga de gases. Os equipamentos de medição eram acoplados nos tubos flexíveis e após 2 minutos os registros eram abertos para se iniciarem as leituras. As leituras eram realizadas com intervalos de 5 minutos, similarmente ao que foi feito nos ensaios de placa de fluxo. Após o término do ensaio, as saídas do dispositivo eram fechadas e os equipamentos retirados.

Na Tabela 08 estão apresentadas as condições climáticas e os dias em que foram realizadas as 4 baterias de ensaios de concentração solo-resíduo nos 5 pontos. A nomenclatura dos ensaios de solo resíduo é similar a utilizada nos ensaios de placa para facilitar a identificação dos pontos.

Tabela 08 – Cronologia e condições climáticas locais nos ensaios de concentração

Ensaio	Cota (m)	Data	Condições climáticas
AP-1	24,81	11/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 29°C
AP-2	24,85	12/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 29°C
AP-3	24,86	13/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 28°C
AP-4	24,78	14/01/2021	Dia nublado. Temperatura ambiente variando de 24 a 30°C
BP-1	4,88	11/01/2020	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 29°C
BP-2	4,83	12/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 29°C
BP-3	4,81	13/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 28°C
BP-4	4,76	15/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 25 a 29°C
CP-1	14,08	11/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 29°C
CP-2	14,12	12/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 29°C
CP-3	14,05	14/01/2021	Dia nublado. Temperatura ambiente variando de 24 a 30°C
CP-4	14,09	15/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 25 a 29°C
DP-1	14,76	11/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 29°C
DP-2	14,53	13/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 28°C
DP-3	14,68	14/01/2021	Dia nublado. Temperatura ambiente variando de 24 a 30°C
DP-4	14,91	15/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 25 a 29°C
EP-1	24,81	12/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 29°C
EP-2	24,85	13/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 24 a 28°C
EP-3	24,86	14/01/2021	Dia nublado. Temperatura ambiente variando de 24 a 30°C
EP-4	24,78	15/01/2021	Dia ensolarado. Temperatura ambiente variando de 25 a 29°C

Fonte: Autor (2021)

Nas Figuras 28 e 29 estão apresentados os procedimentos, respectivamente, de escavação medição da espessura da camada de cobertura, e da instalação do DMPC e medição das concentrações e da pressão.

Figura 28 – Escavação e medição da espessura da camada de cobertura



Fonte: Autor (2021)

Figura 29 – Instalação do DMPC e medição das concentrações e da pressão



Fonte: Autor (2021)

3.3.3 Instrumentação Complementar

Para realização das leituras nos ensaios de placa de fluxo e nos ensaios realizados nos drenos fez-se uso dos seguintes equipamentos:

- 1) Detector de gases: as leituras da composição do biogás quanto a presença dos gases CH_4 , CO_2 e O_2 foram realizadas em um equipamento analisador de gases como o modelo X-am 7000 fabricado pela Dräger ou similar, que tem limites de quantificação de 0,1% para O_2 , CH_4 e CO_2 . A leitura desse aparelho se baseia na interpretação da quantidade de raios infravermelhos absorvida por cada gás.
- 2) Termômetro: O instrumento utilizado para as aferições da temperatura do biogás na atmosfera foi da marca Minipa, modelo MT – 525, com precisão de 0,1 °C, aceitável para a pesquisa, e com faixa de leitura entre 0 °C a 1300 °C.
- 3) Manômetro: para as medições de pressão, foi utilizado um equipamento que realiza leituras de baixa pressão, propício para a realização de medições em camadas de cobertura de aterros sanitários. O manômetro digital utilizado foi da marca Dwyer series 477-2-FM, possui uma sensibilidade de 0,1 Pascal (Pa).
- 4) Termo-anemômetro: O instrumento utilizado foi da marca Instrutherm, modelo TAFR – 180, originalmente podendo realizar medições de temperatura em Kelvin e graus

Celsius e em diferentes faixas de velocidade, porém o equipamento não conseguiu realizar as leituras de velocidade.

Nas Figuras 30 e 31 estão apresentados os instrumentos utilizados para realizar as medições, respectivamente, o detector de gases (Dräger) e termômetro, e manômetro e termo-anemômetro).

Figura 30 – Instrumentos utilizados nos ensaios (Dräger e termômetro)



Fonte: Autor (2021)

Figura 31 – Instrumentos utilizados nos ensaios (Manômetro e termo-anemômetro)



Fonte: Autor (2021)

A Tabela 09 apresenta alguns parâmetros técnicos de cada um dos equipamentos utilizados nos ensaios de campo.

Tabela 09 – Características dos equipamentos utilizados nos ensaios de campo

Equipamento	Parâmetro	Faixa de medição	Percentual de erro
Dräger X-am 7000	Concentração de CH ₄	0 – 100%	± 5,0 %
Dräger X-am 7000	Concentração de O ₂	0 – 100%	± 1,0 %
Dräger X-am 7000	Concentração de CO ₂	0 – 100%	± 2,0 %
Dwyer 477-2-FM	Pressão	0 – 10 kPa	± 0,5 %
Minipa MT – 525	Temperatura	-100 a 1300 °C	± 0,1 % + 0,7 °C

Fonte: Autor (2021)

3.4 CÁLCULO DA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES TOTAIS DE BIOGÁS NO ATERRO

Como a realização desse cálculo demanda uma série de informações relativas à localidade onde o aterro se encontra, foi preciso realizar uma pesquisa junto a prefeitura do município e na Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). Assim, foi possível obter-se a maioria dos dados necessários para realização do cálculo da estimativa. Contudo, os dados relativos à população ano a ano estavam incompletos e, portanto, foi necessário calcular um valor aproximado se baseando nas informações disponíveis.

3.4.1 Dados populacionais

Os dados relativos à população do município durante o período no qual o aterro se manteve ativo foram retirados de censos do IBGE que forneceram valores para os anos 2000, 2007, e 2017. Os dados nos demais anos foram calculados com base na taxa de crescimento populacional do município durante esse intervalo de tempo (2000-2017), encontrada a partir da Equação 3.1.

$$Tx = \left(\sqrt[t]{\frac{Pf}{Pi}} - 1 \right) * 100 \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde: Tx = taxa de crescimento populacional; t = intervalo em anos; Pi = população inicial; Pf = população final

Uma vez que a taxa de crescimento foi encontrada, ela foi aplicada sobre os valores divulgados pelo IBGE e uma estimativa da população para todos os anos pode ser feita. Os dados obtidos estão presentes na Tabela 10.

Tabela 10 – Estimativa da população do município por ano

ANO	POPULAÇÃO
2002	263.331
2003	268.318
2004	273.399
2005	278.576
2006	283.851
2007	289.226
2008	294.703
2009	300.284
2010	305.970
2011	311.764
2012	317.668
2013	323.684
2014	329.813
2015	336.059
2016	342.423
2017	348.907
2018	351.686

Fonte: Autor (2021)

3.4.2 Condições climáticas

Segundo Paz e Firmo (2018), para a aplicação do modelo do IPCC (2000) se faz necessário o levantamento de dados da pluviometria anual acumulada (mm.ano^{-1}) considerando, no mínimo, uma série histórica de 30 anos. As informações climáticas utilizadas foram os acumulados mensais de precipitação do município entre os anos de 1988 a 2017, disponíveis no site da Agência Pernambucana de Águas e Clima, conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Índice pluviométrico de Caruaru (Posto Caruaru-IPA)

ANO	mm.ano ⁻¹	ANO	mm.ano ⁻¹	ANO	mm.ano ⁻¹	ANO	mm.ano ⁻¹
1989	869,2	1997	671,5	2005	750,0	2013	643,5
1990	592,7	1998	342,2	2006	547,1	2014	503,1
1991	501,3	1999	424,4	2007	706,7	2015	400,4
1992	810,6	2000	974,6	2008	663,9	2016	476,6
1993	329,2	2001	586,2	2009	759,3	2017	729,1
1994	840,2	2002	818,3	2010	817,2	2018	519,6
1995	502,2	2003	443,6	2011	1016,7	2019	890,4
1996	557,8	2004	1022,7	2012	350,4	2020	713,2

Fonte: Adaptado de APAC (2021)

Os dados climatológicos são utilizados para o cálculo da constante cinética de decaimento (k), seguindo a condição *default* definida pelo IPCC (2000) e utilizada pelo MCT (2010):

- Se precipitação $< 1.000 \text{ mm.ano}^{-1}$, então k é igual a 0,065;
- Se precipitação $\geq 1.000 \text{ mm.ano}^{-1}$, então k é igual a 0,17.

No caso do município de Caruaru, no posto analisado (escolhido por conter a base de dados mais completa), houve 2 casos em que o índice pluviométrico ultrapassou os 1000 mm.ano^{-1} nos últimos 30 anos, sendo os 1022,7 milímetros do ano de 2004, o maior valor dentro o histórico analisado.

3.4.3 Geração de RSU por habitante e taxa de coleta

Segundo o seu plano de saneamento básico setorial para a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos (CARUARU, 2018) a produção média de resíduos sólidos urbanos por habitante é de cerca $0,95 \text{ kg/hab/dia}$, totalizando uma geração média de 330 toneladas/dia. Ainda segundo o município, o serviço de coleta abrange todo o seu território.

3.4.4 Composição gravimétrica dos resíduos

Os dados de composição gravimétrica utilizados nesta pesquisa foram obtidos a partir do plano de saneamento básico setorial para a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos (CARUARU, 2018), os dados foram utilizados também em anos anteriores pois não haviam

sido realizados estudos similares anteriormente. A Tabela 03, no item 3.1 já apresentou a composição gravimétrica do município de Caruaru.

3.5 PROCEDIMENTOS DE INVESTIGAÇÃO EM LABORATÓRIO

3.5.1 Caracterização geotécnica do solo das camadas de cobertura

Os parâmetros do solo utilizado na camada de cobertura final do aterro sanitário de Caruaru que foram analisados são a sua granulometria, os limites de Atterberg (Limites de Liquidez e de Plasticidade) e o peso específico dos grãos a partir de amostras retiradas no local. Para realização de tais procedimentos, irá se tomar como base as seguintes normas técnicas:

- NBR – 6457/16 (Versão corrigida 2016): Preparação de amostras
- NBR – 7181/16 (Versão corrigida 2: 2018): Análise granulométrica
- NBR – 6459/16 (Versão corrigida 2017): Limite de Liquidez (LL)
- NBR – 7180/16: Limite de plasticidade (LP)
- NBR – 6458/16 (Versão corrigida 2: 2017): Peso específico dos grãos

O intuito da análise granulométrica e dos ensaios de determinação dos limites de liquidez e plasticidade é identificar o tipo de solo presente nas camadas de cobertura do aterro para que se possa comparar a eficiência da camada desse aterro com outros tipos de camada.

3.5.2 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação que foi realizado nessa pesquisa é o Ensaio Proctor Normal que está normatizado pela NBR – 7182/16. Esse ensaio teve como objetivo obter os valores de compactação ótimos para o solo avaliado e usar os resultados para realizar uma comparação com o grau de compactação da camada de cobertura em conjunto com as densidades secas analisadas *in situ*. A curva de compactação a ser obtida também tornará possível desenvolver

um planejamento para os ensaios de permeabilidade do solo ao ar e com isso, investigar a influência da umidade de compactação e estrutura do solo compactado na percolação dos gases.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 APRESENTAÇÃO

Serão apresentados e discutidos agora os resultados dos ensaios realizados entre os meses de outubro e dezembro de 2020 no aterro sanitário municipal de Caruaru, bem como os resultados dos ensaios realizados nos laboratórios do GRS e de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco.

Os resultados apresentados foram divididos em ensaios de campo e ensaios de laboratório, sendo apresentados de forma individual e posteriormente sendo correlacionados.

4.2 ENSAIOS DE CAMPO

4.2.1 Placa de fluxo estática

Através dos ensaios de placa de fluxo foi possível determinar as emissões de CH_4 , CO_2 e O_2 do gás pela camada de cobertura e suas respectivas massas.

As informações apresentadas na Tabela 12 referem-se as concentrações e pressão dos gases na placa, dados esses gerados durante os ensaios e que foram utilizados para o cálculo do fluxo.

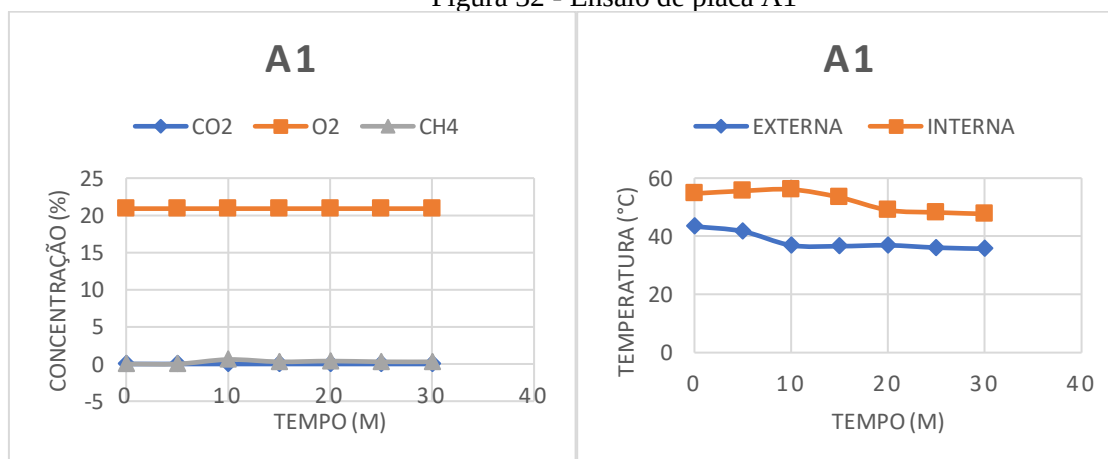
Tabela 12 – Resultado dos ensaios de placa de fluxo

Ensaio	Cota (m)	Data	Concentração final dos gases (%)			Pressão (kPa)	
			CH ₄	CO ₂	O ₂	Mín.	Máx.
A1	24,81	11/10/2020	0,3	0,0	20,9	0,006	0,012
A2	24,85	25/10/2020	0,0	0,0	20,9	0,0	0,006
A3	24,86	16/11/2020	0,0	0,0	20,9	0,0	0,003
A4	24,78	07/12/2020	0,0	0,0	20,9	0,0	0,006
B1	4,88	11/10/2020	0,0	0,0	20,9	0,003	0,006
B2	4,83	25/10/2020	0,0	0,0	20,9	0,0	0,012
B3	4,81	16/11/2020	0,0	0,0	20,9	0,003	0,019
B4	4,76	07/12/2020	0,0	0,0	20,9	0,003	0,016
C1	14,08	11/10/2020	0,0	0,0	20,9	0,006	0,009
C2	14,12	25/10/2020	0,0	0,0	20,9	-0,016	0,009
C3	14,05	16/11/2020	0,0	0,0	20,9	0,0	0,016
C4	14,09	07/12/2020	0,0	0,0	20,9	0,0	0,009
D1	14,76	11/10/2020	0,4	0,0	20,9	0,0	0,006
D2	14,53	25/10/2020	0,0	0,0	20,9	0,0	0,0
D3	14,68	16/11/2020	0,0	0,0	20,9	0,006	0,022
D4	14,91	07/12/2020	0,1	0,0	20,9	0,003	0,019
E1	24,81	12/10/2020	0,0	0,0	20,9	0,009	0,022
E2	24,85	25/10/2020	0,2	0,0	20,9	0,0	0,003
E3	24,86	16/11/2020	0,3	0,0	20,9	0,009	0,016
E4	24,78	07/12/2020	0,2	0,0	20,9	0,0	0,003

Fonte: Autor (2021)

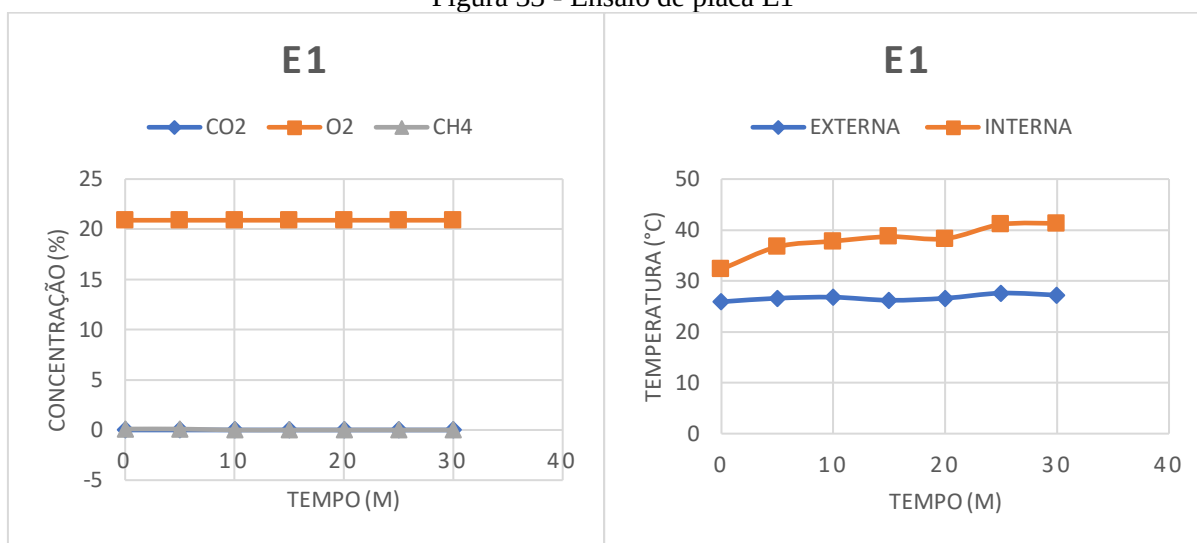
Nas Figuras 32 e 33 estão contidos os gráficos com as variações das concentrações dos gases em função do tempo de duração do ensaio e os gráficos com as variações das temperaturas internas e externas também em função do tempo de cada um dos ensaios realizados. Os resultados apresentados correspondem aos ensaios A1 e E1, os demais gráficos estão presentes no apêndice.

Figura 32 - Ensaio de placa A1



Fonte: Autor (2021)

Figura 33 - Ensaio de placa E1



Fonte: Autor (2021)

De maneira geral, os ensaios apresentaram resultados bem similares, com baixíssimas emissões de CH_4 , um valor constante de 20,9 % de O_2 e zero de CO_2 . Somente os pontos A, C e E apresentaram leituras que indicavam emissões de metano, porém, o valor máximo foi uma leitura de 0,6 %, sendo o restante sempre menor que 0,5%. E mesmo os pontos que apresentaram essas pequenas emissões de metano, não apresentaram leituras em ensaios realizados em dias diferentes.

Diante da pouca emissão ou inexistência de metano, da ausência de CO_2 e do valor constante de O_2 , pode-se trabalhar com 2 hipóteses. A primeira é que a camada de cobertura é eficiente e retém todo o gás no interior do maciço de resíduos, sendo os drenos a única possibilidade do biogás chegar até o ambiente externo ou que não há mais geração de gás.

Moreira *et al.* (2020), detectou na sua pesquisa que um alto grau de compactação da camada de cobertura (91,84%) fez com que uma das células do aterro sanitário de Campina Grande - PB obtivesse uma retenção de CH_4 e de CO_2 de mais de 95%. Contudo, é sabido que cada aterro sanitário é uma obra com características muito particulares, tendo em vista a variedade de fatores que podem influenciar a geração de metano assim como as emissões fugitivas através da camada de cobertura, fatores esses que mudam de um lugar para o outro como: clima, material usado na *liner* (camada de cobertura final), gravimetria do resíduo, espessura da *liner* etc. (MACIEL, 2003; MARIANO; JUCÁ, 2010; RACHOR *et al.*, 2013; NG *et al.*, 2015).

Mariano (2008) reporta na sua pesquisa que as emissões de CO₂ em camadas de cobertura de aterros sanitários são, de maneira geral, maiores que as emissões de CH₄. Esse fato pode ser explicado, pois parte do CH₄ que percola pela *liner* é convertido em CO₂ em virtude da atividade metabólica das bactérias metanotróficas, sendo esse processo denominado de oxidação do CH₄. (MOREIRA *et al.*, 2020). Contudo, observou-se o inverso nesse caso.

Com relação aos gráficos de temperatura observa-se que as temperaturas internas da placa de fluxo sofreram influência da variação da temperatura externa, ou seja, da temperatura ambiente e que quanto maior a temperatura externa, maior a diferença entre elas. Nota-se também que as temperaturas no interior da placa sempre foram maiores que as temperaturas externas.

Quanto as variações de pressão no interior da placa de fluxo durante os ensaios, observa-se que as variações foram positivas na grande maioria dos ensaios, com exceção do ensaio D2, em que a pressão se manteve nula. Nota-se também que em grande parte dos ensaios a leitura inicial foi positiva, apenas o ensaio C2 se iniciou com uma pressão negativa (-0,016 kPa), foi também o ensaio com a maior variação de pressão, 0,025 kPa ou 25 Pa.

4.2.2 Fluxo de CH₄

Os dados sobre o fluxo de gás foram classificados tanto por faixa de massa de CH₄ na placa de fluxo medido durante o ensaio quanto por uma estimativa feita por ano, conforme mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 – Faixa de fluxo e massa (médios) de CH₄

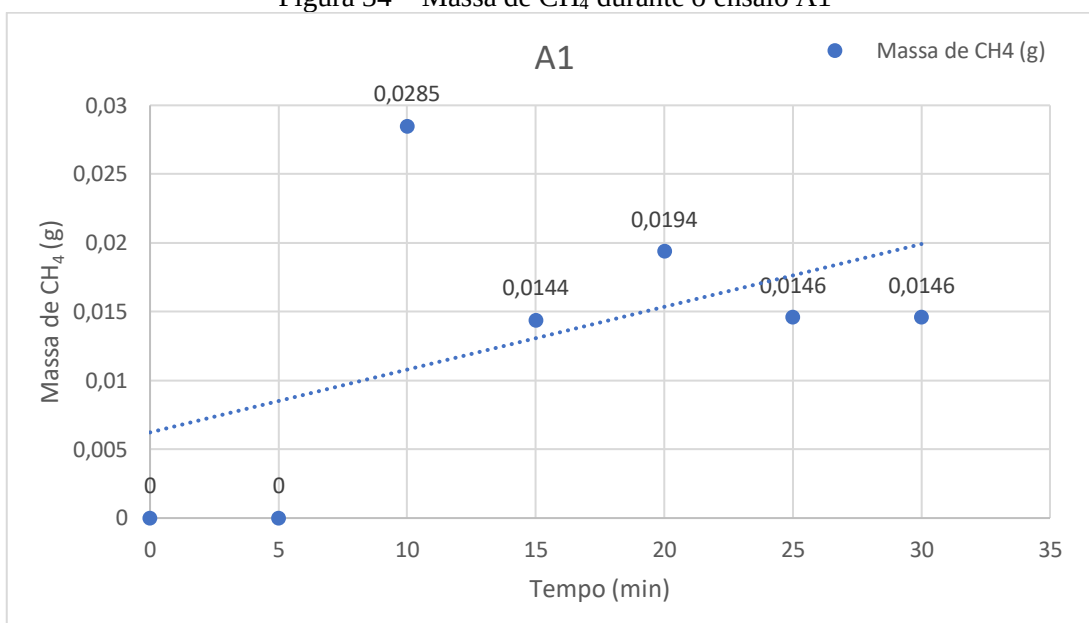
Ensaio	Massa de CH ₄ na placa de Fluxo (g)	Fluxo de CH ₄ (Kg/m ² . ano)
A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4, C1, C2, C3, C4, D2, D3, E1.	0	0
A1	1,44 x 10 ⁻²	1,580
D1	2,007 x 10 ⁻²	2,198
D4	5,064 x 10 ⁻³	0,555
E2	9,99 x 10 ⁻³	1,094
E3	1,5157 x 10 ⁻²	1,660
E4	1,005 x 10 ⁻²	1,100

Fonte: Autor (2021)

Na maioria dos ensaios, a concentração de metano e dióxido de carbono foram nulas. Apenas nos ensaios A1, D1, D4, E2, E3 e E4 foram identificados índices de metano, portanto somente nestes ensaios foi calculado a massa do gás e o fluxo através da camada de cobertura, contudo, em nenhum desses ensaios a concentração chegou a valores superiores a 1,0 %. A duração de todos os ensaios foi de 30 minutos e em nenhum deles houve grandes variações de pressão, tendo essas mudanças de pressão variado entre -16 e 22 Pa.

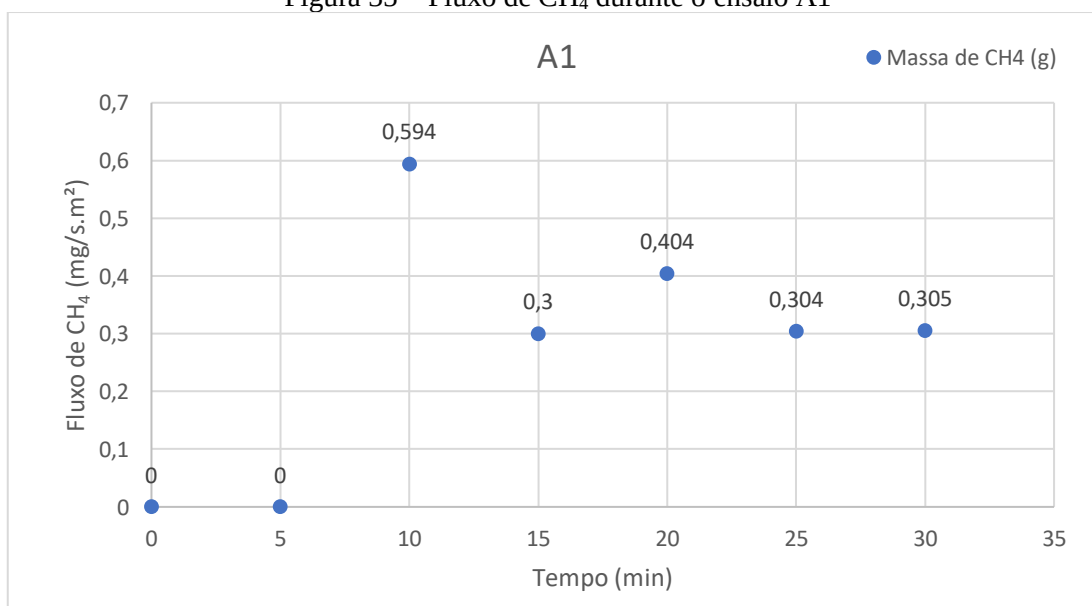
As Figuras 34 a 45 apresentam de forma detalhada as medições da massa e do fluxo de CH_4 nos ensaios que apresentaram indício do gás.

Figura 34 – Massa de CH_4 durante o ensaio A1

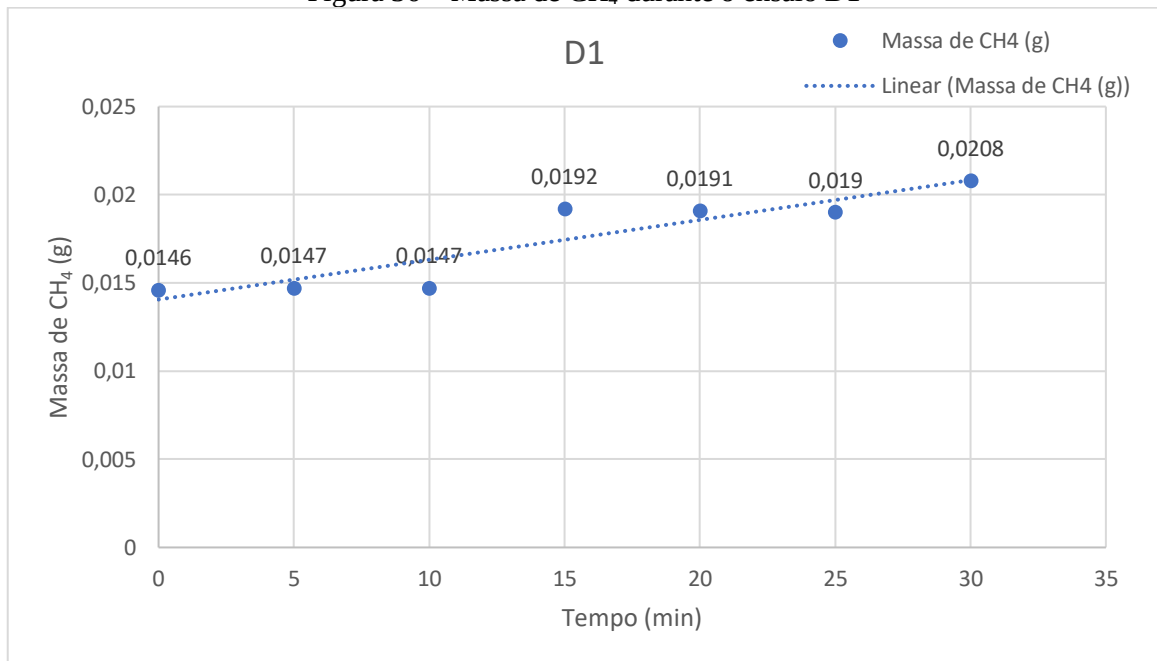


Fonte: Autor (2021)

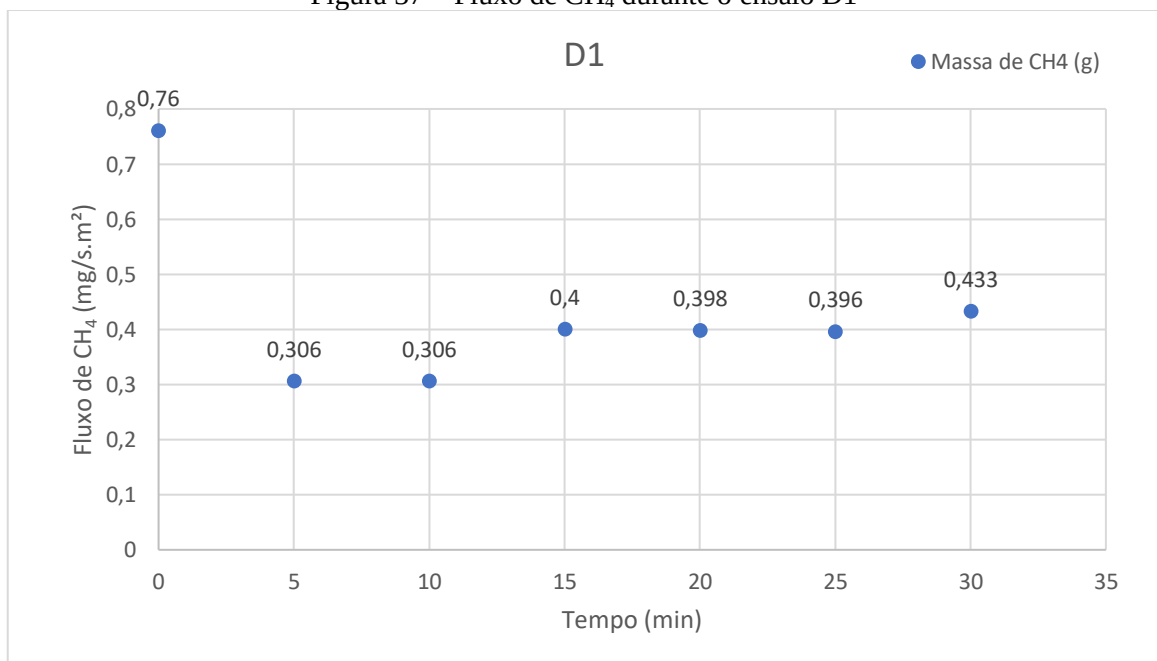
Figura 35 – Fluxo de CH_4 durante o ensaio A1



Fonte: Autor (2021)

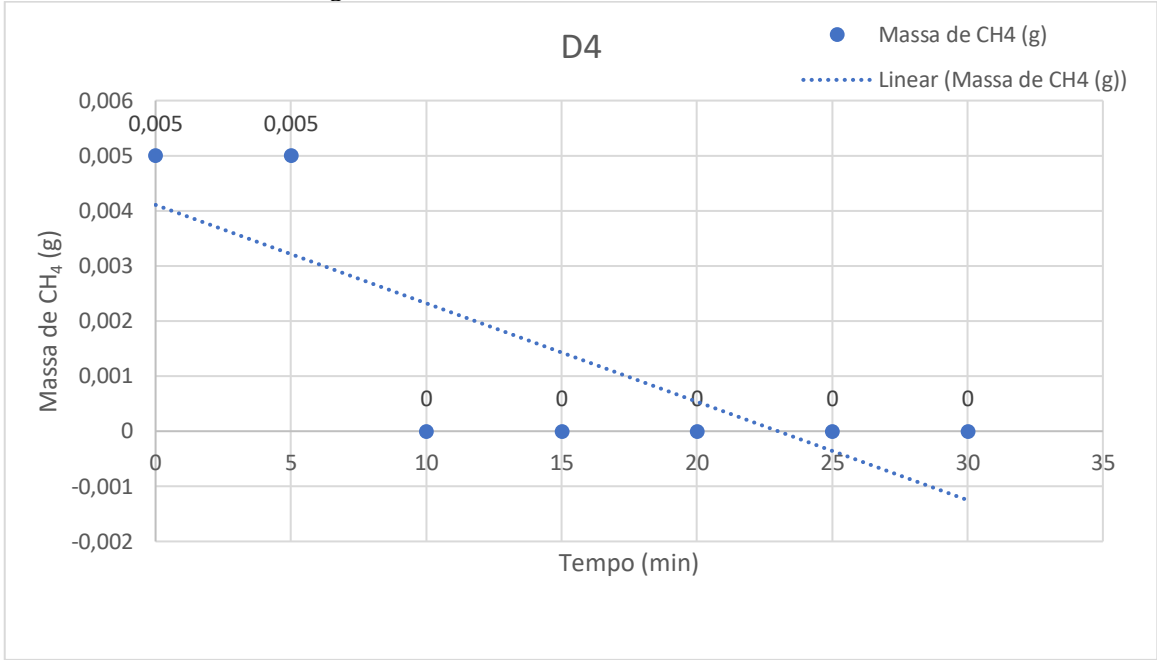
Figura 36 – Massa de CH₄ durante o ensaio D1

Fonte: Autor (2021)

Figura 37 – Fluxo de CH₄ durante o ensaio D1

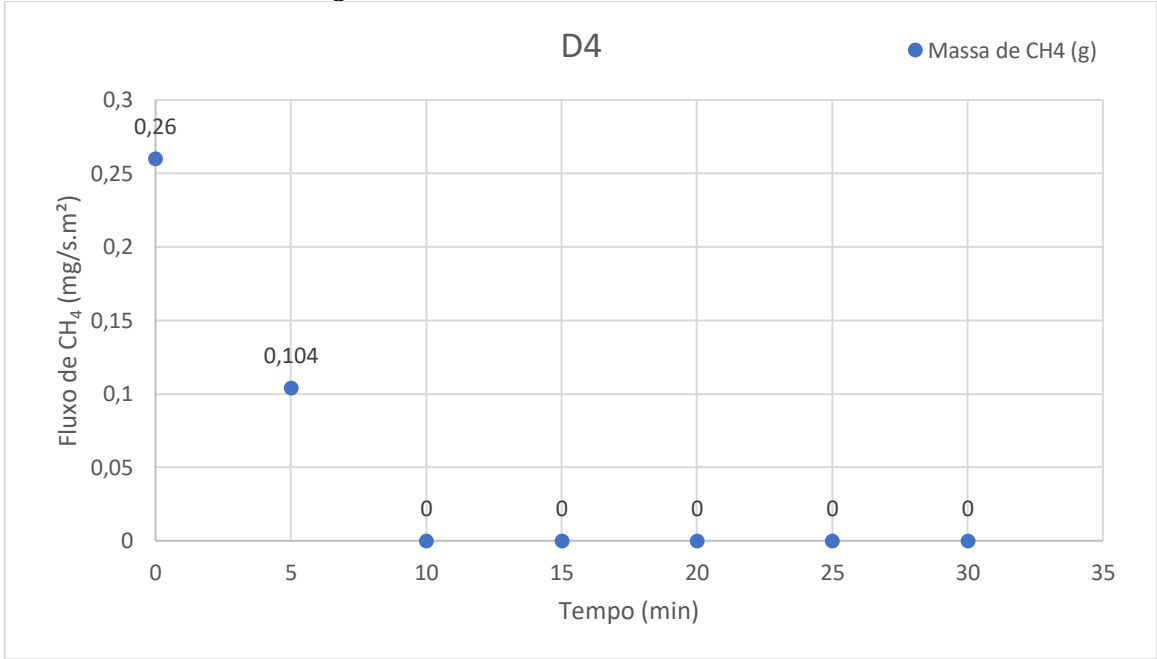
Fonte: Autor (2021)

Figura 38 – Massa de CH₄ durante o ensaio D4



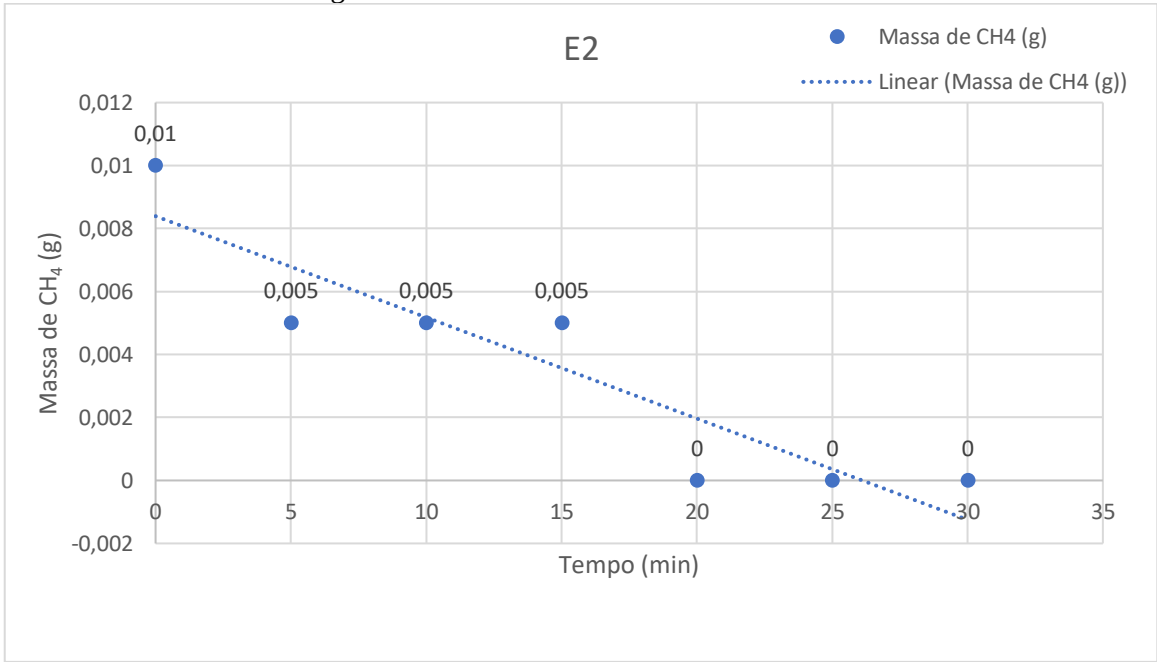
Fonte: Autor (2021)

Figura 39 – Fluxo de CH₄ durante o ensaio D4



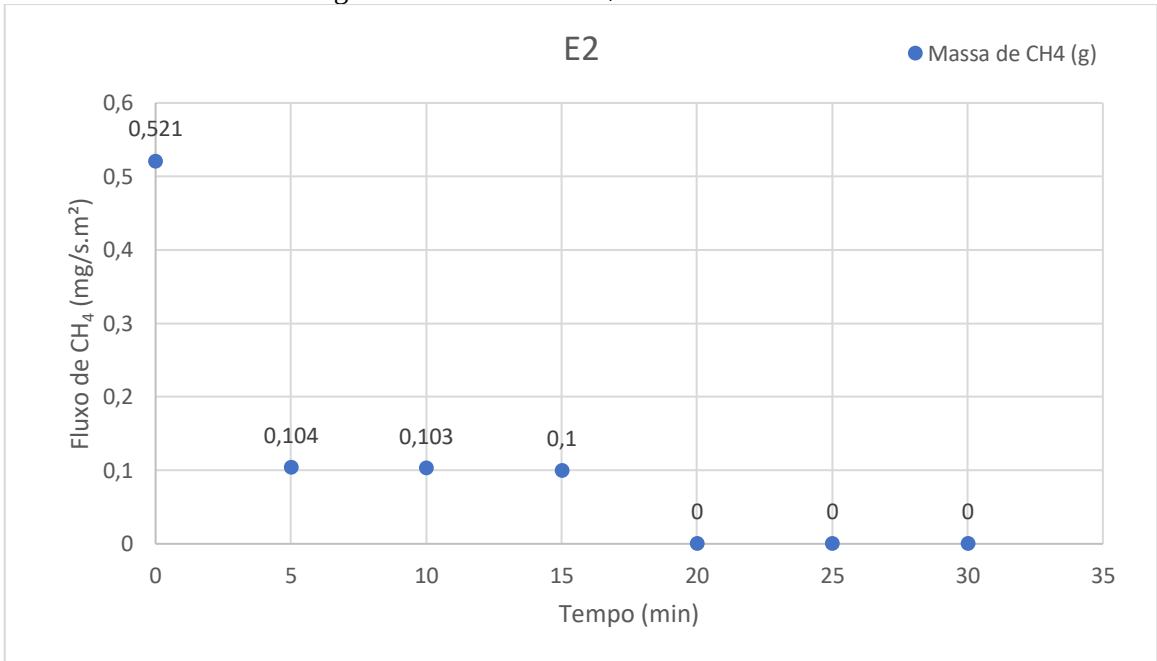
Fonte: Autor (2021)

Figura 40 – Massa de CH₄ durante o ensaio E2



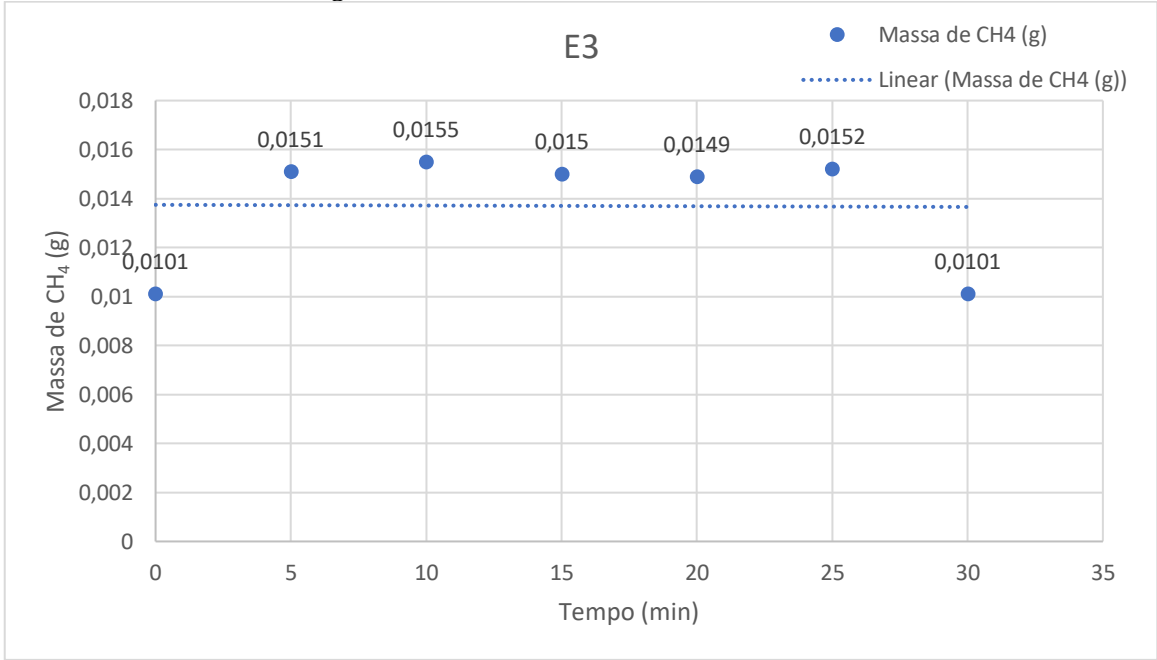
Fonte: Autor (2021)

Figura 41 – Fluxo de CH₄ durante o ensaio E2



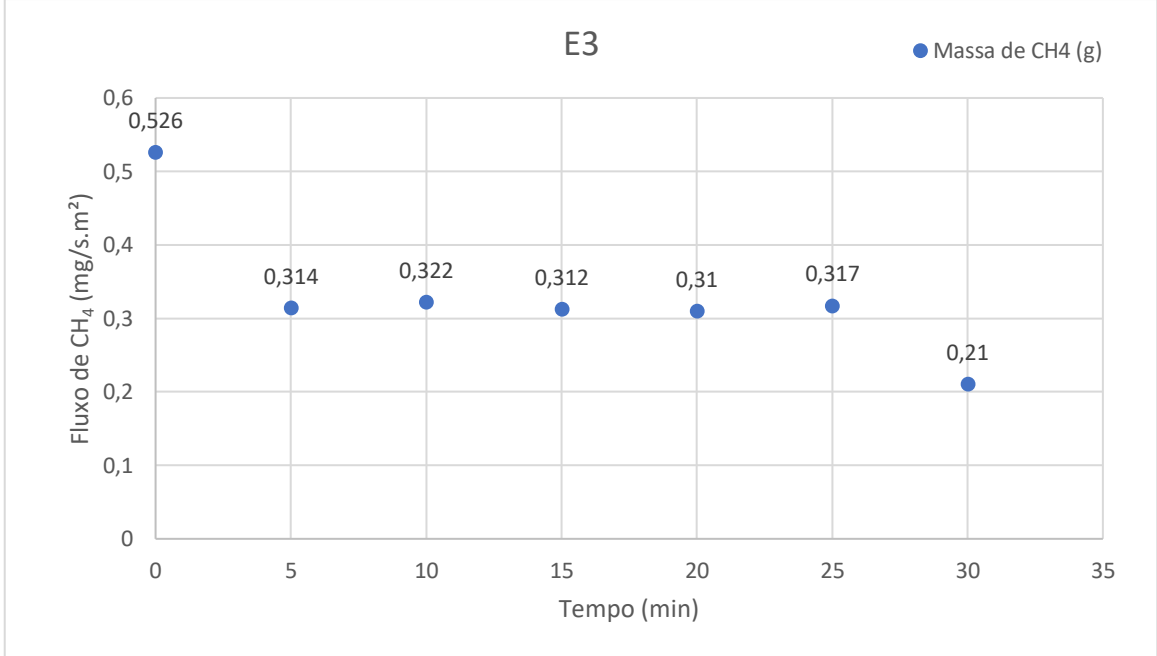
Fonte: Autor (2021)

Figura 42 – Massa de CH₄ durante o ensaio E3

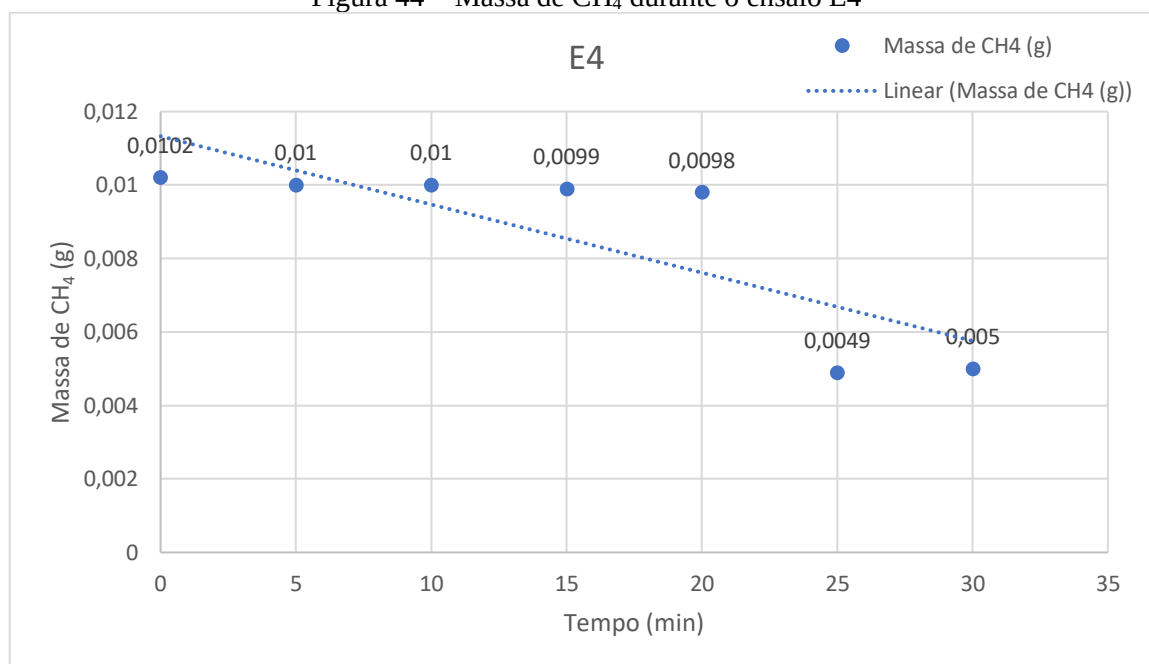


Fonte: Autor (2021)

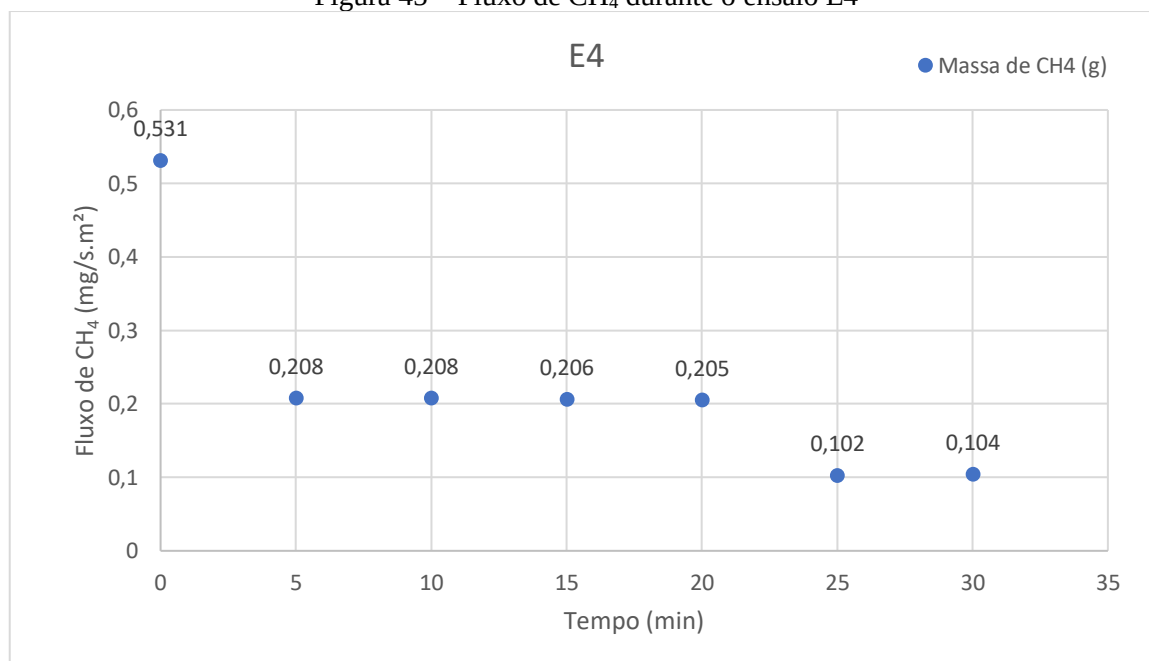
Figura 43 – Fluxo de CH₄ durante o ensaio E3



Fonte: Autor (2021)

Figura 44 – Massa de CH₄ durante o ensaio E4

Fonte: Autor (2021)

Figura 45 – Fluxo de CH₄ durante o ensaio E4

Fonte: Autor (2021)

A massa de metano durante os ensaios variou entre 0,005 e 0,0285 gramas e o fluxo mínimo e o máximo ficaram entre $1,02 \times 10^{-4}$ e $5,94 \times 10^{-4}$ g/m². s que representaria um fluxo anual entre 3,217 e 18,782 kg/ m². ano, isso corresponde a um volume de 4,493 a 26,231 m³/m².

ano. Na Tabela 14 estão detalhados os dados de fluxo e a massa de metano em cada um dos ensaios e as projeções em massa e volume para o período de 12 meses.

Tabela 14 – Fluxo e massa de CH₄ e projeções de emissões

Ensaio	% de CH ₄ na placa	Massa de CH ₄ na placa (g)	Fluxo de CH ₄					Classificação do fluxo
			g/s. m ²	g/dia. m ²	Kg/ano. m ²	m ³ /m ² . dia	m ³ /m ² . ano	
A1	0,3	0,0144	0,0001	8,64	3,11	0,0144	5,173	Baixo
D1	0,4	0,02	0,000139	12,01	4,323	0,0199	7,160	Baixo
D4	0,1	0,005	3,47E-05	2,998	1,079	0,0047	1,704	Baixo
E2	0,2	0,01	6,94E-05	5,996	2,158	0,0096	3,454	Baixo
E3	0,3	0,015	0,000104	8,985	3,234	0,0142	5,121	Baixo
E4	0,2	0,01	6,94E-05	5,996	2,158	0,0095	3,437	Baixo

Fonte: Autor (2021)

De todos os 20 ensaios de placa realizados no aterro sanitário, apenas 6 apresentaram alguma emissão de CH₄, contudo as leituras indicam que o fluxo do gás é muito baixo, ficando entre 03 e 12 g/dia.m² ou 1,08 a 4,32 kg/ano.m².

Em termos de volume, os valores do fluxo ficam entre 0,005 e 0,02 m³/m². dia, ou seja, 1,7 m³/m².ano e 7,16 m³/m².ano.

Se considerarmos o fluxo de metano através da camada de cobertura de todo o aterro como a média de todos os ensaios de placa multiplicado pela área do aterro (144.101,8 m²), a estimativa de emissões no aterro de Caruaru durante o período em que foi realizado esta pesquisa era de 432,017 kg/dia ou 155,486 t/ano a 1.730,066 kg/dia ou 622,952 t/ano considerando as áreas de berma e de talude.

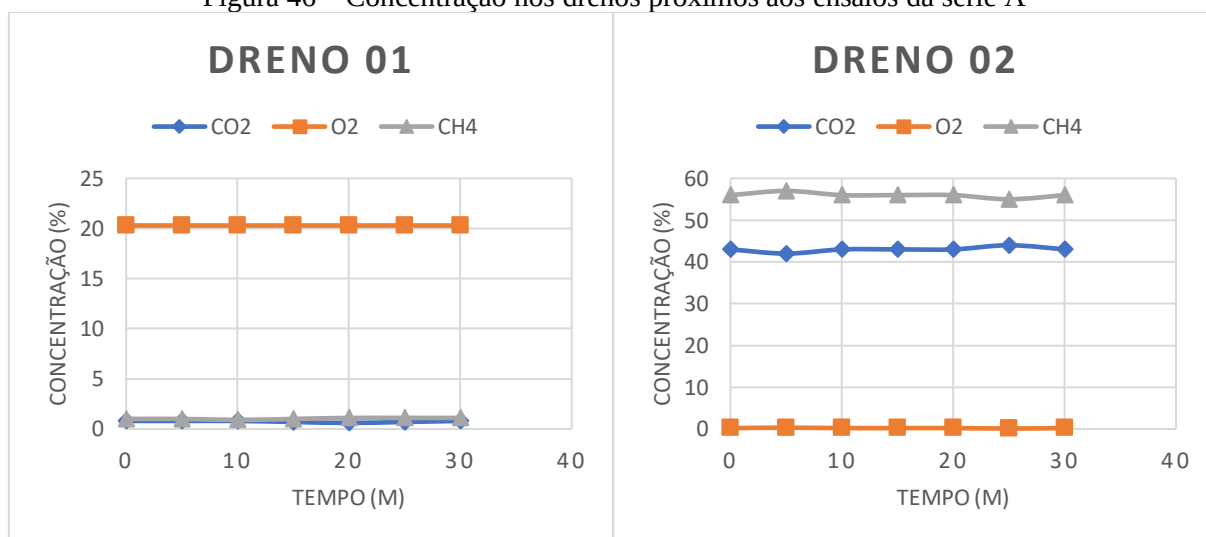
Silva, Freitas e Candiani (2013), verificaram que os aterros sanitários Bandeirantes e Caieiras, ambos considerados de grande porte, apresentaram um fluxo maior, sendo de 0,00126 m³.CH₄.m⁻².h⁻¹ e 0,01222 m³.CH₄.m⁻².h⁻¹, respectivamente. Considerando a área do Aterro Bandeirantes a emissão total foi de 504 m³.CH₄.m⁻².h⁻¹, tendo a camada uma eficiência quanto a retenção de gases de 84%. A emissão total no Aterro Caieiras foi de 3.840,6 m³.CH₄.m⁻².h⁻¹, sendo a eficiência da camada de 65%. Na pesquisa realizada por Maciel e Jucá (2011) as emissões fugitivas também apresentaram um fluxo maior, com valores na faixa de 2,10 a 984,70 g.m⁻².dia⁻¹ e média de 161,50 g.m⁻².dia⁻¹. Já os valores obtidos por Oliveira, Ritter e Mannarino (2013) no lixão remediado de Seropédica (RJ) cujo fluxo de CH₄ variou de 0 a 2,10 g.m⁻².dia⁻¹, foram menores que os obtidos no Aterro de Caruaru.

Emissões fugitivas de CH_4 são reportadas para o aterro de Palermo, na Itália, por Trapani, Bella e Viviani (2013), cuja faixa de valores foi de 0,09 a 1.118,00 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Já Capaccioni *et al.* (2011) verificaram fluxos de CH_4 variando de 0 a 2.483,00 $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o aterro de Fano, também na Itália. Os fluxos mássicos de CH_4 reportados nesses casos consistem em uma faixa de valores consideravelmente maiores quando comparada aos resultados obtidos para o aterro analisado nesse estudo.

4.2.3 Concentração e vazão de biogás nos drenos

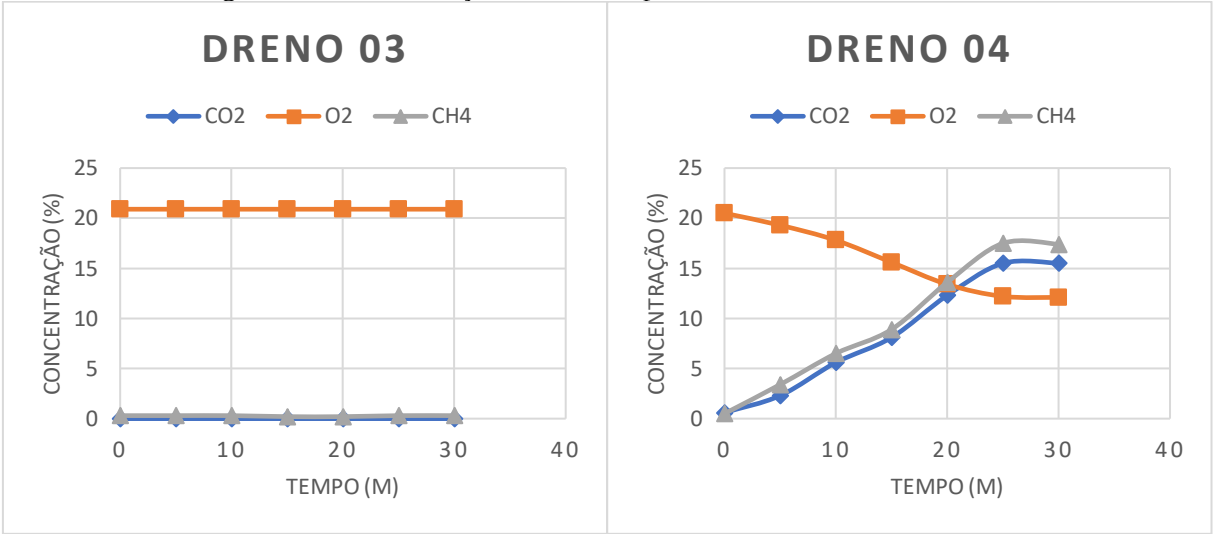
A variação da concentração de gases em função do tempo em cada um dos drenos analisados está apresentada nas Figuras 46 a 50. Foram avaliadas as concentrações de CH_4 , CO_2 e O_2 .

Figura 46 – Concentração nos drenos próximos aos ensaios da série A



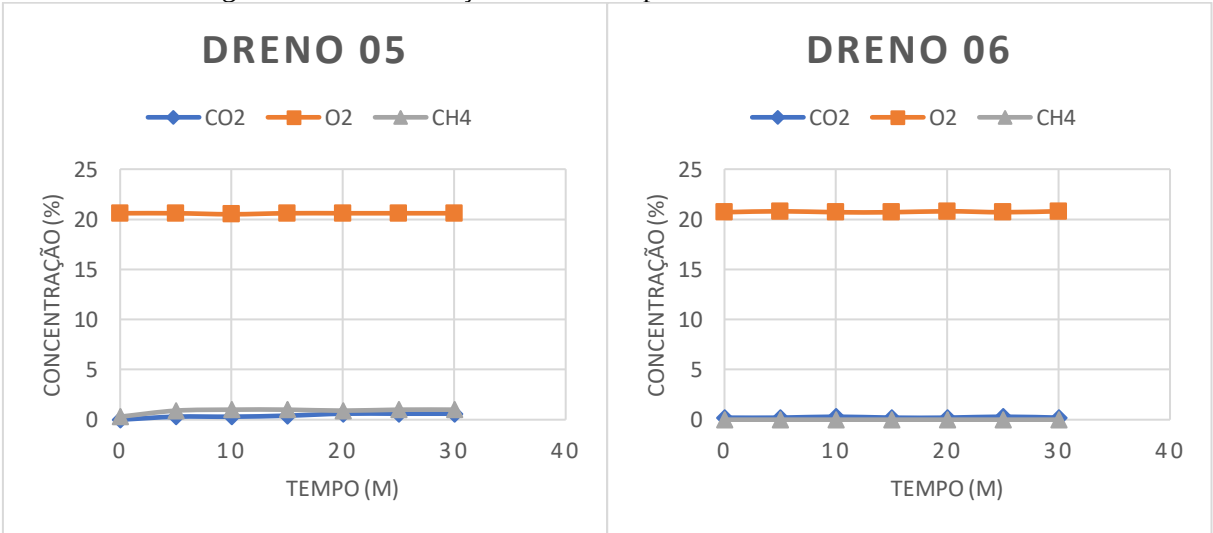
Fonte: Autor (2021)

Figura 47 – Concentração nos drenos próximos aos ensaios da série B



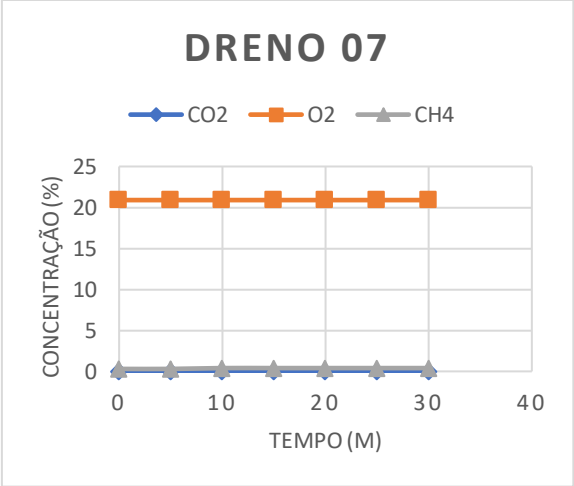
Fonte: Autor (2021)

Figura 48 – Concentração nos drenos próximos aos ensaios da série C



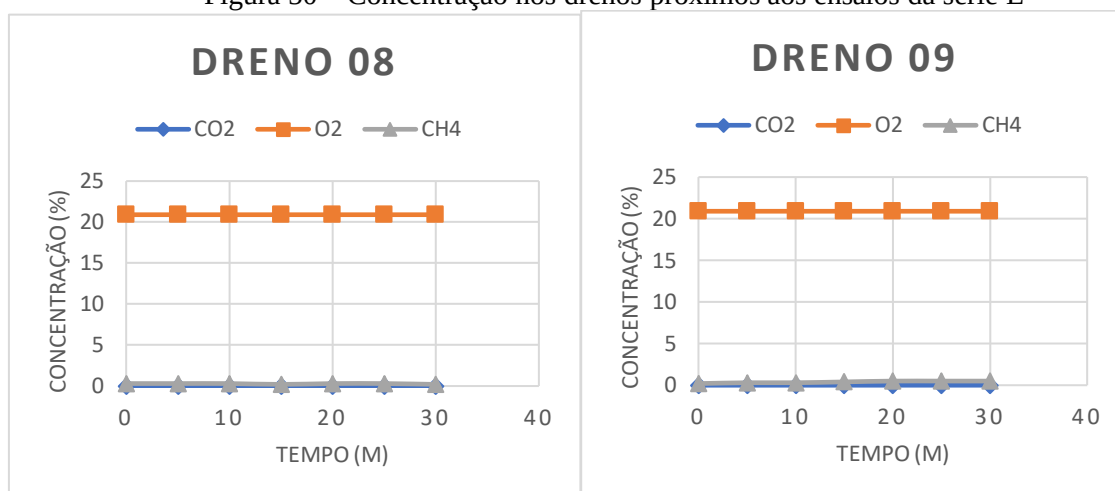
Fonte: Autor (2021)

Figura 49 – Concentração no dreno próximo aos ensaios da série D



Fonte: Autor (2021)

Figura 50 – Concentração nos drenos próximos aos ensaios da série E



Fonte: Autor (2021)

Os ensaios realizados nos drenos 02 e 04 foram os que apresentaram as maiores quantidades de gás metano e dióxido de carbono, com 56% e 17,5% de CH₄ e 43% e 15,5% de CO₂ ao final do ensaio, respectivamente. A Tabela 15 apresenta de forma mais detalhada os resultados dos ensaios de concentração dos gases e pressão nos drenos de gás.

Tabela 15 – Resumo dos ensaios nos drenos de gás

Dreno	Duração (min)	Concentração final dos gases (%)			Pressão (kPa)	
		CH ₄	CO ₂	O ₂	Mín.	Máx.
01	30	1,1	0,8	20,3	0,000	0,042
02	40	56	43	0,2	0,000	0,025
03	30	0,3	0,0	20,9	0,000	0,012
04	60	17,5	15,5	12,1	0,061	0,084
05	40	1,0	0,6	20,6	0,000	0,025
06	30	0,2	0,0	20,8	0,003	0,009
07	40	0,4	0,0	20,9	0,000	0,032
08	40	0,3	0,0	20,9	0,000	0,019
09	30	0,5	0,0	20,9	0,000	0,006

Fonte: Autor (2021)

Para o cálculo de vazão foi utilizada a metodologia aplicada a Norma BSI 1042-2.3 – 19984 – Medição do fluxo de fluídos em condutos fechados. Método de velocidade de área - Métodos de medição de vazão em condições de fluxo turbulento ou assimétrico em dutos circulares, no qual a velocidade do gás foi obtida a partir da diferença das pressões. A duração

dos ensaios foi estabelecida em pelo menos 30 minutos para que houvesse a estabilização da leitura. As determinações das vazões nos drenos estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 – Fluxo de metano nos drenos de gás

Dreno	CH ₄ (%)	Velocidade	Vazão (m ³ /s) Ø = 25,4 mm	CH ₄				
				Vazão			Fluxo	
				m ³ /s	m ³ /h	m ³ /ano	kg/m ² .s	kg/m ² . ano
01	1,1	1,340	0,034026	0,000374	1,347426	11.803,46	0,000299	9.439,63
02	56	1,364	0,03464	0,019398	69,8345	611.750,2	0,015819	498.855,68
03	0,3	1,336	0,033935	0,000102	0,366497	3.210,52	8,19.10 ⁻⁵	2.581,66
04	17,5	1,343	0,034121	0,005971	21,4961	188.305,9	0,004786	150.934,17
05	1,0	1,332	0,033836	0,000338	1,218089	10.670,46	0,000274	8.633,41
06	0,2	1,332	0,033825	6,77E-05	0,243543	2.133,44	5,4.10 ⁻⁵	1.726,15
07	0,4	1,325	0,033658	0,000135	0,484674	4.245,75	1,1.10 ⁻⁴	3.471,32
08	0,3	1,320	0,033531	0,000101	0,362137	3.172,32	8,28.10 ⁻⁵	2.612,57
09	0,5	1,323	0,033603	0,000168	0,604853	5.298,51	0,000138	4.439,20
				TOTAL		840.590,5		682.693,79

Fonte: Autor (2021)

Guedes (2018), identificou que o somatório do volume de biogás captado pelo sistema de drenagem, composto também por 09 drenos verticais, do aterro sanitário de era de 108,2 Nm³.h⁻¹ numa célula com resíduo com idade de 270 dias, numa 2ª medição quando o resíduo atingiu a idade de 570 dias a geração foi de 29,3 Nm³.h⁻¹, uma redução de quase de 73% na geração do biogás. Já a vazão de CH₄ foi de 58,6 Nm³.h⁻¹ com t = 270 dias e 17,4 Nm³.h⁻¹ com t = 570 dias. Maciel e Jucá (2013), também já haviam detectado um decaimento similar (cerca de 70%) da vazão de CH₄ numa célula experimental no Aterro da Muribeca num intervalo de 550 dias

Esses valores estão dentro da faixa citada por Willumsen e Bach (1991) referente a dados coletados em 86 aterros sanitários de países diferentes, sendo verificada uma taxa de captação de biogás provável entre 0,8 e 10,0 Nm³.t⁻¹.ano⁻¹, a depender da idade dos resíduos, embora valores de até 20,0 Nm³.t⁻¹.ano⁻¹ tenham sido observados. Já Themelis e Ulloa (2006) relatam uma taxa média de captura de metano de 43 Nm³.t⁻¹.ano⁻¹, considerando uma média para 25 aterros sanitários na Califórnia.

Um estudo realizado por Reinelt *et al.* (2021), detectou que as emissões de um aterro sanitário no estado de Victoria, na Austrália, que opera desde 1970 e já recebeu mais de 2.500.000 m³ de resíduos, ao receber um sistema de drenagem de gás, coletava cerca de 600 m³.h⁻¹ de biogás. A camada de cobertura nesse aterro possui cerca de 30 cm de espessura. Já Audibert e Fernandes (2012) relatam que as emissões fugitivas de biogás, no aterro de Londrina (PR), representaram mais de 80% do total gerado no empreendimento.

4.2.4 Concentração e pressão do biogás no contato solo-resíduo

As informações apresentadas na Tabela 17 referem-se as concentrações e pressão dos gases no final do ensaio, além dessas informações, a espessura das camadas foi averiguada. O anexo I apresenta todas essas informações de maneira detalhada.

Tabela 17 – Resultado dos ensaios com o DMPC

Ensaio	Cota (m)	Data	Concentração final dos gases (%)			Pressão (kPa)	
			CH ₄	CO ₂	O ₂	Mín.	Máx.
AP-1	24,81	11/01/2021	0,6	0,4	20,9	0,006	0,019
AP-2	24,85	12/01/2021	0,4	0,0	20,9	0,003	0,016
AP-3	24,86	13/01/2021	0,3	0,0	20,9	0,003	0,006
AP-4	24,78	14/01/2021	0,0	0,0	20,9	0,006	0,016
BP-1	4,88	11/01/2020	4,5	3,2	19,0	0,006	0,009
BP-2	4,83	12/01/2021	7,6	6,0	17,8	0,003	0,009
BP-3	4,81	13/01/2021	3,5	2,6	19,4	0,003	0,006
BP-4	4,76	15/01/2021	0,9	0,6	20,9	0,003	0,009
CP-1	14,08	11/01/2021	0,2	0,0	20,9	0,0	0,003
CP-2	14,12	12/01/2021	0,0	0,0	20,9	0,0	0,003
CP-3	14,05	14/01/2021	0,1	0,0	20,9	0,0	0,016
CP-4	14,09	15/01/2021	0,0	0,0	20,9	0,006	0,019
DP-1	14,76	11/01/2021	0,0	0,0	20,9	0,0	0,012
DP-2	14,53	13/01/2021	0,7	0,8	20,4	-0,012	0,0
DP-3	14,68	14/01/2021	0,0	0,0	20,9	0,006	0,022
DP-4	14,91	15/01/2021	0,5	0,4	20,6	0,0	0,003
EP-1	24,81	12/01/2021	0,2	0,0	20,9	0,003	0,006
EP-2	24,85	13/01/2021	0,1	0,0	20,9	0,0	0,006
EP-3	24,86	14/01/2021	0,0	0,0	20,9	0,0	0,006
EP-4	24,78	15/01/2021	0,0	0,0	20,9	0,0	0,009

Fonte: Autor (2021)

Em relação a espessura da camada de cobertura, em todos os pontos onde medidos, a espessura foi superior ao mínimo indicado pela NBR 13.896 (0,60 m). Os valores nos pontos onde o resíduo está disposto a cerca de 02 anos (AP-1 a AP-4) variaram entre 0,82 e 0,90 m, nos pontos com 04 anos (BP-1 a BP-4) os valores ficaram entre 0,86 e 0,92 m, nos pontos com o resíduo disposto a 6 anos a espessura da camada ficou entre 0,81 e 0,93 m. Os pontos onde a camada de cobertura possuía a maior espessura foi nos pontos DP-1 a DP-4 (8 anos), nesses pontos os valores variaram entre 1,13 e 1,35 m. Por último, nos pontos (EP-1 a EP-4), a espessura variou entre 0,80 e 0,94 m.

Quanto as concentrações de gases no ponto solo-resíduo, observa-se que de maneira geral os índices de CH_4 e CO_2 são baixos enquanto o O_2 tem quantidades semelhantes às encontradas na superfície, isso pode indicar que a produção de gás cessou ou que o ambiente aeróbio não favoreceu a produção de metano.

Nos ensaios da série “BP”, foram encontradas as maiores concentrações de metano e de dióxido de carbono, sendo os maiores valores 7,6% para o CH_4 e 6,0% para o CO_2 . Os resíduos presentes nesse local possuíam cerca de 04 anos de idade (1.440 dias).

As pressões verificadas nos ensaios foram, na maior parte dos casos, positivas, contudo, as variações foram pequenas. A maior variação de pressão aferida foi de 0,016 kPa ou 16 Pa e o maior valor absoluto foi de 0,022 kPa, ambos no ensaio DP-3. O único valor negativo foi medido no ensaio DP-2, nesse caso a pressão medida inicialmente foi de 0,0 kPa e no final do ensaio mediu-se -0,012 kPa, isso pode ser explicado por um fluxo inverso do gás, no sentido do ambiente externo para o ambiente interno da massa de resíduos.

Durante a realização dos ensaios, observou-se a presença de fissuras nas camadas geradas pela erosão causada por intempéries (Figura 51).

Figura 51 – Fissuras na camada de cobertura



Fonte: Autor (2021)

Segundo Maciel (2003), fissuras são um dos fatores que influenciam a geração de biogás, da mesma forma que quanto maior for a espessura da *liner* maior a possibilidade de retenção física, química e biológica dos gases. A partir das observações feitas em campo, nenhuma dessas fissuras possuía profundidade suficiente para ultrapassar a espessura das camadas analisadas. Contudo parte do líquido que originou as fissuras pode ter infiltrado a camada devido à natureza do solo e consequentemente alterar características do maciço como a umidade.

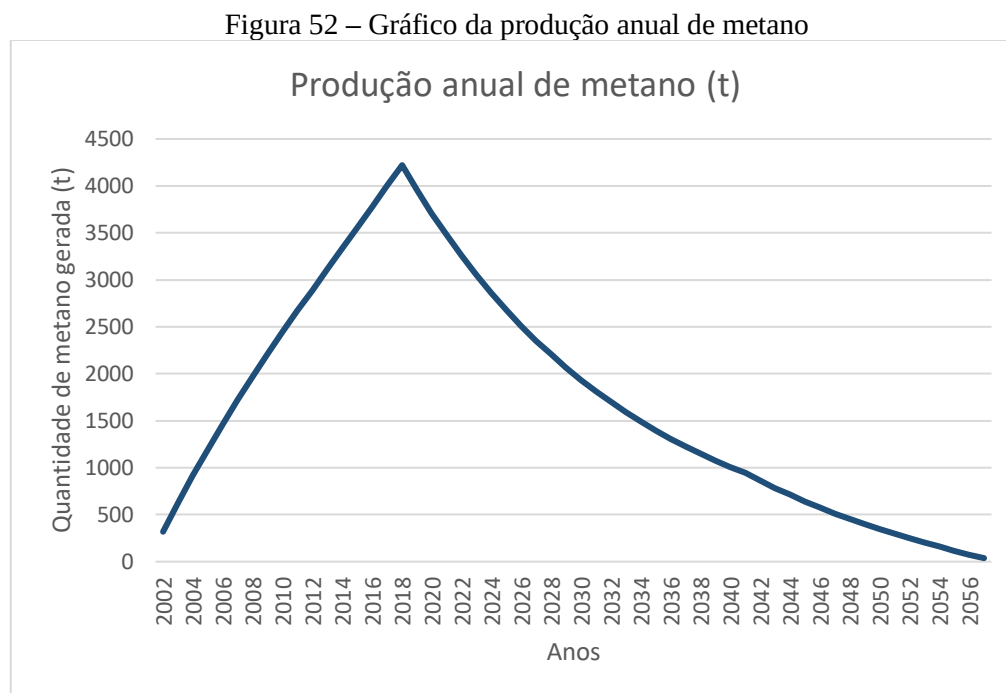
No estudo realizado por Moreira *et al.* (2020), também foram executados ensaios de na interface solo-resíduo, um ponto destacado nesse trabalho é que o grau de saturação do solo não foi um fator de alta relevância para redução do fluxo de CH₄, sendo o grau de compactação da camada e a sua espessura fatores de maior relevância. As variações da concentração dos gases nesses ensaios foi de 0,4 a 64,3% para o CH₄ e 6,1 a 45% para o CO₂, com valores médios de 31 e 28,7%, respectivamente.

4.2.5 Estimativa da geração de biogás no aterro

Durante o período em que o aterro sanitário esteve em funcionamento (2002-2018), estima-se que foi gerado um total de 122.584,827 toneladas de CH₄, que corresponde a 171.207.858,9 m³ do gás. Os resíduos dispostos em 2002 teriam um potencial gerador de

4.696,28 toneladas de CH_4 , das quais 319,26 teriam sido geradas no primeiro ano e o restante sendo gerado nos 39 anos seguintes, em quantidades cada vez menores graças a constante de decaimento.

Na Figura 52 pode-se observar um gráfico com as estimativas da geração de CH_4 no período de 2002 a 2057.



Fonte: Autor (2021)

As estimativas realizadas neste cálculo consideraram as condições ideais de coleta, operação do aterro e cobertura de resíduo, além de uma concentração média de 50% de metano no biogás.

4.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratório tiveram a finalidade de determinar as propriedades geotécnicas do solo utilizado na camada de cobertura do aterro sanitário. Os ensaios realizados nesse estudo foram: caracterização granulométrica; limites de consistência; compactação Proctor Normal.

4.3.1 Caracterização granulométrica

A Tabela 18 apresenta os resultados dos ensaios de granulometria, limites de liquidez e plasticidade, índice de plasticidade, porcentagem de finos e a denominação segundo a classificação unificada dos solos.

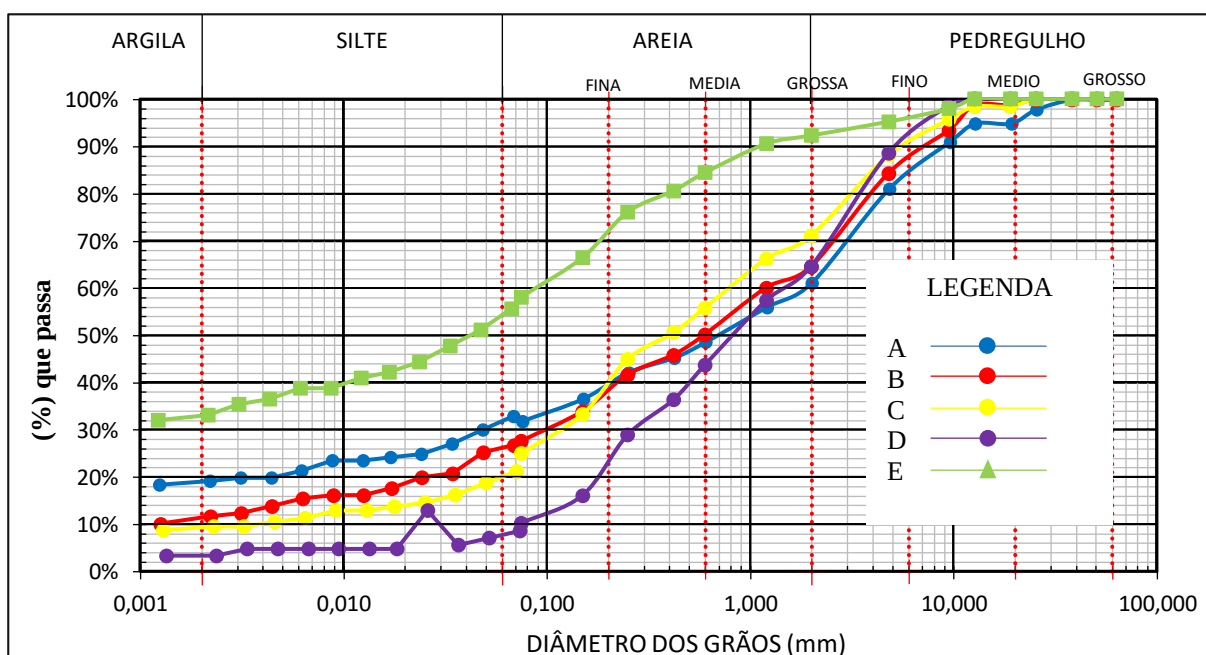
Tabela 18 – Análise granulométrica das amostras

Ensaio	Porcentagem (%)										Classif. Unific.
	Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Pedregulho (f, m, g)	LL	LP	IP	Finos	
01	19,00	12,79	7,58	9,21	12,57	38,83	35	18	17	32	SC
02	11,29	14,82	11,72	12,38	14,41	35,38	26	19	07	26	SF
03	9,22	10,55	19,21	16,75	15,29	28,99	21	16,5	4,5	20	SF
04	3,24	4,23	14,91	21,22	20,93	35,47	-	-	NP	8	SW
05	32,85	21,07	17,25	13,18	7,89	7,76	35,4	16,7	18,7	54	CL

Fonte: Autor (2021)

O percentual de finos foi definido pela quantidade da amostra que passou pela peneira #200 (0,075 mm). Na Figura 53 estão apresentadas as curvas granulométricas dos solos estudados. O anexo 1 apresenta as curvas de maneira individual.

Figura 53 – Curvas granulométricas dos solos analisados



Para determinar a classificação granulométrica do solo e determinar os percentuais apresentados, foi utilizada a ABNT/NBR 7181 – Versão corrigida (2018). Fazendo uso do Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS - sigla em inglês), pôde-se classificar as amostras em 02 (dois) tipos de solo, sendo o solo das quatro primeiras amostras, amostras essas retiradas dos locais onde foram feitos os ensaios das séries A, B, C e D, como solos de granulação grossa, em que mais da metade da amostra possui grãos maiores que a abertura que a peneira nº 40 (0,42 mm). Esses por sua vez, ficaram divididos em 3 subclasses distintas, foram elas: a) SC: areias argilosas, misturas bem graduadas de areia e argila; b) SF: areias siltosas, misturas mal graduadas de areia e silte; c) SW: areias bem graduadas, areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino. O segundo solo, retirado do ponto onde foram realizados os ensaios da série E, foi uma argila arenosa de baixa plasticidade classificada como CL pelo sistema unificado de classificação de solos – SUCS.

4.3.2 Índices físicos do solo

Na Tabela 19 estão apresentados os resultados das análises para obtenção dos índices físicos do solo, sendo, índices de vazios (e), porosidade (η) e grau de saturação (S_r). Foram avaliadas as condições encontradas em campo e as condições de densidade seca máxima e umidade ótima obtidas por meio do ensaio de compactação. Observa-se que os valores apresentados indicam que o índice de vazios e porosidade das amostras retiradas em campo foi relativamente maior que os valores encontrados no ensaio de Proctor Normal. Ambos os índices são proporcionais a quantidade de vazios encontrados no solo, esses vazios se conectados podem afetar a estrutura do solo compactado e facilitar o fluxo de gás pela camada.

Tabela 19 – Índices físicos do solo das amostras

Ensaio	Condições de umidade e densidade de campo			Condições de umidade e densidade da curva Proctor		
	e	η (%)	S_r (%)	e	η (%)	S_r (%)
A	0,498	33,24	90,64	0,366	26,79	88,94
B	0,584	36,87	83,71	0,324	24,47	79,28
C	0,629	38,61	64,44	0,304	23,31	93,90
D	0,580	36,71	78,85	0,431	30,11	96,01
E	0,614	38,04	85,39	0,404	28,77	88,60

Fonte: Autor (2021)

Observa-se que os valores apresentados na Tabela 19 indicam que o índice de vazios e porosidade das amostras retiradas em campo foi relativamente maior que os valores encontrados no ensaio de Proctor Normal. Ambos os índices são proporcionais a quantidade de vazios encontrados no solo, esses vazios se conectados podem afetar a estrutura do solo compactado e facilitar o fluxo de gás pela camada.

4.3.3 Compactação dos solos

Na Tabela 20 são apresentados os resultados dos ensaios de campo (densidade e umidade) e de laboratório (Proctor Normal) relativo à compactação dos solos, além da variação de umidade e grau de compactação do solo no campo. Esses resultados auxiliaram a avaliar a eficiência da compactação realizada em campo e consequentemente na sua capacidade de reter os gases no interior do maciço de resíduos.

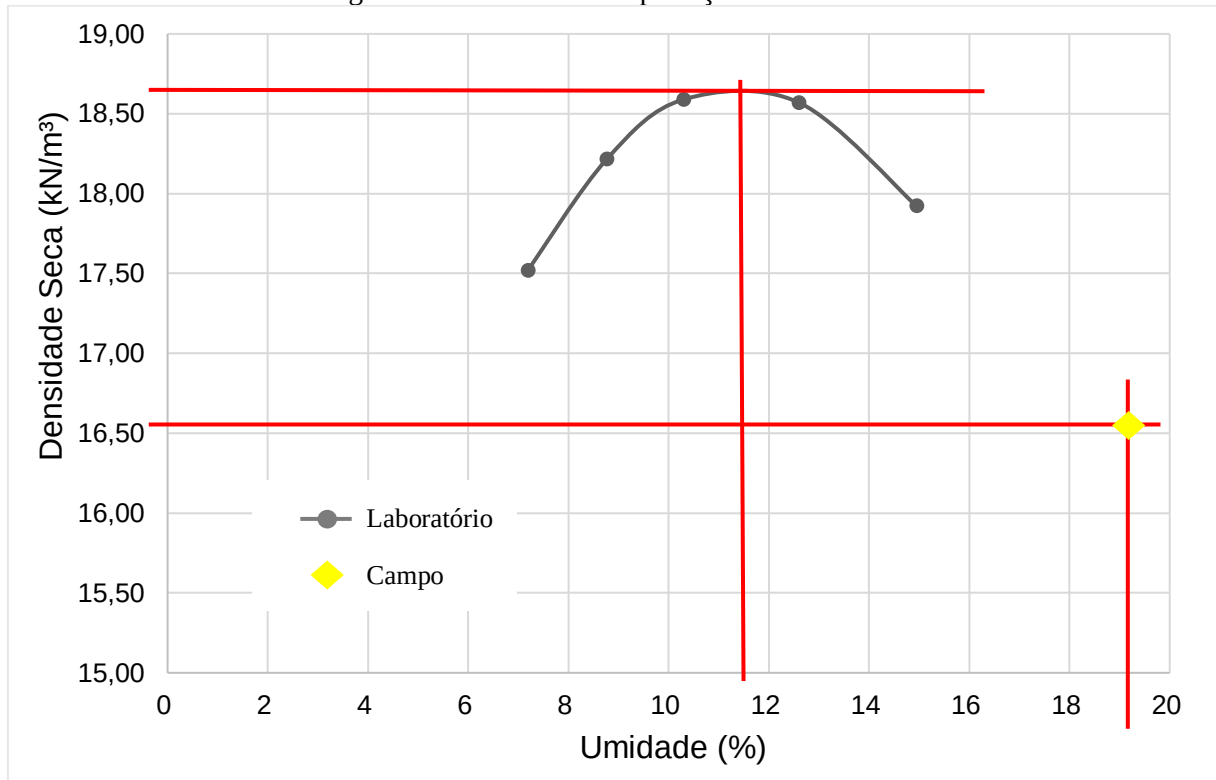
Tabela 20 – Condições de campo e resultado dos ensaios de compactação no laboratório

Ensaio	Condições de campo			Proctor Normal			
	γ úmida de campo (kN/m ³)	γ seca de campo (kN/m ³)	Umidade de campo (%)	γ seca máxima (kN/m ³)	Umidade ótima (%)	$\Delta h = h_{\text{campo}} - h_{\text{ótima}}$	GC (%)
A	19,48	16,54	17,88	18,64	11,50	6,58	89
B	19,41	16,39	18,46	19,62	9,90	6,49	83
C	18,43	15,99	15,25	19,99	8,80	7,19	80
D	19,50	16,66	17,03	18,39	8,20	8,46	90
E	18,88	15,70	20,28	18,05	12,98	7,30	87

Fonte: Autor (2021)

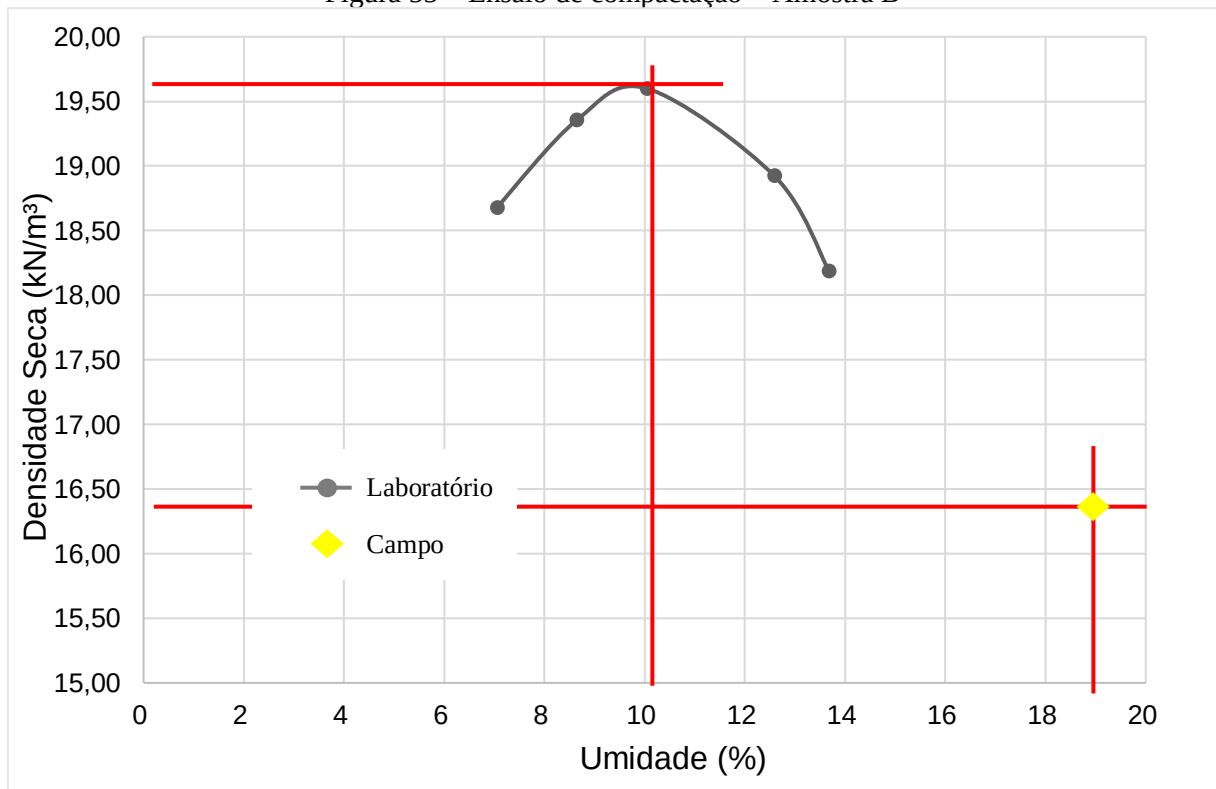
Nas Figuras 54 a 58 pode-se observar uma comparação entre os ensaios Proctor realizados em laboratório e os resultados encontrados em campo.

Figura 54 – Ensaio de compactação – Amostra A



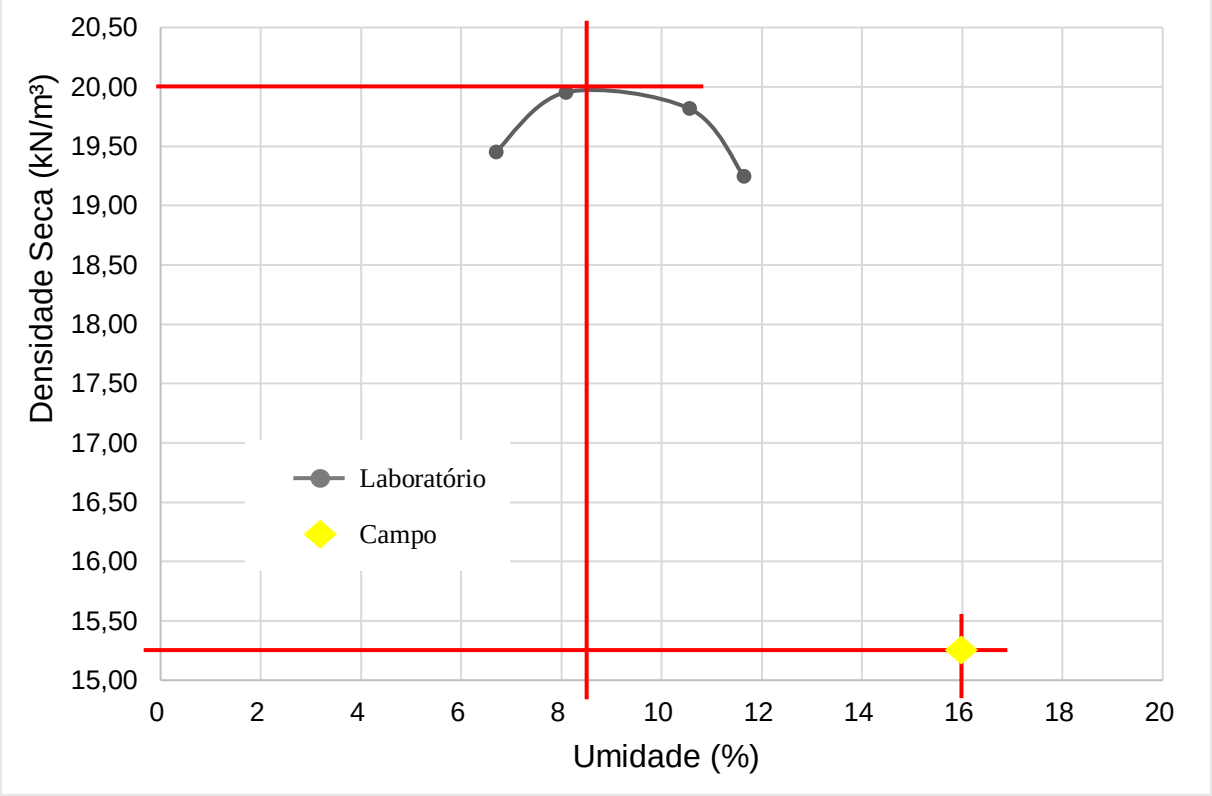
Fonte: Autor (2021)

Figura 55 – Ensaio de compactação – Amostra B



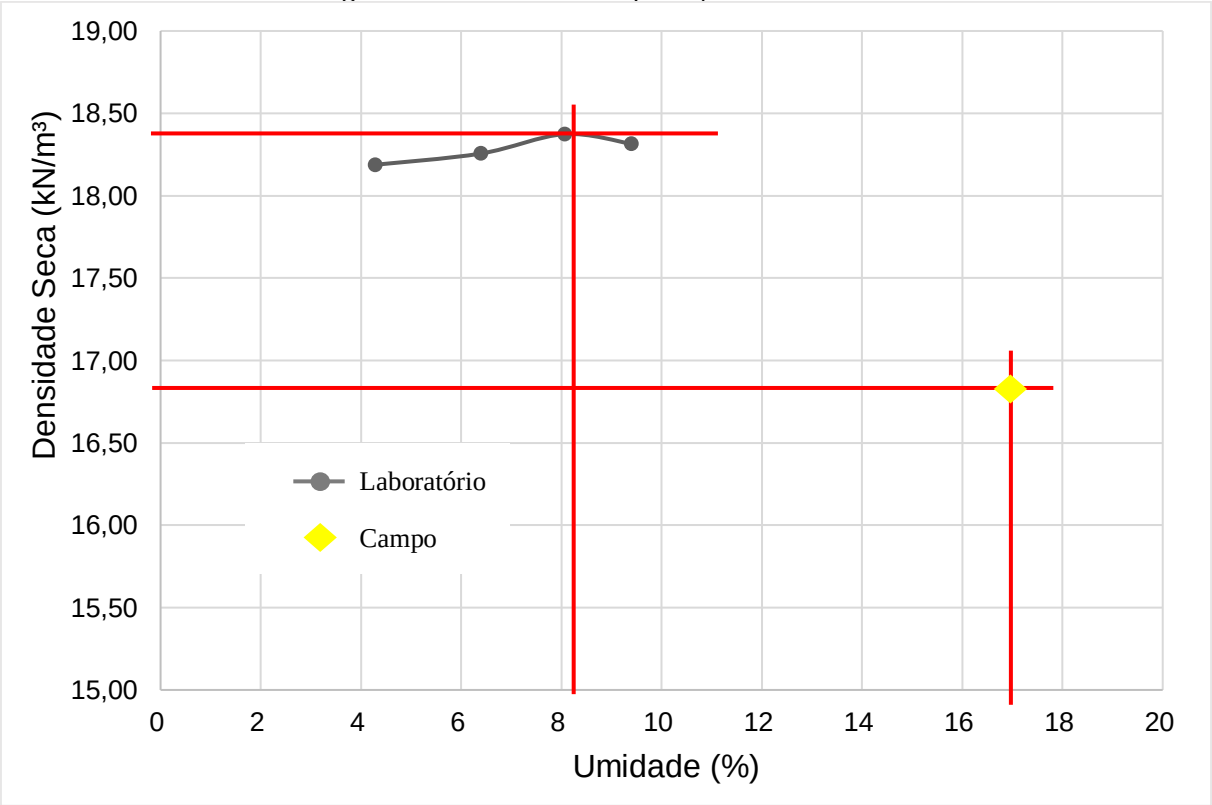
Fonte: Autor (2021)

Figura 56 – Ensaio de compactação – Amostra C



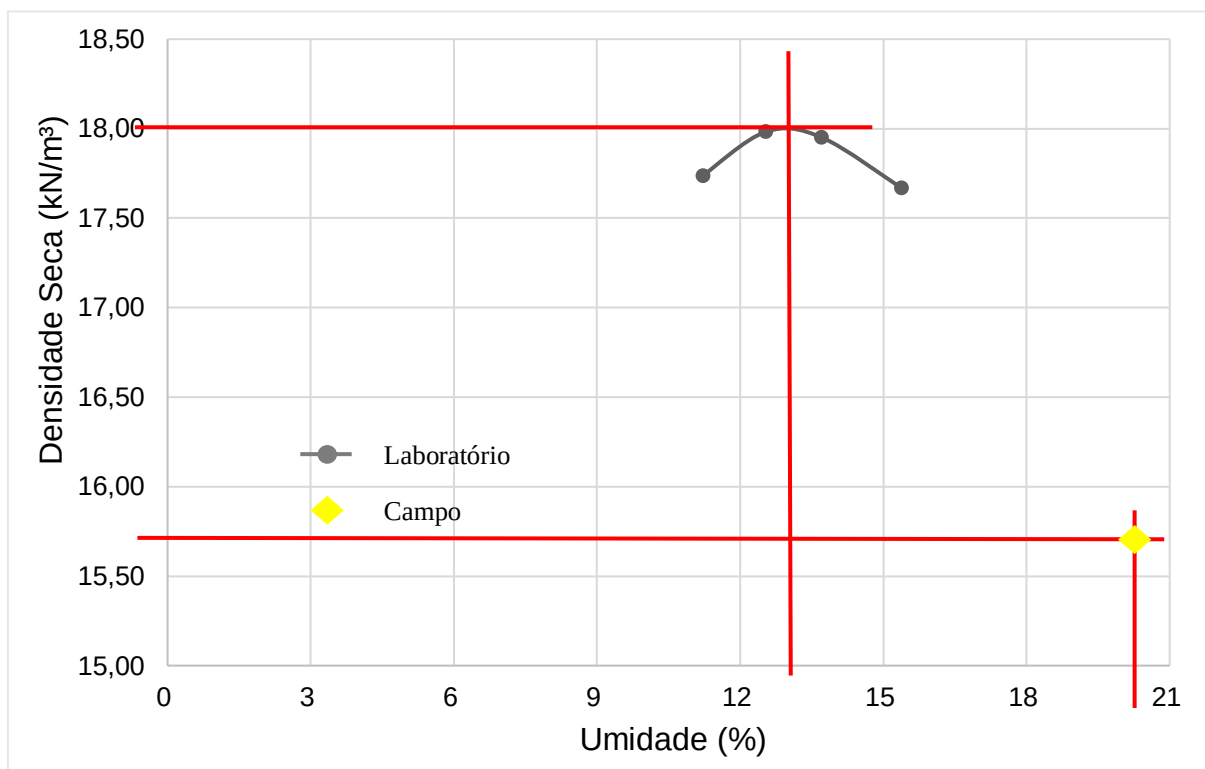
Fonte: Autor (2021)

Figura 57 – Ensaio de compactação – Amostra D



Fonte: Autor (2021)

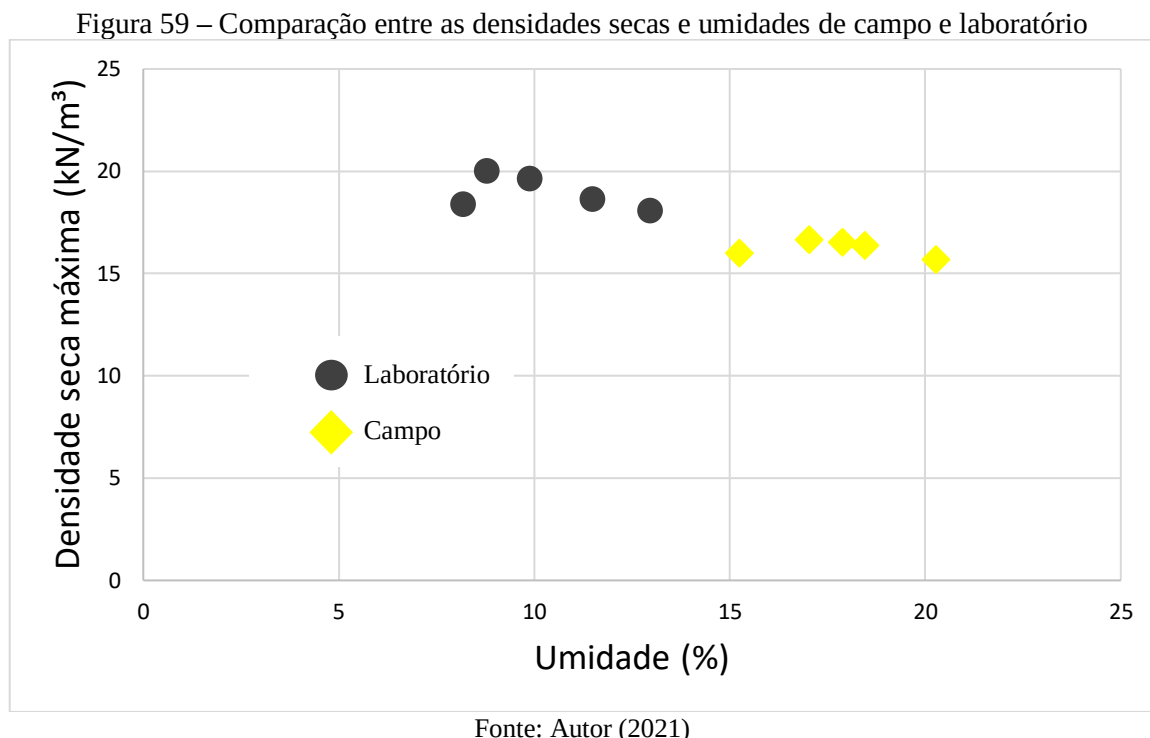
Figura 58 – Ensaio de compactação – Amostra E



Fonte: Autor (2021)

A partir da observação dos gráficos pode-se afirmar que as amostras de solo que foram coletadas em campo foram compactadas abaixo da densidade seca máxima obtida nos ensaios de compactação. A partir dessa constatação pode-se afirmar que isso pode afetar a permeabilidade das camadas, tendo em vista que solos com estruturas floculadas apresentam maior contração e permeabilidade que solos com estrutura dispersa.

Na Figura 59 são apresentadas as comparações dos resultados das densidades secas máximas e das umidades ótimas obtidas nos ensaios de laboratório com os resultados obtidos em campo. A simbologia aplicada no gráfico visa facilitar a visualização das variações entre os resultados de campo e de laboratório e consequentemente a comparação deles.



A Figura 60 apresenta os resultados do grau de compactação das amostras dividindo os resultados em duas faixas distintas, sendo 80% - 85%, com 2 ensaios pertencentes a esta faixa e 86% - 90% com 3 ensaios pertencentes a ela. Na pesquisa realizada por Moreira *et al.* (2020), um grau de compactação maior que 90% foi capaz de apresentar uma retenção de cerca de 95% do biogás.

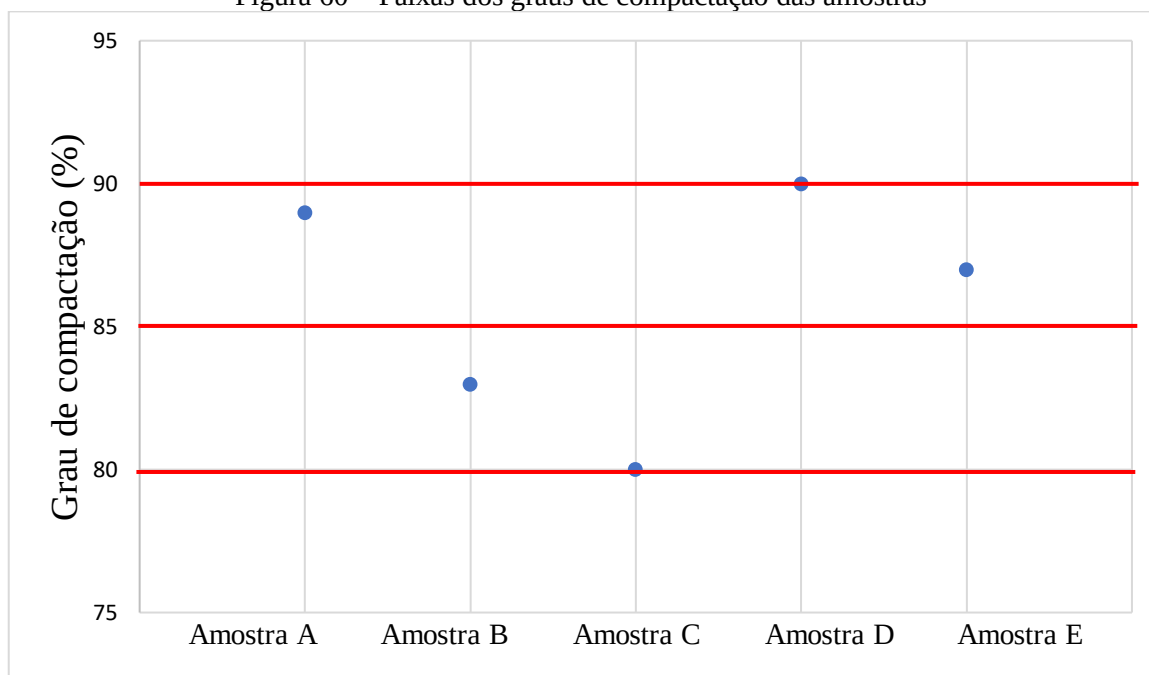
O grau de compactação encontrado em campo pode indicar que durante a execução da camada não ocorreu controle de compactação e que de maneira geral estes solos foram compactados no ramo seco da compactação (curva de ascensão do gráfico), aumentando a permeabilidade ao gás.

Observa-se no gráfico que o maior grau de compactação se deu no ponto onde a camada é mais espessa, isso pode indicar que nesse ponto houve um tráfego maior de máquinas realizando movimentação de “terra”, além disso nos pontos mais antigos, a camada ficou exposta mais tempo à ação de intempéries, fatores que podem contribuir com a acomodação do solo e eliminação de vazios.

Quanto a variação entre a umidade de campo e a umidade ótima, os desvios de umidade (Δh) variaram entre 6,5% e 8,5%, indicando a influência de eventos ambientais e climáticos na

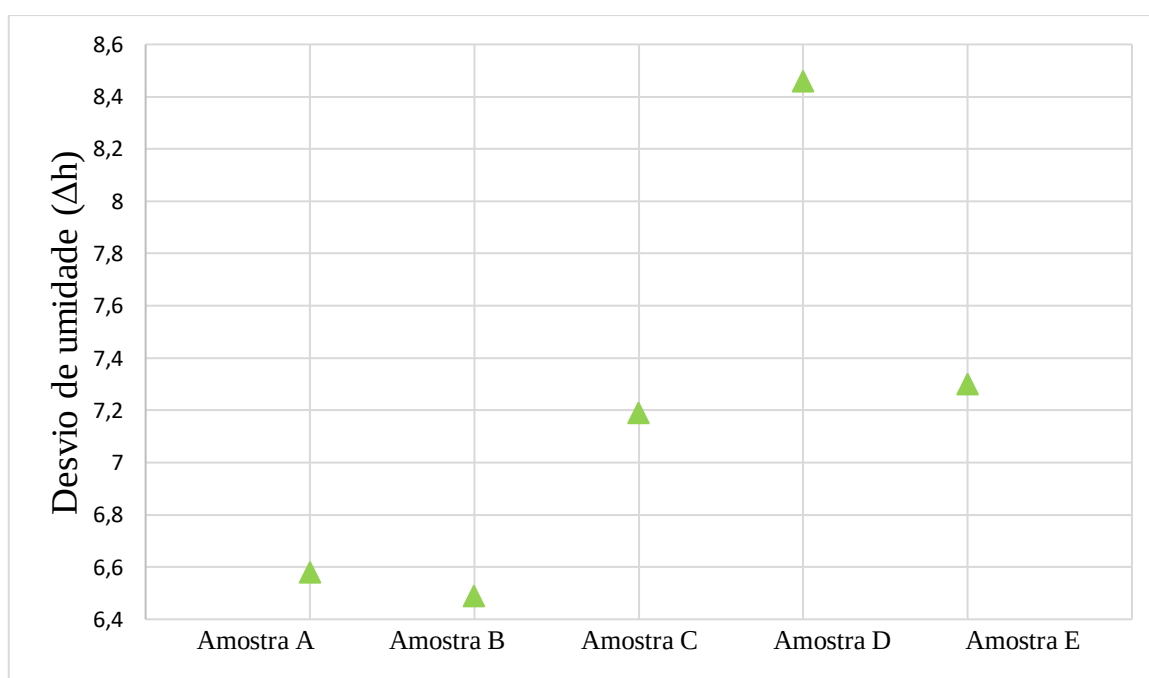
umidade do solo em campo. Na Figura 61 estão os resultados das variações de umidade por ensaio.

Figura 60 – Faixas dos graus de compactação das amostras



Fonte: Autor (2021)

Figura 61– Desvio de umidade (Δh) encontrado nos ensaios



Fonte: Autor (2021)

Os desvios de umidade do solo indicam a necessidade de uma cobertura vegetal sobre bermas e taludes, de modo que o solo recupere sua capacidade de retenção de água e, conseqüentemente, reduza sua permeabilidade ao ar.

Uma boa compactação reduz, entre outras coisas, a infiltração de líquidos, a dilatação e contração do solo, a permeabilidade ao ar e a redução volumétrica por variações de temperatura e processos de umidificação e secagem. Contudo, os resultados dos ensaios indicam que a estrutura das amostras de solo coletadas em campo possui um alto índice de vazios e uma estrutura floculada, causada pela compactação de baixa densidade realizada possivelmente no ramo seco da curva de Proctor. Esses fatores favorecem o fluxo de gases através da camada de cobertura.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE FUTURAS PESQUISAS

5.1 CONCLUSÕES

Estão presentes nesse capítulo as principais obtidas a partir das análises e ensaios realizados no período de realização dessa pesquisa.

5.1.1 Parâmetros geotécnicos do solo do aterro

Das 5 amostras de solos utilizados na camada de cobertura que foram avaliadas, 4 foram classificadas como solos arenosos e 1 como solo argiloso baseado nos ensaios de granulometria e na quantidade de finos. Quanto aos índices de vazios (e) encontrados nas amostras, seus valores variaram entre 0,5 e 0,63 enquanto a porosidade (η) variou entre 33,2% e 38,6% e o grau de saturação (S_r) entre 64,5% e 90,6%. A amostra de solo argiloso apresentou altos índices em todos os parâmetros.

No ensaio de compactação as curvas Proctor de todas as amostras tiveram um comportamento similar apesar de pequenas variações nos valores. Quanto ao grau de compactação, todas as amostras apresentaram valores abaixo do ideal, mostrando assim que a execução de compactação da camada não foi realizada corretamente.

Tanto o tipo de solo predominante (arenoso) na camada de cobertura, quanto os índices apresentados à primeira vista indicariam que haveria um alto fluxo de gás pela camada, contudo as altas espessuras aferidas em campo (entre 0,80 e 1,35 m), foram o primeiro obstáculo encontrado para que houvesse fluxo de gás através da camada de cobertura.

5.1.2 Ensaios de placa de fluxo, concentração solo-resíduo e vazão nos drenos

Os ensaios de placa de fluxo foram os primeiros ensaios realizados na pesquisa, o procedimento se mostrou de fácil execução e o simples manuseio dos equipamentos de

determinação das emissões de gases agilizaram o todo o processo. O tempo relativamente curto de cada ensaio (30 min), permitia a realização de até 05 ensaios por dia, não sendo possível realizar mais por conta da distância entre os pontos com resíduos de diferentes idades.

Todos os ensaios apresentaram baixas concentrações de CH_4 e nenhum indício de CO_2 , as quantidades de O_2 , no entanto, se mantinha iguais ou muito próximas às encontradas na atmosfera. Esse resultado indicou a não geração de gás ou uma alta eficiência da camada de cobertura na retenção dos gases.

O fluxo total de CH_4 através da camada de cobertura no Aterro Sanitário Municipal de Caruaru durante a realização dessa pesquisa foi de 432,017 kg/dia ou 155,486 t/ano a 1.730,066 kg/dia ou 622,952 t/ano considerando toda a área de disposição de resíduos.

Durante a realização dos ensaios de concentração e pressão com o DMPC no contato solo-resíduo algumas dificuldades precisaram ser superadas, a primeira delas foi a espessura das camadas que como já citado chegou a 1,35 m, além de ser excessivamente difícil realizar um furo tão profundo, o equipamento (trado) não possuía toda essa extensão, sendo necessário utilizar outras ferramentas e/ou extensões. Outra dificuldade a ser vencida foi a falta de coesão do material arenoso que tornava um desafio retirar do furo o material escavado pela ferramenta. Uma vez superadas as dificuldades, o ensaio foi realizado sem maiores problemas e através do mesmo foi possível a obtenção de informações muito úteis para a pesquisa.

A principal dúvida esclarecida pelo ensaio com o DMPC foi a da presença e concentrações do biogás no interior do maciço de resíduos. Após a realização dos ensaios de placa de fluxo, por conta dos baixos valores obtidos levantou-se a hipótese de que talvez não houvesse mais geração de biogás sob a camada de cobertura.

Após a realização dos ensaios constatou-se que apesar de não serem medidas concentrações em todos os ensaios, os 5 pontos analisados apresentaram a presença de CH_4 com valores iguais ou superiores aos identificados durante os ensaios de placa de fluxo, além disso, em 03 pontos (A, B e D) foram identificadas concentrações de CO_2 , gás esse que não havia sido encontrado nos ensaios de placa, mostrando assim que, ao menos, nesses pontos as camadas de cobertura se mostraram eficientes quanto a retenção desse gás.

Quanto a retenção de CH_4 o ponto E foi o que demonstrou a menor eficiência, pois as concentrações encontradas sob a camada foram as mesmas encontradas na superfície pelo ensaio de placa de fluxo.

Os ensaios realizados nos drenos indicaram que, após a aplicação dos métodos de correção estatística e as devidas conversões, os drenos avaliados emitem anualmente cerca de 682,69 t/ano de CH₄.

Ao realizar-se uma comparação entre os valores obtidos por meio dos ensaios nos drenos e os valores obtidos por meio dos ensaios com a placa de fluxo, temos que, durante a realização dessa pesquisa, aproximadamente 10,5%, considerando o melhor resultado dos ensaios, e 31,7%, considerando o pior, de toda a emissão de metano do Aterro Sanitário Municipal de Caruaru chega à atmosfera através da camada de cobertura do aterro, naturalmente os outros 89,5% a 68,3%, levando em conta o mesmo raciocínio, são conduzidos até o ambiente externo através do sistema de drenagem de gás. Tomando-se uma média entre os resultados obtidos nos ensaios, obtém-se um valor de 22,36% de emissões fugitivas.

Segundo a estimativa realizada utilizando-se o método de decaimento de primeira ordem do *Guidelines 1996* e do *Good Practice Guidance 2000*, na melhor das hipóteses o aterro sanitário municipal de Caruaru poderia gerar aproximadamente 4.750 toneladas de CH₄ em 2020, contudo segundo os ensaios realizados a geração chegou a pouco mais de 650 toneladas, cerca de 13,7%. Fatores que podem ter contribuído para isso são os altos índices de O₂ encontrados sob a camada de cobertura nos ensaios com o DMPC e o uso constante de recirculação de lixiviado, pelo qual o efluente é aspergido diretamente sobre a camada de cobertura aumentando assim a umidade e a linha piezométrica no interior do maciço. Tais atenuantes podem impedir ou dificultar a fase metanogênica da biodegradação.

Também foram identificados em diversos pontos a presença de fissuras na camada de cobertura, esse tipo de patologia prejudica a eficiência da camada de cobertura, criando vazios conectados e aumentando assim a permeabilidade da mesma.

Durante o período de atividade do aterro, a quantidade de metano que chegava até a atmosfera através da camada de cobertura pode ter sido maior, pois conforme averiguado, alguns pontos já não geravam ou geravam quantidades insignificantes de CH₄ e em alguns casos, mesmo essa pequena quantidade gerada conseguia chegar até a superfície atravessando a camada. Isso demonstra que o tipo de material utilizado na camada de cobertura do Aterro Sanitário Municipal de Caruaru não obteve a mesma eficiência de uma camada de argila compactada, mesmo tendo uma espessura maior que a recomendada, seja por permitir emissões fugitivas do biogás ou por prejudicar a sua geração por conta da infiltração de líquidos e consequente aumento da umidade no interior do maciço.

5.2 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Analisar em laboratório, através de ensaios de colunas, a retenção de água e a permeabilidade ao ar nas camadas de cobertura com diferentes graus de saturação e graus de compactação do solo, utilizando valores variados de fluxos de gases e de água;
- Realizar um modelo digital do comportamento das emissões fugitivas do biogás pela camada de cobertura;
- Analisar em laboratório, através de ensaios de colunas, o desempenho do material utilizado na cobertura diante de variações sazonais, analisando o comportamento do material diante de ciclos de umedecimento e secagem;
- Avaliar a influência do procedimento de recirculação na fase metanogênica do processo de biodegradação;
- Verificar a influência de um ambiente aeróbio na duração e eficiência das fases do processo de biodegradação;
- Identificar se as condições apresentadas nesse aterro alteram o tempo necessário para que ocorra o processo de bioestabilização dos resíduos.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A. **Anaerobic digestion for global warming control and energy generation** - An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, p. v. 3228-3242, 2012.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2019**. Disponível em :<<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2019.pdf>> Acesso em: 03 de ago. de 2021.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Disponível em :<<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2020.pdf>> Acesso em: 08 de ago. de 2021.
- AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN, R. **Biogas Handbook**. University of Southern Denmark: Esbjerg, 2008.
- ALCÂNTARA, P.B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. Tese de Doutorado. Grupo de Resíduos Sólidos (GRS), Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. Recife, 2007.
- ALVES, I.R.F.S. **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos**. 2008, 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1990). **Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter**: D 5084. Philadelphia. 8p.
- ANTONIUTTI NETTO, L.; VAL, E. C.; ABREU, R. C. **Desempenho de piezômetros vector em aterros sanitários**. In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 3, 1995. III Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos: REGEO'95. Ouro Preto, MG, 1995. v.2I, p.593-601.
- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA – APAC. **Monitoramento Pluviométrico de Caruaru**. Disponível em: < <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>>. Acesso em 27 de ago de 2019.
- ARAÚJO. T. T, **Avaliação de emissões de biogás em camadas de cobertura de um aterro sanitário**. Perspectivas online: exatas e engenharia, Campo dos Goytacazes, v. 16, p. 34-49, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: execução de sondagens de simples reconhecimento dos solos**. 11 p. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação**. 12 p. Rio de Janeiro, 1997.

[____]. **NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento.** Rio de Janeiro, 2010.

AUDIBERT, J.L.; FERNANDES, F. **Avaliação qualitativa e quantitativa da emissão de biogás em aterro controlado de médio porte.** *Revista DAE*, n. 190, 2012, p. 56-73. Disponível em <http://doi.org/10.4322/dae.2014.093> Acesso em 30 de dez. de 2021.

BARIZON, R. R. M. **Sorção e transporte de pesticidas sob condições de não-equilíbrio.** Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004

BATHURST, R.J.; ALLEN, T.M.; WALTERS, D.L. **Reinforcement loads in geosynthetic walls and the case for a new working stress design method.** *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 23, Issue 4, p. 287-322. 2005

BENSON, C.; ABICHO, T.; ALBRIGHT, W.; GEE, G.; ROSELER, A. **Tests of Alternative Final Landfill Covers in Arid and Semi-Arid Areas Using Innovative Water Balance Monitoring Systems.** Environmental Protection Agency – United States, 2001.

BENSON, C.H; BARLAZ, M.A; LANE, D.T; RAWE, J.M. **Practice review of five bioreactor/recirculation landfills.** *Waste Management*. v. 27, n. 1, p.13-29, 2007.

BERGER, J., FORNÉS, L.V., OTT, C., JAGER, J., WAWRA, B., ZANKE, U. **Methane oxidation in a landfill cover with capillary barrier.** *Waste Management*, 25, 4, p. 369-373. 2005.

BIONDI, M.; NASCIMENTO C. A.; WILLIAMS, C.; ADELAZIL, F. B. N. **Teores naturais de bário em solos de referência de Pernambuco.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online] 2011, 35 (PY): Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180221126036>> Acesso em: 24 de fevereiro de 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 10 nov. 2018.

CAMARA, K. R.; PEREIRA, A. C. Análise de perfis SPT para solos do município de Natal. **Revista HOLOS**, Ano 21, p. 38-53, maio, 2005

CAPACCIONI, B.; CARAMIELLO, C.; TATÀNO, F.; VISCIONE, A. **Effects of a temporary HDPE cover on landfill gas emissions: Multiyear evaluation with the static chamber approach at an Italian landfill.** *Waste Management*, v. 31, n. 5, 2011, p. 956-965. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.004>>. Acesso em 30 de dez. de 2021

CARVALHO, S.A.; SOBRINHO, L.L.P. **As contradições dos objetivos do Protocolo de Kyoto, do mercado de crédito de carbono e do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL).** *REDESG – Revista Direitos Emergentes na Sociedade Global*, v. 6, nº 1. Santa Maria, 2017.

CASTILHOS JR., A. B.; MEDEIROS, P. AP.; FIRTA, I. N.; LUPATINI, G.; SILVA, J. D. Principais Processos de Degradação de Resíduos Sólidos Urbanos. In: _____. **Rede Cooperativa de Pesquisas: Alternativas de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos para Pequenas comunidades.** Rede de Pesquisa em Saneamento Básico – PROSAB. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

CATAPRETA, C.A. A.; SIMÕES, G. F.; BATISTA, H. P. **Avaliação de técnicas de perfuração e amostragem de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.** In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 6. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 5, 2007, RECIFE. Anais de congresso. Recife: ABMS, 2007. p. 1-6.

CEPOLLINA, M.; KAIMOTO, L. S. A.; LUDEMANN, S. M. **Investigações de condicionantes geotécnicos de maciços sanitários.** In: SIMPÓSIO SOBRE BARRAGENS DE REJEITOS E DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS, 10, 1994. X Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Foz do Iguaçu, 1994. v.3. p.979-986.

CHABUK, A.; *et al.* **Landfill Final Cover Systems Design for Arid Areas Using the HELP Model: A Case Study in the Babylon Governorate, Iraq.** *Sustainability* **2018**, *10*, 4568. <https://doi.org/10.3390/su10124568>

CHAPRA, S.C., 1997, **Surface Water-Quality Modeling.** Texas, EUA, McGraw-Hill, 844p.

CODUTO, D.P; HUITRIC, R. **Monitoring landfill movements using precise instruments[m] geotechnics of waste fills-theory and practice.** Philadelphia: ASTM, 1990. p. 358-370

COLMANETTI, J. P. **Estudos sobre a Aplicação de Geomembranas na Impermeabilização da Face de Montante de Barragens de Enrocamento.** Publicação nº G. TD-037/2006, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. Brasília, DF, 272 p., 2006.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Emissões de metano no tratamento e na disposição de resíduos.** In: Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa - Relatórios de referência. São Paulo, 2006.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA. **Resolução n. 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasília, DF. 2011

COSSU, R., MUNTONI, A., CHIARANTINI, L., MASSACCI, G., SERRA, P., SCOLLETTA, A. e STERZI, G. **Biogas emission measurements using static and dynamic flux chambers and infrared methods.** Proceedings of The Sixth International Landfill Symposium, vol.4, pp.103-114. Sardinia, Italia, 1997.

COSTA M. D. **Estudo de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos.** Tese, 145 p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2015.

CPRH – Agência Pernambucana de Meio Ambiente. **Resumo dos Resíduos Sólidos de Pernambuco.** Relatório anual. Recife, 2017.

CZEPIEL, P.M., MOSHER, B., CRILL, P.M. e HARRISS, R.C. ***Quantifying the effect of oxidation on landfill methane emissions***, Journal of Geophysical Research, vol. 101, nº D11, pp. 16,721-16,729. USA 1996.

DANIEL, D.E. ***Geotechnical Practice for Waste Disposal***. Chapman and Hall Editory, London, UK, ISBN 0 412 35170 6. 1993

ECK, C. P. ***Effects of moisture content in solid waste landfills***. Master Thesis. Faculty of Graduate School of Engineering and Management of the Air Force Institute of Technology. U.S. Air Force, 2000.

EDUARDO, J. ***Avaliação das características microbiológicas e físico-químicas do lixiviado (chorume) no processo de tratamento do aterro metropolitano de Gramacho (Rj – Brasil)***. 98 f. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, 2007.

ENVIRONMENT AGENCY. ***Guidance on the monitoring of Landfill leachate groundwater and surface water***. Disponível em: <www.environmentagency.gov.uk> Acesso em: 02 de mar. 2019. Bristol, Reino Unido, 2001.

ENVIRONMENT AGENCY. ***Guidance for the treatment of Landfill leachate***. Disponível em: <www.environmentagency.gov.uk> Acesso em: 02 de mar. 2019. Bristol, Reino Unido, 2007.

ESTEVEZ, M.M., LINJORDET, R., MORKEN, J. ***Effects of steam explosion and codigestion in the methane production from Salix by mesophilic batch assays***. Bioresource Technology 104: 749–756. 2012.

EWAIS A. M. R., ROWE R. K., RIMAL S., SANGAM H. P. ***17-year elevated temperature stoudy of HDPE geomembrane longevity in air, water and leachate***. Geosynthetics International, Vol. 25 Issue 5, pp. 525-544. Austin, 2018.

FARQUHAR, G. H.; ROVERS, F. A. ***Gas production during refuse decomposition***. Water Air Soil Pollut. v.2, p.483-495, 1973.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE – FNR. ***Guide to biogas: From production to use***. Hannover, 2010.

FORESTI, E. ***Fundamentos do processo de digestão anaeróbia***. In: TALLERY SEMINARIO LATINOAMERICANO TRATAMIENTO ANAEROBIO DE AGUAS RESIDUALES, 3., Montevideu, Uruguai. Anais... p.97-110, 1994.

FOURIE, A.B. e MOOSAMMY, M. ***Store and release covers for landfills in semi-arid climates***. Unsaturated Soils, Recife, Brasil, 2002. Anais, p 823-826.

FRANQUETO, R. et al. ***Monitoramento de emissões fugitivas a partir da camada de cobertura de aterro sanitário***. REVISTA UNINGÁ REVIEW, [S.l.], v. 35, p. eRUR2603, jul. 2020. ISSN 2178-2571. Disponível em: <<http://34.233.57.254/index.php/uningareviews/article/view/2603>>. Acesso em: 22 set. 2021.

FUNESS, L.T., GARCIA, M. **Qual o valor da vinhaça? Mitigação de impacto ambiental e recuperação de energia por meio da digestão anaeróbia**. São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, 2012.

GM CONSULTORIA AMBIENTAL. **Projeto executivo de ampliação da capacidade operacional do aterro sanitário do município de Caruaru**. Caruaru, 2012.

GOLDENBERG, M.; REDDY, K.R. **Sustainability Assessment of Conventional and Alternate Landfill Cover Systems**. Geotechnical Frontiers, Orlando, Mar., 2017.

GUEDES, M. J. F. **Estudo das emissões de biogás em aterro de resíduos sólidos urbanos no semiárido brasileiro**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

HAGOS, K.; ZONG, J.; LI, D.; LIU, C.; LU, X. **Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives**. Elsevier - Renewable and Sustainable Energy Reviews Journal, v. 76, p. 1485-1496. Set., 2017.

HOUSTON, S.L.; HOUSTON, W.N.; WAGNER, A.M. **Laboratory filter paper suction measurements**. Geotechnical Testing Journal, Vol.17, nº2, pp.185-194. 1994

IGNATIUS, S. G., KESSLER, T., VICENZETTO, F. **Ensaio de permeabilidade ao ar – Estimativa da vazão de gás bioquímico** – 6º Congresso Nacional de Geotecnia – Lisboa, 1997.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA – IBGE. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/v4/brasil/pe/caruaru/panorama>>. Acesso em: 09 de jan. 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions – Guideline for National Greenhouse Gas Inventories**. United Nations For Environmental Program. The Organization for Economic Cooperation and Development and The International Energy Agency. London, UK. 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2021 The Physical Science Basis**. Summary for Policymakers. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland, 2021.

JESSBERGER, H., e STONE, K. **Subsidence Effects on Clay Barriers**. Géotechnique, 41(2), 185-194. 1991

JUCÁ, J.F.T. **Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada**. Espanha, 1990. Tese (Doutorado) - Universidad Politécnica de Madrid.

JUCÁ, J.F.T.; MARIANO, M.O.H.; ALVES, M.C.M.; MACIEL, F.J.; MILINS, E.A. **Feasibility of gas recovery from the Muribeca landfill Brazil**. In: INTERNATIONAL

WASTE MANAGEMENT AND LANDFILL SYMPOSIUM, 20, 2005. Proceedings of the tenth international Waste Management and Landfill Symposium. Italy, 2005.

KHANAL, S. K.; CHEN, W.; LI, L.; SUNG, S. ***Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products***. International Journal of Hydrogen Energy, v. 29, p. 1123-1131, 2004.

KIM, S.; TOJO, Y.; MATSURO, T. ***Compartment model of aerobic and anaerobic biodegradation in a municipal solid waste landfill***. Waste Management and Research, 25, 6, p. 524-537. 2008.

KLINK, R. E.; HAM, R. K. ***Effects of moisture movement on methane production in solid waste landfill samples***, 1982.

KUMAR, A. G.; KAMATCHI, P., UMASHANKARI, J.; VIDHYA S.; MURTHY, P. S.; SEKARAN, G. ***Acidogenic fermentation of proteinaceous solid waste and characterization of different bioconversion stages and extracellular products***. Biodegradation, 19, 4, p. 535-543. 2008

KUNZ A., STEINMETZ R. L. R., AMARAL A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Livro, 209 p. Sbera: Embrapa. Concórdia, 2019.

LIMA, R.M.; SANTOS, A.H.M.; PEREIRA, C.R.S.; FLAUSINO, B.K.; PEREIRA, A.C.O.S.; NOGUEIRA, F.J.H.; VALVERDE, J.A.R. ***Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil***. Elsevier – Waste Management Journal. Vol. 74, p. 323-334. Abr., 2018.

LIN, Q.; DE VRIEZE, J.; HE, G.; LI, X.; LI, J. ***Temperature regulates methane production through the function centralization of microbial community in anaerobic digestion***. Bioresource Technology, v. 216, 150-158, 2016.

LOPES, M. L.; GOMES, C. C. **Problemas relativos a estabilidade de aterros de resíduos**. Seminário sobre aspectos geotécnicos do projeto e construção de aterros de resíduos. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia; LNEC, 2000. p 1-55.

LOPES, R. L. (2011) **Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. 268 p.

MACIEL, F.J. **Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE**, Dissertação de mestrado, Grupo de Resíduos Sólidos (GRS), Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. Dissertação de Mestrado. Recife, 2003.

MACIEL, F. J. **Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2009, 330 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. **Biogas recovery in an experimental MSW cell in Brazil: lessons learned and recommendations for CDM projects.** *Greenhouse Gas Measurement and Management*, v. 2, n. 4, p. 186-197, 2013.

MARIANO, O. H. M. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos.** 232 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil. Recife, 2008.

MARIANO, M.O.H.; JUCÁ, J.F.T. (2010) **Ensaio de campo para a determinação de emissões de biogás em camada de cobertura de aterros de resíduos sólidos.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 3. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522010000300004>. Acesso em 08 de dez. de 2021.

MARQUES JUNIOR, F. A. F. **Condições intervenientes na geração de biogás de resíduos recém dispostos em aterro sanitário e com um ano de aterramento.** 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2020

McBEAN, E.A.; FARQUHAR, G.J. **An examination of temporal / spatial variations in landfill-generated methane gas.** *J. of Air, Water and Soil Pollution*, v.13, p. 157-172, 1980.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia. **Protocolo de Quioto à convenção sobre mudança do clima.** Versão original publicada pelo secretariado da convenção sobre mudança do clima. Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia com o apoio do Ministério das Relações Exteriores. 34 p. Brasília, 2001.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia. **Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no Mundo.** Relatório. DF, 2008. Disponível em: <www.mct.gov.br/clima>. Acesso em 12 de fev. de 2019.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia. **Emissões de Gases de Efeito Estufa no Tratamento e Disposição de Resíduos.** Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília – DF. 2010.

MELCHIOR, S. **In situ studies on the performance of landfill caps.** Proc., Intl. Containment Technology Conference, 365-373. St. Petersburg, FL, 1997.

MELO, V.L.A.; JUCÁ, J. F. T. **Diagnóstico ambiental em aterros de resíduos sólidos a partir de estudos de referência.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa, 2001.

MONTGOMERY, R., e PARSONS, L. **The Omega Hills final cover test plot study: Three year data summary.** Proc., 1989 Annual Meeting of the National Solid Waste Management Association, 1–14. 1989.

MOON, S; NAM K.; YOUNG KIM J.; KYUHWAN S.; CHUNG M. **Effectiveness of compacted soil liner as a gas barrier layer in the landfill final cover system.** Waste Management. 2007.

MOREITA, P.A.G.; BARBERI, M.; OLIVEIRA, A.L.G. **Delimitação de áreas para implantação de aterro sanitário utilizando metodologia multicritérios no município de goiás.** Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos. V. 4, nº 2, p. 223-235. Goiânia, jul/dez 2018.

MOREIRA F. G. S., GUEDES M. J. F., MONTEIRO V. E. D., MELO M. C. **Emissões fugitivas de biogás em camada de cobertura de solo compactado em aterro sanitário.** Engenharia Sanitária Ambiental. Vol. 25 no. 2, Rio de Janeiro, 2020.

OLIVEIRA, L. R. G. **Estudo das emissões de biogás em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólido urbanos.** 93 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil. Recife, 2013.

OTHMAN, M.; BENSON, C.; CHAMBERLAIN, E.; ZIMMIE, T. *Laboratory Testing to Evaluate Changes in Hydraulic Conductivity Caused by Freeze-Thaw: State-of-the-Art*, Hydraulic Conductivity and Waste Containment Transport in Soils, STP 1142, ASTM, 227-254. 1994

PARKIN, G. F.; OWEN, W. F. *Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges.* Journal of Environmental Engineering, v. 112, p. 867-920, 1986.

PAZ, D. H. F., FIRMO, A. L. B. **Estimativa da geração de metano proveniente dos locais de disposição final de RSU em Pernambuco seguindo as diretrizes do Plano Estadual de Resíduos Sólidos.** Revista DAE, São Paulo, n. 211, vol. 66, p. 5-19. jul./set. 2018.

PESSOA, F. **Livro do desassossego por Bernardo Soares.** vols. I e II. Recolha e transcrição dos textos: Maria Aliete Galhoz e Teresa Sobral Cunha; prefácio e organização: Jacinto do Prado Coelho. Lisboa: Ática, 1982.

PINTO, M. S. **A coleta e a disposição de lixo no Brasil.** Editora Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro, 1992.

POHLAND, F.G.; HARPER, S.R. *Critical review and summary of leachate and gas production from landfills.* Cincinnati: US Environmental Protection Agency, EPA/600/2-86/07. 1985.

REES, J.F. *The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organic matter.* J. Chem. Technol. Biotech. v. 30, p. 161-175, 1980.

REINELT, T.; McCABE, B. K.; HILL, A.; HARRIS, P.; BAILLIE, C.; LIEBETRAU J. *Field measurements of fugitive methane emissions from three Australian waste management and biogas facilities.* Waste Manegement. v. 137, p. 294-303, 2021.

RIBEIRO, B.M.G.; MENDES, C.A.B. **Avaliação de parâmetros na estimativa da geração de resíduos sólidos urbanos.** Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento. Vol. 9, nº 3. Edição Especial Fórum Inter. de Resíduos Sólidos, p. 422-443. Curitiba, ago., 2018.

RIBEIRO, D.F. **Avaliação dos aspectos estruturais e operacionais em cinco aterros sanitários, localizados nos Estados do Rio de Janeiro e São Paulo.** 136 f. Dissertação

(Mestrado) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, 2016.

SAMIR, S. ***Characterization and evaluation of gas generation potential of municipal solid waste from a closed section of a landfill.*** Master Thesis. Faculty of the Graduate School of the University of Texas: Arlington, 2011.

SANTOS, H.G.; ZARONI, M.J. **Definição e características gerais de solos tropicais – neossolos.** Agência Embrapa de Informação Tecnológica – AGEITEC. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_16_2212200611542.html>. Acesso em 09 de dez. de 2018.

SCHALCH, V. **Análise comparativa do comportamento de dois aterros sanitários semelhantes e correlações dos parâmetros do processo de digestão anaeróbia.** 1992. Tese (Doutorado – hidráulica e saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SEED, H.B.; CHAN, A.M. ***Structure and strength characteristics of compacted clay.*** J. of Soil Mech. and Found. Div., A.S.C.E., Vol. 85, SM5, p. 87-128. 1959.

SHACKELFORD, D.C; BENSON. C.H.; BOUAZZA A.; DE MELO, M; BOSCOV, M.E; BOWERS, J; KATZENBACH.R; MOON-YONG, H.; ZIMMIE R. e ZORNBERG, J.G. ***Traditional and Innovative Barriers Technologies and Materials. Part 2 – Innovative Barriers.*** 5TH ICEG Environmental Geotechnics.2006

SIMON, F.G, MÜLLER W.W. ***Standard and alternative landfill capping design in Germany.*** Environment, Science and Policy. Vol-7, 277–290. 2004

SILVA, J. **Volumétrica de uma Argila Expansiva Não-Saturada submetida a diferentes condições climáticas.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EP-USP. São Paulo, 2001.

SILVA, T. N.; FREITAS, F. S. N.; CANDIANI, G. **Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte.** Engenharia Sanitária Ambiental, v.18 n.2, p. 95-104, abr/jun 2013.

SPERA, S.T.; REATTO, A.; CORREIA, J.R.; SILVA, J.C.S. **Características físicas de um latossolo vermelho-escuro no cerrado de Planaltina, DF, submetido à ação do fogo.** Pesquisa Agropecuária Brasileira. Volume 35, n. 9, p. 1817-1824, set. 2000, Brasília.

SOARES C. M. T., FEIDEN A., TAVARES S. G. **Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás.** Nativa, Sinop, v.5, esp., p.509-514, dez. 2017

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 Publishing CO, Westerville, vol.36, nº.4. 1998.

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

SZYŁAK-SZYDŁOWSKI, M. KORNIEŁŁOWICZ-KOWALSKA, T. **The mycobiota of landfill leachates in the pretreatment process in a sequencing batch reactor.** *Open Life Sciences*, vol. 7, no. 2, 2012, pp. 250-258. Disponível em <https://doi.org/10.2478/s11535-012-0010-y>. Acesso em 14 de jun. de 2021.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VINIL S. **Integrated solid waste management : engineering principles and management issues.** 978 p. New York: Irwin MacGraw-Hill, 1993.

TEIXEIRA, P.F. **Oxidação biológica do metano em coberturas de aterros de resíduos sólidos urbanos: dinâmica do processo e aspectos geotécnicos.** 2008. 164. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. **Methane generation in landfills.** *Renewable Energy*, v. 32, p. 1243–1257, 2007.

TRAPANI, D.; BELLA, G.; VIVIANI, G. **Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes.** *Waste Management*, v. 33, n. 10, 2013, p. 2108-2115. Disponível em <[https:// doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.032](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.032).> Acesso em 29 de dez. De 2021.

TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DE PERNAMBUCO – TCEPE. **Diagnóstico: Destinação de resíduos sólidos em PE – 2018/2019.** Disponível em: <<http://www.tce.pe.gov.br/internet/index.php/estudos-e-levantamento-novo>>. Acesso em 29 de mar. de 2019.

TWB (The World Bank). (2012). **World production of Municipal Solid Waste (MSW), 2012-2025.** Disponível em <http://www.proparco.fr/webdav/site/proparco/shared/PORTAILS/Secteur_privé_developpement/PDF/SPD15/SPD15_key_data_uk.pdf> Acesso em 11 de nov. de 2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY- EPA. (2003). **Evapotranspiration Landfill Cover Systems Fact Sheet.** EPA-542-F-03-015. Disponível em <<http://clu-in.org>.> Acesso em: 29 de fev. de 2019.

WELTY, J.R.; WICK, C.E. e WILSON, R.E. **Fundamentals of momentum, heat and mass transfer.** John Wiley e Sons, Inc, Singapore, 1984.

WILLUMSEN, H.C.; BACH, L. **Landfill gas utilization overview, In: Proceedings Sardinia 1991.** The Third International Landfill Symposium, Sardinia, Itália, v.1, p.329-348. 1991.

YAN, Z. *et al.* **The effects of initial substrate concentration, C/N ratio, and temperature on solid-state anaerobic digestion from composting rice straw.** *Bioresource Technology*, vol. 177, pp. 266-273, fev. 2015.

YUAN, X.; WEN, B.; MA, X.; ZHU, W.; WANG, X.; CHEN, S.; CUI, Z. **Enhancing the anaerobic digestion of lignocellulose of municipal solid waste using a microbial pretreatment method.** *Bioresource Technology*, v. 154, p. 1-9. 2014.

YVON-DUROCHER, G., ALLEN, A. P., BASTVIKEN, D., CONRAD, R., GUDASZ, C., PIERRE, A. S., THANHDUC, N., GIORGIO, P. A. **Methane fluxes show consistent**

temperature dependence across microbial to ecosystem scales. Nature, vol. 507, p. 488-491. 2014.

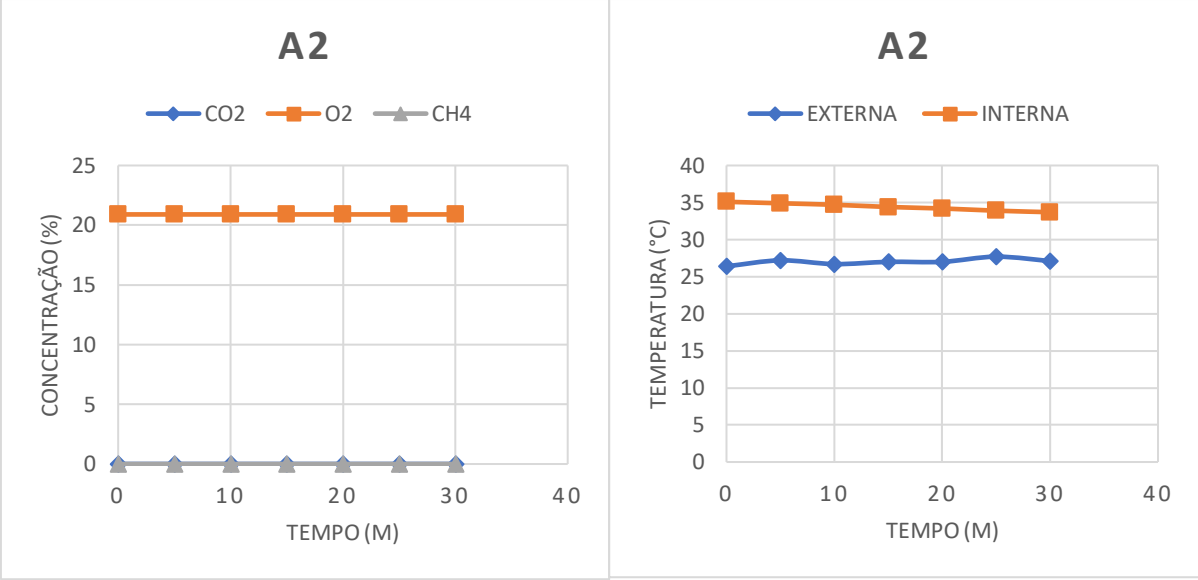
ZORNBERG, J.G., LAFOUNTAIN, L., e CALDWELL, J.A. ***Analysis and Design of Evapotranspirative Cover for Hazardous Waste Landfill***. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 5, pp. 427-438. 2003.

ZORNBERG, J.G e McCARTNEY, J.S. ***Chapter 34: Evapotranspirative Cover Systems for Waste Containment***. The Handbook of Groundwater Engineering, 2nd Edition, Jacques W. Delleur (Editor-in-Chief), 2006.

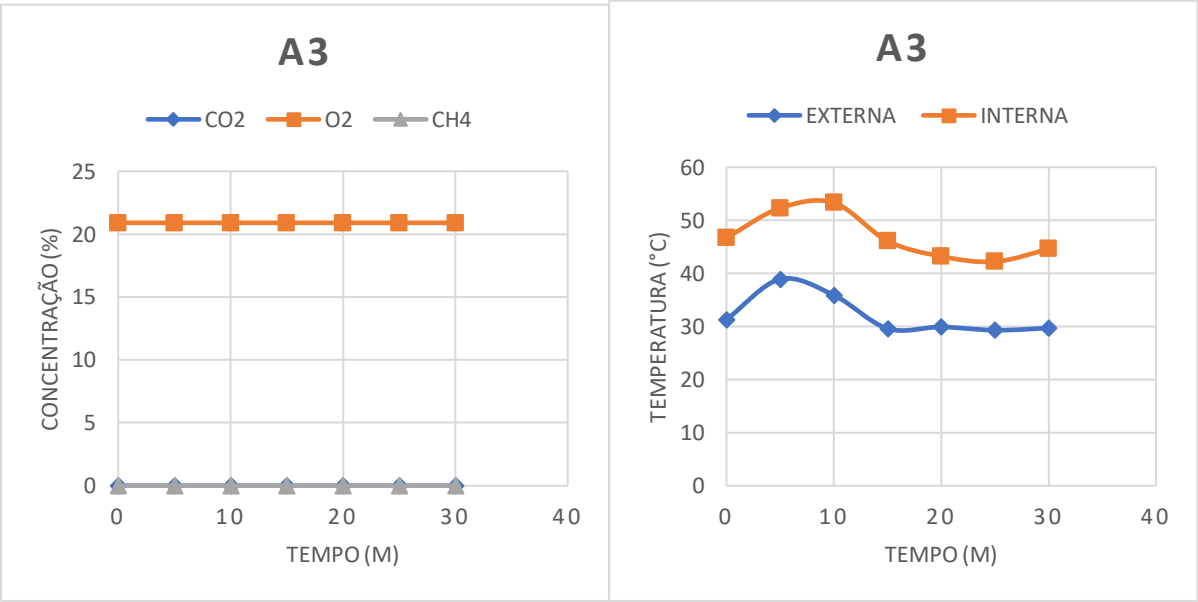
ANEXO I**ENSAIOS DE PLACA DE FLUXO, DMPC E CURVAS GRANULOMÉTRICAS**

ENSAIOS DE PLACA DE FLUXO E DMPC

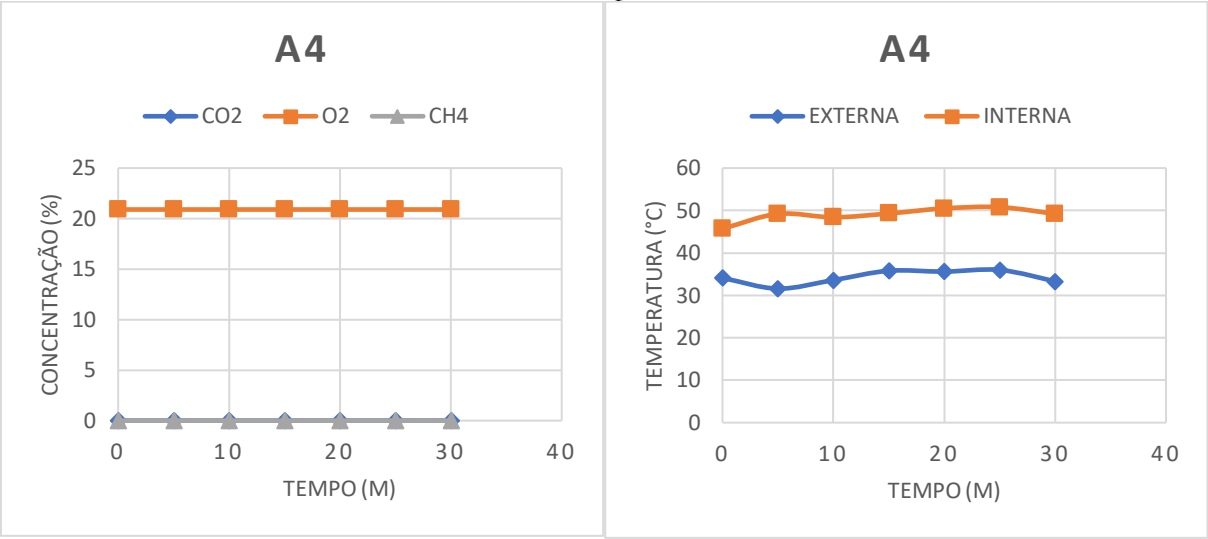
Ensaio de placa A2



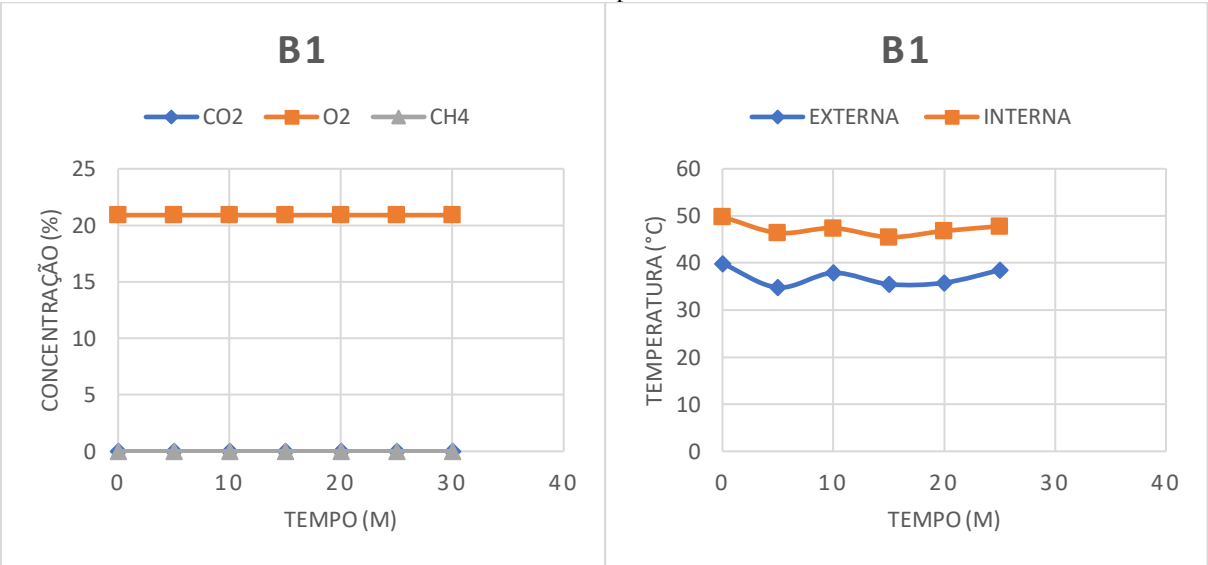
Ensaio de placa A3



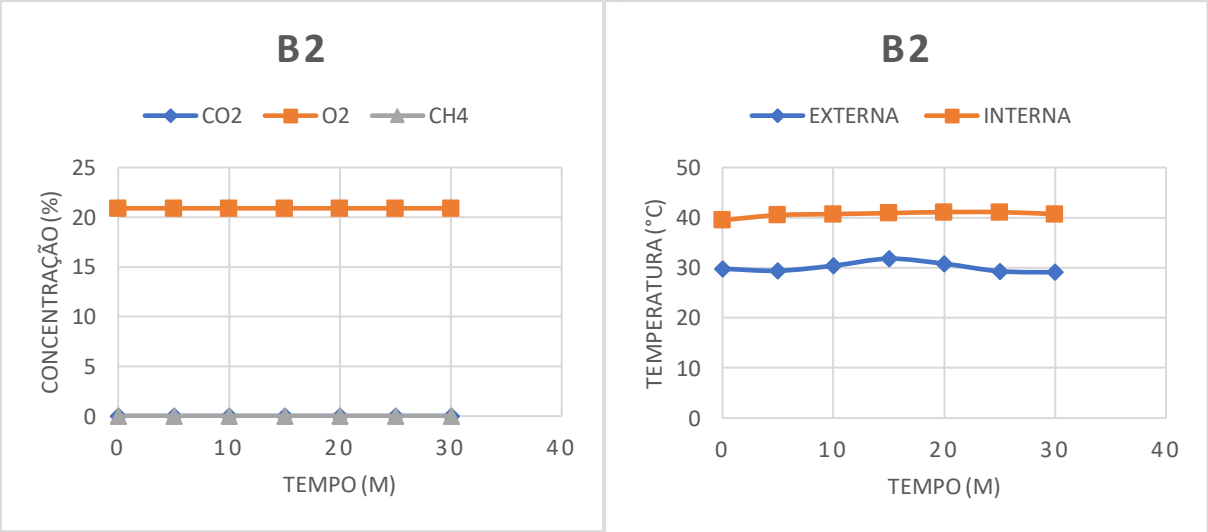
Ensaio de placa A4



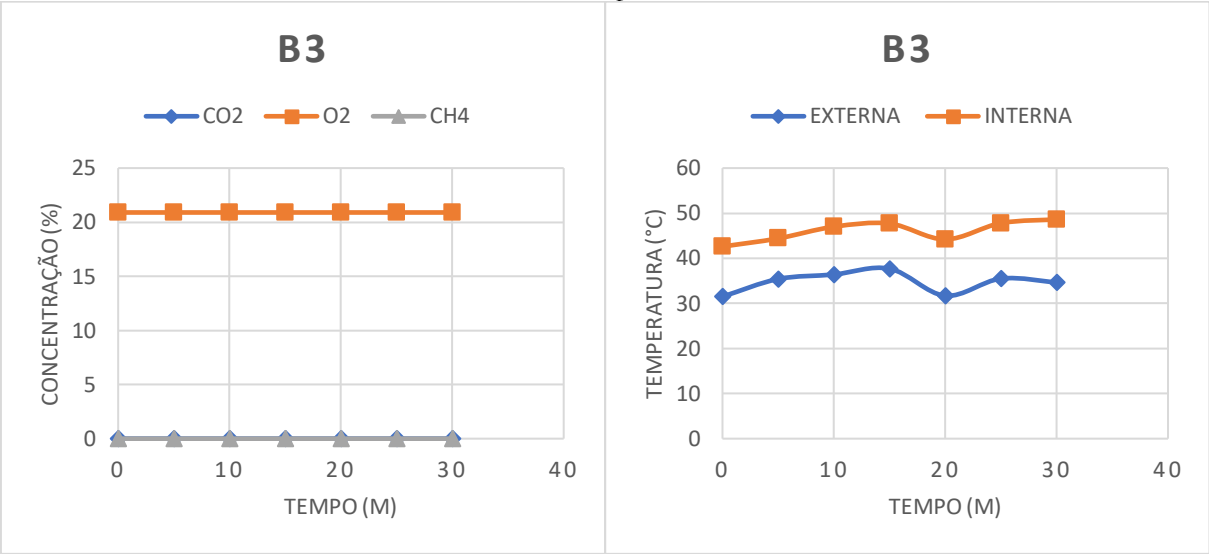
Ensaio de placa B1



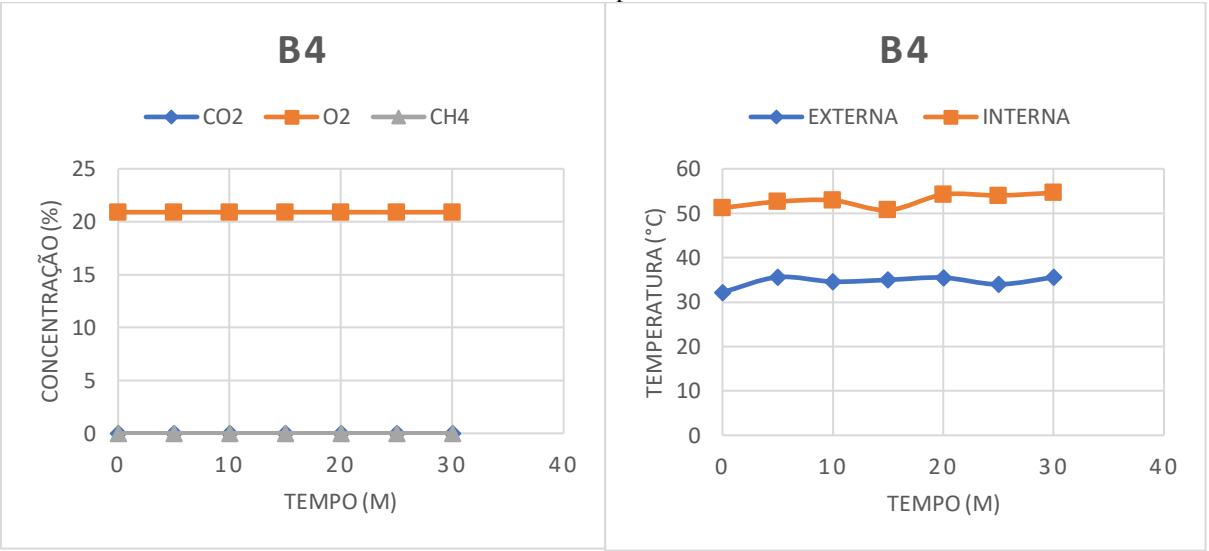
Ensaio de placa B2



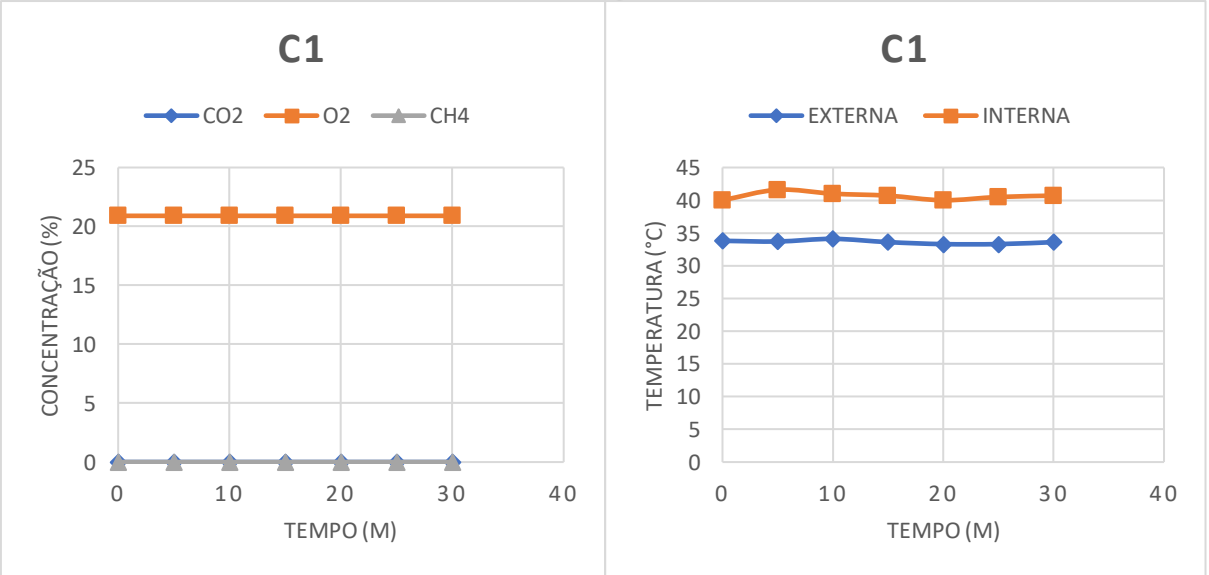
Ensaio de placa B3



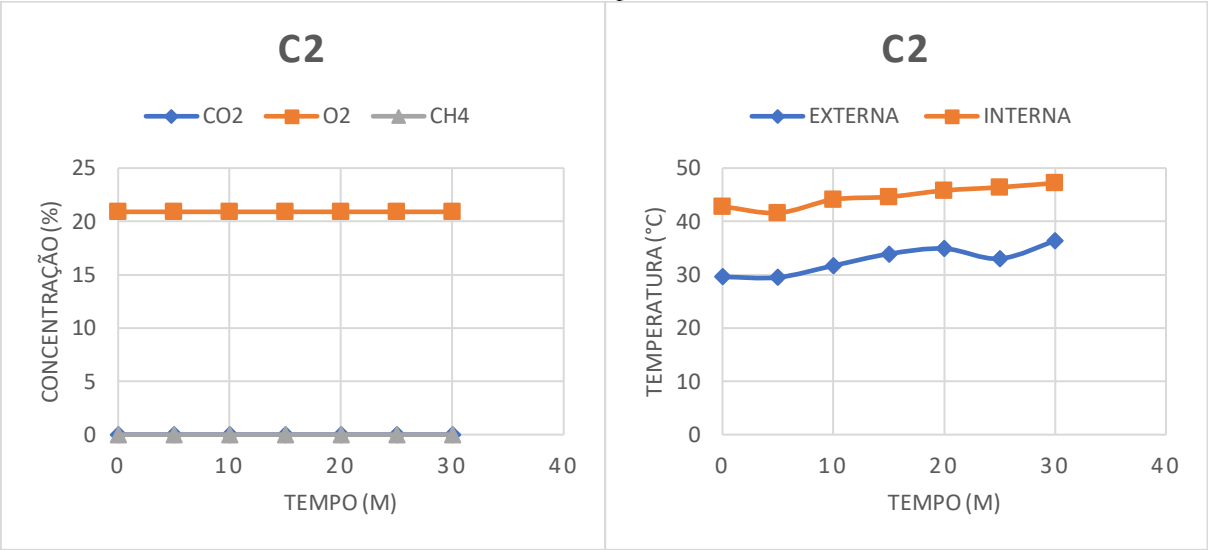
Ensaio de placa B4



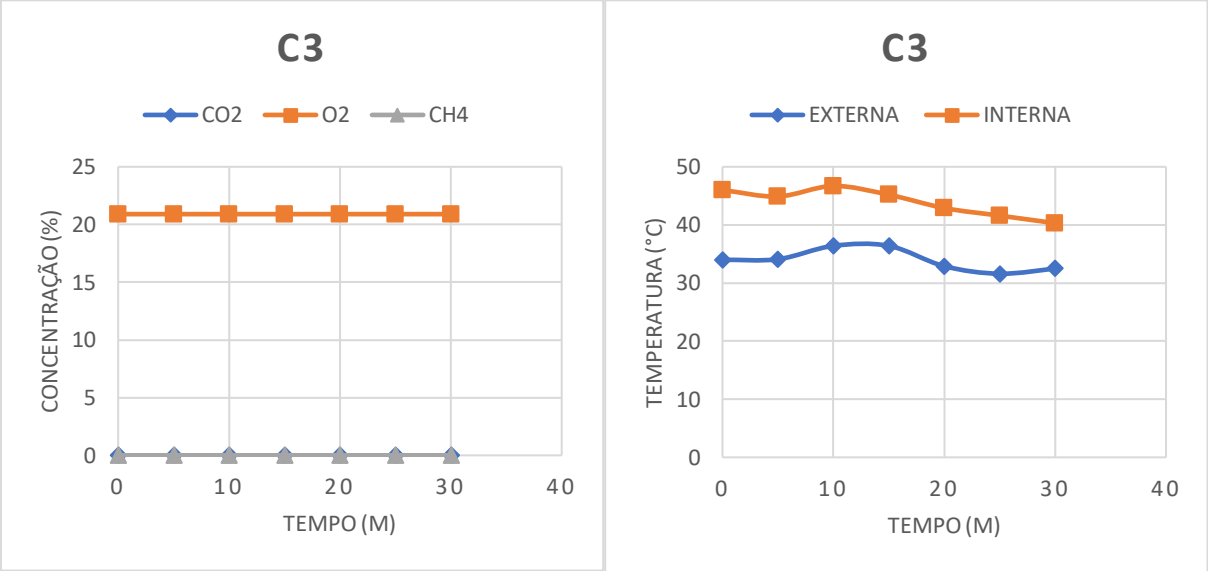
Ensaio de placa C1



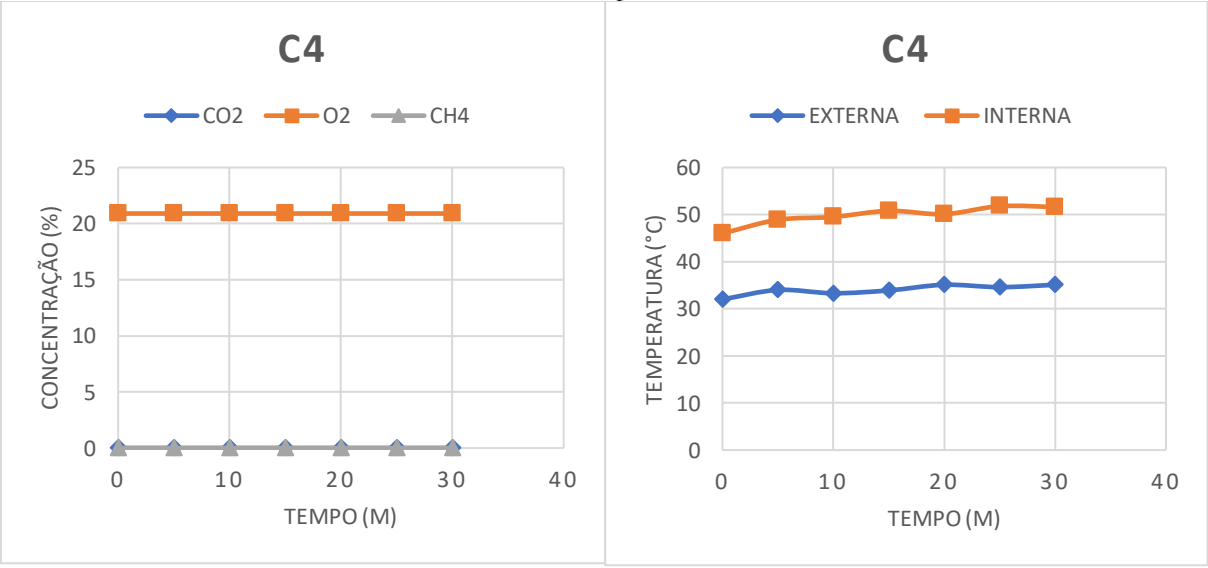
Ensaio de placa C2



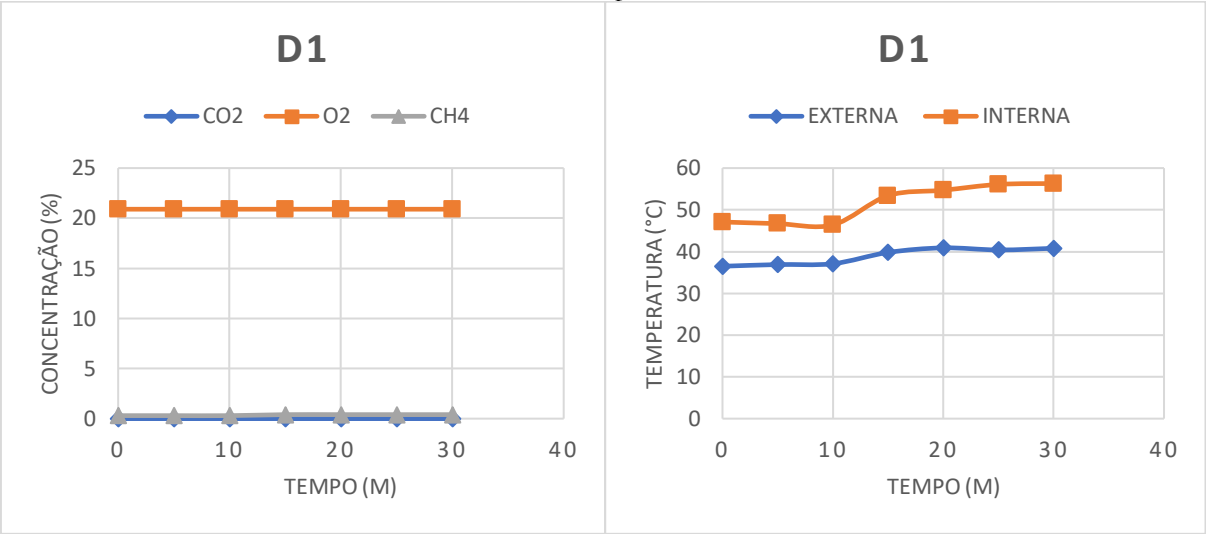
Ensaio de placa C3



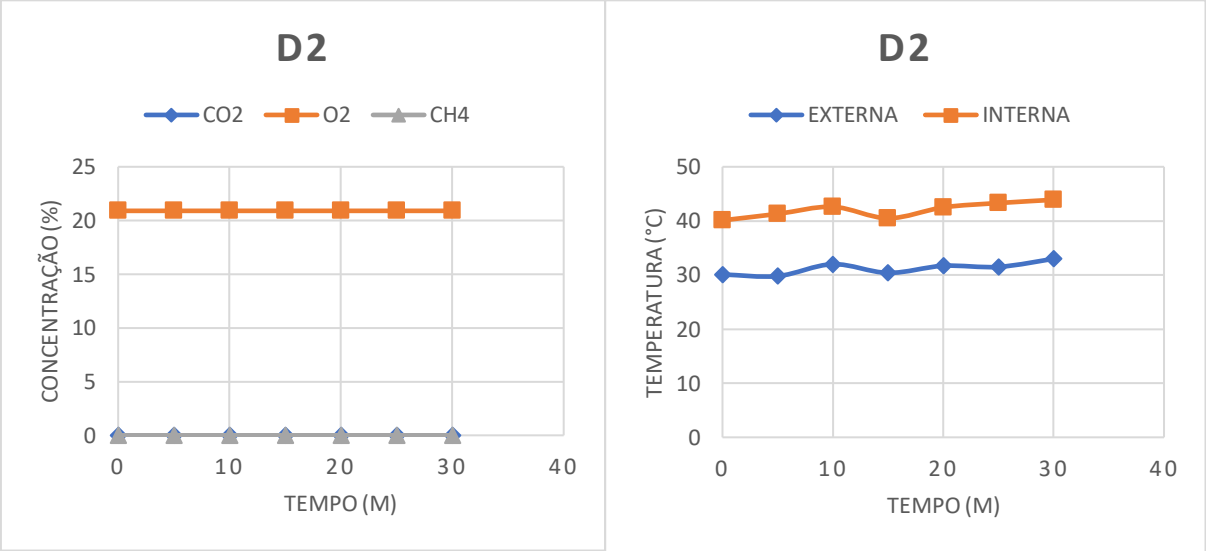
Ensaio de placa C4



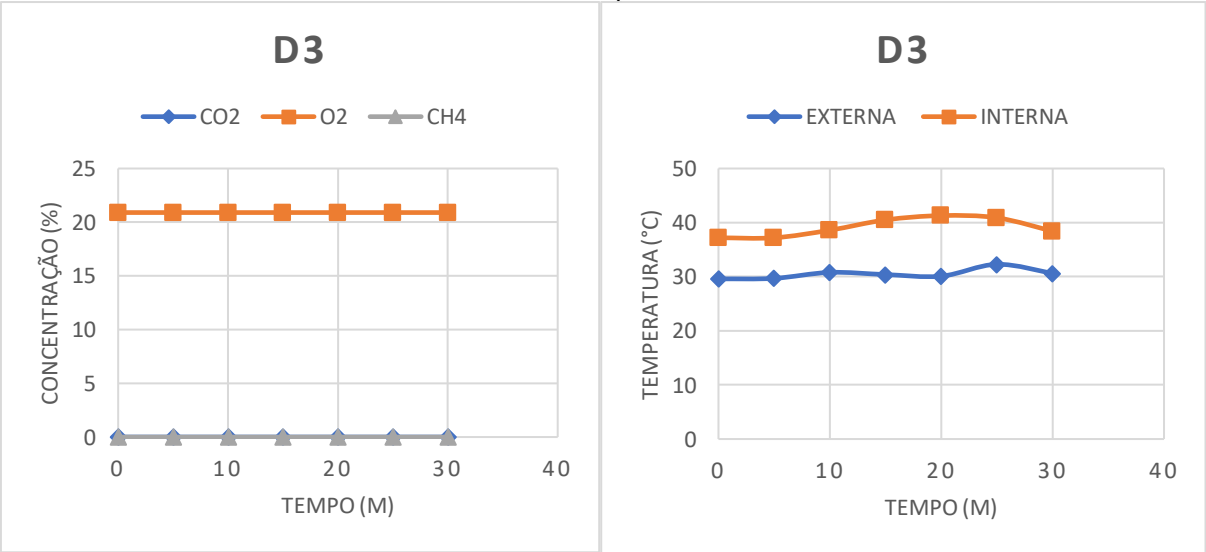
Ensaio de placa D1



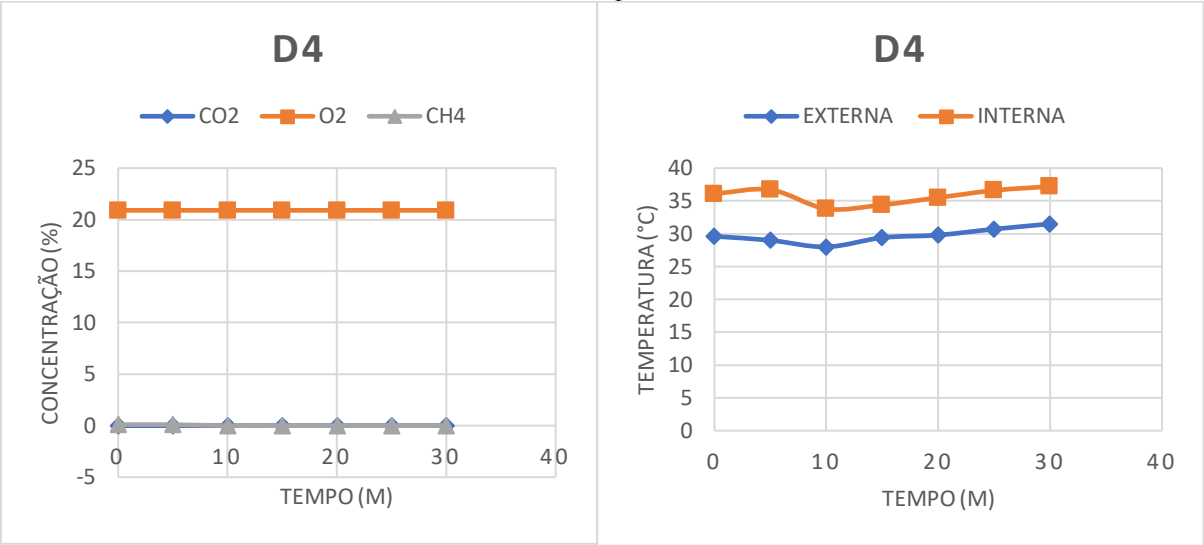
Ensaio de placa D2



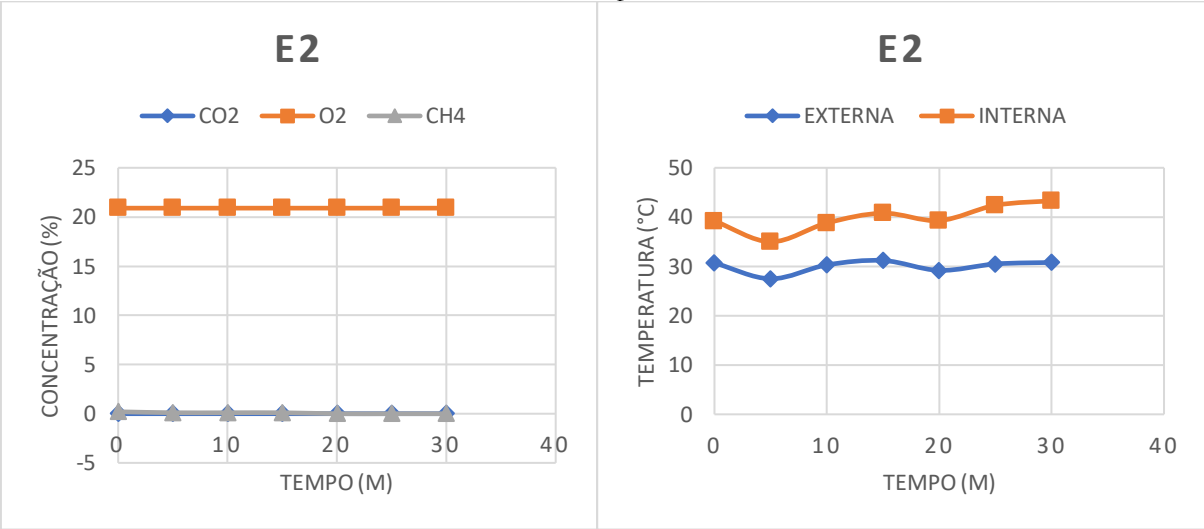
Ensaio de placa D3



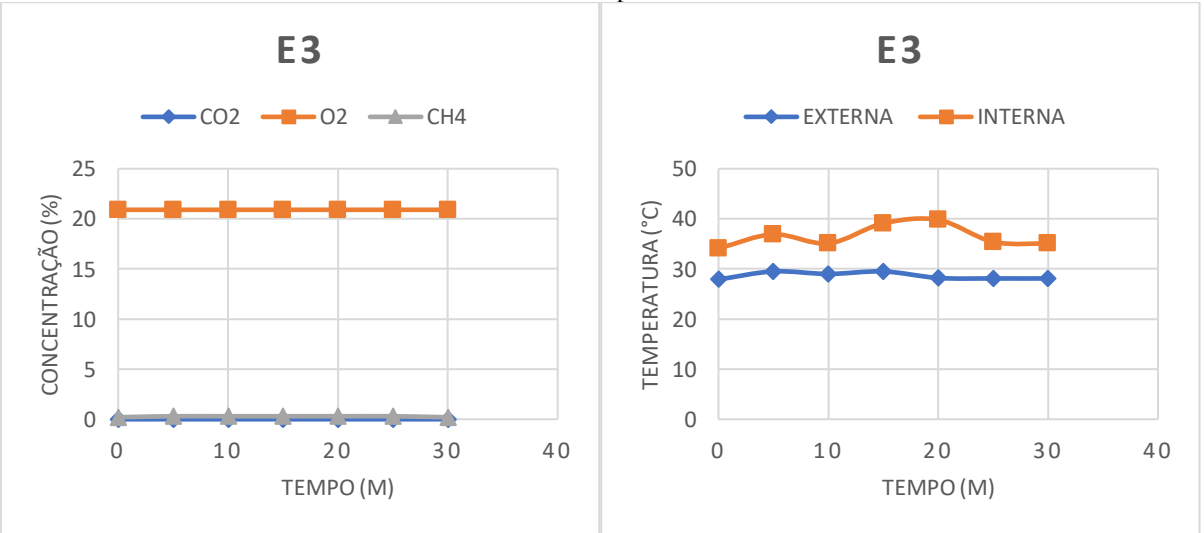
Ensaio de placa D4



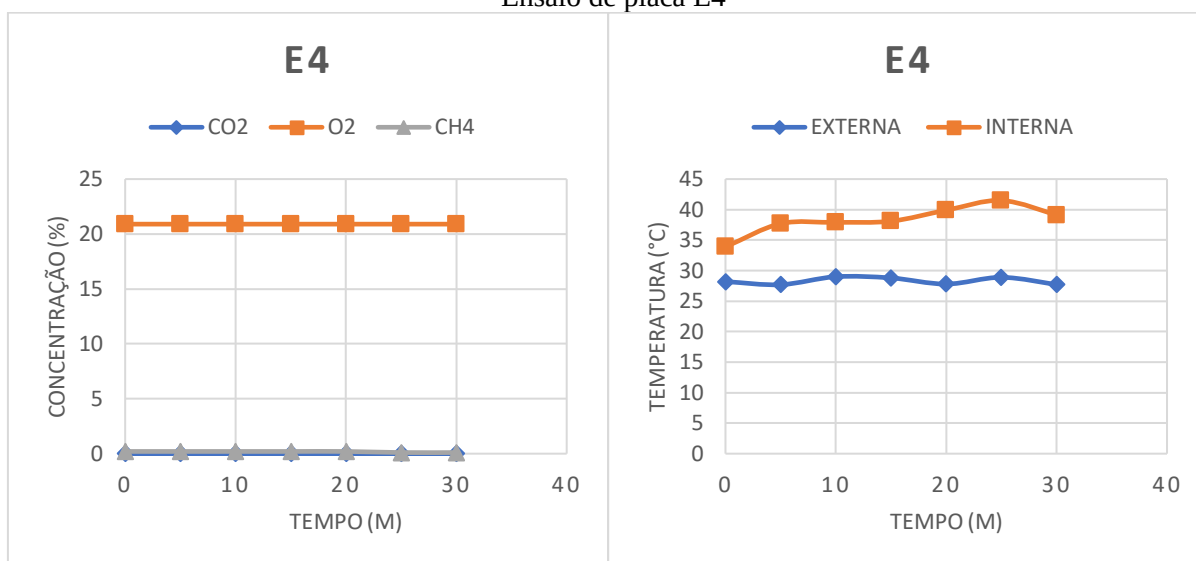
Ensaio de placa E2



Ensaio de placa E3



Ensaio de placa E4



ENSAIO A1

Ponto 01	Bateria: 01	Data: 11/10/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
10:55	Inicial	0,0	0,0	20,9	43,4	54,7	0,0
11:00	5 min	0,0	0,0	20,9	41,7	55,6	0,0
11:05	10 min	0,6	0,0	20,6	36,9	56,1	0,006
11:10	15 min	0,3	0,0	20,5	36,6	53,4	0,012
11:15	20 min	0,4	0,0	20,5	36,9	49,0	0,006
11:20	25 min	0,3	0,0	20,5	36,1	48,2	0,0
11:25	30 min	0,3	0,0	20,5	35,7	47,7	0,0

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO A2

Ponto 01	Bateria: 02	Data: 25/10/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
15:35	Inicial	0,0	0,0	20,9	26,4	35,1	0,0
15:40	5 min	0,0	0,0	20,9	27,2	34,9	0,0
15:45	10 min	0,0	0,0	20,9	26,7	34,7	0,0
15:50	15 min	0,0	0,0	20,9	27,0	34,4	0,003
15:55	20 min	0,0	0,0	20,9	27,0	34,2	0,003
16:00	25 min	0,0	0,0	20,9	27,7	33,9	0,0
16:05	30 min	0,0	0,0	20,9	27,1	33,7	0,003

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO A3

Ponto 01	Bateria: 03				Data: 16/11/2020		
<u>CAMADA DE COBERTURA</u>							
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
11:27	Inicial	0,0	0,0	20,9	31,3	46,7	0,003
11:32	5 min	0,0	0,0	20,9	38,9	52,3	0,0
11:37	10 min	0,6	0,0	20,9	35,9	53,3	0,003
11:42	15 min	0,3	0,0	20,9	29,6	46,1	0,003
11:47	20 min	0,4	0,0	20,9	29,9	43,2	0,0
11:52	25 min	0,3	0,0	20,9	29,3	42,2	0,0
11:57	30 min	0,3	0,0	20,9	29,7	44,6	0,0

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO A4

Ponto 01	Bateria: 04				Data: 07/12/2020		
<u>CAMADA DE COBERTURA</u>							
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
11:40	Inicial	0,0	0,0	20,9	34,1	45,7	0,0
11:45	5 min	0,0	0,0	20,9	31,6	49,2	0,0
11:50	10 min	0,6	0,0	20,9	33,6	48,4	0,006
11:55	15 min	0,3	0,0	20,9	35,8	49,3	0,006
12:00	20 min	0,4	0,0	20,9	35,6	50,5	0,006
12:05	25 min	0,3	0,0	20,9	36,0	50,8	0,006
12:10	30 min	0,3	0,0	20,9	33,3	49,2	0,006

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO B1

Ponto 02	Bateria: 01				Data: 11/10/2020		
<u>CAMADA DE COBERTURA</u>							
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
15:11	Inicial	0,0	0,0	20,9	39,9	49,8	0,0
15:17	5 min	0,0	0,0	20,9	34,8	46,4	0,0
15:22	10 min	0,0	0,0	20,9	37,9	47,4	0,0
15:27	15 min	0,0	0,0	20,9	35,5	45,5	0,003
15:32	20 min	0,0	0,0	20,9	-	-	-
15:37	25 min	0,0	0,0	20,9	35,8	46,8	0,003
15:42	30 min	0,0	0,0	20,9	38,5	47,0	0,006

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO B2

Ponto 02	Bateria: 02	Data: 25/10/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
14:00	Inicial	0,0	0,0	20,9	29,8	39,5	0,0
14:05	5 min	0,0	0,0	20,9	29,4	40,5	0,012
14:10	10 min	0,0	0,0	20,9	30,4	40,7	0,006
14:15	15 min	0,0	0,0	20,9	31,8	40,9	0,006
14:20	20 min	0,0	0,0	20,9	30,8	41,1	0,009
14:25	25 min	0,0	0,0	20,9	29,3	41,1	0,009
14:30	30 min	0,0	0,0	20,9	29,1	40,7	0,006

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO B3

Ponto 02	Bateria: 03	Data: 16/11/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
10:14	Inicial	0,0	0,0	20,9	31,5	42,6	0,003
10:19	5 min	0,0	0,0	20,9	35,4	44,4	0,012
10:24	10 min	0,0	0,0	20,9	36,4	47,0	0,016
10:29	15 min	0,0	0,0	20,9	37,7	47,7	0,016
10:34	20 min	0,0	0,0	20,9	31,7	44,2	0,019
10:39	25 min	0,0	0,0	20,9	35,5	47,8	0,016
10:44	30 min	0,0	0,0	20,9	34,6	48,6	0,019

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO B4

Ponto 02	Bateria: 04	Data: 07/12/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
09:52	Inicial	0,0	0,0	20,9	32,2	51,2	0,003
09:57	5 min	0,0	0,0	20,9	35,6	52,2	0,006
10:02	10 min	0,0	0,0	20,9	34,6	52,9	0,012
10:07	15 min	0,0	0,0	20,9	35,0	50,7	0,016
10:12	20 min	0,0	0,0	20,9	35,5	54,2	0,016
10:17	25 min	0,0	0,0	20,9	34,0	54,0	0,016
10:22	30 min	0,0	0,0	20,9	35,6	54,6	0,016

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO C1

Ponto 03	Bateria: 01	Data: 11/10/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
16:02	Inicial	0,0	0,0	20,9	33,8	40,0	0,006
16:07	5 min	0,0	0,0	20,9	33,7	41,6	0,006
16:12	10 min	0,0	0,0	20,9	34,1	41,0	0,006
16:17	15 min	0,0	0,0	20,9	33,6	40,7	0,006
16:22	20 min	0,0	0,0	20,9	33,3	40,0	0,006
16:27	25 min	0,0	0,0	20,9	33,3	40,5	0,009
16:32	30 min	0,0	0,0	20,9	-	-	-

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO C2

Ponto 03	Bateria: 02	Data: 25/10/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
12:55	Inicial	0,0	0,0	20,9	29,6	42,8	- 0,016
13:00	5 min	0,0	0,0	20,9	29,5	41,6	- 0,012
13:05	10 min	0,0	0,0	20,9	31,7	44,1	- 0,003
13:10	15 min	0,0	0,0	20,9	33,9	44,6	0,0
13:15	20 min	0,0	0,0	20,9	34,9	45,8	0,0
13:20	25 min	0,0	0,0	20,9	33,0	46,4	0,003
13:25	30 min	0,0	0,0	20,9	36,4	47,2	0,009

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO C3

Ponto 03	Bateria: 03	Data: 16/11/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
12:33	Inicial	0,0	0,0	20,9	34,0	46,0	0,0
12:38	5 min	0,0	0,0	20,9	34,1	44,9	0,003
12:43	10 min	0,0	0,0	20,9	36,4	46,7	0,012
12:48	15 min	0,0	0,0	20,9	36,4	45,2	0,016
12:53	20 min	0,0	0,0	20,9	32,9	42,9	0,016
12:58	25 min	0,0	0,0	20,9	31,6	41,6	0,016
13:03	30 min	0,0	0,0	20,9	32,5	40,3	0,012

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO C4

Ponto 03	Bateria: 04	Data: 07/12/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
10:48	Inicial	0,0	0,0	20,9	32,0	46,0	0,0
10:53	5 min	0,0	0,0	20,9	34,0	48,9	0,003
10:58	10 min	0,0	0,0	20,9	33,3	49,5	0,006
11:03	15 min	0,0	0,0	20,9	33,9	50,8	0,006
11:08	20 min	0,0	0,0	20,9	35,1	50,1	0,009
11:13	25 min	0,0	0,0	20,9	34,6	51,8	0,006
11:18	30 min	0,0	0,0	20,9	35,1	51,6	0,009

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO D1

Ponto 04	Bateria: 01	Data: 11/10/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
14:17	Inicial	0,3	0,0	20,9	36,5	47,1	0,0
14:22	5 min	0,3	0,0	20,9	36,9	46,7	0,003
14:27	10 min	0,3	0,0	20,9	37,1	46,4	0,006
14:32	15 min	0,4	0,0	20,9	39,8	53,4	0,0
14:37	20 min	0,4	0,0	20,9	40,9	54,7	0,0
14:42	25 min	0,4	0,0	20,9	40,4	56,1	0,006
14:47	30 min	0,4	0,0	20,9	40,8	56,3	0,006

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO D2

Ponto 04	Bateria: 02	Data: 25/10/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
10:05	Inicial	0,0	0,0	20,9	30,1	40,1	0,0
10:10	5 min	0,0	0,0	20,9	29,8	41,3	0,0
10:15	10 min	0,0	0,0	20,9	32,0	42,6	0,0
10:20	15 min	0,0	0,0	20,9	30,4	40,5	0,0
10:25	20 min	0,0	0,0	20,9	31,7	42,5	0,0
10:30	25 min	0,0	0,0	20,9	31,5	43,3	0,0
10:35	30 min	0,0	0,0	20,9	33,0	43,9	0,0

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO D3

Ponto 04	Bateria: 03	Data: 16/11/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
09:22	Inicial	0,0	0,0	20,9	29,6	37,2	0,006
09:27	5 min	0,0	0,0	20,9	29,7	37,2	0,009
09:32	10 min	0,0	0,0	20,9	30,8	38,6	0,016
09:37	15 min	0,0	0,0	20,9	30,4	40,5	0,019
09:42	20 min	0,0	0,0	20,9	30,1	41,3	0,019
09:47	25 min	0,0	0,0	20,9	32,3	40,9	0,019
09:52	30 min	0,0	0,0	20,9	30,6	38,4	0,022

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO D4

Ponto 04	Bateria: 04	Data: 07/12/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
09:07	Inicial	0,1	0,0	20,9	29,6	36,1	0,003
09:12	5 min	0,1	0,0	20,9	29,0	36,7	0,012
19:17	10 min	0,0	0,0	20,9	28,0	33,8	0,009
09:22	15 min	0,0	0,0	20,9	29,4	34,4	0,012
09:27	20 min	0,0	0,0	20,9	29,8	35,5	0,016
09:32	25 min	0,0	0,0	20,9	30,7	36,6	0,016
09:37	30 min	0,0	0,0	20,9	31,5	37,2	0,019

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO E1

Ponto 05	Bateria: 01	Data: 12/12/2020
-----------------	--------------------	-------------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
09:07	Inicial	0,0	0,0	20,9	25,9	32,3	0,022
09:12	5 min	0,0	0,0	20,9	26,6	36,7	0,022
09:17	10 min	0,0	0,0	20,9	26,8	37,8	0,019
09:22	15 min	0,0	0,0	20,9	26,2	38,7	0,016
09:27	20 min	0,0	0,0	20,9	26,6	38,3	0,016
09:32	25 min	0,0	0,0	20,9	27,6	41,1	0,012
09:37	30 min	0,0	0,0	20,9	27,2	41,3	0,009

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO E2

Ponto 05	Bateria: 02	Data: 25/10/2020
----------	-------------	------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
08:45	Inicial	0,2	0,0	20,9	30,7	39,2	0,003
08:50	5 min	0,1	0,0	20,9	27,5	35,0	0,0
08:55	10 min	0,1	0,0	20,9	30,3	38,8	0,0
09:00	15 min	0,1	0,0	20,9	31,2	40,8	0,0
09:05	20 min	0,0	0,0	20,9	29,2	39,3	0,0
09:10	25 min	0,0	0,0	20,9	30,5	42,4	0,0
09:15	30 min	0,0	0,0	20,9	30,8	43,3	0,0

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO E3

Ponto 05	Bateria: 03	Data: 16/11/2020
----------	-------------	------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
08:19	Inicial	0,2	0,0	20,9	27,9	34,1	0,009
08:24	5 min	0,3	0,0	20,9	29,5	36,9	0,009
08:29	10 min	0,3	0,0	20,9	29,0	35,1	0,012
08:34	15 min	0,3	0,0	20,9	29,5	39,1	0,012
08:39	20 min	0,3	0,0	20,9	28,2	39,8	0,016
08:44	25 min	0,3	0,0	20,9	28,1	35,4	0,016
08:49	30 min	0,2	0,0	20,9	28,1	35,1	0,009

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO E4

Ponto 05	Bateria: 04	Data: 07/12/2020
----------	-------------	------------------

CAMADA DE COBERTURA

Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	T1	T2	Pressão (kPa)
08:17	Inicial	0,2	0,0	20,9	28,2	33,9	0,0
08:22	5 min	0,2	0,0	20,9	27,7	37,7	0,0
08:27	10 min	0,2	0,0	20,9	29,0	37,9	0,0
08:32	15 min	0,2	0,0	20,9	28,8	38,1	0,003
08:37	20 min	0,2	0,0	20,9	27,8	39,9	0,003
08:42	25 min	0,1	0,0	20,9	28,9	41,5	0,003
08:47	30 min	0,1	0,0	20,9	27,7	39,1	0,003

*T1 = temperatura externa (°C)

T2 = temperatura interna (°C)

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO AP-1

Ponto 01	Bateria: 01				Data: 11/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,90 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
11:13	Inicial	0,5	0,0	20,9	0,006
11:18	5 min	0,6	0,0	20,9	0,009
11:23	10 min	0,6	0,0	20,9	0,012
11:28	15 min	0,6	0,0	20,9	0,016
11:33	20 min	0,6	0,4	20,9	0,016
11:38	25 min	0,6	0,0	20,9	0,019
11:43	30 min	0,6	0,4	20,9	0,009

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO AP-2

Ponto 01	Bateria: 02				Data: 12/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,82 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
11:33	Inicial	0,2	0,0	20,9	0,012
11:38	5 min	0,3	0,0	20,9	0,016
11:43	10 min	0,3	0,0	20,9	0,012
11:48	15 min	0,4	0,0	20,9	0,006
11:53	20 min	0,4	0,0	20,9	0,003
11:58	25 min	0,4	0,0	20,9	0,003
12:03	30 min	0,4	0,0	20,9	0,003

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO AP-3

Ponto 01	Bateria: 03				Data: 13/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,86 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
11:55	Inicial	0,0	0,0	20,9	0,006
12:00	5 min	0,2	0,0	20,9	0,006
12:05	10 min	0,2	0,0	20,9	0,006
12:10	15 min	0,3	0,0	20,9	0,003
12:15	20 min	0,3	0,0	20,9	0,003
12:20	25 min	0,3	0,0	20,9	0,003
12:25	30 min	0,3	0,0	20,9	0,003

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO AP-4

Ponto 01	Bateria: 04				Data: 14/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,84 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
12:17	Inicial	0,0	0,0	20,9	0,006
12:22	5 min	0,0	0,0	20,9	0,006
12:27	10 min	0,2	0,0	20,9	0,016
12:32	15 min	0,2	0,0	20,9	0,016
12:37	20 min	0,1	0,0	20,9	0,016
12:42	25 min	0,0	0,0	20,9	0,016
12:47	30 min	0,0	0,0	20,9	0,016

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO BP-1

Ponto 02	Bateria: 01				Data: 11/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,89 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
09:21	Inicial	0,3	0,4	20,2	0,006
09:26	5 min	0,3	0,6	20,2	0,006
09:31	10 min	0,6	0,6	20,3	0,006
09:36	15 min	1,2	0,8	20,1	0,006
09:41	20 min	2,3	1,4	19,8	0,006
09:46	25 min	3,3	2,0	19,5	0,006
09:51	30 min	4,5	3,2	19,0	0,009

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO BP-2

Ponto 02	Bateria: 02				Data: 12/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,92 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
09:56	Inicial	0,6	0,0	20,9	0,009
10:01	5 min	5,0	2,0	18,2	0,006
10:06	10 min	6,8	4,8	17,7	0,006
10:11	15 min	7,0	5,2	17,6	0,006
10:16	20 min	7,6	6,0	17,3	0,003
10:21	25 min	7,4	6,0	17,8	0,003
10:26	30 min	7,0	6,0	17,8	0,003

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO BP-3

Ponto 02	Bateria: 03				Data: 13/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,86 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
10:15	Inicial	0,6	0,0	20,6	0,003
10:20	5 min	0,8	0,0	20,6	0,003
10:25	10 min	1,0	0,4	20,6	0,003
10:30	15 min	1,2	0,6	20,4	0,003
10:35	20 min	1,9	1,0	20,1	0,003
10:40	25 min	2,3	1,4	20,0	0,003
10:45	30 min	2,6	1,6	19,8	0,003
10:50	35 min	3,0	2,2	19,6	0,003
10:55	40 min	3,5	2,6	19,4	0,006

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO BP-4

Ponto 02	Bateria: 04				Data: 15/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,90 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
10:45	Inicial	0,5	0,0	20,9	0,006
10:50	5 min	0,7	0,0	20,9	0,003
10:55	10 min	0,8	0,4	20,9	0,006
11:00	15 min	0,9	0,4	20,9	0,009
11:05	20 min	0,9	0,4	20,9	0,006
11:10	25 min	0,9	0,6	20,9	0,009
11:15	30 min	0,9	0,6	20,9	0,006

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO CP-1

Ponto 03	Bateria: 01				Data: 11/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,93 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
12:58	Inicial	0,0	0,0	20,9	0,003
12:03	5 min	0,1	0,0	20,9	0,0
12:08	10 min	0,2	0,0	20,9	0,0
12:13	15 min	0,2	0,0	20,9	0,0
12:18	20 min	0,2	0,0	20,9	0,0
12:23	25 min	0,2	0,0	20,9	0,0
12:28	30 min	0,2	0,0	20,9	0,0

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO CP-2

Ponto 03	Bateria: 02				Data: 12/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,87 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
12:49	Inicial	0,0	0,0	20,9	0,003
12:54	5 min	0,0	0,0	20,9	0,003
12:59	10 min	0,0	0,0	20,9	0,0
13:04	15 min	0,1	0,0	20,9	0,0
13:09	20 min	0,0	0,0	20,9	0,003
13:14	25 min	0,1	0,0	20,9	0,0
13:19	30 min	0,1	0,0	20,9	0,0

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO CP-3

Ponto 03	Bateria: 03				Data: 14/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,84 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
13:21	Inicial	0,0	0,0	20,9	0,0
13:26	5 min	0,0	0,0	20,9	0,0
13:31	10 min	0,0	0,0	20,9	0,003
13:36	15 min	0,1	0,0	20,9	0,006
13:41	20 min	0,1	0,0	20,9	0,016
13:46	25 min	0,1	0,0	20,9	0,016
13:51	30 min	0,1	0,0	20,9	0,016

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO CP-4

Ponto 03	Bateria: 04				Data: 15/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,81 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
13:43	Inicial	0,0	0,0	20,9	0,019
13:48	5 min	0,0	0,0	20,9	0,016
13:53	10 min	0,0	0,0	20,9	0,012
13:58	15 min	0,0	0,0	20,9	0,006
14:03	20 min	0,0	0,0	20,9	0,016
14:08	25 min	0,0	0,0	20,9	0,006
14:13	30 min	0,0	0,0	20,9	0,003

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO DP-1

Ponto 04	Bateria: 01				Data: 11/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 1,35 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
14:09	Inicial	0,0	0,0	20,9	0,0
14:14	5 min	0,0	0,0	20,9	0,0
14:19	10 min	0,0	0,0	20,9	0,0
14:24	15 min	0,0	0,0	20,9	0,0
14:29	20 min	0,0	0,0	20,9	0,006
14:34	25 min	0,0	0,0	20,9	0,009
14:39	30 min	0,0	0,0	20,9	0,012

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO DP-2

Ponto 04	Bateria: 02				Data: 13/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 1,26 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
14:28	Inicial	0,0	0,0	20,9	0,006
14:33	5 min	0,0	0,0	20,9	0,016
14:38	10 min	0,0	0,0	20,9	0,012
14:43	15 min	0,0	0,0	20,9	0,016
14:48	20 min	0,0	0,0	20,9	0,016
14:53	25 min	0,0	0,0	20,9	0,019
14:58	30 min	0,0	0,0	20,9	0,022

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO DP-3

Ponto 04	Bateria: 03				Data: 14/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 1,33 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
14:51	Inicial	0,3	0,0	20,9	0,003
14:56	5 min	0,5	0,4	20,6	0,0
15:01	10 min	0,6	0,6	20,5	- 0,003
15:06	15 min	0,6	0,6	20,5	- 0,006
15:11	20 min	0,6	0,6	20,5	- 0,009
15:16	25 min	0,7	0,8	20,4	- 0,012
15:21	30 min	0,7	0,8	20,4	- 0,012

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO DP-4

Ponto 04	Bateria: 04				Data: 15/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 1,13 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
15:32	Inicial	0,3	0,0	20,9	0,003
15:37	5 min	0,3	0,0	20,9	0,003
15:42	10 min	0,3	0,2	20,8	0,0
15:47	15 min	0,4	0,3	20,7	0,003
15:52	20 min	0,4	0,3	20,7	0,0
15:57	25 min	0,5	0,4	20,6	0,0
16:02	30 min	0,5	0,4	20,6	0,0

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO EP-1

Ponto 05	Bateria: 01				Data: 12/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,91 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
09:18	Inicial	0,0	0,0	20,9	0,0
09:23	5 min	0,0	0,0	20,9	0,003
09:28	10 min	0,0	0,0	20,9	0,006
09:33	15 min	0,0	0,0	20,9	0,003
09:38	20 min	0,0	0,0	20,9	0,003
09:43	25 min	0,0	0,0	20,9	0,006
09:48	30 min	0,0	0,0	20,9	0,006

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO EP-2

Ponto 05	Bateria: 02				Data: 13/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,94 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
09:38	Inicial	0,2	0,0	20,9	0,003
09:43	5 min	0,2	0,0	20,9	0,0
09:48	10 min	0,2	0,0	20,9	0,0
09:53	15 min	0,2	0,0	20,9	0,0
09:58	20 min	0,2	0,0	20,9	0,0
10:03	25 min	0,2	0,0	20,9	0,006
10:08	30 min	0,1	0,0	20,9	0,0

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO EP-3

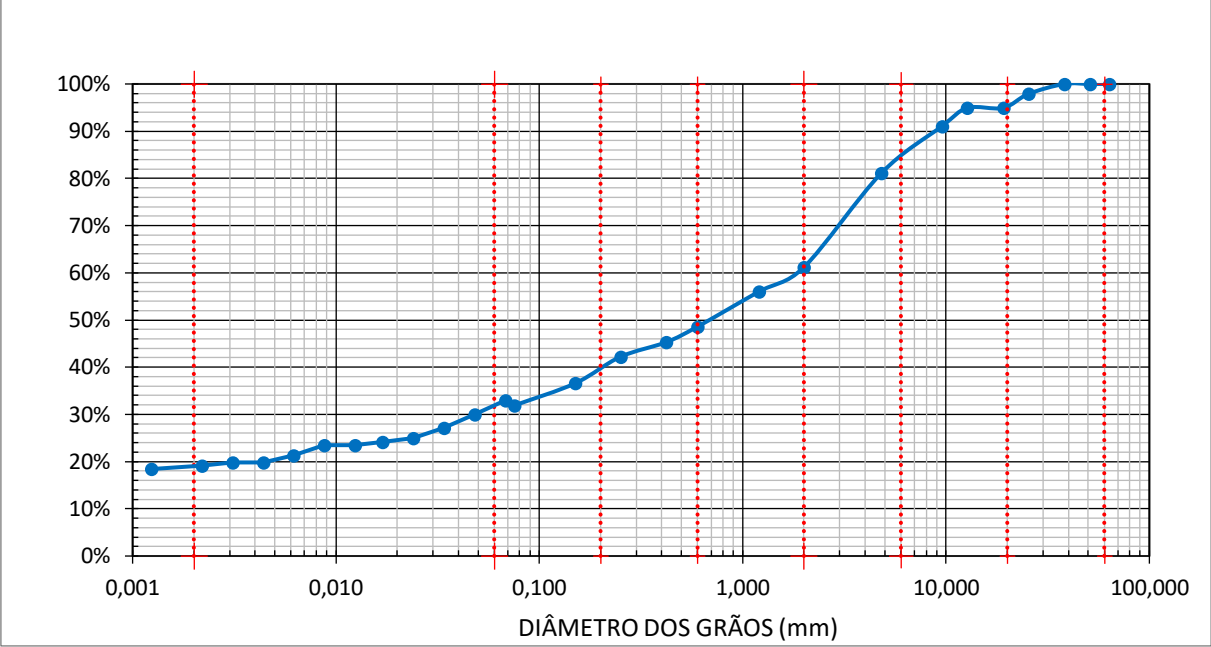
Ponto 05	Bateria: 03				Data: 14/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,80 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
09:57	Inicial	0,2	0,0	20,9	0,0
10:02	5 min	0,2	0,0	20,9	0,0
10:07	10 min	0,1	0,0	20,9	0,003
10:12	15 min	0,1	0,0	20,9	0,006
10:17	20 min	0,1	0,0	20,9	0,006
10:22	25 min	0,0	0,0	20,9	0,006
10:27	30 min	0,0	0,0	20,9	0,003

ENSAIO DE CONCENTRAÇÃO EP-4

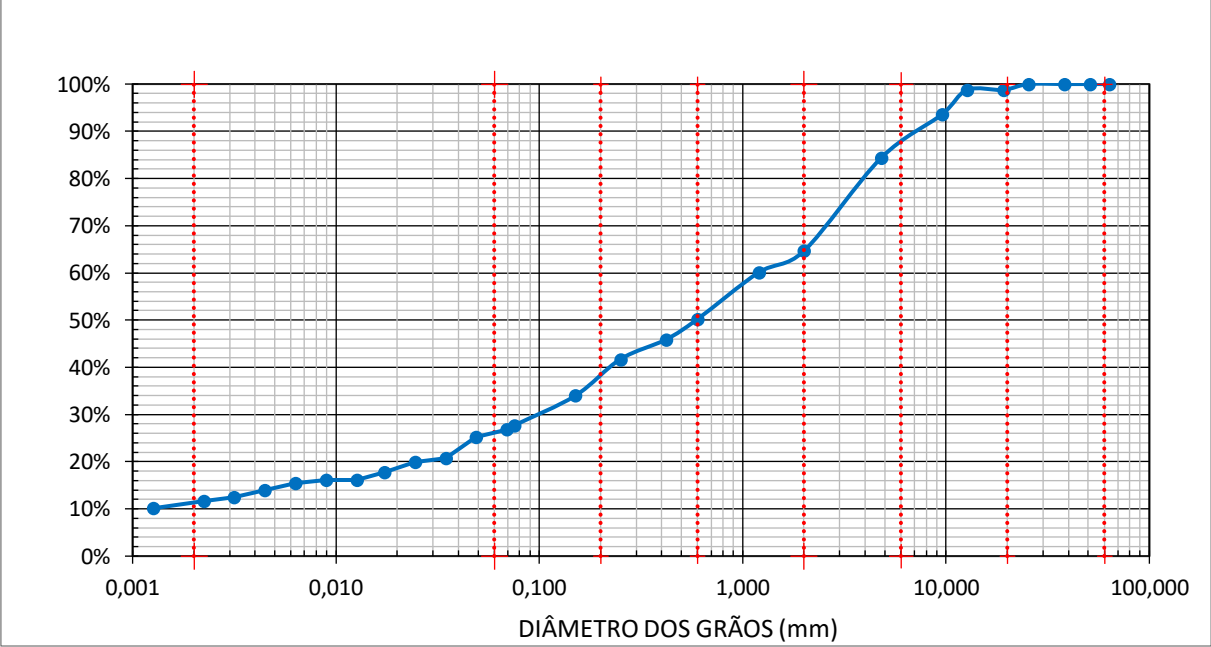
Ponto 05	Bateria: 04				Data: 15/01/2021
PROFUNDIDADE DA CAMADA DE COBERTURA: 0,88 m					
Hora	Tempo em min	CH ₄	CO ₂	O ₂	Pressão (kPa)
10:01	Inicial	0,0	0,0	20,9	0,009
10:06	5 min	0,0	0,0	20,9	0,0
10:11	10 min	0,0	0,0	20,9	0,0
10:16	15 min	0,0	0,0	20,9	0,0
10:21	20 min	0,0	0,0	20,9	0,0
10:26	25 min	0,0	0,0	20,9	0,0
10:31	30 min	0,0	0,0	20,9	0,0

CURVAS GRANULOMÉTRICAS

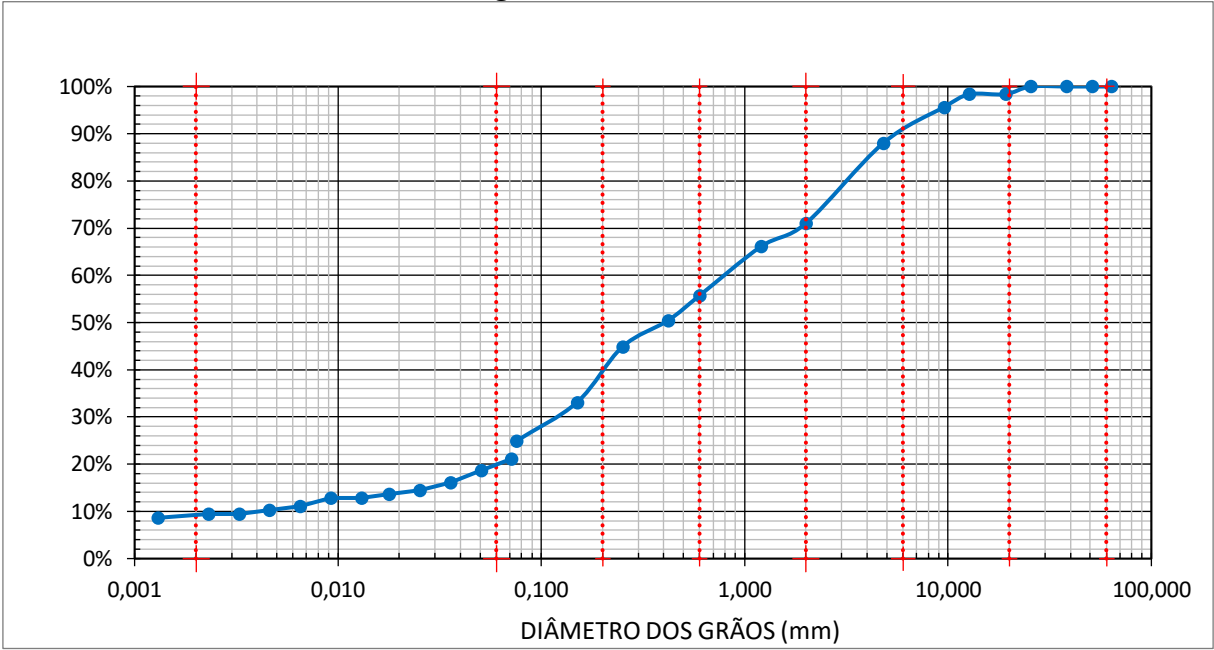
Ensaio de granulometria – Amostra 01



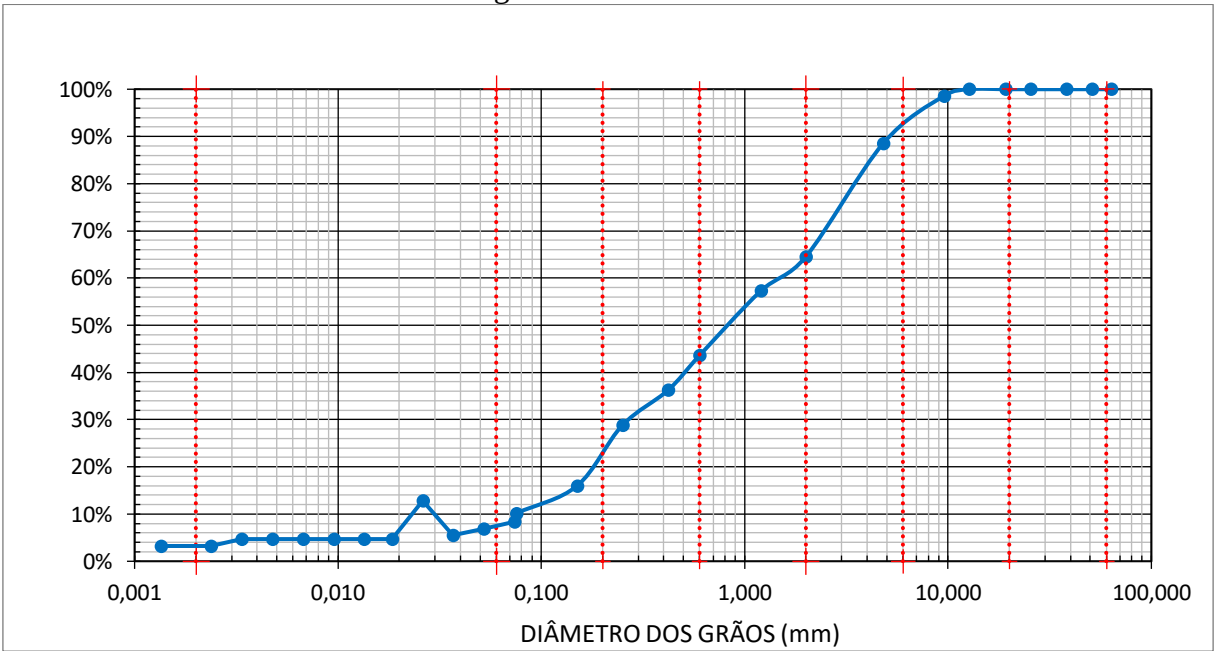
Ensaio de granulometria – Amostra 02



Ensaio de granulometria – Amostra 03



Ensaio de granulometria – Amostra 04



Ensaio de granulometria – Amostra 05

