



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**GUILHERME JOSÉ CORREIA GOMES**

**COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE SOLO E COMPOSTO ORGÂNICO PARA  
DIMENSIONAMENTO DE CAMADAS DE COBERTURA DE DEPÓSITOS DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

**RECIFE  
2018**

*GUILHERME JOSÉ CORREIA GOMES*

**COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE SOLO E COMPOSTO ORGÂNICO PARA  
DIMENSIONAMENTO DE CAMADAS DE COBERTURA DE DEPÓSITOS DE  
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para aprovação de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

RECIFE

2018

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S633c Gomes, Guilherme José Correia  
Comportamento de misturas de solo e composto orgânico para dimensionamento de camadas de cobertura de depósitos de resíduos sólidos urbanos. – Recife, 2018.  
72 folhas, Ils. Tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Graduação em Engenharia Civil, 2018.  
Inclui Referências.

1. Gás metano. 2. Emissões. 3. Mitigar. 4. Camadas de cobertura. 5. Material compostado. I. Jucá, José Fernando Thomé (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2018-46



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA  
CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL**

**CANDIDATO:** Guilherme José Correia Gomes

**BANCA EXAMINADORA:**

**Orientador:** José Fernando Thomé Jucá

**Examinador 1:** Maria Odete Holanda Mariano

**Examinador 2:** Washington Moura de Amorim Junior

**TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:** COMPORTAMENTO DE MISTURAS DE SOLO E COMPOSTO ORGÂNICO PARA DIMENSIONAMENTO DE CAMADAS DE COBERTURA DE DEPÓSITOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.

**LOCAL:** CTG – UFPE, Sala de pós graduação em Geotecnia (Térreo).

**DATA:** 16/01/2018 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 17:00.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: \_\_\_\_\_ (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

**1) ( ) aprovado(s) (nota  $\geq 7,0$ ),** pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo,  **$3,0 \leq \text{nota} < 7,0$** , será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

**2) ( ) reprovado(s). (nota  $< 3,0$ )**

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 16 de Janeiro de 2018

Orientador: .....

Avaliador 1: .....

Avaliador 2: .....

Candidato: .....

*Dedico este trabalho aos meus pais Wellington e Neusa, demais familiares e amigos pela paciência e ajuda ao longo desta graduação.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me guiar ao longo dessa jornada.

Aos meus pais pelo incentivo e amor que me ajudaram a concluir mais uma etapa de minha vida.

À minha família pela educação e apoio em todos os momentos.

Ao Professor Dr. José Fernando Thomé Jucá pela motivação, confiança e orientação para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Professora Dra. Maria Odete Holanda Mariano pelas contribuições e orientações ao longo da pesquisa.

À Antônio Brito e Gutemberg pelo grande apoio e paciência para a realização dos ensaios no Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE.

Aos amigos do Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE (GRS/UFPE) pelo incentivo, paciência e grande apoio ao longo dessa pesquisa.

À equipe de Camadas de Cobertura por todos os suportes e ideias compartilhadas.

Aos amigos da graduação e a todos que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

Os aterros sanitários e lixões a céu aberto são responsáveis por um teor considerável de gases tóxicos emitidos na atmosfera. Dentre os gases mais preocupantes emitidos nesses locais e altamente associados ao efeito estufa, estão o gás carbônico e o metano, sendo o último cerca de 21 vezes mais nocivo nesse aspecto. Daí, é necessário mitigar principalmente as emissões de gás metano na atmosfera em atendimento aos protocolos internacionais e também à Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010). Assim, um mecanismo promissor é, atualmente, a oxidação do gás metano através de camadas de cobertura alternativas com adição de material compostado, uma vez que isso possibilita que parte do metano que seria emitido para a atmosfera seja convertido em água, CO<sub>2</sub> e biomassa pelo potencial microbiológico do composto orgânico. Dessa forma, este trabalho busca implementar camadas de cobertura com misturas de solo e material compostado para atender aos critérios de emissões de metano na atmosfera e viabilizar o emprego de material compostado. Para isso, foram realizados ensaios de coluna para verificar, em laboratório, o desempenho de duas camadas de cobertura de solos misturados com composto orgânico em proporções volumétricas de 1:1 perante o fluxo de gases. Um dos solos que foram misturados com composto orgânico possui características predominantemente siltosas, que foi extraído da jazida utilizada na cobertura do Aterro da Muribeca, em Jaboatão dos Guararapes – PE, já o outro solo possui características arenosas, coletado nas proximidades de Centro Acadêmico do Agreste (CAA) da UFPE, em Caruaru - PE e o composto orgânico foi adquirido no Jardim Botânico da cidade do Recife – PE. Além da caracterização dos solos puros e das misturas em proporções volumétricas de 1:1 utilizadas, foram caracterizadas também misturas 2:1 (solo:composto orgânico) para avaliar a influência da quantidade de composto orgânico em cada material. Ambas as misturas empregadas nos ensaios de coluna apresentaram microrganismos metanotróficos por meio de ensaios microbiológicos e reduziram de forma significativa as emissões de gás metano de forma a mostrar uma alternativa de redução de emissões.

Palavras-chave: Gás metano, emissões, mitigar, camadas de cobertura, material compostado.

## ABSTRACT

Landfills and open dumps are responsible for a considerable amount of toxic gases emitted into the atmosphere. Among the most worrisome gases emitted in these places and highly associated with the greenhouse effect, there are carbon dioxide and methane, the latter being about 21 times more harmful in this regard. Therefore, it is mainly necessary to mitigate methane gas emissions in the atmosphere in compliance with international protocols and also the National Solid Waste Policy (Law 12.305/2010). Thus, a promising mechanism is currently the oxidation of methane gas through alternative cover layers with the addition of composted material, once this allows some of the methane that would be emitted into the atmosphere to be converted into water, CO<sub>2</sub> and biomass by the microbiological potential of the organic compound. So, this work seeks to implement cover layers with mixtures of soil and composted material to satisfy the criteria of methane emissions in the atmosphere and make practicable the use of composted material. For this, column tests were performed to verify, in the laboratory, the performance of two layers of soils mixed with organic compound in volumetric proportions of 1:1 before the gas flow. One of the soils that were mixed with organic compost has predominantly silty characteristics, in which it was extracted from the deposit used in the Muribeca Landfill, in Jaboatão dos Guararapes - PE, while the other soil has sandy characteristics, collected near Centro acadêmico do Agreste (CAA) of UFPE, in Caruaru - PE, and the organic compound was purchased at Jardim Botânico of the city of Recife - PE. In addition to the characterization of pure soils and mixtures in 1:1 volumetric proportions used, 2:1 mixtures (soil: organic compost) were also characterized to evaluate the influence of the amount of organic compound in each material. Both mixtures used in the column tests showed methanotrophic microorganisms through microbiological tests and significantly reduced methane gas emissions in order to show an alternative to reduce emissions.

Keywords: Methane gas, emissions, mitigate, cover layers, composted material.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de uma instalação para depósito de resíduos com tratamento de efluentes.....	17
Figura 2 - Sistema de colunas em funcionamento.....	21
Figura 3 - Coleta do composto orgânico.....	22
Figura 4 - Temperatura ambiente e umidade relativa do ar.....	23
Figura 5 - Temperatura interna central da leira de compostagem.....	23
Figura 6 - Jazida de solo no aterro da Muribeca.....	24
Figura 7 - Coleta de material para estudo.....	25
Figura 8 – Retirada do material.....	25
Figura 9 – Material coletado.....	26
Figura 10 - Série padrão de peneiras.....	28
Figura 11 - Dispensor para o ensaio de sedimentação.....	29
Figura 12 - Execução do ensaio de sedimentação.....	29
Figura 13 - Remoção de bolhas de ar com bomba de vácuo.....	30
Figura 14 - Aplicação de golpes com o soquete.....	31
Figura 15 - Extração do corpo de prova do cilindro metálico.....	32
Figura 16 - Estados e limites de consistência com o teor de umidade. Adaptado: Caputo, H. P. – Mecânica dos Solos e suas aplicações. Vol. 1.....	32
Figura 17 - Aparelho de Casa Grande com ranhura à esquerda e cinzel à direita.....	33
Figura 18 - União das duas partes e interrupção da manivela.....	33
Figura 19 - Modelagem de cilindros em placa de vidro fosco.....	34
Figura 20 - Cápsulas de ensaio de limite de plasticidade para medição de umidade.....	35
Figura 21 - Realização do ensaio de permeabilidade.....	36
Figura 22 - Membrana de látex envolvendo o corpo de prova.....	36
Figura 23 - Amostra a ser moldada pela caixa metálica prismática.....	37
Figura 24 - Amostra indeformada a ser transferida para a caixa de cisalhamento direto..	37
Figura 25 - Equipamento para realização do ensaio de cisalhamento direto.....	37
Figura 26 - Corpo de prova de solo sendo moldado.....	38
Figura 27 - Prensas utilizadas num ensaio edométrico.....	39

Figura 28 - Câmara de ensaio de compressão triaxial.....	39
Figura 29 – Curvas de retenção de areia, silte e argila.....	40
Figura 30 – Parâmetros da curva de retenção de um solo siltoso.....	41
Figura 31 - Moldagem dos corpos de prova.....	42
Figura 32 - Retirada das amostras de dentro das colunas.....	44
Figura 33 - Amostras de solo diluídas em série até a concentração de $10^{-6}$ .....	44
Figura 34 - Amostras diluídas colocadas em placas de Petri contendo meio de cultura NMS.....	45
Figura 35 - Placas colocadas em dessecadores para incubação.....	45
Figura 36 - Visão geral esquemática do procedimento para crescimento de bactérias oxidantes de metano.....	46
Figura 37 - Curvas granulométricas dos materiais.....	47
Figura 38 - Resultado do ensaio de compactação para Umidade Ótima dos materiais.....	49
Figura 39 - Resultado do ensaio de compactação para Umidade Ótima do composto orgânico.....	49
Figura 40 - Gráfico dos resultados do Limite de Liquidez para o solo da jazida da Muribeca.....	50
Figura 41 - Resultados do Limite de Liquidez para o solo do município de Caruaru.....	50
Figura 42 - Resultados dos ensaios de permeabilidade vertical ao ar para um mesmo corpo de prova das misturas 1:1 e 2:1 com o solo da jazida da Muribeca.....	52
Figura 43 - Resultados dos ensaios de permeabilidade horizontal ao ar para um mesmo corpo de prova da mistura 1:1 da jazida da Muribeca.....	53
Figura 44 - Envoltória linear do ensaio de resistência ao cisalhamento direto da Muribeca na umidade ótima em condições não inundadas.....	54
Figura 45 - Envoltória linear do ensaio de resistência ao cisalhamento direto da Muribeca na umidade ótima em condições inundadas.....	55
Figura 46 - Envoltória linear do ensaio de resistência ao cisalhamento direto de Caruaru na umidade ótima em condições não inundadas.....	56
Figura 47 - Envoltória linear do ensaio de resistência ao cisalhamento direto de Caruaru na umidade ótima em condições inundadas.....	56
Figura 48 - Ensaio de adensamento para os solos puros na umidade ótima.....	58
Figura 49 - Ensaio de adensamento para as misturas 1:1 na umidade ótima.....	58

Figura 50 - Ensaio de adensamento para as misturas 2:1 na umidade ótima.....	59
Figura 51 - Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para a mistura 1:1 da Muribeca.....	60
Figura 52 - Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para a mistura 1:1 de Caruaru.....	60
Figura 53 - Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para a mistura 2:1 da Muribeca.....	61
Figura 54 - Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para a mistura 2:1 de Caruaru.....	61
Figura 55 - Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para o solo puro da Muribeca.....	61
Figura 56 - Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para o solo puro de Caruaru.....	62
Figura 57 - Curvas características de sucção matricial das misturas e solo puro da Muribeca.....	63
Figura 58 - Curvas características de sucção matricial das misturas e solo puro de Caruaru.....	64
Figura 59 - Resultado do crescimento de microrganismos metanotróficos nas misturas 1:1 utilizadas no ensaio de coluna.....	65
Figura 60 - Resultados das concentrações de metano na coluna com mistura 1:1 da Muribeca.....	66
Figura 61 - Resultados das concentrações de metano na coluna com mistura 1:1 de Caruaru.....	67
Figura 62 - Resultados das concentrações de dióxido de carbono na coluna com mistura 1:1 da Muribeca.....	67
Figura 63 - Resultados das concentrações de dióxido de carbono na coluna com mistura 1:1 de Caruaru.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equipamentos utilizados na coleta do composto orgânico em campo.....	22
Tabela 2 - Dados coletados em campo.....	23
Tabela 3 - Umidade gravimétrica inicial de campo do composto orgânico.....	24
Tabela 4 - Nomenclatura e espaçamento das peneiras.....	27
Tabela 5 - Energias de compactação conforme a NBR 7182 (ABNT, 1988).....	31
Tabela 6 - Resultados da caracterização dos materiais.....	47
Tabela 7 - Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação.....	49
Tabela 8 – Parâmetros dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da Muribeca...	55
Tabela 9 – Parâmetros dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto de Caruaru.....	57
Tabela 10 - Parâmetros dos ensaios de adensamento na umidade ótima.....	59
Tabela 11 – Parâmetros dos ensaios triaxiais da Muribeca.....	62
Tabela 12 – Parâmetros dos ensaios triaxiais de Caruaru.....	62
Tabela 13 - Resultados da análise química das amostras de composto orgânico e solos puros.....	65

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1</b>	<b>Justificativa e motivação</b> .....	17
<b>1.2</b>	<b>Objetivos gerais e específicos</b> .....	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Aterros sanitários</b> .....	18
2.1.1	Camadas de cobertura de aterros sanitários.....	19
2.1.1.1	<i>Camadas oxidativas</i> .....	19
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	21
<b>3.1</b>	<b>Realização dos ensaios de coluna</b> .....	21
<b>3.2</b>	<b>Coleta dos materiais</b> .....	22
3.2.1	Coleta do composto orgânico .....	22
3.2.2	Coleta do silte arenoso da Muribeca.....	25
3.2.3	Coleta da areia siltosa de Caruaru .....	26
<b>3.3</b>	<b>Caracterização dos materiais</b> .....	27
3.3.1	Ensaio geotécnicos.....	27
3.3.1.1	<i>Análise granulométrica</i> .....	28
3.3.1.2	<i>Densidade das partículas</i> .....	31
3.3.1.3	<i>Ensaio de compactação</i> .....	31
3.3.1.4	<i>Limites de consistência</i> .....	33
3.3.1.5	<i>Permeabilidade</i> .....	36
3.3.1.6	<i>Resistência ao cisalhamento</i> .....	37
3.3.1.7	<i>Ensaio de edométrico</i> .....	39
3.3.1.8	<i>Ensaio de compressão triaxial</i> .....	40
3.3.1.9	<i>Curvas características dos materiais</i> .....	41
3.3.2	Ensaio químico: Análise química por fluorescência de raios X.....	44
3.3.3	Ensaio microbiológico.....	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	47
<b>4.1</b>	<b>Análise granulométrica</b> .....	47
<b>4.2</b>	<b>Ensaio de Compactação / Umidade Ótima</b> .....	49
<b>4.3</b>	<b>Limites de Consistência</b> .....	51
<b>4.4</b>	<b>Permeabilidade</b> .....	52

4.4.1	Permeabilidade Vertical ao ar.....	52
4.4.2	Permeabilidade Vertical à água .....	53
4.4.3	Permeabilidade Horizontal ao ar .....	54
4.4.3	Permeabilidade Horizontal à água.....	55
<b>4.5</b>	<b>Resistência ao cisalhamento direto .....</b>	<b>55</b>
<b>4.6</b>	<b>Ensaio de edométrico .....</b>	<b>58</b>
<b>4.7</b>	<b>Ensaio de compressão triaxial CIU.....</b>	<b>61</b>
<b>4.8</b>	<b>Curvas características dos materiais .....</b>	<b>64</b>
<b>4.9</b>	<b>Análise química por fluorescência de raios X.....</b>	<b>65</b>
<b>4.10</b>	<b>Ensaio microbiológico .....</b>	<b>66</b>
<b>4.11</b>	<b>Ensaio de coluna .....</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o quinto maior gerador de resíduos sólidos urbanos (RSU) do planeta, atingindo valores de 80 milhões de toneladas anuais. A grande parte destes resíduos possuem destinação adequadas em aterros sanitários (52%) e ainda quase metade se destinam a locais impróprios, a exemplo de lixões. No Nordeste cerca de 90% dos municípios ainda depositam seus resíduos sólidos urbanos em lixões. Em todos os casos a fração orgânica destes resíduos se degrada gerando biogás, que é composto principalmente de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, gases de efeito estufa (GEE).

Em um aterro sanitário, o potencial de geração desse biogás pode chegar a 240 m<sup>3</sup> por tonelada de RSU, tendo em sua composição diversos gases (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, etc), que dependem das fases de decomposição dos resíduos e de inúmeros fatores intervenientes no processo de degradação como composição dos resíduos, clima, formas de operação e outros (MACIEL, 2003). No país, projetos de aproveitamento energético do biogás de aterro foram impulsionados inicialmente pela oportunidade de obtenção da Redução Certificada de Emissões (RCE), através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que promovia a implantação de tecnologias limpas para o tratamento (queima) e geração de energia a partir do biogás produzido em aterros localizados nos países em desenvolvimento, tendo em troca créditos de carbono que poderiam ser negociados e vendidos internacionalmente, principalmente para a iniciativa privada localizada nos países desenvolvidos signatários do Protocolo de Kyoto (FIRMO, 2013).

O que se busca, em geral, é uma “Economia de Baixo Carbono”. Esse termo foi pela primeira vez utilizado no relatório do Departamento de Transporte e do Meio Ambiente do Reino Unido, em 2003, intitulado “Our energy future-creating a low carbon economy”. Uma economia de baixo carbono pode ser definida como uma economia com baixa emissão de gases de efeito estufa, incluindo, dentre outras ações, implementações de políticas de mitigação de GEE (UK ENERGY WHITE PAPER, 2003). Este aspecto gerou iniciativas de se buscar “Tecnologias de Baixo Carbono”, que norteiam grandes iniciativas de financiamentos internacionais a exemplo das iniciativas do Banco Mundial neste sentido (ESMAP, 2010).

Espera-se que as emissões de CO<sub>2</sub> dos países em desenvolvimento representem mais de metade das emissões globais até 2030, embora em termos per capita, os países desenvolvidos ainda estejam bem à frente (IEA, 2007; BOSETTI & BUCHNER, 2009). Esses países já têm enfrentado uma crescente pressão para reduzir suas emissões de carbono (DIRINGER, 2008).

No estágio atual, existem muitas incertezas sobre metas, políticas e responsabilidades quanto a mitigação, e alguns estudos apontam as principais dificuldades e possibilidades que estariam envolvidas nas negociações internacionais após o Protocolo de Kyoto, que se expirou em 2012. Questões comumente debatidas, e de fundamental interesse para países como o Brasil, são a efetividade na mitigação de emissões dos gases de efeito estufa. A necessidade desta mitigação no Brasil foi levantada em diagnóstico realizado pela CETESB, em parceria com o Banco Mundial (Brazil Low Carbon: Waste Case Study – Technical Synthesis Report, 2010). Nestes estudos, foram constatados que o setor de resíduos responde pela menor parcela de emissões no Brasil, com 68,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2014, crescendo desde 1990.

Dessa forma, tanto as emissões geradas em aterros sanitários, quanto as geradas em lixões a céu aberto necessitam ser mitigadas em atendimento aos protocolos internacionais e também à Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que estabelece no Art. 54 que: “A disposição final ambientalmente adequada de resíduos deverá ser implantada em até 4 anos”. Esse anúncio previa o fim dos lixões, em 2014, no Brasil. Isso gera a necessidade de uma solução para a emissão dos gases nesse meio, através de tecnologias de baixo carbono.

Nesse sentido, este trabalho busca a redução de emissões dos gases de efeito estufa através de camadas de cobertura, as quais constituem uma barreira física à passagem de fluídos do meio externo para a massa de resíduos e também no sentido contrário, além de isolar os resíduos sólidos do ambiente. São usualmente constituídas por material argiloso devido, principalmente, as suas características de baixa condutividade hidráulica, disponibilidade e custo.

Quanto à estanqueidade da camada, seu objetivo principal é impedir a entrada de água no aterro em quantidade de gerar uma grande produção de lixiviados bem como de minimizar a emissão de gases poluentes provenientes, sobretudo, da decomposição da matéria orgânica. Dentre os gases mais preocupantes e altamente associados ao efeito estufa, estão o gás carbônico e o metano, sendo o último cerca de 21 vezes mais nocivo nesse aspecto. Aprisionando tais gases no aterro, eles podem ser canalizados e, inclusive, aproveitados como fonte de energia elétrica.

Pode-se dividir as formas de camada de cobertura em basicamente duas: camada de cobertura convencional e camada de cobertura alternativa. A primeira é constituída principalmente por material argiloso e geossintéticos e na segunda há a incorporação de outros materiais como produtos compostados, resíduos da construção civil e resíduos de estações de tratamento de água.

Concentrando os estudos nas camadas de cobertura alternativas com a adição de material compostado com finalidade de utilizá-las em encerramento de lixões, esta solução possibilita que parte do metano que seria emitido para a atmosfera seja convertido em água, CO<sub>2</sub> e biomassa pela atividade microbiológica ali desenvolvida, de forma a lançar menos poluentes para atmosfera, classificando a camada como oxidativa.

Além da verificação da real capacidade de degradação do metano, para melhorar o desempenho dessas camadas, é necessário conhecer os materiais que as compõem, analisando as características geotécnicas e os condicionantes climáticos das regiões onde serão implantados os depósitos de resíduos sólidos urbanos com essa cobertura final.

### **1.1 Justificativa e motivação**

Contribuir para o desenvolvimento de tecnologias alternativas de execução de camadas de cobertura em depósitos de resíduos sólidos urbanos.

### **1.2 Objetivos gerais e específicos**

Os principais objetivos deste trabalho são analisar, em laboratório, o desempenho de duas camadas de cobertura perante o fluxo de gás metano, uma com solo de características predominantemente siltsos e outra com solo de características predominantemente arenosas, ambas misturadas com composto orgânico coletado do Jardim Botânico da cidade do Recife e obter parâmetros para o dimensionamento.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- Avaliar a eficiência de duas camadas de solo e composto orgânico nas proporções volumétricas de 1:1 com respeito às emissões gasosas, correlacionando com as propriedades obtidas por meio de ensaios;
- Viabilizar o uso de camadas oxidativas em aterros sanitários que não possuem um sistema eficiente de drenagem e tratamento do biogás para geração de energia elétrica;
- Viabilizar tecnicamente o uso de camadas oxidativas para contribuir com o encerramento dos lixões, de modo a compatibilizá-los às exigências estabelecidas para implantação e operação de um aterro sanitário ao longo da vida útil e também após o encerramento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

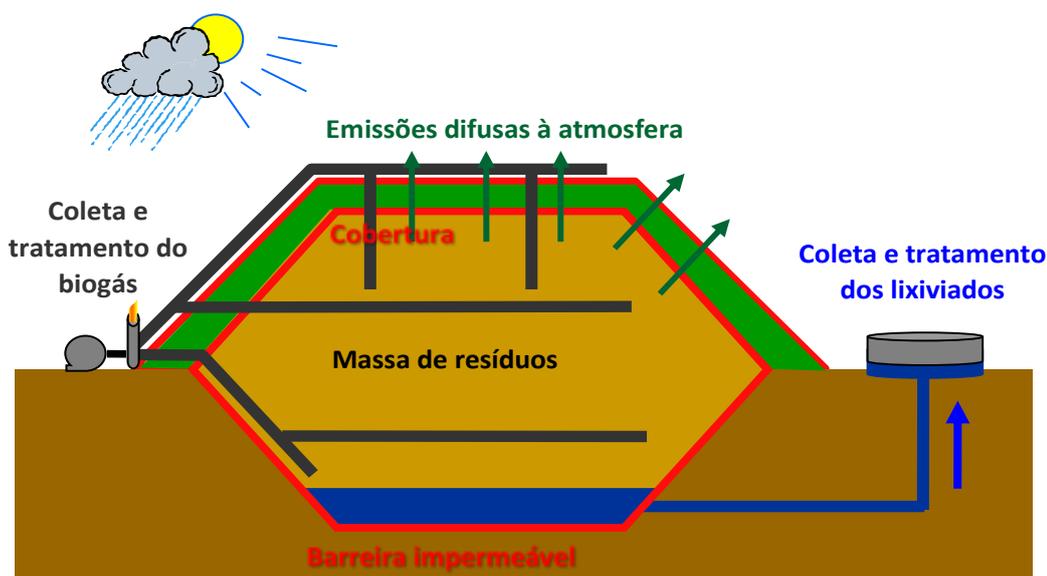
### 2.1 Aterros sanitários

De acordo com a NBR 8419 (ABNT, 1992), aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é definido como uma obra de engenharia, onde a disposição final no solo não cause danos à saúde pública e à sua segurança, mitigando seus impactos ambientais utilizando princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível, reduzindo os resíduos ao menor volume permissível e deve ter a área das células de resíduos coberta diariamente na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

Os aterros sanitários são construídos para o armazenamento dos resíduos sólidos de forma correta e segura. São projetados para que haja o aproveitamento adequado do biogás gerado ao longo do tempo, tornado possível uma maior eficiência na produção e captação do metano na massa de resíduos, colaborando para a redução das emissões de gases à atmosfera. Sua correta concepção também impede que parte dos líquidos penetre o interior do aterro prevenindo uma maior produção de lixiviados.

Do ponto de vista biológico, o aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos corresponde a um sistema dinâmico que envolve reações metabólicas num ambiente formado pela massa de resíduos com suas características físicas, químicas, biológicas e suas inter-relações, formando um sistema complexo, promovendo a degradação da fração orgânica dos RSU que gera efluentes líquidos e gasosos, modificando a pressão no interior da massa de resíduos, contida por sistemas de impermeabilização de base e de cobertura (ALCÂNTARA, 2007).

Figura 1 – Esquema de uma instalação para depósito de resíduos com tratamento de efluentes.



Fonte: Gourc & Staub, 2009.

Os locais em que os aterros estão localizados guardam grandes volumes de resíduos e abrangem grandes áreas das cidades. Devido ao custo e os riscos associados com o tratamento ou a remoção desses resíduos que estão confinados, é necessária a construção de uma cobertura para os resíduos, para que esta seja a ligação do interior dos resíduos com o ambiente. Sendo assim, para evitar que águas pluviais infiltrem no interior do aterro e que não haja a emissão de gases para atmosfera, são construídas camadas de coberturas que utilizam o conhecimento da engenharia de solos nos seus projetos, prevenindo assim, os danos ao meio ambiente (COSTA, 2015).

### 2.1.1 Camadas de cobertura de aterros sanitários

A camada de cobertura é um sistema que tem como objetivo principal impedir a entrada de líquidos no interior do corpo do aterro, bem como, a saída de gases para a atmosfera. Existem vários métodos de construção da camada de cobertura, sendo que a utilização de solos compactados com baixa condutividade hidráulica é o método mais empregado. Entre outros fins, o sistema de cobertura também tem a função de proteger as células de lixo, minimizando os impactos ao meio ambiente através da eliminação de vetores, reduzindo a exalação de odores, eliminando a queima de resíduos e a saída descontrolada de gases. Além disso, evita o espalhamento do lixo e/ou poeira e melhora a estética do local onde o aterro se encontra (HUSE, 2007).

Mariano (2008) afirma que as camadas de cobertura de aterros de resíduos devem cumprir três funções: isolar o resíduo do ambiente (área circunvizinha); controlar a entrada ou saída dos gases (por exemplo, poluição contínua das áreas circunvizinhas, entrada de oxigênio na massa de resíduo.); limitar a entrada de água no aterro, evitando, assim, o aumento da geração de lixiviado.

Existem basicamente dois tipos de sistemas de cobertura final: os sistemas convencionais e os sistemas alternativos. Os sistemas convencionais são aqueles que utilizam camadas de solo argiloso ou camadas intercaladas de solos argilosos com geossintéticos. Os sistemas alternativos são aqueles que utilizam outros tipos de camadas de cobertura sem que seja propriamente o solo. A utilização destes sistemas alternativos em cidades pequenas é bastante útil devido à sua fácil aplicação e baixo custo (ROSE, 2009).

#### 2.1.1.1 Camadas oxidativas

Existem duas maneiras de mitigar a emissão de  $\text{CH}_4$ , segundo Teixeira et al. (2009), uma parte do biogás gerado em aterros sanitários, composto por 50 a 60% de  $\text{CH}_4$ , pode

atravessar a barreira de cobertura e escapar para a atmosfera, mesmo os aterros dotados de sistema de captação de biogás. A primeira é a construção de sistemas de captação do gás para serem queimados ou aproveitados para a geração de energia. A segunda é a utilização do potencial microbiológico no solo de cobertura dos aterros, através da oxidação do metano. Esse tipo de camada funciona como habitat para os microrganismos metanotróficos, além de ser uma solução eficiente que pode valorizar materiais alternativos (ARAÚJO, 2014).

As bactérias metanotróficas formam um grupo único e fisiologicamente distinto pela sua habilidade de usar o gás metano como única fonte de carbono e energia. O gás metano produzido nos aterros sanitários é consumido por essas bactérias que o converte em água, dióxido de carbono e biomassa celular. Na reação, há a liberação de 778 kJ/mol CH<sub>4</sub>, de modo que a formação do produto ocorre de forma exergônica ( $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{Energia}$ ) (SALIM, 2011; TEIXEIRA *et al*, 2007).

Em aterros pequenos, que não possuem um tratamento do biogás ou que não possuem uma qualidade elevada para ser aproveitado como geração de energia elétrica, é extremamente importante a utilização de camadas oxidativas, pois através da atividade microbiológica o metano será convertido em água, CO<sub>2</sub> e biomassa, sendo, por conseguinte, lançado para a atmosfera de forma menos poluente (BAHR *et al*, 2006).

Segundo Humer e Lechner (2003) os principais fatores que interferem na oxidação do metano na camada são, principalmente, a quantidade de oxigênio e metano disponível, o pH da camada, a temperatura, umidade, quantidade de nutrientes disponíveis como fósforo e nitrogênio, e o tamanho das partículas do solo utilizado para fazer a cobertura.

Dentre as propriedades físicas que interferem no processo de oxidação é importante ressaltar a porosidade do material utilizado para fazer a cobertura, pois afeta diretamente o coeficiente de difusão de gás (HILGER e HUMER, 2003). As condições climáticas do ambiente, como a pressão atmosférica e a precipitação, também podem influenciar por afetar a quantidade de oxigênio que entrará na camada, bem como o teor de água que irá infiltrar e comprometer a atividade microbiológica (EINOLA *et al*, 2008; CABRAL *et al*, 2007; TEIXEIRA *et al*, 2007; HILGER & HUMER, 2003).

Um fator limitante para o crescimento das bactérias metanotróficas é a disponibilidade de Carbono (C), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S) existentes no meio. Outra condição necessária para a oxidação do metano é a relação C/N, pois segundo Boeckx e Van Cleemput (1996), altas relações de C/N são fundamentais para o bom desempenho destas bactérias, uma vez que altas concentrações de amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) no solo tende a inibir a atividade destas bactérias.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Os ensaios de coluna serviram para verificar, em laboratório, o desempenho de duas camadas de cobertura de solos misturados com composto orgânico em proporções volumétricas de 1:1 perante o fluxo de gases.

Um dos solos que foram misturados com composto orgânico possui características predominantemente siltosas, que foi extraído da jazida utilizada na cobertura do Aterro Sanitário da Muribeca, em Jaboatão dos Guararapes – PE, já o outro solo possui características arenosas, coletado nas proximidades de Centro Acadêmico do Agreste (CAA) da UFPE, em Caruaru – PE, de forma que quando misturado com composto orgânico possa atender aos critérios de uma camada de cobertura. O composto orgânico foi adquirido no Jardim Botânico da cidade do Recife – PE.

Para utilizar misturas de solo com composto orgânico numa camada de cobertura, é necessário saber informações como origem e formação de cada material e as respectivas características para obtenção dos parâmetros de dimensionamento e avaliação do comportamento em campo e em laboratório. Além da caracterização dos solos puros e das misturas em proporções volumétricas de 1:1 utilizadas, foram caracterizadas também misturas 2:1 (solo:composto orgânico) para avaliar a influência da quantidade de composto orgânico em cada material.

#### **3.1 Realização dos ensaios de coluna**

Para verificar o comportamento da camada de cobertura analisada foi feita uma simulação utilizando colunas de PVC (policloreto de vinila), como mostra a Figura 2. Para a confecção das colunas foi utilizada a metodologia dos ensaios de Vieira (2005) e Oliveira & Marinho (2007).

As colunas foram reutilizadas do ensaio feito por Costa (2015), na qual possuem diâmetro interno de 0,15m e altura total de 0,77m, sendo um segmento de 0,15m na parte inferior e outros dois de 0,30m e tampas no topo e na base de 0,01m. Na base, foram inseridas torneiras de passagem para injeção do gás metano. As leituras de saída de gás foram realizadas por meio de dois furos laterais ao longo da coluna de distâncias da base de 0,22m e 0,50m, além de uma saída por meio de uma torneira de passagem no topo da coluna a 0,77m.

Figura 2 - Sistema de colunas em funcionamento.



Fonte: COSTA, 2015.

Foi inserida no segmento da base de 0,15m uma camada de brita de 0,05m, seguida por tela galvanizada e geotêxtil para servirem como base. Em seguida, foi realizada a compactação das misturas nas umidades ótimas com grau de compactação de 75%, uma vez que estudos realizados por Gebert *et al* (2011) concluíram que colunas com materiais com grau de compactação em torno de 75% possuem melhor eficiência de oxidação em razão da quantidade de poros que facilitam a entrada de oxigênio.

Após a montagem das colunas, foi injetado gás metano adquirido de empresas de fornecimento de gases industriais. O fluxo escolhido foi o de 3,53g de CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.h, no qual foi proposto por Gebert *et al* (2011) para uma compactação de 75% com resultado variando entre 95% a 100% de eficiência em redução de CH<sub>4</sub>. Logo, a vazão injetada em cada coluna foi de 0,08619NI/h (1,42ml/min ou 3,5g de CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>.h).

Para a medição da vazão de entrada foi utilizado um termoanemômetro modelo HT-9829 da marca Highmed e para a medição das concentrações de gases nas saídas foi utilizado o analisador de gases da marca Dräger de modelo X-am 7000. Com a medição do gás na entrada e nas saídas, é possível avaliar o desempenho das camadas de cobertura em laboratório e se elas são capazes de fazer a oxidação do metano.

## 3.2 Coleta dos materiais

### 3.2.1 Coleta do composto orgânico

A coleta do composto orgânico foi realizada no dia 18 de maio de 2016 às 10:00 da manhã. Antes de coletar o material, foram feitas medições de temperatura e umidade relativa do ar do local com o Relógio Termo-higrômetro digital Minipa, modelo MT-241, e da temperatura interna da leira de compostagem com o Termômetro digital Minipa, modelo MT-525. As características dos equipamentos podem ser vistas na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Equipamentos utilizados na coleta do composto orgânico em campo.

Parâmetro	Equipamento	Faixa de medição	Resolução	Precisão básica
Temperatura ambiente	Relógio Termo-higrômetro digital Minipa, Modelo MT-241	0°C a 50°C	0,1°C	± 2°C
Umidade relativa do ar	Relógio Termo-higrômetro digital Minipa, Modelo MT-241	20 a 90%	1%	± 5%
Temperatura interna da leira de coleta	Termômetro digital Minipa, Modelo MT-525	-100°C a 1300°C	0,1°C	± 0,7°C

O composto orgânico coletado foi resultante da compostagem de resíduos de poda de árvores e jardinagem do local. A coleta foi feita manualmente com o auxílio de pás e, para a armazenagem, utilizaram-se sacos plásticos, conforme a Figura 3 abaixo. Foram coletados cerca de 100kg de material.

Figura 3 - Coleta do composto orgânico.



Inicialmente, foram realizadas as medições de temperatura ambiente e umidade relativa do ar, conforme a Figura 4 abaixo. Logo após, foi conectado um sensor termopar ao termômetro digital e foi possível medir a temperatura interna central da leira de compostagem a ser coletada, conforme a Figura 5 a seguir. Os valores obtidos estão informados na Tabela 2 abaixo.

Figura 4 - Temperatura ambiente e umidade relativa do ar.



Figura 5 - Temperatura interna central da leira de compostagem.



Tabela 2 - Dados coletados em campo.

Parâmetro	Valor
Temperatura ambiente	41,1°C
Umidade relativa do ar	48%
Temperatura interna da leira de coleta	37,8°C

No mesmo dia, foram coletadas duas cápsulas para a obtenção da umidade gravimétrica inicial de campo do composto orgânico pelo ensaio de determinação da umidade em estufa, conforme NBR 6457 (ABNT, 1986). Deve-se prestar atenção às temperaturas entre 105°C e 110°C em estufa dessa norma, uma vez que os resultados de umidade podem ter sido majorados com a queima de parte da matéria orgânica. O valor da umidade média foi de 132,72%, de acordo com a Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Umidade gravimétrica inicial de campo do composto orgânico.

Cápsula N°.	218	822
Peso bruto úmido (g)	37,78	47,42
Peso bruto seco (g)	23,58	30,25
Peso da cápsula (g)	12,8	17,41
Peso da água (g)	14,2	17,17
Peso do solo seco (g)	10,78	12,84
Umidade (%)	131,73%	133,72%
Umidade média (%)	132,72%	

### 3.2.2 Coleta do silte arenoso da Muribeca

Extraído da jazida utilizada na cobertura do Aterro da Muribeca, em Jaboatão dos Guararapes – PE, Brasil, esse solo é classificado como um Silte Arenoso de Baixa compressibilidade (ML), segundo a classificação SUCS. Por estar localizado na parte sul da Região Metropolitana do Recife (RMR), onde há a predominância da Formação Barreiras, esse solo se encontra no local em elementos morfológicos em tabuleiro, conforme a Figura 6 abaixo.

Figura 6 - Jazida de solo no aterro da Muribeca.



Fonte: Costa, 2015.

Essa formação é constituída por conglomerados de cor creme a avermelhada com seixos e blocos de argila retrabalhada em corpos tabulares a lenticulares. Nesses conglomerados intercalam-se camadas silto-argilosas menos esparsas, determinando algumas vezes estratificações paralelas. Em algumas porções da área pode-se encontrar depósitos de granulometria variada, apresentando areias grossas a finas de cores claras. Esses depósitos mostram intercalações com sedimentos finos sob a forma de camadas de argila e silte.

Figura 7 - Coleta de material para estudo.



Fonte: Costa, 2015.

### 3.2.3 Coleta da areia siltosa de Caruaru

A coleta desse material foi realizada no dia 16 de dezembro de 2016 às 08:00 da manhã nas redondezas do Centro Acadêmico de Agreste da UFPE em Caruaru – PE, conforme as Figuras 8 e 9. Esse solo é classificado como uma Areia Siltosa (SM), conforme a classificação SUCS, e é característico de áreas planas a suave onduladas, podendo ser encontrado em algumas zonas do Agreste de Pernambuco e áreas de clima similar. Pode ser caracterizado como um solo pouco profundo com horizonte superficial de cores claras e textura arenosa e, à medida que se aprofunda na camada, pode ser vista a redução de cores, que pode ser decorrente de drenagem imperfeita ou formação de lençol suspenso temporário.

Figura 8 – Retirada do material.



Figura 9 – Material coletado.



### 3.3 Caracterização dos materiais

Os ensaios realizados foram: Preparação de amostras - NBR 6457 (ABNT, 1986); Análise granulométrica - NBR 7181 (ABNT, 1984); Limite de Liquidez - NBR 6459 (ABNT, 1984); Limite de Plasticidade - NBR 7180 (ABNT, 1984); Peso específico dos grãos ( $\gamma_s$ ) - método do picnômetro - NBR 6508 (ABNT, 1984); Ensaio Proctor Normal - NBR 7182 (ABNT, 1988); Ensaio de resistência ao cisalhamento direto – ASTM D3080; Ensaio de Compressão Triaxial - ASTM D4767; Ensaio de Adensamento Unidimensional - NBR 12007 (ABNT, 1990); Permeabilidade a água – ASTM D5084; Permeabilidade ao ar com adaptações ao sistema do permeâmetro de parede flexível, Tri-flex 2 - Soil Test – ELE realizadas por Maciel (2003); Curvas características pelo método do papel filtro - ASTM D5298; Análise química por fluorescência de raios X; Ensaio microbiológico e Ensaio de coluna.

#### 3.3.1 Ensaios geotécnicos

Os ensaios realizados seguiram a norma NBR 6457 (ABNT, 1986) “Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização”, a qual prescreve os métodos para preparação de amostras de solo.

Inicialmente, as amostras de composto orgânico e misturas são preparadas para o ensaio de caracterização granulométrica e o ensaio de compactação. Para isso, essas amostras são secadas e destorroadas. A secagem é realizada colocando o material em uma bandeja e o deixando secar ao ar livre até atingir aproximadamente a umidade higroscópica. Para a análise granulométrica, são feitos os ensaios de peneiramento e sedimentação, conforme a NBR 7181 (ABNT, 1984), no qual utiliza-se um almofariz e uma mão de gral com extremidade emborrachada para que os torrões de cada amostra sejam desmanchados. A preparação das amostras para o ensaio de compactação é feita com o auxílio da peneira 4, de abertura 4,76 mm, a qual retém os grãos indesejáveis ao ensaio.

Em seguida, para a caracterização geotécnica, serão moldados corpos de prova cilíndricos por meio da compactação nas unidades ótimas, obtidas nos ensaios de compactação. De cada corpo de prova, são extraídas amostras para os ensaios de resistência ao cisalhamento direto, adensamento unidimensional, compressão triaxial e permeabilidade ao ar e à água.

### 3.3.1.1 Análise granulométrica

Um item fundamental para a caracterização do solo é a granulometria. Ela indica a dimensão das partículas que, por sua vez, está relacionada com as propriedades dos solos. A NBR 6502 (ABNT, 1995) “Rochas e Solos” define limites para as frações constituintes do solo e a NBR 7181 (ABNT, 1984) “Solo - Análise granulométrica” prescreve o método para análise granulométrica dos solos através do peneiramento ou combinando-se peneiramento e sedimentação.

#### 3.3.1.1.1 Peneiramento

O ensaio de peneiramento consiste na passagem da amostra de solos por peneiras de malha quadrada de dimensões de acordo com as normas NBR NM ISO 2395 (ABNT, 1997) e NBR NM ISO 3310 (ABNT, 2010). A série de peneiras padrão possui dois tipos usuais de numerações, uma referente a abertura da malha em milímetros e a outra que indica o número de fios presentes em uma polegada da malha ou o seu espaçamento em polegadas, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Nomenclatura e espaçamento das peneiras.

Malha	Abertura em mm	Malha	Abertura em mm
2"	50,80	Nº. 16	1,190
1 1/2"	38,10	Nº. 30	0,590
1"	25,40	Nº. 40	0,420
3/4"	19,10	Nº. 50	0,297
3/8"	9,52	Nº. 100	0,149
Nº. 4	4,76	Nº 200	0,075
Nº. 10	2,00		

As peneiras, conforme a Figura 10, são dispostas de modo que, no sentido de passagem das partículas, a abertura da malha seja sucessivamente menor. A agitação pode ser mecânica ou manual e a composição da distribuição ocorre com a comparação da massa da amostra

tomada com a massa do material retido por cada peneira. Cuidado deve ser tomado no sentido de garantir que todo material retido em uma peneira seja pesado e não se acumule na malha.

Figura 10 - Série padrão de peneiras.



Inicia-se o processo anotando-se a massa da amostra previamente preparada e passando-a pela peneira de 2,0 mm. O material retido nesta peneira é de granulometria grossa. Deve-se lavá-lo em água corrente para desprendimento das partículas finas aderidas e após secagem em estufa, determinar sua massa e fazer o cálculo da fração grossa após uso das peneiras de 2", 1 ½", 1", ¾", ⅜", N°4 e N°10.

Do material passante na peneira 2,0 mm, anota-se sua massa além de separar uma quantidade que permita a determinação da umidade. Se a distribuição granulométrica for realizada apenas por peneiramento, o material passante na peneira 2,0 mm deve ser lavado na peneira de 0,075 mm e seco em estufa, com posterior passagem pelas peneiras intermediárias (N° 16, N° 30, N° 40, N° 50 e N° 100) e verificação da massa do material por elas retido.

#### 3.3.1.1.2 Sedimentação

Para as partículas passantes na peneira com dimensão 0,075 mm, ou seja, os siltes e argilas, é necessária outra forma para quantificar a dimensão das partículas. O ensaio de sedimentação usa o princípio de Stokes, ou seja, para grãos maiores e mais pesados a sedimentação ocorre mais rapidamente, sendo de forma bem lenta para partículas muito finas. O ensaio consiste no registro temporal da densidade de uma mistura do solo e água destilada, sendo tanto menor quanto maior for a sedimentação do material. À fração passante na peneira 2,0 mm de massa é adicionado um defloculante à fração do solo, deixando-a repousar por no mínimo 12 horas. Após esse período, com auxílio de um dispersor, conforme a Figura 11, a solução é agitada em um copo com chicanas metálicas por 15 minutos. O defloculante age neutralizando as cargas elétricas das partículas suspensas de modo que no processo seguinte a força preponderante sobre as partículas seja a gravitacional.

Figura 11 - Dispersor para o ensaio de sedimentação.



A mistura é então colocada numa proveta, completando-a até o volume de 1 litro com água destilada. Agita-se energicamente com auxílio das mãos a proveta em movimentos circulares durante 1 minuto. Coloca-se a proveta sobre uma mesa e inicia-se as leituras no densímetro em intervalos de tempo preestabelecidos com o cuidado de colocá-lo lentamente na proveta com alguns segundos de antecedência para sua estabilização. Após cada leitura, para que não haja acúmulo de material em seu corpo com consequentes erros, o densímetro é retirado e colocado em outra proveta com água destilada. A execução do ensaio foi registrada conforme a Figura 12.

Após a última leitura necessária, verter a mistura na peneira de malha 0,075 mm, realizando a lavagem e secagem para caracterização da fração de areia como feito no caso de peneiramento sem sedimentação.

Com o conhecimento da temperatura da água e de sua viscosidade, as densidades registradas para cada intervalo de tempo darão origem a uma definição do percentual de solo compreendido numa faixa granulométrica, completando os dados necessários para a definição da curva granulométrica do solo. Este cálculo baseia-se na Lei de Stokes, como já dito, e pode ser encontrado em detalhes na NBR 7181 (ABNT, 1984) “Solo - Análise granulométrica”.

Figura 12 - Execução do ensaio de sedimentação.



### 3.3.1.2 Densidade das partículas

A determinação da densidade das partículas ( $\delta_g$ ) é realizada com o uso de um picnômetro. O procedimento consiste em determinar a massa do aparelho com água ( $P_2$ ), a massa do aparelho com uma quantidade conhecida de solo e água ( $P_1$ ) e, definida a densidade relativa da água na temperatura do ensaio ( $\gamma_a$ ), realiza-se a seguinte consideração:

$$\delta_g = \frac{P_s \cdot \gamma_a}{P_2 - P_1 + P_s} \quad (1)$$

Em que:

$P_1$  = Massa do (Picnômetro + Solo + Água) (g)

$P_2$  = Massa do (Picnômetro + Água) (g)

$P_s$  = Massa do Solo Seco (g)

$\gamma_a$  = Densidade da água na temperatura de ensaio (g/cm<sup>3</sup>)

Deve-se ter cuidado especial para remover as bolhas de ar que possam estar aprisionadas na mistura solo e água no picnômetro. Sua presença indicaria um volume fictício nos cálculos e tal procedimento deve ser realizado com uso de uma bomba de vácuo, conforme a Figura 13.

Figura 13 - Remoção de bolhas de ar com bomba de vácuo.



### 3.3.1.3 Ensaio de compactação

O ensaio correlaciona a umidade do solo à sua densidade quando compactado, podendo-se definir parâmetros que permitam obter a densidade máxima do solo para uma determinada energia de compactação, estado este da umidade ótima.

O cilindro metálico possui base e colarinho removíveis. A partir da amostra de solo preparada, executa-se camadas aproximadamente de mesmas dimensões finais com um determinado número de golpes do soquete padrão em queda livre. Os golpes devem ser distribuídos uniformemente ao longo da superfície.

A depender do ensaio realizado, os equipamentos podem apresentar variações como descrito pela NBR 7182 (ABNT, 1988) “Solo - Ensaio de compactação”. O soquete e o cilindro podem ser de dois tamanhos, pequeno e grande. O soquete pequeno possui 2500 g com altura de queda de 30,5 cm e o grande possui 4536 g com altura de queda de 45,7 cm.

Além da variação no equipamento, pode-se realizar os ensaios com diferentes energias de compactação pelos chamados ensaio normal, intermediário e modificado, de acordo com a Tabela 5. Também é possível optar pelo reuso ou não de solo entre uma compactação e a seguinte.

Tabela 5 - Energias de compactação conforme a NBR 7182 (ABNT, 1988).

Cilindro	Características	Energia de Compactação		
		Normal	Intermediária	Modificada
Grande	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Nº de camadas	3	3	5
	Nº de golpes por camada	26	21	27
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Nº de camadas	5	5	5
	Nº de golpes por camada	12	26	55

O ensaio de Proctor inicia-se adicionando água e homogeneizando o solo até ele aparentar estar cerca de 5% abaixo da umidade ótima. Uma quantidade de solo é colocada no cilindro pequeno e os golpes verticalmente aplicados, conforme a Figura 14, em quantidade de acordo com a Tabela 5. Entre uma camada e outra deve-se escarificar a superfície para melhorar a aderência entre elas. Prossegue-se até a última camada de modo que haja um excedente acima do cilindro (dentro do colarinho) que será posteriormente rasado.

Figura 14 - Aplicação de golpes com o soquete.



Realiza-se a pesagem do conjunto para a determinação do peso do solo úmido e faz-se a remoção do solo do molde cilíndrico com uso de um extrator, conforme a Figura 15, com coleta de amostra para caracterização da umidade. Conhecido o peso da amostra e o volume do cilindro é possível calcular a densidade do solo pela simples divisão entre eles.

Figura 15 - Extração do corpo de prova do cilindro metálico.



Adicionando-se água à amostra faz-se, no mínimo, mais quatro ensaios tentando obter dois pontos no ramo seco, dois pontos no ramo úmido e um deles próximo à umidade ótima. Sendo  $P_w$  a massa do solo úmido em gramas,  $V$  o volume do cilindro em  $\text{cm}^3$  e  $W$  a umidade do solo em porcentagem, o peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) é determinado da seguinte forma:

$$\gamma_s = \frac{P_w}{V} \cdot \frac{100}{(100 + w)} \quad (2)$$

Realiza-se então a curva de compactação plotando os valores de  $\gamma_s$  versus  $W$ , cuja ordenada máxima é o peso específico aparente seco máximo tendo como valor de umidade correspondente, a umidade ótima.

#### 3.3.1.4 Limites de consistência

O solo é um material que muda sua consistência de acordo com sua umidade. Convencionou-se dividir em quatro estados. Os limites de consistência, também chamados de Limites de Atterberg, indicam a consistência e algumas características dos solos de acordo com sua umidade, definindo também o chamado índice de consistência, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Estados e limites de consistência com o teor de umidade. Adaptado: Caputo, H. P. – Mecânica dos Solos e suas aplicações. Vol. 1.



#### 3.3.1.4.1 Limite de Liquidez

A norma NBR 6459 (ABNT, 1984) “Solo – Determinação do Limite de Liquidez” trata dos aspectos ligados ao ensaio. O aparelho conhecido como de Casa Grande é composto por um corpo de ebonite com pés de borracha e uma concha de latão que se movimenta a partir do giro de um eixo excêntrico. O solo é depositado na concha e uma ranhura executada com o cinzel simula um talude, conforme a Figura 17. Há dois tipos de cinzeis de acordo com a consistência do solo. O cinzel utilizado nos ensaios foi o cinzel para solos coesos. A altura da queda da concha é de 10 mm, sendo possível a sua verificação com o uso de um gabarito.

Figura 17 - Aparelho de Casa Grande com ranhura à esquerda e cinzel à direita.



O objetivo do ensaio é verificar a umidade do solo para que a ranhura (talude) seja fechada após a aplicação de 25 ciclos no sistema. O solo é misturado com água procurando torná-lo homogêneo e sem bolhas. Para o primeiro ponto, o ideal é atingir uma consistência tal que sejam necessários cerca de 35 golpes para fechar a ranhura produzida pelo cinzel. Ao executar a ranhura, verificar se a altura do solo na parte central é de 10 mm ajustando com uma espátula se necessário.

Após girar a manivela numa velocidade aproximada de 2 giros por segundo, verificar o número de golpes para unir cerca de 13 mm ao longo do comprimento da ranhura, conforme a Figura 18, e retirar uma amostra nas proximidades da união em uma cápsula para determinação da umidade.

Figura 18 - União das duas partes e interrupção da manivela.



Com a concha e o cinzel limpos, realizar novos ensaios pela adição de água de modo que sejam necessários cada vez menos golpes para unir as metades do solo obtendo-se pelo menos 5 pontos no intervalo de 15 a 35 golpes. Após a verificação das umidades em cada ponto obtido, traça-se um gráfico mono-log do (número de golpes requeridos) versus (umidade do solo). Após aproximar os pontos com uma reta, verificar a umidade em que a reta intercepta a ordenada de 25 golpes. Este valor é definido como Limite de Liquidez.

Em solos muito arenosos ou aqueles em que não seja possível realizar a abertura da ranhura ou o fechamento com mais de 25 golpes, define-se a amostra como não apresentando Limite de Liquidez (NL). Esse caso acontece com o composto orgânico, no qual é classificado como NL.

#### 3.3.1.4.2 Limite de Plasticidade

O ensaio é prescrito pela norma NBR 7180 (ABNT, 1984) “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade”. A amostra de solo deve ser misturada com uma espátula adicionando-se água ao solo de modo a obter uma pasta homogênea. Este ensaio pode ser realizado com o material usado no ensaio de limite de liquidez.

Após atingir uma consistência plástica, uma quantidade de amostra deve ser rolada sobre uma superfície de vidro esmerilhada com o a palma das mãos com o objetivo de obter-se um tubo com 3mm de diâmetro e 100mm de comprimento, conforme a Figura 19. Utiliza-se um gabarito metálico que indica a espessura que a amostra deve atingir.

Figura 19 - Modelagem de cilindros em placa de vidro fosco.



A amostra deve iniciar o processo de fissuramento quando atingir as dimensões aproximadas do gabarito. Se a fissura ocorrer antes, deve-se adicionar mais água ao solo, homogeneizá-lo e então repetir o procedimento. Se ao chegar no diâmetro de 3mm não houver fissuras, deve-se repetir o processo fazendo a amostra perder umidade para o ambiente. Havendo sucesso na realização do procedimento, deve-se colher a amostra para determinação da umidade, conforme a Figura 20.

Figura 20 - Cápsulas de ensaio de limite de plasticidade para medição de umidade.



Caso a umidade de no mínimo três amostras não diferirem cada uma delas em mais de 5% da média, elas são consideradas satisfatórias. O resultado é expresso em porcentagem pela média dos valores obtidos, aproximando-a para o inteiro mais próximo. Não sendo possível a obtenção do cilindro com as dimensões indicadas, define-se o solo como não apresentando Limite de Plasticidade (NP). Como também não é possível a obtenção do Limite de Plasticidade do composto orgânico, ele é classificado como NP.

#### 3.3.1.5 Permeabilidade

A avaliação da permeabilidade é realizada pelo coeficiente de permeabilidade que indica a facilidade de escoamento de um fluido, em geral a água, pelos vazios do solo. Este parâmetro pode ser calculado por ensaios “in situ” ou por análise em laboratório.

O princípio que norteia o estudo baseia-se nos estudos de Reynolds e na comprovação empírica de Darcy que foi obtida fazendo-se percolar água através de uma amostra de solo de comprimento  $L$  e área  $A$ , mantida entre dois reservatórios de nível constante com diferença de cota  $h$ . Os resultados indicaram que a velocidade de percolação  $v = Q/A$  é proporcional ao gradiente hidráulico  $i = h/L$ . A constante de proporcionalidade é a permeabilidade, que é dada por:

$$K = \frac{Q \times L}{(h \times A)} \quad (3)$$

Fazendo-se variar a granulometria, índice de vazios, composição, temperatura, entre outras características do solo é possível verificar a mudança na velocidade de percolação de diferentes fluidos e, portanto, da permeabilidade dos solos. O coeficiente pode variar de valores da ordem de  $10^{-3}$ cm/s para solos granulares até  $10^{-9}$ cm/s para solos argilosos de baixíssima permeabilidade.

### 3.3.1.5.1 Ensaio de permeabilidade com aparelho Triflex

O equipamento para esse ensaio é mais sofisticado, conforme a Figura 21, e possibilita acelerar o processo de percolação do fluido com a aplicação de uma elevada pressão. Pode ser aplicado, portanto, para solos bastante argilosos. O corpo de prova é revestido por uma membrana de látex, conforme a Figura 22, e a cápsula submetida ao fluido sob pressão.

Figura 21 - Realização do ensaio de permeabilidade.



Figura 22 - Membrana de látex envolvendo o corpo de prova.



Espera-se o corpo de prova saturar e por um sistema de abertura de válvulas e controle de pressão pode-se controlar a carga hidráulica atuante no corpo de prova. Mede-se o tempo que um determinado volume do fluido leva para passar pelo corpo de prova, calculando a permeabilidade de maneira análoga ao método explicitado anteriormente.

### 3.3.1.6 Resistência ao cisalhamento

Uma das características mais importantes de um solo para as obras correntes de engenharia é a sua capacidade de suportar os esforços de cisalhamento já que quando ela é ultrapassada, há a ruptura no correspondente plano de ruptura. O princípio que norteia o estudo leva em consideração o proposto por Terzaghi e relaciona-se com a análise de tensões atuantes no solo.

O solo está sujeito a tensões devido ao peso próprio, esforços aplicados e empuxo. De acordo com o critério de Mohr-Coulomb, a ruptura ocorre quando, no plano de ruptura, a combinação das tensões normais e cisalhantes for tal que a tensão de cisalhamento é máxima,

sendo a envoltória de ruptura considerada uma reta que faz um determinado ângulo com o plano principal maior, dada por:

$$\tau = c' + \sigma \times \text{tg}(\phi) \quad (4)$$

Pela expressão anterior, observamos que a tensão de cisalhamento depende da coesão, tensão efetiva (carregamento) e do atrito interno do solo.

#### 3.3.1.6.1 Resistência ao cisalhamento direto

Inicialmente, são moldadas amostras indeformadas em caixas metálicas prismáticas, conforme a Figura 23 e, logo após as amostras indeformadas em formato prismático são transferidas para uma caixa de cisalhamento bipartida, conforme a Figura 24, para a execução do ensaio. No ensaio, são colocadas pedras porosas e papel filtro nas faces superior e inferior.

Figura 23 - Amostra a ser moldada pela caixa metálica prismática.



Figura 24 - Amostra indeformada a ser transferida para a caixa de cisalhamento direto.



Figura 25 - Equipamento para realização do ensaio de cisalhamento direto.



Aplica-se então uma tensão normal ao corpo de prova ao solo, iniciado também o deslocamento relativo entre as metades da caixa. O equipamento de ensaio, mostrado na Figura 25, é capaz de manter uma velocidade constante e com o uso de extensômetros e anel dinamométrico é possível realizar as leituras de deslocamento e resistência ao cisalhamento.

É realizado o registro da resistência ao cisalhamento e deslocamento vertical em um determinado intervalo definido de deslocamento horizontal e compostos os gráficos de tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para diferentes tensões normais aplicadas.

Importante observar que com o crescer do deslocamento relativo a área de contato entre as duas metades do solo é progressivamente menor, devendo ser considerada no cálculo da tensão efetiva de cisalhamento a área efetiva.

Apesar de ser um método bastante simples e prático, há a rotação dos planos principais já que eles são definidos pela configuração da caixa bipartida, podendo não ser este o de maior fraqueza do solo.

#### 3.3.1.7 Ensaio edométrico

A compressão ou expansão do solo é o processo em que o solo varia de volume sob ação de uma carga. A compressão pode ocorrer pela redução de volume de vazios do solo ou pela redução do volume de água contida nos vazios.

A norma para realização do ensaio de adensamento (edométrico) é a NBR 12007 (ABNT, 1990) “Solo - Ensaio de adensamento unidimensional - Método de ensaio”. O anel metálico restringe a deformação radial quando uma carga axial é aplicada ao corpo de prova cilíndrico, moldado conforme a Figura 26. A cápsula possibilita a colocação de água para saturação do solo e a prensa permite diferentes configurações de ensaio como incremento de carga gradual e medição da deformação axial do conjunto, indicando a expansão ou compressão do solo, ou a simples medição da expansão livre, por exemplo.

Figura 26 - Corpo de prova de solo sendo moldado.



Figura 27 - Prensas utilizadas num ensaio edométrico.



### 3.3.1.8 Ensaio de compressão triaxial

O ensaio de compressão triaxial convencional consiste na aplicação de um estado hidrostático de tensões e de um carregamento axial sobre um corpo de prova cilíndrico do solo. Para isto, o corpo de prova é colocado dentro de uma câmara de ensaio, conforme a Figura 28, e envolto por uma membrana de borracha. A câmara é cheia de água, à qual se aplica uma pressão, que é chamada pressão confinante ou pressão de confinamento do ensaio. A pressão confinante atua em todas as direções, inclusive na direção vertical. O corpo de prova fica sob um estado hidrostático de tensões.

O carregamento axial é feito por meio da aplicação de forças no pistão que penetra na câmara, caso em que o ensaio é chamado de ensaio de deformação controlada. A carga é medida por meio de um anel dinamométrico externo, ou por uma célula de carga intercalada no pistão.

Figura 28 - Câmara de ensaio de compressão triaxial.



Como não existem tensões de cisalhamento nas bases e nas geratrizes do corpo de prova, os planos horizontais e verticais são os planos principais. Se o ensaio é de carregamento, o plano horizontal é o plano principal maior. No plano vertical, o plano principal menor, atua a pressão confinante. A tensão devida ao carregamento axial é denominada de tensão desviadora. Durante o carregamento, medem-se, a diversos intervalos

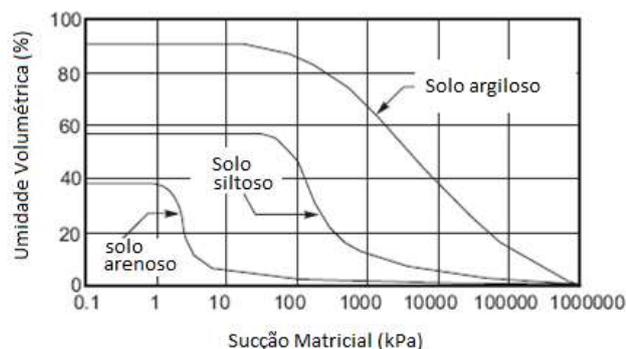
de tempo, o acréscimo de tensão axial que está atuando e a deformação vertical do corpo de prova. Esta deformação vertical é dividida pela altura inicial do corpo de prova, dando origem à deformação vertical específica, em função da qual se expressam as tensões desviadoras, bem como podem ser plotadas com as variações de volume ou de pressão neutra.

### 3.3.1.9 Curvas características dos materiais

A curva característica ou curva de retenção é a relação sucção-umidade do solo e sua forma depende da geometria dos poros, magnitude e da composição mineralógica da fração fina. Solos argilosos apresentam curvas características de menor inclinação ou declividade, enquanto solos areno-siltosos apresentam curvas mais inclinadas ou verticalizadas, o que leva a um rápido decréscimo da sucção para pequenas variações de umidade (JUCÁ, 1990).

A curva de retenção de água e a permeabilidade dos solos estão diretamente ligadas à estrutura do solo. Os principais fatores que influenciam a forma da curva de retenção de água e a permeabilidade do solo não saturado são: teor de umidade inicial ou de moldagem, índice de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia e porcentagem de finos, histerese, energia de compactação, densidade e histórico de tensões (SILVA, 2005; VIEIRA, 2005). A Figura 29 mostra o comportamento típico de curvas de retenção de solos com granulometrias diferentes.

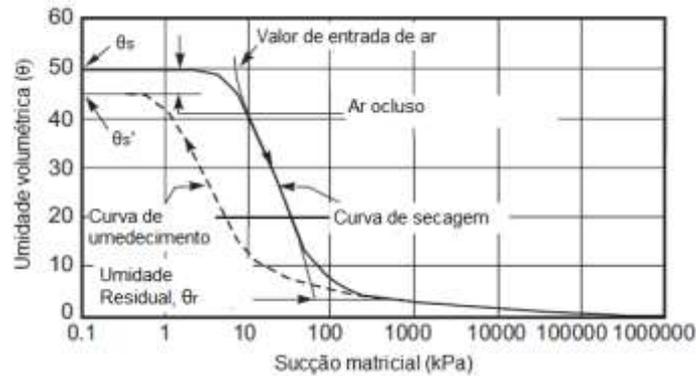
Figura 29 – Curvas de retenção de areia, silte e argila.



Fonte: Fredlund e Xing, 1994.

A curva de retenção pode ser obtida a partir de trajetórias de umedecimento e secagem, e o ajuste dessas curvas é feito por aproximações realizadas através de modelos matemáticos. Os principais parâmetros obtidos através da curva de retenção são: teor de umidade na saturação ( $\theta_s$ ), o teor de umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ ), o valor de entrada de ar ( $\psi_b$ ) e a capacidade volumétrica de retenção de água ( $C = \Delta\theta/\Delta\psi$ ), como mostrado na Figura 30 (LOPES, 2011 e MENDONÇA, 2007).

Figura 30 – Parâmetros da curva de retenção de um solo siltoso.



Fonte: Fredlund e Xing, 1994.

Segundo Marinho (2005) a técnica do papel filtro é certamente a mais simples de todas as técnicas para se medir sucção. As curvas de retenção de água foram elaboradas utilizando-se o método do papel filtro, padronizado pela norma ASTM D5298-92 e descrita por Marinho (1995). O método baseia-se no princípio de absorção e equilíbrio que existe quando um material poroso com deficiência de umidade é posto em contato com um papel filtro, com umidade menor. O papel filtro passa a absorver uma certa quantidade de água do solo até que o sistema entre em equilíbrio de sucção.

Utilizou-se o período mínimo de equilíbrio indicado por Marinho (1995) de 7 dias e o papel adotado foi o Whatman nº 42 que apresenta umidade inicial no estado seco de aproximadamente 6%, permitindo intervalo de sucção de zero até 29 MPa. A curva de calibração utilizada para o papel filtro foi a proposta por Chandler et al. (1992) conforme as Equações 5 e 6.

Para Umidades do papel filtro  $\leq 47\%$ :

$$\text{Sucção (kPa)} = 10(4,84 - 0,0622w) \quad (5)$$

Para Umidades do papel filtro  $> 47\%$ :

$$\text{Sucção (kPa)} = 10(2,412 - 0,0135w) \quad (6)$$

Com a relação entre sucção e umidade do material poroso em cada ponto de medição, obteve-se a curva de retenção de água do solo e das misturas solo-composto. Para realizar o ensaio de determinação da sucção, cada solo foi compactado na umidade ótima e a partir de cada solo compactado foram moldadas três amostras em anéis metálicos tipo shelby com 75mm de diâmetro e 20mm de altura. A Figura 31 mostra os procedimentos de preparação das amostras a partir do solo e das misturas solo-composto compactados na umidade ótima e na densidade máxima.

Figura 31 - Moldagem dos corpos de prova.



O procedimento do ensaio ocorreu de acordo com as seguintes etapas:

a) As amostras que foram umedecidas acima da umidade ótima foram colocadas, sobre pedras porosas, dentro de uma bandeja com uma lâmina d'água de altura inferior a espessura das pedras porosas;

b) Essas amostras permaneceram em repouso durante um período de aproximadamente 24h ou até que fosse observada umidade na face superior;

c) Após o umedecimento, retirou-se esse conjunto para pesagem inicial (anel e solo);

d) Em seguida, com muito cuidado, colocou-se o papel filtro Whatman nº 42 em contato direto com cada material em uma das faces, para medição da sucção matricial e na outra face impedindo o contato do papel filtro com o solo, utilizou-se uma tela espessa, para a medição da sucção total;

e) Em seguida, envolveram-se as amostras e papéis filtro com várias camadas de filme plástico (PVC) e logo após envolveu-se com papel alumínio. As amostras, já protegidas, foram colocadas em caixa isolante térmica (do tipo isopor) garantindo que as amostras não entrassem em contato com a umidade e a luz do ambiente externo, deixando-as em repouso por 7 dias;

f) Após o tempo de repouso (7 dias), retirou-se cuidadosamente o papel filtro de cada amostra com uma pinça metálica, e imediatamente colocou-se em balança com precisão de 0,0001g para determinação do peso úmido do papel (esse procedimento durou poucos segundos para evitar a perda de umidade do papel por evaporação);

g) O conjunto anel e amostra foram pesados, para determinação da umidade do solo no equilíbrio, no momento da retirada do papel filtro, e deixados em repouso para perda de umidade ao ar livre;

h) O papel filtro foi colocado em cápsula e levado para secagem em estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas;

- i) Após as 24 horas, o conjunto cápsula e papel filtro seco foram colocados em um dessecador com sílica e transportados rapidamente para pesagem em balança de precisão;
- j) Procedeu-se a determinação da umidade do papel filtro e a respectiva sucção do solo utilizando-se as equações propostas por Chandler et al. (1992), citadas anteriormente;
- k) Repetiu-se a partir da etapa (d) até que os corpos de prova atingissem umidades próximas às residuais.

### 3.3.2 Ensaio químico: Análise química por fluorescência de raios X

A fluorescência de raios-X é uma técnica analítica utilizada para se realizar uma análise qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presentes na amostra sob a forma de óxidos. O princípio básico da espectrometria de raios-X é que todo elemento atômico emite uma radiação característica deste elemento (radiação fluorescente na região de raios-X) quando excitado por uma radiação eletromagnética de alta energia. A detecção desta radiação característica é realizada por um sistema composto de um cristal analisador e detector de radiação.

As amostras coletadas de composto orgânico e misturas foram secadas ao ar, passadas em peneira ABNT 200 (0,074 mm) e submetidas à caracterização pelo método do semiquantitativo, em forma de pó, sob atmosfera a vácuo, colimador 10 mm. O equipamento utilizado foi o modelo EDX-720 da marca SHIMADZU. Os resultados são apresentados em percentuais relativos.

### 3.3.3 Ensaio microbiológico

O objetivo desse ensaio foi a contagem de bactérias metanotróficas. A enumeração foi feita pelo número mais provável (NMP). O crescimento e a sobrevivência dos isolados foram medidos ao registrar contagens pelo preparo do meio de cultura NMS e registrados como unidades formadoras de colônias (UFC)/g.

Para a realização desse ensaio, foram retiradas amostras de dentro das colunas experimentais contendo as misturas 1:1 de solo da Muribeca e solo de Caruaru, sendo a coleta realizada 30 cm abaixo da superfície, conforme a Figura 32 (a) e (b).

Figura 32 - Retirada das amostras de dentro das colunas.



(a)

(b)

Um grama de solo de cada coluna para a enumeração de unidades formadoras de colônias foi diluído a 1:9 em NaCl a 0,9% em água MilliQ e agitados vigorosamente em um agitador. O procedimento de cultivo e inoculação foi feito com as amostras de solo diluídas em série até a concentração de  $10^{-6}$  e colocados em frascos com tampa de rosca contendo água destilada, conforme a Figura 33.

Figura 33 - Amostras de solo diluídas em série até a concentração de  $10^{-6}$ .

Cinco réplicas foram preparadas para cada diluição. Em seguida, as amostras diluídas foram colocadas em placas de Petri contendo meio de cultura NMS, conforme a Figura 34.

Figura 34 - Amostras diluídas colocadas em placas de Petri contendo meio de cultura NMS.



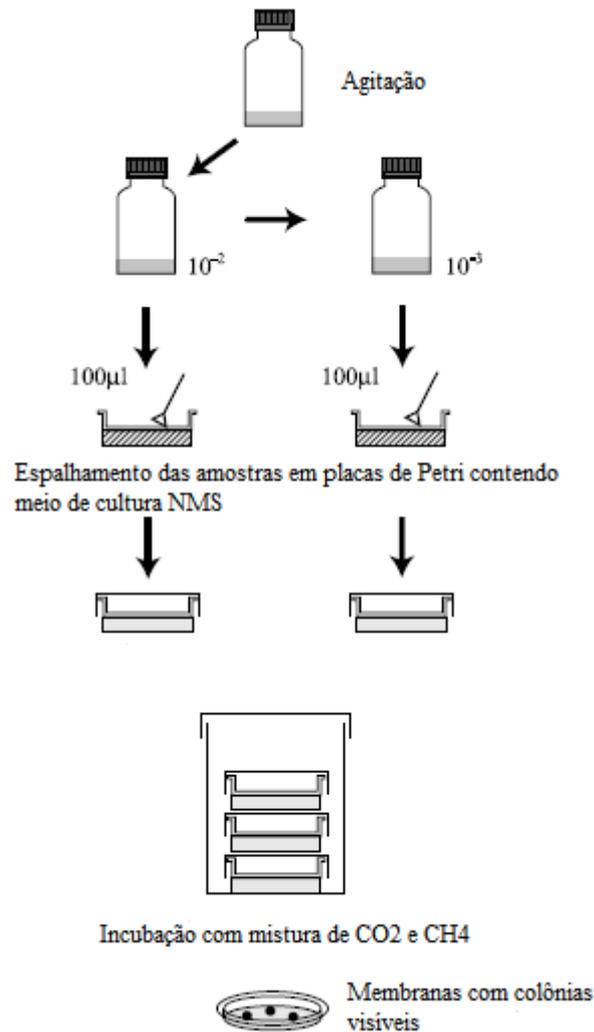
Após o espalhamento das diluições do solo, as placas permaneceram em repouso durante 2h, isso foi feito para melhor absorção das amostras pelo meio de cultura. As placas foram colocadas em dessecadores para incubação, que podem ser vistos na Figura 35.

Figura 35 - Placas colocadas em dessecadores para incubação.



A criação da atmosfera modificada foi feita através do estabelecimento de vácuo dentro do dessecador e posterior injeção de uma mistura de 40% de  $\text{CO}_2$  com 60% de  $\text{CH}_4$  e ar sintético. Os dessecadores contendo as placas foram colocados em estufa a 30 °C. Os dessecadores foram observados regularmente durante a incubação, e eram injetados com a mistura de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  em dias alternados durante 8 dias. Svenning *et al.* (2003) apresentou uma visão geral esquemática do procedimento para crescimento de bactérias oxidantes de metano, conforme a Figura 36.

Figura 36 - Visão geral esquemática do procedimento para crescimento de bactérias oxidantes de metano.

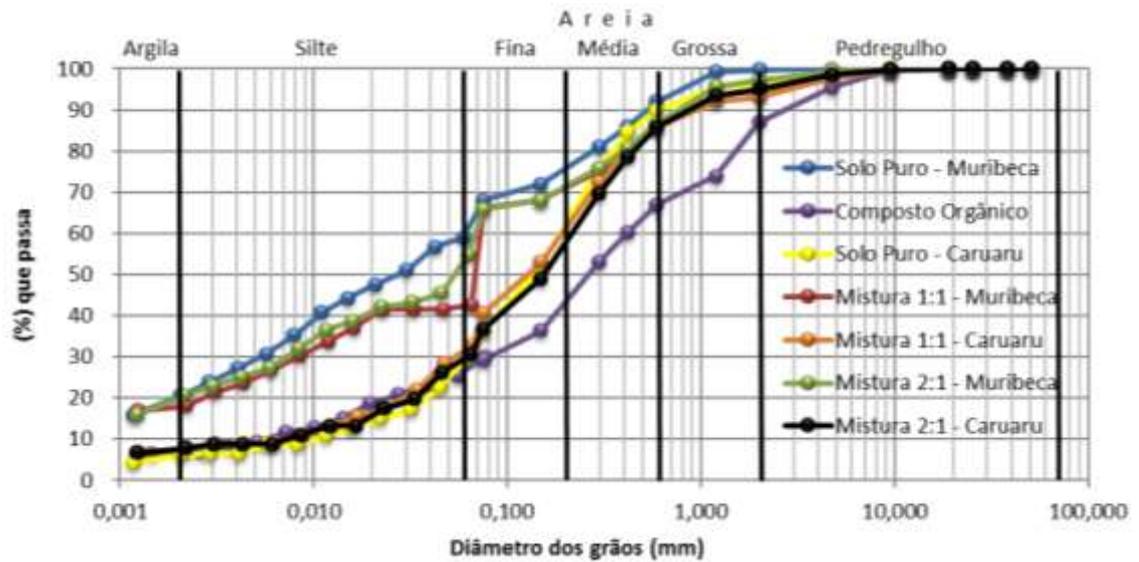


## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise granulométrica

Foram realizados ensaios com peneiramento e sedimentação, sendo os ensaios de sedimentação realizados de modo comparativo para verificar a influência do uso de defloculante no processo. Os resultados foram analisados com uso do defloculante, uma vez que, como já citado, essa substância atua neutralizando as cargas elétricas das partículas finas tornando os resultados do ensaio mais próximos da real dimensão dos grãos.

Figura 37 - Curvas granulométricas dos materiais.



De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo da jazida da Muribeca é classificado como silte de baixa compressibilidade (ML). Já o solo coletado no município de Caruaru é classificado como uma areia siltosa (SM). Os valores dos limites de plasticidade, liquidez, densidade dos grãos e percentagens da caracterização dos tipos de solo são apresentados na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 - Resultados da caracterização dos materiais.

Material	Solo Muribeca	Composto Orgânico	Solo Caruaru	Mistura 1:1 Muribeca	Mistura 1:1 Caruaru	Mistura 2:1 Muribeca	Mistura 2:1 Caruaru	
Granulometria (%)	Argila	20	8	6	18	8	20	8
	Silte	40	20	24	24	24	34	22
	Areia Fina	16	16	32	29	29	17	28
	Areia Média	15	24	28	15	25	17	28
	Areia Grossa	9	20	8	9	8	10	9
	Pedregulho	0	12	2	5	6	2	5
Índice de Consistência (%)	LL	44	-	32	44	36	43	36
	LP	30	-	25	34	33	30	29
	IP	14	-	7	10	3	13	7
Densidade real dos grãos (g/cm <sup>3</sup> )	2,72	1,18	2,83	2,54	2,58	2,58	2,67	

Analisando a Tabela 6 é possível constatar que o valor de argila presente no solo da jazida da Muribeca é em torno de 20%, enquanto que na mistura de 1:1 é de 18%, o que afirma que ao ser colocado uma parcela de composto não há uma diferença significativa no teor de argila, mas quando se verifica a percentagem de silte, constata-se que o teor de composto adicionado faz com que haja uma redução para 24%. Já a mistura contendo o solo coletado no município de Caruaru apresentou uma variação menor de materiais finos devido ao solo ser de características arenosas e pelo fato da granulometria do composto orgânico ser semelhante a uma areia siltosa.

Com relação aos resultados dos índices de consistência, a mistura 1:1 da jazida da Muribeca apresentou índice de plasticidade de 10%, caracterizando assim como um solo medianamente plástico, enquanto que o solo puro apresentou um índice de plasticidade de 14%, que o enquadra como um solo plástico. O solo coletado no município de Caruaru apresentou um índice de plasticidade menor que o do solo coletado na jazida da Muribeca por ter maior quantidade de areia, mas também sofreu um decréscimo de plasticidade devido à presença de composto orgânico na mistura. Como o composto orgânico não tem características coesivas, o mesmo não apresentou valores para os limites de liquidez e plasticidade. Quanto à densidade real dos grãos, a utilização de composto orgânico nas misturas fez com que também houvessem reduções.

#### **4.2 Ensaio de Compactação / Umidade Ótima**

O ensaio de compactação adotado foi o de Proctor Normal, ou seja, usados soquetes e cilindros pequenos com solo disposto em três camadas com 26 golpes em cada uma delas. As Figuras 38 e 39 mostram os gráficos para os solos puros, as misturas 1:1 (v/v), as misturas 2:1 (v/v) e composto orgânico. A Tabela 7 informa os valores de umidade ótima e peso específico aparente seco de cada ensaio.

Figura 38 - Resultado do ensaio de compactação para Umidade Ótima dos materiais.

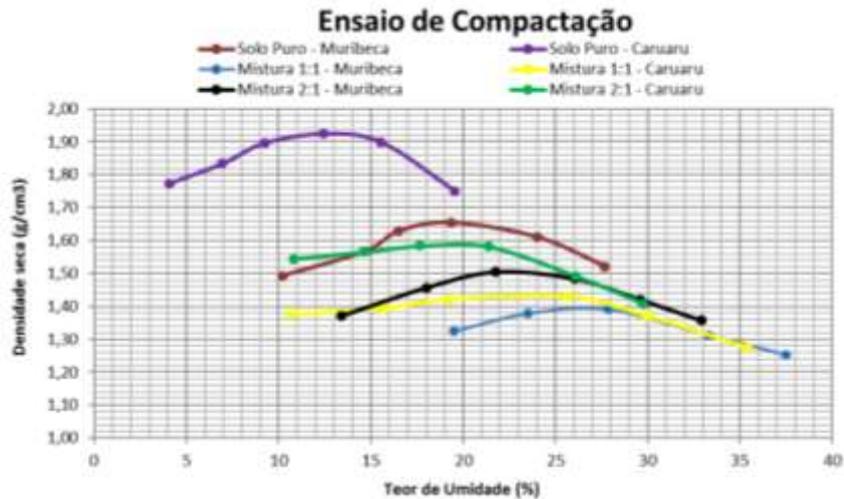


Figura 39 - Resultado do ensaio de compactação para Umidade Ótima do composto orgânico.

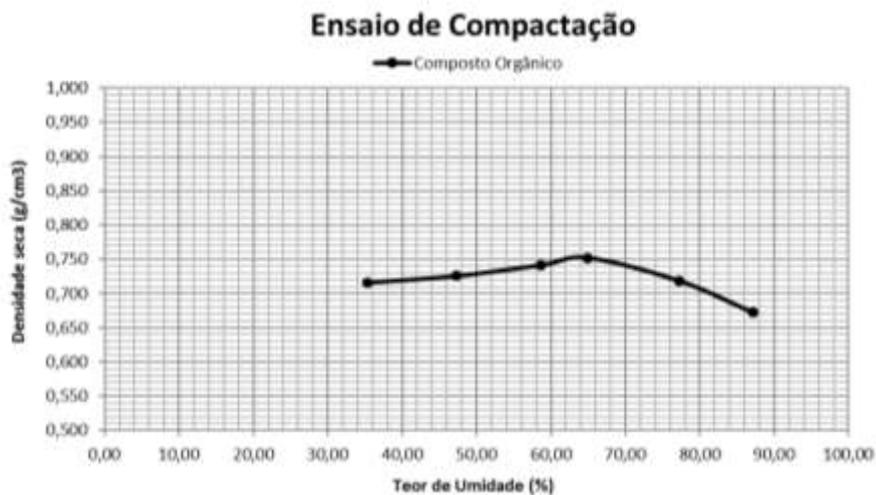


Tabela 7 - Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação.

Material	Umidade ótima (%)	Densidade seca (g/cm <sup>3</sup> )
Solo Muribeca	20	1,660
Composto Orgânico	63	0,749
Solo Caruaru	13	1,928
Mistura 1:1 Muribeca	26	1,396
Mistura 1:1 Caruaru	23	1,440
Mistura 2:1 Muribeca	23	1,506
Mistura 2:1 Caruaru	19	1,590

Nota-se que a medida que se acrescenta composto orgânico aos solos puros, a curva de compactação se desloca ainda mais para a direita, no sentido de aumento da umidade, e para baixo, no sentido de decréscimo do peso específico aparente seco. O aumento da umidade

com a adição de composto orgânico se dá porque ele, apesar de ter uma granulometria semelhante a uma areia siltosa, retém grande quantidade de água em sua composição química.

Já o decréscimo do peso específico aparente seco com a adição de composto orgânico é devido a menor densidade real dos grãos dele em relação aos materiais apresentados, conforme a Tabela 6. O aumento da capacidade de retenção de água dos solos com a adição de composto orgânico mostra-se importante para manter a camada de cobertura na umidade adotada em projeto de maneira a evitar o aparecimento de fissuras e caminhos preferenciais de entrada de líquidos e saída de gases por essa camada.

### 4.3 Limites de Consistência

O ensaio para limite de liquidez e plasticidade das misturas consideradas forneceram os gráficos mostrados nas Figuras 40 e 41. Lembrando que o composto orgânico foi classificado como NL e NP.

Figura 40 - Gráfico dos resultados do Limite de Liquidez para o solo da jazida da Muribeca.

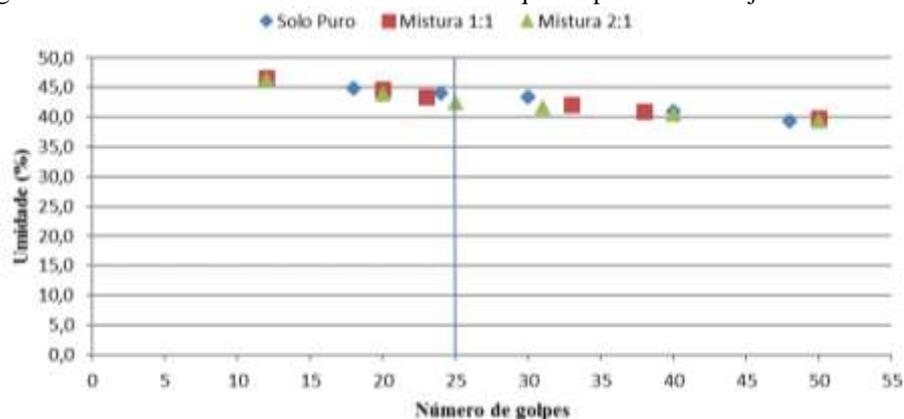
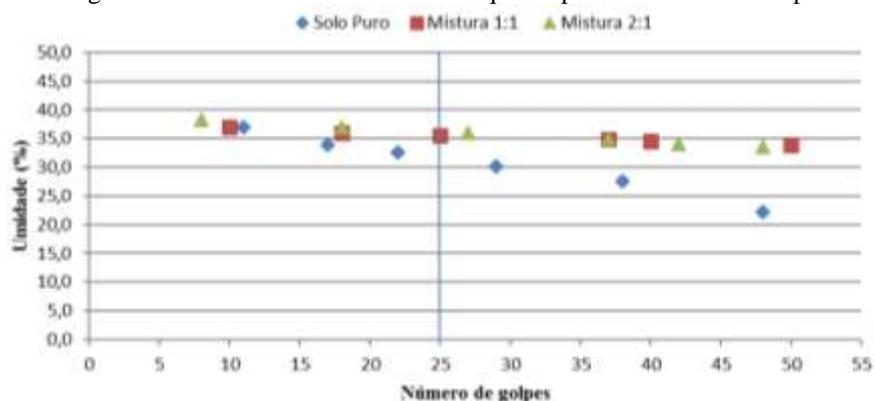


Figura 41 - Resultados do Limite de Liquidez para o solo do município de Caruaru.



É possível notar que os gráficos de solo puro e misturas da jazida da Muribeca são semelhantes e que os valores de índice de plasticidade foram de 14 para o solo puro, 13 para a mistura 2:1 e 10 para a mistura 1:1, conforme a Tabela 6. Com isso, pode-se concluir que a

adição de composto orgânico praticamente altera pouco a plasticidade do material extraído da jazida da Muribeca, já que o composto orgânico retém água.

Os gráficos dos ensaios de Limite de Liquidez para o solo puro e misturas do município de Caruaru mostraram que, com a adição de composto orgânico, os valores de Limites de Liquidez aumentam. No entanto, os valores dos Índices de Plasticidade diminuem devido ao grande aumento dos Limites de Plasticidade. Disso, nota-se que apesar do composto orgânico aumentar os Limites de Liquidez quando adicionado, ele também contribui para a diminuição do Índice de Plasticidade de modo que isso pode contribuir para a diminuição da plasticidade e o aumento da compressibilidade dos materiais a serem utilizados com adição de composto orgânico numa camada de cobertura.

#### **4.4 Permeabilidade**

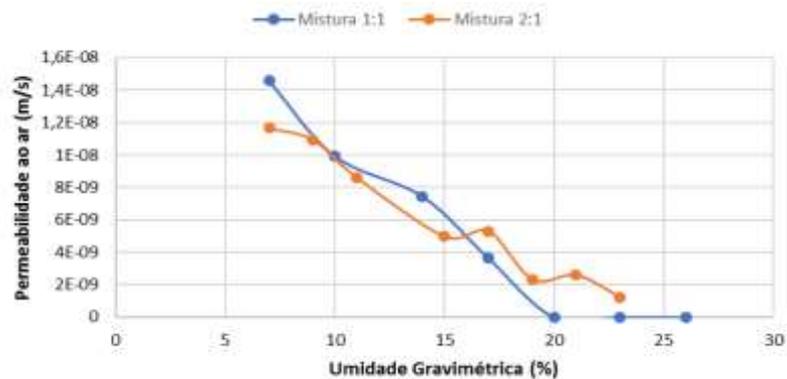
Os ensaios de permeabilidade vertical foram realizados para as misturas 1:1 e 2:1, uma vez que é possível notar que os maiores valores de permeabilidade se darão para as misturas com maiores porcentagens de composto orgânico na estrutura, como visto anteriormente, por conta do aumento de vazios. Já os ensaios de permeabilidade horizontal somente foram possíveis de serem realizados para mistura 1:1 da Muribeca.

##### **4.4.1 Permeabilidade Vertical ao ar**

Para determinar a permeabilidade ao ar da mistura utilizada para fazer a camada de cobertura, foram moldados dois corpos de prova nas proporções de 1:1 e 2:1 de solo e composto orgânico de cada material, ambas amostras foram formadas com energia de um Proctor Normal na umidade ótima. A trajetória dos ensaios se deu através do processo de secagem das amostras e a verificação do coeficiente de permeabilidade correspondente à umidade da amostra.

Tendo a validação da Lei de Darcy para fluxos compressíveis foi possível calcular a permeabilidade ao ar das misturas, o gráfico abaixo apresenta os resultados dos ensaios através da variação da permeabilidade em função do teor de umidade do corpo de prova.

Figura 42 - Resultados dos ensaios de permeabilidade vertical ao ar para um mesmo corpo de prova das misturas 1:1 e 2:1 com o solo da jazida da Muribeca.



Como é possível observar pelo gráfico, à altos teores de umidade não há valores para permeabilidade, isso ocorre pelo fato que o solo muito úmido dificulta a passagem do ar injetado pelo equipamento. Para tanto, a mistura 1:1 da Muribeca, que tem 26% de umidade ótima e a mistura 2:1 da Muribeca, que tem 23% de umidade ótima, apresentaram valores de permeabilidade na mesma grandeza de  $10^{-9}$  e  $10^{-8}$  m/s.

Não foi possível realizar o mesmo procedimento de secagem para as misturas 1:1 e 2:1 com o solo de Caruaru. Como o solo da Caruaru possui uma maior quantidade de areia, não foi necessário um elevado gradiente de pressão para a determinação do coeficiente de permeabilidade ao ar. A mistura 1:1 de Caruaru na umidade ótima de 23% apresentou um coeficiente de permeabilidade ao ar de  $1,06 \times 10^{-7}$  m/s, enquanto que a mistura 2:1 na umidade ótima de 19% apresentou um valor de  $5,31 \times 10^{-8}$  m/s.

Logo, observa-se que as misturas com o solo de Caruaru possuem maiores valores de permeabilidade ao ar que as misturas com o solo da Muribeca e que a influência de adição de composto orgânico é maior nas misturas com solo de Caruaru, sendo a maior permeabilidade ao ar na mistura 1:1 de Caruaru.

O intuito de fazer este processo de secagem e determinar a permeabilidade ao ar em cada umidade é caracterizar o comportamento do solo e a sua eficiência em reter os gases gerados no aterro durante períodos de seca e chuvosos.

#### 4.4.2 Permeabilidade Vertical à água

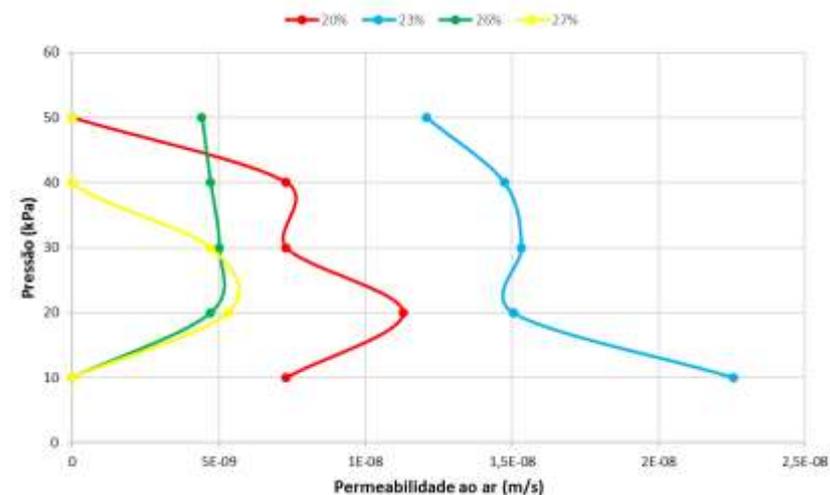
Os resultados encontrados para a permeabilidade à água foram de  $2,77 \times 10^{-9}$  m/s para a mistura 1:1 da Muribeca,  $3,59 \times 10^{-8}$  m/s para a Mistura 1:1 de Caruaru,  $5,60 \times 10^{-9}$  m/s para a mistura 2:1 da Muribeca e  $9,84 \times 10^{-9}$  m/s para a mistura 2:1 de Caruaru. Como o solo da Muribeca possui maior quantidade de argila e silte, observa-se que as misturas 1:1 e 2:1 da Muribeca apresentaram menores valores, mas as misturas tiveram resultados para a

condutividade hidráulica com ordem de grandeza requerida para um aterro sanitário. De acordo com a USEPA (2004) para camadas de cobertura em aterros sanitários é indicado que os valores de permeabilidade à água sejam inferiores a ordem de grandeza de  $10^{-7}$  m/s, para garantir assim que não haja muita percolação de água proveniente das chuvas. Pode-se afirmar também que a mistura 1:1 da Muribeca apresentou valor compatível com os valores encontrados por Maciel (2003), Lopes (2011) e Costa (2015).

#### 4.4.3 Permeabilidade Horizontal ao ar

Para o ensaio de permeabilidade horizontal foi moldado um corpo de prova na energia de um Proctor Normal com a mistura de 1:1 da Muribeca. O experimento foi realizado para diferentes umidades do corpo de prova e foi verificada a permeabilidade ao ar horizontal quando a amostra era submetida a diferentes valores de pressão. Inicialmente aplica-se uma pressão confinante de 10kPa e vai crescendo esta pressão até que a mesma chegue a um valor de 50kPa. O gráfico a seguir mostra o desempenho do corpo de prova durante a realização do experimento.

Figura 43 - Resultados dos ensaios de permeabilidade horizontal ao ar para um mesmo corpo de prova da mistura 1:1 da jazida da Muribeca.



Pelo gráfico é possível observar que independentemente da umidade da amostra, para altos valores de pressão aplicado há uma deformação na amostra a ponto de diminuir o coeficiente de permeabilidade ao ar. Em campo este aumento de pressão poderia ser caracterizado por um sobrepeso presente na camada de cobertura.

#### 4.4.3 Permeabilidade Horizontal à água

Para o ensaio de permeabilidade horizontal também foi verificado a permeabilidade à água da Mistura 1:1 da Muribeca, afim de analisar o seu comportamento quando submetida a um fluxo de água no sentido horizontal. Assim sendo, para essa mistura, foi constatado um coeficiente de permeabilidade à água de  $5,33 \times 10^{-9}$  m/s, que apresentou a mesma ordem de grandeza do coeficiente de permeabilidade vertical encontrado para a mistura 1:1 da jazida da Muribeca.

#### 4.5 Resistência ao cisalhamento direto

Para as misturas 1:1, 2:1 e solo puro da jazida da Muribeca, os resultados são apresentados a seguir.

Figura 44 - Envoltória linear do ensaio de resistência ao cisalhamento direto da Muribeca na umidade ótima em condições não inundadas.

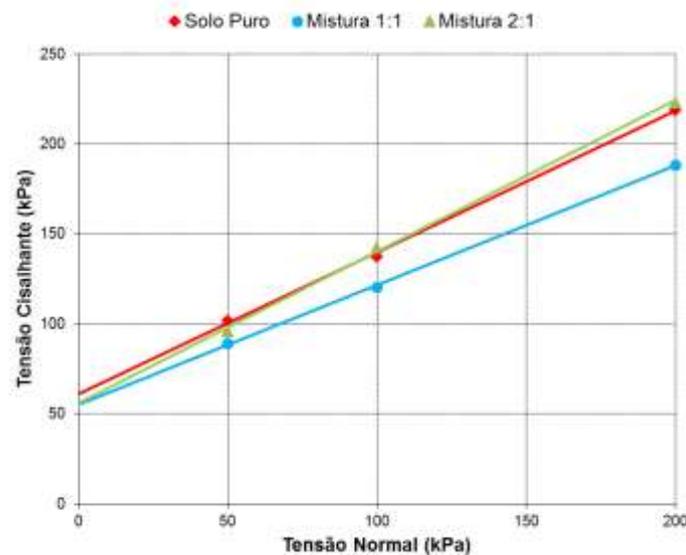


Figura 45 - Envoltória linear do ensaio de resistência ao cisalhamento direto da Muribeca na umidade ótima em condições inundadas.

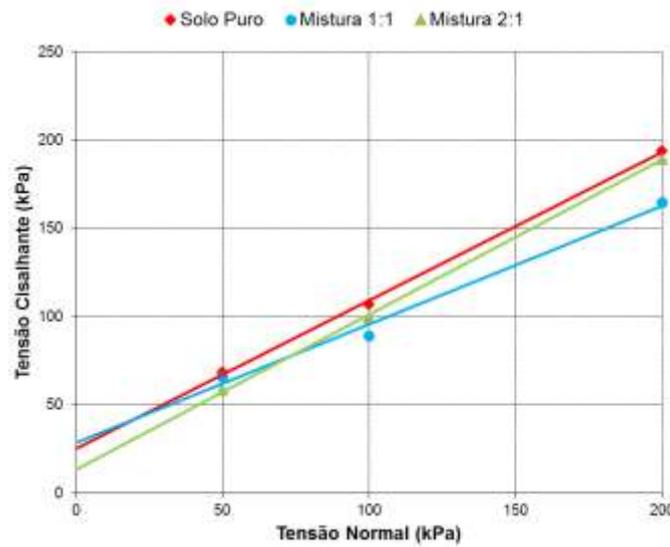


Tabela 8 – Parâmetros dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto da Muribeca.

Condição do ensaio	Material	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Não inundado	Solo puro Muribeca	60,8	38,2
	Mistura 2:1 Muribeca	55,8	40,1
	Mistura 1:1 Muribeca	55,1	33,6
Inundado	Solo puro Muribeca	24,8	40,1
	Mistura 2:1 Muribeca	13,1	41,3
	Mistura 1:1 Muribeca	28,3	33,9

Para as misturas 1:1, 2:1 e solo puro do município de Caruaru, os resultados são apresentados a seguir.

Figura 46 - Envoltória linear do ensaio de resistência ao cisalhamento direto de Caruaru na umidade ótima em condições não inundadas.

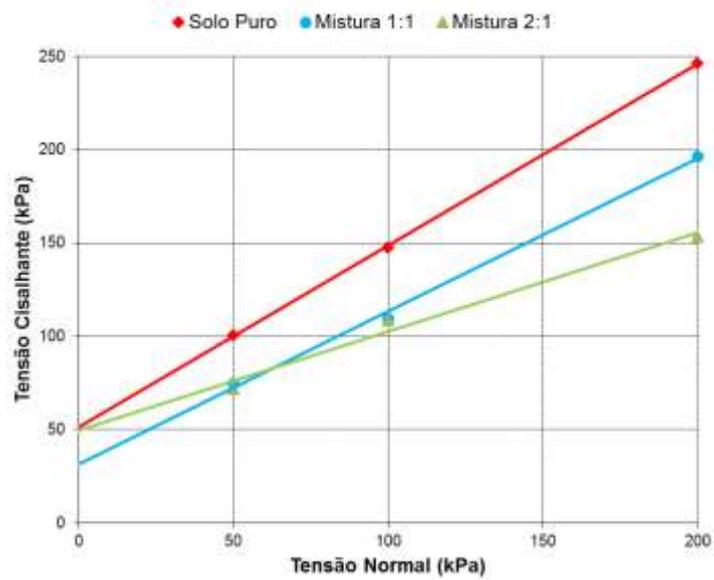


Figura 47 - Envoltória linear do ensaio de resistência ao cisalhamento direto de Caruaru na umidade ótima em condições inundadas.

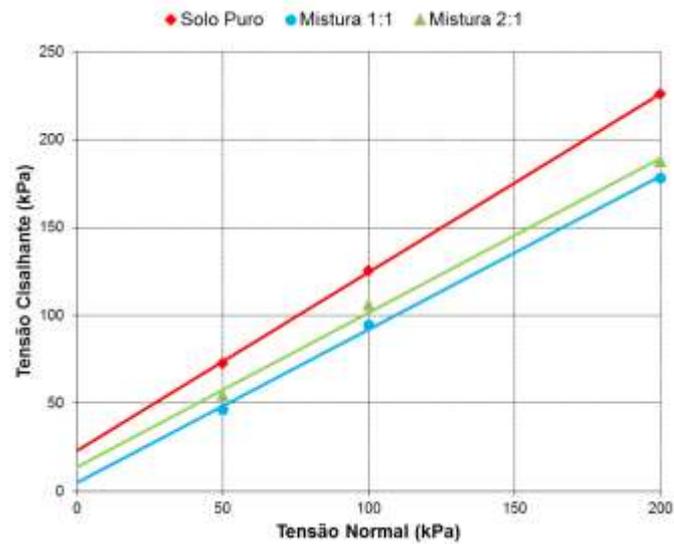


Tabela 9 – Parâmetros dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto de Caruaru.

Condição do ensaio	Material	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Não inundado	Solo puro Caruaru	51,3	44,2
	Mistura 2:1 Caruaru	51,8	27,6
	Mistura 1:1 Caruaru	31,3	39,3
Inundado	Solo puro Caruaru	22,7	45,5
	Mistura 2:1 Caruaru	13,6	41,3
	Mistura 1:1 Caruaru	4,8	41,1

Os valores obtidos dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto praticamente mostraram que as adições de composto orgânico aos solos ocasionaram uma queda nos valores de coesão e ângulo de atrito interno. A adição de água do ensaio inundado gerou um decréscimo nos valores de coesão de quase todos os ensaios analisados com menores valores para o solo de Caruaru.

Por ser um solo com maiores teores de argila, o solo da Muribeca apresentou maiores valores de coesão que o solo de Caruaru. Os valores dos ângulos de atrito internos para o solo de Caruaru foram maiores que o do solo da Muribeca pela maior presença de areia e, conseqüentemente, maior entrosamento das partículas.

#### 4.6 Ensaio de edométrico

O ensaio de adensamento foi realizado segundo as recomendações presentes na NBR 12007/90 e foram feitos para o solo puro e as misturas 1:1 e 2:1 de solo:composto. Para determinar a tensão de pré-adensamento, foi utilizado o método proposto por Pacheco-Silva e o coeficiente de adensamento foi calculado pelo método de Taylor. A Tabela 10 e as Figuras 48, 49 e 50 a seguir mostram os resultados encontrados durante o procedimento para umidade ótima e em condições inundadas e não inundadas.

Dentre os parâmetros obtidos durante o ensaio, tem-se: índice de compressão ( $C_c$ ), que corresponde à inclinação da reta de compressão virgem; tensão de sobre adensamento ( $\sigma'_a$ ) e o índice de vazios, conforme a Tabela 10.

Figura 48 - Ensaio de adensamento para os solos puros na umidade ótica.

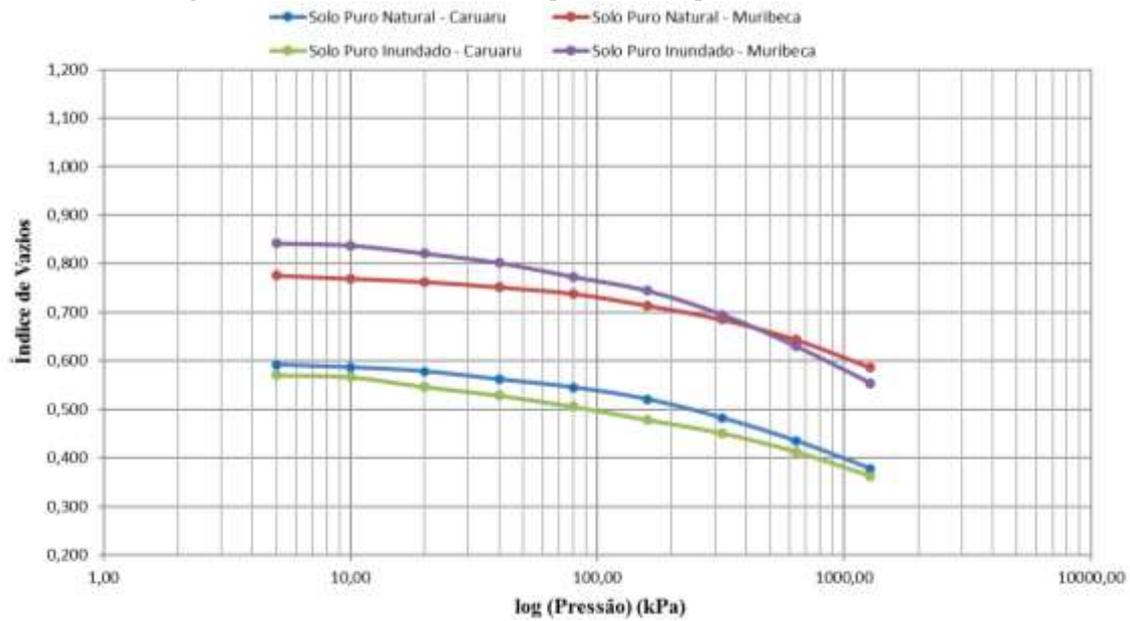


Figura 49 - Ensaio de adensamento para as misturas 1:1 na umidade ótica.

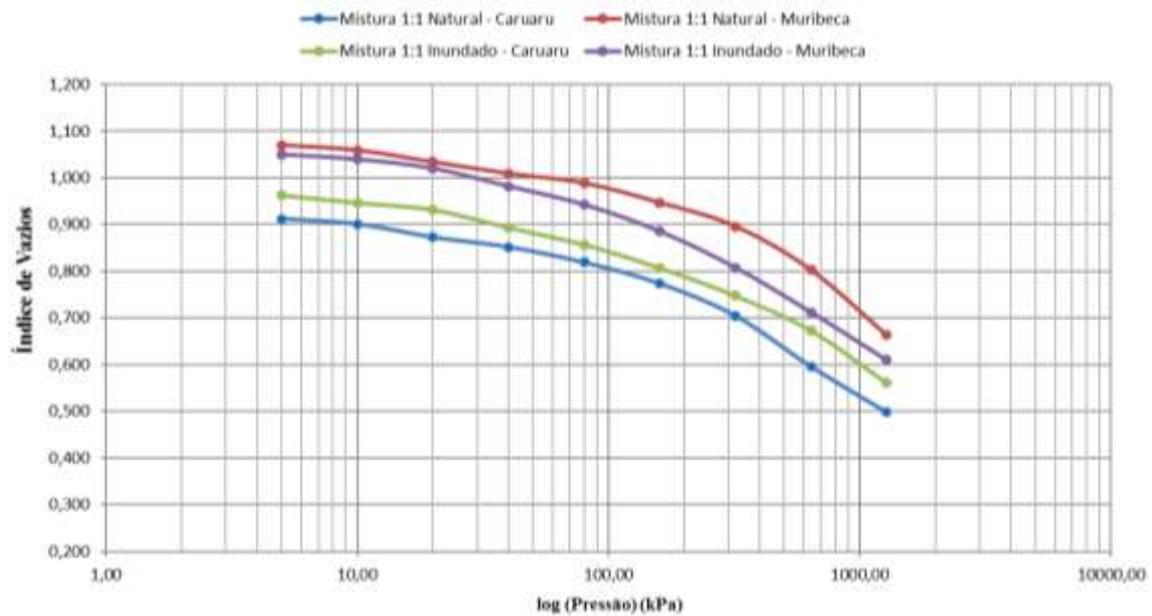


Figura 50 - Ensaio de adensamento para as misturas 2:1 na umidade ótima.

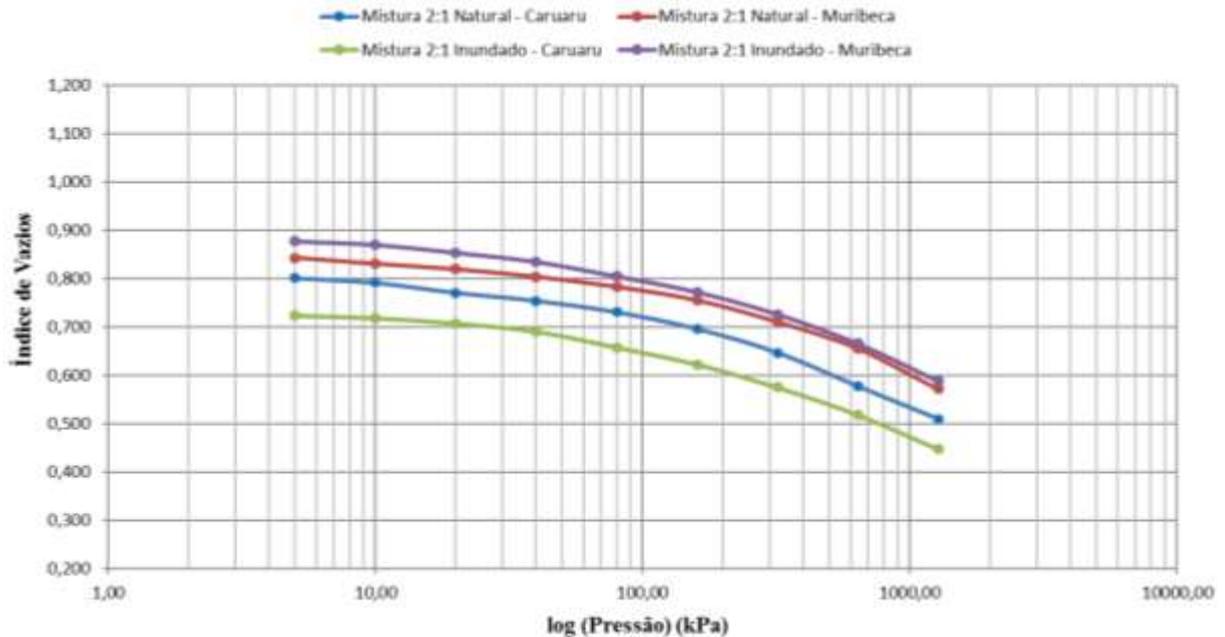


Tabela 10 - Parâmetros dos ensaios de adensamento na umidade ótima.

Amostra	Não inundado			Inundado		
	$e_o$	$\sigma'_a$	Cc	$e_o$	$\sigma'_a$	Cc
Solo Puro Muribeca	0,790	200kPa	0,175	0,828	150Kpa	0,230
Solo Puro Caruaru	0,599	140kPa	0,170	0,571	133kPa	0,146
Mistura 1:1 Muribeca	1,101	250kPa	0,413	1,040	120Kpa	0,327
Mistura 1:1 Caruaru	0,936	133kPa	0,320	0,974	178Kpa	0,327
Mistura 2:1 Muribeca	0,863	200kPa	0,288	0,878	180Kpa	0,243
Mistura 2:1 Caruaru	0,814	122kPa	0,221	0,724	128Kpa	0,209

Nota-se que a adição de composto orgânico aos solos faz com que os índices de compressão nos ensaios não inundados aumentem devido a características do composto como elevado índice de vazios e composição de fibras na massa.

Logo, as misturas 1:1 foram as que se apresentaram mais compressíveis, sendo a Mistura 1:1 com o solo da jazida da Muribeca com valores maiores ou iguais de índice de compressão e índice de vazios que a Mistura 1:1 com solo de Caruaru. Isso ocorre porque o

solo de Caruaru é mais arenoso, o qual se caracteriza por ser um solo mais permeável e menos compressível que o solo da Muribeca.

Para uma camada de cobertura, os parâmetros da Tabela 10 mostram-se necessários para a estimativa dos recalques ao longo do tempo perante peso próprio da camada e cargas externas a exemplo do peso de maquinário operante ao longo da vida útil de aterro sanitário e outras cargas externas quando do encerramento do mesmo.

#### 4.7 Ensaio de compressão triaxial CIU

Os ensaios triaxiais foram realizados com medição da poropressão. Logo, obtiveram-se valores de tensões efetivas a partir das medições de tensões totais por meio do equipamento de ensaio. Os gráficos abaixo mostram as envoltórias construídas em termos de tensões efetivas e tensões totais com os resultados de coesão e ângulo de atrito informados nas Tabelas 11 e 12.

Figura 51 – Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para a mistura 1:1 da Muribeca.

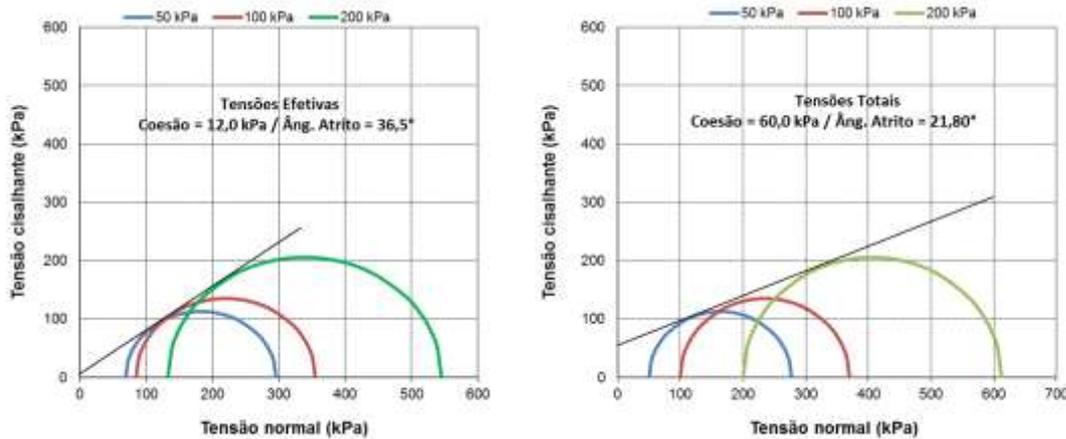


Figura 52 – Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para a mistura 1:1 de Caruaru.

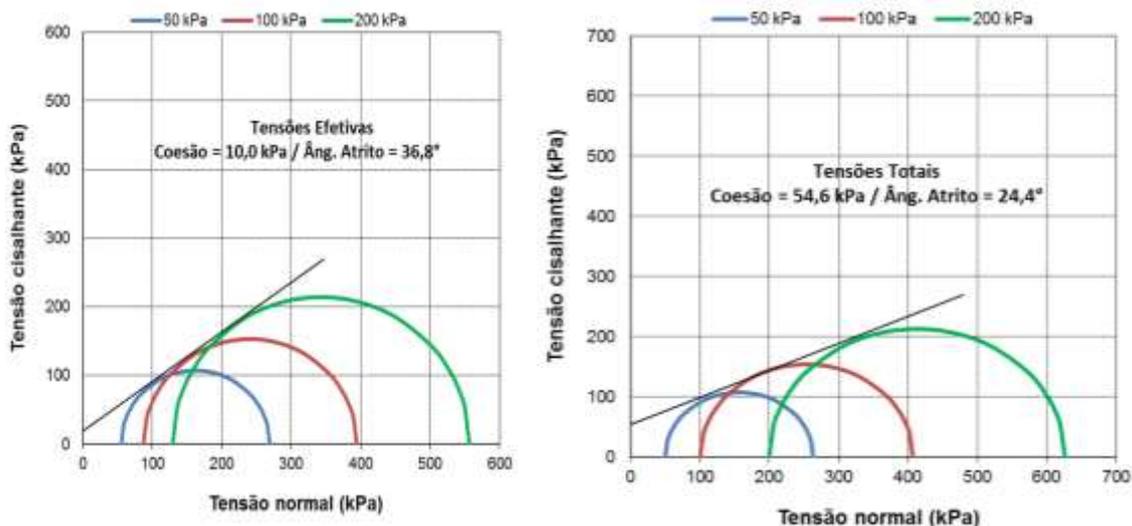


Figura 53 – Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para a mistura 2:1 da Muribeca.

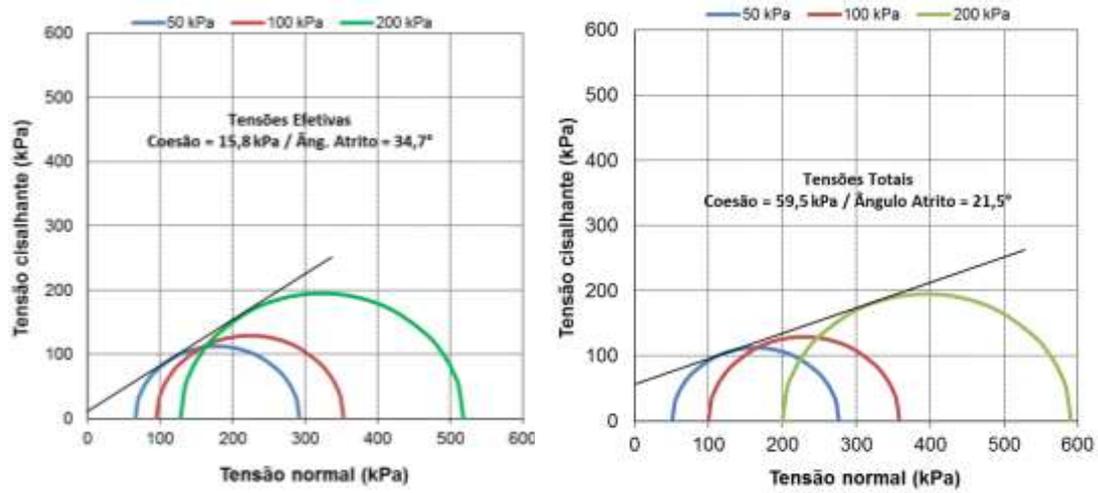


Figura 54 – Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para a mistura 2:1 de Caruaru.

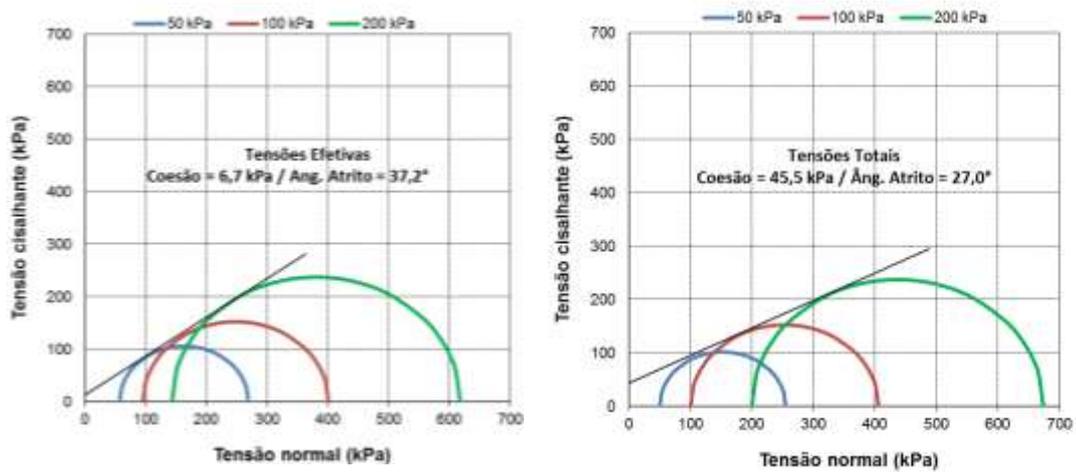


Figura 55 – Envoltórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para o solo puro da Muribeca.

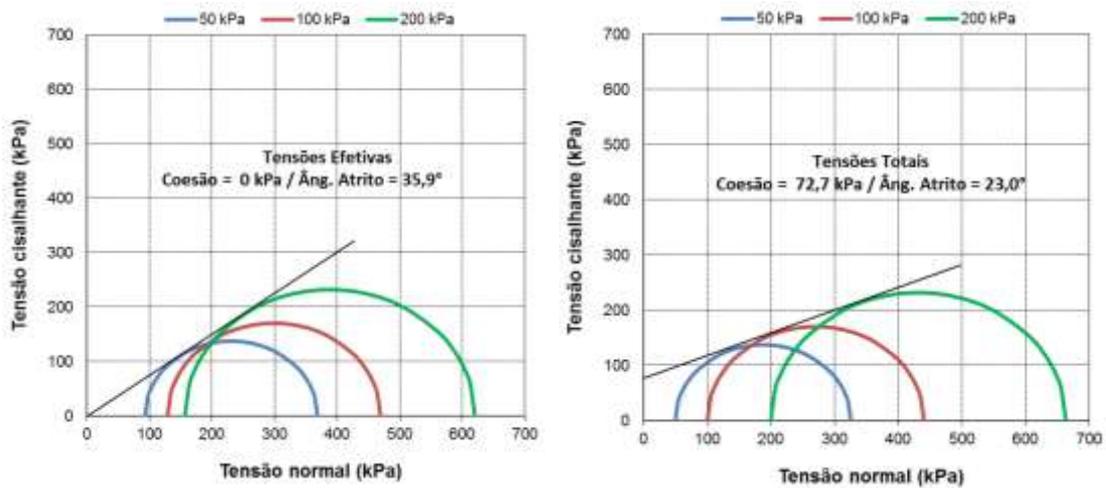


Figura 56 – Envolvórias do ensaio triaxial em tensões efetivas e tensões totais para o solo puro de Caruaru.

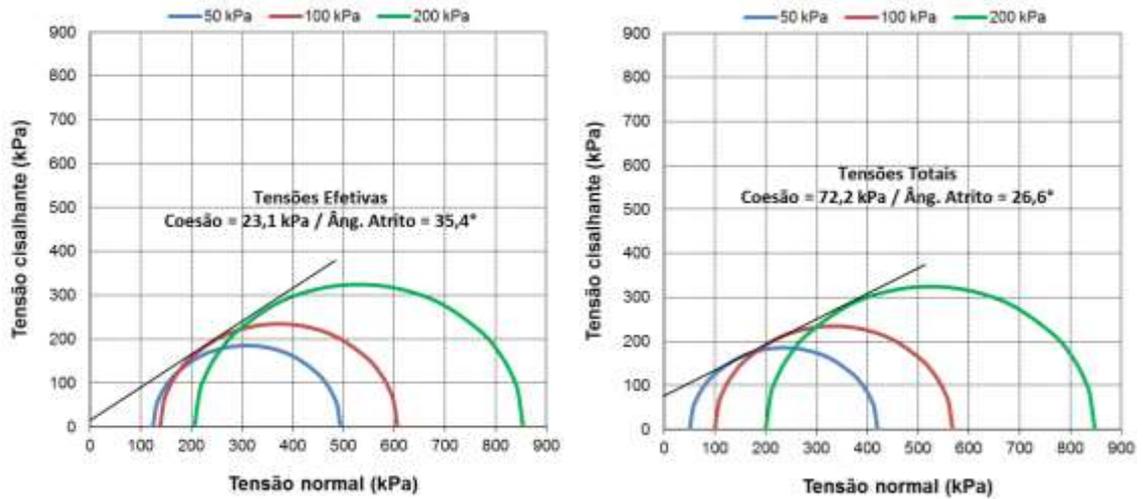


Tabela 11 – Parâmetros dos ensaios triaxiais da Muribeca.

Condição do ensaio	Material	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Tensões efetivas	Solo puro Muribeca	0	35,9
	Mistura 2:1 Muribeca	15,8	34,7
	Mistura 1:1 Muribeca	12,0	36,5
Tensões Totais	Solo puro Muribeca	72,7	23,0
	Mistura 2:1 Muribeca	59,5	21,5
	Mistura 1:1 Muribeca	60,0	21,8

Tabela 12 – Parâmetros dos ensaios triaxiais de Caruaru.

Condição do ensaio	Material	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Tensões efetivas	Solo puro Caruaru	23,1	35,4
	Mistura 2:1 Caruaru	6,7	37,2
	Mistura 1:1 Caruaru	10,0	36,8
Tensões totais	Solo puro Caruaru	72,2	26,6
	Mistura 2:1 Caruaru	45,5	27,0
	Mistura 1:1 Caruaru	54,6	24,4

Nota-se que em ambos os solos, ao ser adicionada uma quantidade de composto orgânico, há quedas nos valores de coesão. Diferente dos ensaios de resistência ao cisalhamento direto, os ângulos de atrito no ensaio triaxial variaram pouco com a adição de composto orgânico.

#### 4.8 Curvas características dos materiais

As curvas características dos solos puros e das misturas 1:1 e 2:1, que relacionam a umidade gravimétrica com a sucção matricial, podem ser vistas nas Figuras 57 e 58.

Tendo em vista a relação entre a variação de umidade gravimétrica e o logaritmo da variação de sucção ( $C = \Delta w / \Delta \log \psi$ ), observaram-se valores para o solo puro da Muribeca de 4,58% entre 1kPa e 2000kPa e 21,13% entre 2000kPa e 10000kPa. A mistura 1:1 da Muribeca apresentou valores de 7,90% entre 1kPa e 3000kPa e 26,67% entre 3000kPa e 10000kPa. Já a mistura 2:1 da Muribeca apresentou valores de 5,96% entre 1kPa e 4000kPa e 20,96% entre 4000kPa e 20000kPa.

Com relação ao solo puro de Caruaru, os valores de capacidade de retenção de água extraídos do gráfico mostrado na Figura 58 foram de 0,82% entre 1kPa e 800kPa e 13,15% entre 800kPa e 7000kPa. A curva característica da mistura 1:1 de Caruaru apresentou um padrão linear de tal modo que ela foi aproximada em apenas uma reta com capacidade de retenção média de 8,01% entre 1kPa e 50000kPa. Já a mistura 2:1 de Caruaru apresentou valores de 3,12% entre 1kPa e 200kPa e 15,37% entre 200kPa e 4000kPa.

Figura 57 – Curvas características de sucção matricial das misturas e solo puro da Muribeca.

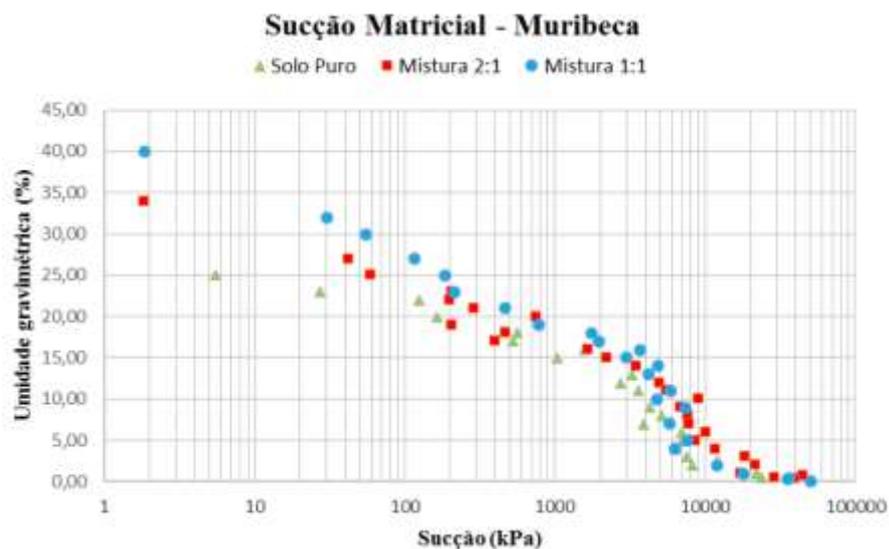
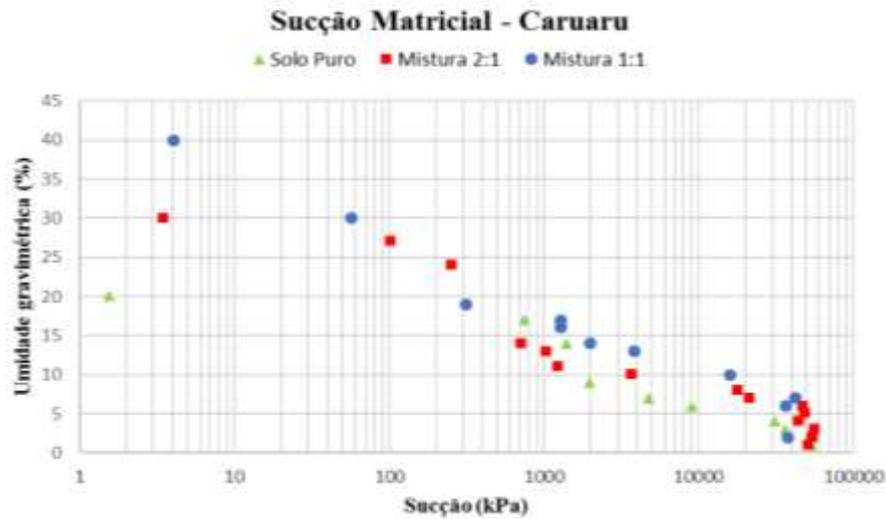


Figura 58 – Curvas características de sucção matricial das misturas e solo puro de Caruaru.



Nota-se, através dos gráficos e dos valores de capacidade de retenção extraídos, que à medida que foram adicionadas quantidades de composto orgânico aos solos puros, houveram aumentos nas capacidades de retenção dos materiais. Isso complementa que a adição de composto orgânico, em certas quantidades, pode ajudar na retenção de água na camada de cobertura reduzindo o número de fissuras ou caminhos preferenciais de infiltração de água e fuga de gases perante mudanças climáticas do ambiente.

#### 4.9 Análise química por fluorescência de raios X

A Tabela 13 apresenta os resultados da análise química por fluorescência de raios x do material orgânico e dos solos puros. Pelas análises de fluorescência de raios-x, foi constatada, em todos os materiais, a presença de alumina ( $Al_2O_3$ ), sílica ( $SiO_2$ ), óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ) e dióxido de titânio ( $TiO_2$ ). O composto orgânico apresentou Óxido de cálcio ( $CaO$ ) em maior quantidade.

Tabela 13 - Resultados da análise química das amostras de composto orgânico e solos puros.

Óxidos	Composto Orgânico (%)	Solo Muribeca (%)	Solo Caruaru (%)
SiO <sub>2</sub>	50.124	47.563	49.343
CaO	20.568	0.125	5.885
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.661	41.486	15.677
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.869	-	2.052
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.364	9.614	19.219
SO <sub>3</sub>	3.038	-	1.231
MgO	2.017	-	2.785
K <sub>2</sub> O	1.397	-	1.761
TiO <sub>2</sub>	0.682	1.120	1.061
ZrO <sub>2</sub>	0.073	-	-
MnO	0.053	-	0.172
ZnO	0.045	-	-
SrO	0.043	-	0.065
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.036	0.093	-
CuO	0.031	-	-
BaO	-	-	0.749

#### 4.10 Ensaio microbiológico

Os resultados dos ensaios microbiológicos atestaram crescimento positivo de microrganismos metanotróficos nas misturas 1:1 utilizadas nos ensaios de coluna, conforme a Figura 59.

Figura 59 – Resultado do crescimento de microrganismos metanotróficos nas misturas 1:1 utilizadas no ensaio de coluna.



Os valores de contagem de colônias de bactérias em unidades formadoras de colônias (UFC)/g foram de  $2,37 \times 10^7$  para a mistura 1:1 da Muribeca e  $0,83 \times 10^7$  para a mistura 1:1 de Caruaru.

Nota-se que a mistura 1:1 da Muribeca apresentou maior valor de unidades formadoras de colônias em relação à mistura 1:1 de Caruaru. Isso pode ser decorrente da maior quantidade de finos no solo da Muribeca, principalmente pela maior percentagem de argila, uma vez que solos argilosos possuem maiores capacidades de retenção de água. Conseqüentemente, esse ambiente pode ter criado melhores condições para o desenvolvimento dos microrganismos quando comparado ao solo de Caruaru.

Logo, esses resultados obtidos podem comprovar o potencial oxidativo das camadas de cobertura com emprego de misturas de solo e composto orgânico em depósitos de resíduos sólidos urbanos.

#### 4.11 Ensaio de coluna

As Figuras 60 e 61 apresentam os resultados das concentrações de metano ao longo dos dias e as figuras 62 e 63 mostram os resultados das concentrações de dióxido de carbono ao longo dos dias nas duas colunas utilizadas no ensaio.

As posições de medição 1, 2 e 3 nas ordenadas dos gráficos são referentes às três saídas de gás das colunas distantes da base de 0,22m, 0,50m e 0,77m, respectivamente.

Figura 60 – Resultados das concentrações de metano na coluna com mistura 1:1 da Muribeca.

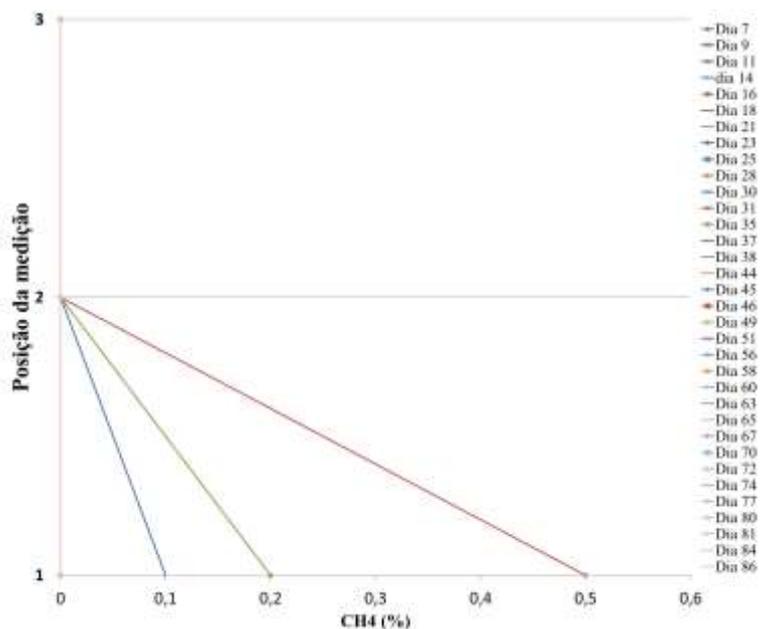


Figura 61 – Resultados das concentrações de metano na coluna com mistura 1:1 de Caruaru.

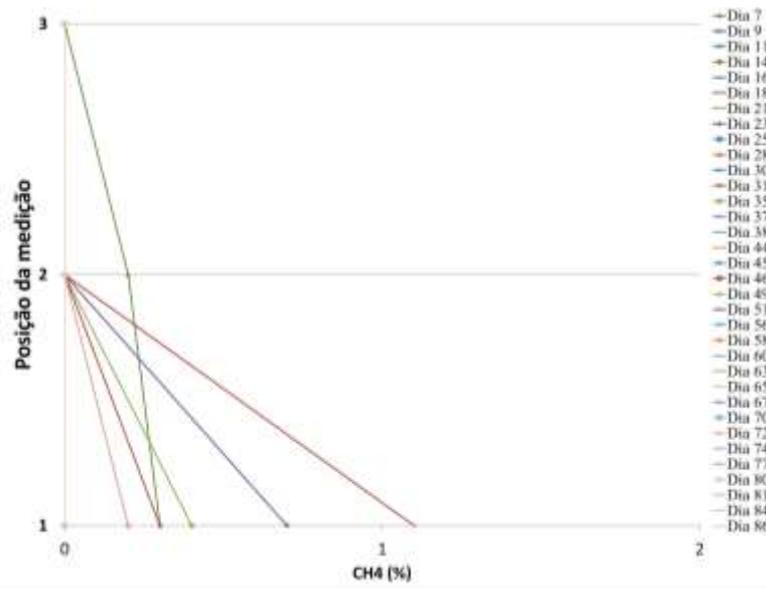


Figura 62 – Resultados das concentrações de dióxido de carbono na coluna com mistura 1:1 da Muribeca.

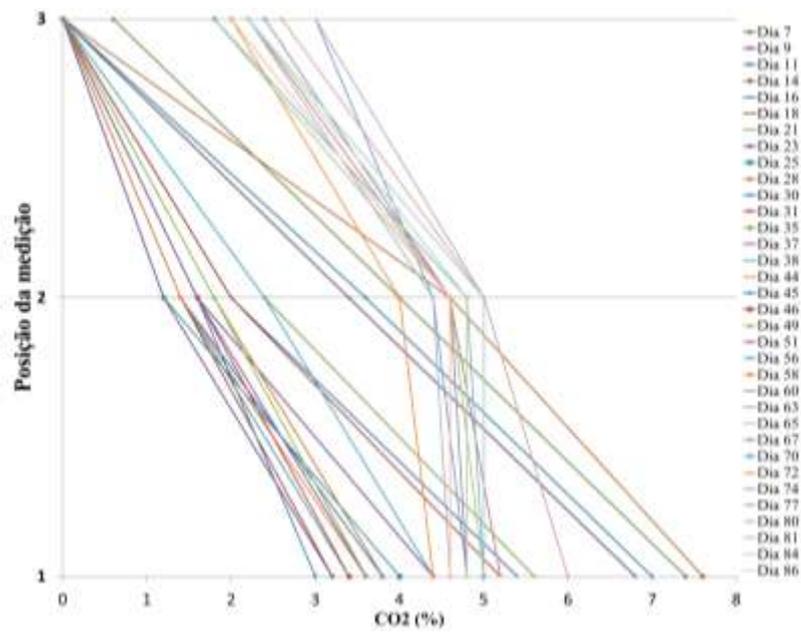
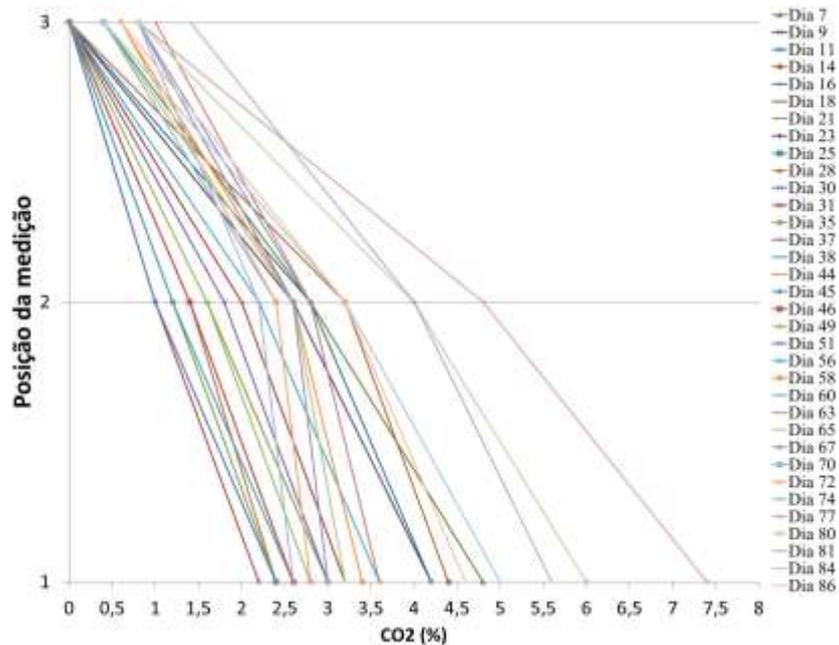


Figura 63 – Resultados das concentrações de dióxido de carbono na coluna com mistura 1:1 de Caruaru.



Nota-se que a coluna que conteve o solo de Caruaru apresentou maiores concentrações de metano nas medições ao longo da altura da coluna, o que pode ser devido a maior permeabilidade ao ar na umidade ótima dessa mistura, na qual foi da ordem de grandeza de 10-7 m/s, enquanto a mistura 1:1 da Muribeca apresentou valor de permeabilidade ao ar na umidade ótima na ordem de 10-9 m/s, como vistos anteriormente.

Outra possibilidade de menor concentração de metano na coluna com mistura 1:1 da Muribeca pode ser devido ao maior número de microrganismos metanotróficos nessa mistura, conforme o ensaio microbiológico realizado, na qual a maior oxidação de metano nessa coluna reflete-se na maior produção de dióxido de carbono, o que pode ser visto nas Figuras 62 e 63, que mostram maiores concentrações de dióxido de carbono ao longo dos dias na coluna com a mistura 1:1 da Muribeca.

Nota-se também que a presença do gás metano foi detectada apenas nos primeiros dias para ambas as colunas. Sendo metano puro injetado na base, considerou-se que ocorreu a oxidação desse gás pelos microrganismos metanotróficos.

A maior quantidade de dióxido de carbono na base pode ser explicada pela maior presença de água na base por conta da gravidade e, como consequência, criando um melhor ambiente para os microrganismos por conta da maior umidade, sendo melhor esse ambiente para as bactérias quanto maior a capacidade de retenção do material em acumular água, daí uma maior concentração de dióxido de carbono ao longo dos dias na mistura 1:1 da Muribeca.

## 5 CONCLUSÕES

Notou-se que o acréscimo de composto orgânico aos solos interferiu no aumento de materiais grossos nas granulometrias dos solos e reduziram as plasticidades dos materiais. Esse acréscimo causou também diminuições nas densidades aparentes secas dos materiais e aumentos nas umidades ótimas e capacidades de retenção, uma vez que o composto orgânico possui uma composição de materiais leves e fibras (resíduos de podas de árvores e jardinagens) e maior teor de umidade, mas ajudou no aumento de retenção de água quando foi misturado com os solos de acordo com as curvas características, o que pode minimizar as fissuras das camadas de cobertura perante ciclos de umedecimento e secagem do ambiente.

Os ensaios de compressibilidade dos materiais mostraram que a adição de composto orgânico aumenta o índice de vazios e torna a camada de cobertura mais compressível por meio da avaliação dos parâmetros, mas que o dimensionamento pode ser feito de forma a compensar os recalques excessivos. A resistência ao cisalhamento das camadas com adição de composto orgânico foi reduzida principalmente pela queda dos valores de coesão, mas não de forma significativa.

As misturas também apresentaram permeabilidades à água variando entre  $10^{-8}$  e  $10^{-9}$  m/s, estando de acordo com os padrões indicados pela USEPA (2003) para camadas de cobertura em aterros sanitários, garantindo assim que não haja percolação em excesso de água proveniente das chuvas.

As misturas com o solo da Muribeca tiveram melhores resultados de permeabilidade ao ar do que as misturas com o solo de Caruaru, o que as tornam melhores para minimizar as emissões de gases poluentes a atmosfera.

Por fim, foi possível avaliar a presença de atividade microbiana nos solos com adições de composto orgânico, com melhores resultados na mistura 1:1 do solo da Muribeca pelo maior número de colônias de bactérias capazes de oxidar o gás metano, que teve menores concentrações, e consequentes maiores concentrações de dióxido de carbono.

Logo, o estudo realizado permite que seja possível aplicar misturas de solo com material compostado em camadas de cobertura visando o potencial de redução de emissões de gases, principalmente o gás metano, e consequente atendimento ao fechamento dos lixões, tornando-se uma alternativa viável para muitas regiões reduzindo o uso de materiais convencionais de cobertura final com o uso de composto orgânico estabilizado.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6508:1984. **Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica dos grãos.** Rio de Janeiro – RJ. 1984.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459:1984. **Solo – Determinação do Limite de Liquidez.** Rio de Janeiro – RJ. 1984.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457:1986. **Amostra de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização.** Rio de Janeiro – RJ. 1986.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181:1988. **Análise granulométrica para solos, com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material de acordo com a norma.** 1988.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180:1988. **Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.** Rio de Janeiro – RJ. 1988.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182:1988. **Solo – Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal.** Rio de Janeiro – RJ. 1988.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8419:1992. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos.** Rio de Janeiro - RJ. 1992.
- ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de Resíduos Sólidos Urbanos no comportamento de aterros simulados.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2007.
- ASTM, D5084-10. **Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity os Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter.** American Society for Testing and Materials. Volume 04.08. Soil and Rock: D420 – D5876. 2010.
- BAHR, T.; FRICKE, K.; HILLEBRECHT, K.; KÖLSCH, F.; REINHARD, B. **Clean Development Mechanism - Tratamento de Resíduos Sólidos e Oxidação de Gás Metano para Minimização de Emissões.** 2006.
- BOECKX, P.; VAN CLEEMPUT, O. Methane oxidation in a neutral landfill cover soil: Influence of moisture content, temperature, and nitrogen-turnover. **Journal of Environmental Quality**, p 178-183, 1996.
- BOSETTI, V., BUCHNER, B. Data Envelopment Analysis of different climate policy scenarios. **Ecological Economics**, v. 68, n. 5, p. 1340 –1354, 2009.

CABRAL, A. R.; ARTEAGA, K.; RANNAUD, D.; AÏT-BENICHOUS, S.; POUËT, M.F.; ALLAIRE, S.; JUGNIA L-B.; GREER, C. W. Analysis of methane oxidation and dynamics of methanotrophs within a passive methane oxidation barrier. In: **Proceedings Sardinia 2007**, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 2007.

COSTA, M. D. **Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. 145p.

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

FIRMO, A. L. B. **Estudo da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. 2013. 279 p.

FREDLUND, D. G. & XING, A. Equations for the soil water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31(4): 521-532. 1994.

GEBERT, J.; GROENGROEFT, A; PFEIFFER E-M. **Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill covers**. Soil Biology & Biochemistry. Article In Press. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.07.004. 2011.

GOURC, J. P.; STAUB, M.; Bilan Environnemental des installations de stockage – Réduction des émissions de gaz à effet de serre et valorisation du biogaz: une actualisation nécessaire de la conception des couvertures, Grenoble – França. **Ingénieries**, n. spécial, p. 71-82, 2009.

HILGER, H. T.; HUMER, M. Biotic Landfill Cover Treatments for Mitigating Methane Emissions. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 84(1), 2003, p.71-84.

HUMER, M.; LECHNER, P. Effect of Methane oxidation on the water balance of the landfills cover and the vegetation layer. Proc. Ninth International Waste Management and Landfill Symposium. **Anais**. Cagliari, Italy, 2003.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007. 138p.

IEA - International Energy Agency. **CO2 Emissions from Fuel Combustion**. France, Paris, 576 p. 2007.

JUCÁ, J. F. T. **Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada**. Tese de Doutorado, Engenharia Civil, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, España. 1990.

LOPES, R. L. **Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2011. 274p.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. 2003. 173 p.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólido.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. 2008. 243p.

MARINHO, F. A. M. **A técnica do papel filtro para medição de sucção.** Encontro Sobre Solos Não Saturados. Rio Grande do Sul. 1995.

ROSE, J. L. **Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camada oxidativas experimentais.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2009. 166p.

SALIM, K. G. **Oxidação passiva do metano em ensaios de coluna simulando camadas de cobertura de aterros sanitários.** Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2011.

SANTOS, G. M. **Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca, Pernambuco.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife. 2015. 195p.

SVENNING, M. M.; WARTIAINEN, I.; HESTNES, A. G.; BINNERUP, S. J. **Isolation of methane oxidising bacteria from soil by use of a soil substrate membrane system.** FEMS Microbiology Ecology, v.44, p.347-354, 2003.

TEIXEIRA, P. F. *et al.* **Processo de Oxidação do metano através das bactérias metanotróficas em coberturas de aterros sanitários.** VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador. 2007.

TEIXEIRA, C. E. *et al.* **Estudos sobre a oxidação aeróbia do metano na cobertura de três aterros sanitários no Brasil.** Eng Sanit Ambient. v.14. n.1. 2009.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Evapotranspiration landfill cover system.** Fact sheet, 2003.

VIEIRA, A. M. **Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Paulo. São Paulo. 2005. 287p.

WORLD BANK. **Estudo de baixo carbono para o Brasil.** Relatório de Síntese Técnica sobre uso e mudança do uso da terra e florestas. Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), The World Bank, Washington, DC, USA, 253 páginas.