



Universidade Federal de Pernambuco
Centro Acadêmico do Agreste
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS CAMADAS DE COBERTURA DE
ATERRO SANITÁRIO PARA A REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO
ESTUFA**

ALICE JADNEIZA GUILHERME DE ALBUQUERQUE ALMEIDA

Caruaru, 2017

ALICE JADNEIZA GUILHERME DE ALBUQUERQUE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS CAMADAS DE COBERTURA DE
ATERRO SANITÁRIO PARA A REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO
ESTUFA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Orientador : Profº Drº Maria Odete Holanda Mariano

Co-orientador: Profº Drº José Fernando Thomé Jucá

Caruaru, 2017

Catálogo na fonte:

Bibliotecária – Paula Silva – CRB/4-1223

A447a Almeida, Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque.
Avaliação do desempenho das camadas de cobertura de aterro sanitário para a redução de emissões de gases de efeito estufa. / Alice Jadneiza Guilherme de Albuquerque Almeida. – 2017.
93f.; il.: 30 cm.

Orientadora: Maria Odete Holanda Mariano.
Coorientador: José Fernando Thomé Jucá.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2017.
Inclui Referências.

1. Gases. 2. Solos - lixiviação. 3. Biogás – Caruaru (PE). 4. Efeito estufa (Atmosfera) – Caruaru (PE). I. Mariano, Maria Odete Holanda (Orientadora). II. Jucá, José Fernando Thomé (Coorientador). III. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2017-236)

ALICE JADNEIZA GUILHERME DE ALBUQUERQUE ALMEIDA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS CAMADAS DE COBERTURA DE
ATERRO SANITÁRIO PARA A REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO
ESTUFA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Aprovado em: 11/08/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Maria Odete Holanda Mariano (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Magdalena Duarte Costa (Examinador Externo)
Instituto Federal da Paraíba

Prof^o. Dr. Régia Lúcia Lopes (Examinador Externo)
Instituto Federal do Rio Grande do Norte

*Dedico este trabalho a “minha flor, minha bebê”,
minha mãe Rose.*

AGRADECIMENTOS

Sou grata infinitamente ao pai celestial e a todos os irmãos de luz que me guiaram durante esta etapa, me auxiliando e me ajudando a passar por todos os momentos de provas e expiações.

Agradeço a minha mãe, Rose, que mesmo não estando no mesmo plano que eu, me emanou e emana energias e luz a todo momento. Sou grata ao meu pai Vicente e ao meu irmão Victor por todo cuidado e companheirismo. As minhas tias, Luzia e Marilene, que me amparam e que me cuidam como filha e a minha cunhada Patrícia pela motivação durante toda essa etapa.

Ao meu namorado Káritas e seus pais, Ailton e Deise, por todo o amparo nesta cidade nova e pelas oportunidades oferecidas. Sou muito grata em saber que posso contar com vocês a todo momento!

À minha orientadora Dra. Maria Odete Holanda Mariano por todo ensinamento, motivação e apoio durante o desenvolvimento de toda a pesquisa.

Ao professor Dr. José Fernando Thomé Jucá por toda paciência, confiança e pela oportunidade oferecida.

Ao engenheiro Antônio Brito e ao laboratorista Gutemberg por toda a ajuda na realização dos ensaios.

Aos amigos de laboratório do GRS, em especial ao grupo de camadas de cobertura, por todo o apoio e horas compartilhadas.

Ao CAPES pelo apoio financeiro concedido.

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

RESUMO

A emissão descontrolada dos gases produzidos em aterros sanitários é uma das maiores problemáticas de poluição local e global. Pessoas que vivem próximas às instalações dos aterros são muito afetadas, pois são continuamente expostas a mau odores e componentes tóxicos presentes no biogás, podendo até ocasionar o desenvolvimento de doenças. No âmbito mundial, o lançamento de biogás na atmosfera é uma das formas de maior causa e contribuição para o aquecimento global. A fim de minimizar tais impactos, torna-se necessário que aterros disponham de uma camada de cobertura eficiente, pois além da mesma impossibilitar que gases produzidos no local escapem para a atmosfera, também irá garantir que líquidos provenientes das precipitações não percolem no aterro e, por conseguinte, gerem mais lixiviados para serem tratados. Atualmente o uso de camadas de cobertura alternativas em aterros sanitários vem se intensificando. Entre as camadas utilizadas existem as camadas oxidativas, que utilizam uma mistura de solo com composto orgânico para melhorar a oxidação dos gases gerados, bem como auxiliar na retenção dos líquidos provenientes das chuvas. O principal objetivo deste trabalho foi o estudo em laboratório das camadas oxidativas através da metodologia das colunas de solos e a avaliação do seu comportamento quando a mesma for submetida a uma injeção controlada de gás. Foram utilizadas duas colunas de PVC preenchidas de solo, cada uma com cerca de 0,60 metros de comprimento. Na primeira coluna (A) foram colocados uma mistura de solo classificado como silte arenoso com composto na proporção de 1:1, já na segunda coluna (B) a mistura foi feita com um solo classificado como areia siltosa com composto nas proporções de 1:1 de solo composto. O gás utilizado para a verificação do comportamento da coluna foi metano com um fluxo ininterrupto de 3,5g CH₄/m².h. Em relação a concentração dos gases, a coluna (A) apresentou maior geração de CO₂, quando comparada com a coluna (B). Já em relação a capacidade de retenção de metano, ambas as colunas reduziram de forma significativa as emissões deste gás.

Palavras chaves: Emissões de gases. Camadas de cobertura. Camada oxidativa.

ABSTRACT

The uncontrolled emissions of gases produced by landfills are one of the major local and global pollution problems. As for location, people who live near the landfill installations are the most affected, because they are continuously exposed to bad odors and toxic components present in the biogas, even causing the development of diseases. Globally, the release of biogas in the atmosphere is one of the leading cause and contribution to global warming. In order to minimize said impacts, it is necessary that the landfills are provided with an efficient cover layer, besides making it impossible for the gases produced in the location escape to the atmosphere, it will also guarantee that the liquids originated from the precipitations do not percolate in the landfill, and consequently generate more leachate to be treated. Nowadays the use of alternative cover layers in landfills has been intensifying. Among the cover layers used, there are the oxidative layers, which use a mixture of soil and organic compound to improve the oxidation of the generated gases, as well as assist in the retention of the liquids originated from the rain. The aim of this work will be the study of the oxidative cover layers in laboratory through the soil column method and the evaluation of its behavior when submitted to different flows of gases. Two PVC columns filled with soil, each about 0.60 m long, were used. In the first column (A) a mixture of soil classified as sandy silt with 1: 1 compound was placed, already in the second column (B) the mixture was made with a soil classified as silty sand with compound in proportions of 1: 1 of composite soil. The gas used to verify the behavior of the column was methane with an uninterrupted flow of 3.5 g CH₄ / m².h. Regarding the gas retention capacity, column (A) showed a higher CO₂ retention capacity when compared to column (B). Regarding the methane retention capacity, both columns significantly reduced emissions of this gas.

Key words: Gas emissions. Covering layers. Oxidative layer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Variação da sucção em um perfil de solo	26
Gráfico 1: Curvas típicas de retenção de água para três tipos de solo.....	28
Foto 1: Equipamento Tri-flex 2 da Soil Test – ELE.....	33
Foto 2: Ensaio de permeabilidade à água	33
Foto 3: Câmara de acrílico contendo amostra no momento da realização do ensaio de permeabilidade a água	34
Foto 4: Câmara de fluxo com rotâmetro.....	35
Foto 5: Fluxímetro com detergente no seu interior	36
Foto 6: Posicionamento do papel filtro no anel.....	38
Foto 7: Processo de isolamento dos anéis	39
Foto 8: Pesagem do papel filtro após secagem na estufa.....	39
Foto 9: Confeção das Colunas A e B.....	41
Foto 10: Detalhe do sensor dentro da coluna.	41
Figura 2: Vista frontal das colunas preenchidas, medidas em centímetros.	42
Figura 3: Vista posterior das colunas preenchidas, medidas em centímetros.....	43
Foto 11: Sistema de Colunas em funcionamento	44
Gráfico 2: Ensaio de granulometria com mistura A na proporção 1:1	46
Gráfico 3 : Ensaio de granulometria com mistura A proporção 2:1	46
Gráfico 4: Ensaio de granulometria com mistura B proporção 1:1	48
Gráfico 5: Ensaio de granulometria com mistura B proporção 2:1	49
Gráfico 6: Curva de Compactação dos Materiais do tipo A.....	52
Gráfico 7: Curva de Compactação dos Materiais do tipo B	53
Gráfico 8: Ensaio de adensamento na umidade ótima em condições não inundadas do Material A.	55
Gráfico 9: Ensaio de adensamento na umidade ótima em condições inundadas do Material A.	55
Gráfico 10: Ensaio de adensamento na umidade ótima em condições não inundadas do Material B	57
Gráfico 11: Ensaio de adensamento na umidade ótima em condições inundadas do Material B	57
Gráfico 12: Resultados dos ensaios de permeabilidade vertical ao ar para um mesmo corpo de prova nas misturas A com proporções 2:1 e 1:1 de solo composto.....	59

Gráfico 13: Relação Tensão x Deformação Mistura A com proporção 1:1	61
Gráfico 14: Envoltória de Mohr-Coulomb para Tensões Efetivas da Mistura A com proporção 1:1	62
Gráfico 15: Relação Tensão x Deformação Mistura A de proporção 2:1	63
Gráfico 16: Envoltória de Mohr-Coulomb para Tensões Efetivas da Mistura A de proporção 2:1	64
Gráfico 17: Relação Tensão x Deformação Mistura B de proporção 1:1.....	65
Gráfico 18: Envoltória de Mohr-Coulomb para Tensões Efetivas da Mistura B de proporção 1:1	66
Gráfico 19: Relação Tensão x Deformação Mistura B de proporção 2:1.....	67
Gráfico 20: Envoltória de Mohr-Coulomb para Tensões Efetivas da Mistura B de proporção 2:1	68
Gráfico 21: Curvas de retenção de água do Material A.....	70
Gráfico 22:Curvas de retenção de água do Material B.....	71
Figura 4: Pontos de medição de gás	73
Gráfico 23: Resultados das leituras de concentrações de metano na Coluna A- Mistura A com proporção 1:1.....	75
Gráfico 24: Resultados das leituras de concentrações de metano na Coluna B- Mistura B proporção 1:1.....	76
Gráfico 25: Resultados das leituras de concentrações de dióxido de carbono na Coluna A	77
Gráfico 26: Resultados das leituras de concentrações de dióxido de carbono na Coluna B ...	78
Gráfico 27: Concentração de gases da coluna A no ponto 2	79
Gráfico 28: Concentração de gases da coluna B no ponto 2	80
Gráfico 29: Variação da temperatura da coluna A	81
Gráfico 30:Variação da temperatura da coluna B.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Esquema da utilização dos anéis.	36
Tabela 2: Caracterização com Mistura A	47
Tabela 3: Caracterização com Mistura B	47
Tabela 4: Resumo dos resultados de caracterização de todas as misturas.....	51
Tabela 5: Resultados preliminares da compactação do Material A.....	52
Tabela 6: Resultados Preliminar da Compactação do Material B	53
Tabela 7: Parâmetros dos ensaios de adensamento para o material A	54
Tabela 8: Parâmetros dos ensaios de adensamento para o material B.....	56
Tabela 9: Pressões hidrostáticas e axiais para cada corpo de prova da Mistura A com proporção 1:1	61
Tabela 10: Pressões hidrostáticas e axiais para cada corpo de prova da Mistura A de proporção 2:1	63
Tabela 11: Pressões hidrostáticas e axiais para cada corpo de prova da Mistura B de proporção 1:1	65
Tabela 12: Pressões hidrostáticas e axiais para cada corpo de prova da Mistura B de proporção 2:1	67
Tabela 13: Classificação dos parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento direto	69
Tabela 14: Tabela resumo dos parâmetros obtidos no ensaio de sucção.....	70
Tabela 15: Resultados das leituras de gás das colunas A e B.....	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Aterros Sanitários	16
3.2	Mecanismo de formação do biogás em aterros sanitários	16
3.3	Fatores que influenciam a composição e emissão do biogás	17
3.4	Efeito estufa e o aquecimento global	18
3.5	Gases emitidos por aterros sanitários	18
3.5.1	<i>Compostos Orgânicos não-metanogênicos (NMOC)</i>	19
3.5.2	<i>Dióxido de Carbono (CO₂)</i>	19
3.5.3	<i>Hidrogênio (H₂)</i>	19
3.5.4	<i>Metano (CH₄)</i>	20
3.6	Sistemas de cobertura final em aterros sanitários	20
3.6.1	<i>Camadas convencionais</i>	21
3.6.2	<i>Camadas alternativas</i>	21
3.7	Oxidação do metano na camada de cobertura	23
3.8	Uso de material compostado e solo na camada de cobertura	24
3.9	Fluxo de água e gás no solo	25
3.10	Sucção	26
3.11	Curva de Retenção da água	28

3.12	Parâmetros geotécnicos	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	Coleta, caracterização e propriedades geotécnicas do material utilizado para camada oxidativa	32
4.1.1	<i>Ensaio de Permeabilidade</i>	33
4.1.2	<i>Ensaio de Sucção</i>	38
4.2	Realização dos ensaios de coluna	41
4.2.1	<i>Montagem das colunas</i>	41
4.2.3	<i>Fluxo de Gás nas Colunas</i>	44
5	RESULTADOS	46
5.1	Ensaio de Caracterização Física	46
5.1.1	<i>Análise Granulométrica</i>	46
5.1.2	<i>Compactação de Proctor Normal</i>	52
5.1.3	<i>Ensaio de Adensamento</i>	55
5.1.4	<i>Ensaio de Permeabilidade</i>	59
5.1.5	<i>Ensaio de Compressão Triaxial</i>	62
5.1.6	<i>Curvas Características</i>	70
5.2	Ensaio de Coluna	73
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
7	SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	86
	REFERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

A elevação da temperatura no planeta terra é um fenômeno natural, entretanto devido à ação antrópica, muitos poluentes que são emitidos para a atmosfera acabam por sua vez acelerando este aquecimento. Dentre estes poluentes, o metano (CH_4) é um dos gases mais danosos presentes na atmosfera e de maior responsabilidade pelo aumento da temperatura mundial. O CH_4 é o segundo maior contribuinte do aquecimento global, ficando atrás apenas do dióxido de carbono (CO_2). Estima-se que o CH_4 seja aproximadamente 21 vezes mais poluente que o CO_2 (FERNANDES, 2009). As principais fontes naturais geradoras do metano são: vulcões, pântanos, falhas geológicas e a decomposição de resíduos sólidos (ROSE, 2009).

Cerca de 5% das emissões de gases causadores do efeito estufa são emitidos pelos aterros sanitários (UNEP, 2011). No Brasil, as emissões ocasionadas por resíduos sólidos urbanos representam 12% do total, sendo que 84% são oriundas de aterros sanitários (BRASIL, 2010). Tal fato acontece porque, na maioria dos aterros, para se implantar um sistema de drenagem, captação e conversão do biogás, é necessário um capital de investimento inicial muito elevado. Por força da legislação e também pela possibilidade de se obter créditos de carbono, muitos aterros estão investindo na implantação destes sistemas (TEIXEIRA 2008).

A captação de gases gerados no aterro, além de se fazer necessário, é de grande importância que o mesmo também possua um sistema de cobertura, para evitar que águas pluviais adentrem no aterro, pois além de aumentar a quantidade de lixiviado, pode-se também aumentar as chances de que gases escapem para a atmosfera. Em aterros sanitários existem basicamente dois tipos de sistemas de cobertura final: as camadas convencionais, formada por solo argiloso e materiais geossintéticos; e as camadas alternativas, que são as junções de solos com outros materiais, como material compostado (COSTA, 2015).

A utilização de camadas convencionais é de grande préstimo apenas em locais com climas úmidos. Já em regiões áridas, um dos problemas que podem ocorrer é a formação de macro e microfissuras, fazendo assim com que ocorra o escape do biogás gerado (USEPA, 2003).

A aplicação de camadas alternativas, também conhecidas como camadas oxidativas, é bastante útil principalmente em aterros em que não há um sistema de captação de gases, pois a camada composta com material orgânico é capaz de fazer a oxidação do metano, diminuindo assim a emissão deste gás para a atmosfera. (GEBERT *et al.*, 2011; LOPES, 2011; HE *et al.*,

2008). Esse sistema de cobertura final também se mostra bastante eficiente na retenção do lixiviado para o interior do aterro (COSTA, 2015).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho de dois tipos de materiais para a utilização em camadas de cobertura oxidativas reproduzidas em laboratório, através de ensaios de coluna de solo, e avaliação da sua funcionalidade na redução de emissões de gases de efeito estufa.

2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar eficiência da utilização de um solo do tipo silte arenoso e de uma areia siltosa em camadas de cobertura para redução de emissões gasosas;
- b) Verificar comportamento de duas camadas de cobertura oxidativa quando submetida à um fluxo de gás, relacionando com propriedades geotécnicas do solo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Aterros Sanitários

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) está intimamente ligada ao crescimento populacional. Em países subdesenvolvidos a geração de lixo torna-se um grande problema, uma vez que quanto mais resíduo é gerado, mais recursos são necessários para a sua coleta e tratamento. Resíduos sólidos que não recebem um tratamento adequado podem ser responsáveis por uma série de problemas ambientais e de saúde pública (ROSE, 2009).

Como forma de tratamento e disposição final dos resíduos gerados são utilizados aterros sanitários, que são obras de engenharia projetadas sobre critérios técnicos com o objetivo de mitigar os danos à saúde e ao meio ambiente. Por ser uma obra segura, o aterro impede que a água da chuva infiltre e aumente a geração de lixiviado, bem como garantir também que haja um maior aproveitamento do biogás gerado durante todo o processo de degradação. Aterros sanitários são bastante utilizados em países em desenvolvimento por sua facilidade em operação e por ter um custo de manutenção relativamente baixo (COSTA, 2015; MARIANO, 2008).

Segundo Ricken e outros (2004) os aterros de RSU são operados como grandes biorreatores e dentro dos mesmos ocorrem uma série de reações metabólicas, como processos físicos, químicos e biológicos que garantem a degradação da fração orgânica de resíduos, gerando consequentemente efluentes líquidos e gasosos.

Com o propósito de garantir uma impermeabilização do aterro no local de instalação, após a deposição do resíduo é necessário fazer uma camada de cobertura final para certificar que não haja a proliferação de vetores (roedores, insetos e aves), bem como minimizar que gases provenientes da degradação dos resíduos sejam lançados para a atmosfera. Se aplicada de forma adequada, a utilização de camadas de cobertura é capaz de diminuir significativamente uma série de problemas ambientais que porventura possam vir a acontecer (HRAD *et al.*, 2012; TEIXEIRA, 2008).

3.2 Mecanismo de formação do biogás em aterros sanitários

Através de processos biológicos e físico-químicos ocorre a degradação dos resíduos sólidos presentes na massa do aterro. Tal processo é catalisado pela presença de água, que por

sua vez está presente nos resíduos tanto pela umidade inicial quanto pela água das chuvas (CASTILHOS JR *et al.*, 2003).

A produção de biogás em aterros sanitários é comumente realizada a partir da decomposição biológica dos resíduos e também através de reações químicas. Através do processo de decomposição, bactérias transformam componentes orgânicos em compostos voláteis. Em seguida, reações químicas ocorrem através do contato dos resíduos com os gases reativos que foram gerados no aterro (USEPA, 1991).

3.3 Fatores que influenciam a composição e emissão do biogás

A composição do biogás está atrelada às características do tipo de material que foi degradado. Desta forma é possível que em diferentes locais do aterro possam ocorrer o aparecimento de tipos de biogás com composições diferentes. De acordo com a Environment Agency (2004), existe uma série de fatores que podem alterar esta composição, entre elas podemos citar: idade do resíduo, características hidráulicas do local, propriedades físico-químicas do resíduo, temperatura do aterro, diferenças da composição do resíduo, armazenamento e pré-tratamento, entre outras. Quaisquer mudanças nestas características podem alterar a composição do biogás, uma vez que poderão haver mudanças no comportamento das bactérias responsáveis pela degradação da matéria orgânica.

Em relação a fatores como emissão, quantidade e pressão que o biogás chegará na camada de cobertura, todos irão depender da forma de como ocorreu a decomposição dos resíduos e também da eficiência do sistema de drenagem de gás do aterro. Através da análise destes fatores é possível descrever se o fluxo de gases até a camada de cobertura foi devido ao processo de advecção ou por difusão (MACIEL, 2003).

Fatores climáticos também podem alterar a emissão de gases do aterro para a atmosfera. Christensen e outros (2001) afirma que há uma diminuição da quantidade de gases emitidos durante os períodos de precipitação de chuva. Segundo McBain e outros (2005), tal fato ocorre porque durante a chuva os poros presentes na camada de cobertura são preenchidos por água.

Um fator que aumenta a emissão de biogás para a atmosfera é o aumento da temperatura ambiente. Segundo Maciel (2003), a temperatura ambiente também influencia no aumento da temperatura do solo. De acordo com o trabalho de Park e Shin (2001) há um acréscimo no fluxo de gás à medida que há uma elevação na temperatura ambiente. Realizando análises de fluxo de gás durante um período de 24 horas, observou-se que entre o período de 20:00 às 4:00 horas,

o fluxo de gás emitido era mínimo quando comparado com as medições realizadas durante o período entre às 12:00 e 18:00 horas. Tal experimento foi realizado em diferentes épocas do ano, onde a temperatura do solo variou de -10 a 35 graus Celcius (C°).

3.4 Efeito estufa e o aquecimento global

O efeito estufa nada mais é do que um sistema que controla a temperatura na terra de forma natural, fazendo com que a mesma se eleve a aproximadamente 30 °C. Dentre os principais gases de efeito estufa (GEE) destacam-se CO₂, CH₄ e o N₂O, que são agentes determinantes na temperatura atual do planeta. Sem a presença destes gases, a temperatura média na Terra seria de -20 °C. O aumento da concentração destes gases na atmosfera está intimamente atrelado a quantidade de calor retido, e nos últimos anos, devido as altas emissões destes gases na atmosfera, a temperatura média na Terra tem aumentado, caracterizando assim, como o aquecimento global (UNEP, 2005).

Segundo a UNEP (2005), a elevação da temperatura no planeta, caracterizada pelo efeito estufa, tende a trazer uma série de consequências tanto no clima como no ciclo hidrológico, atingindo assim a fauna e a flora mundial bem como no aumento do nível dos oceanos devido ao derretimento das geleiras. De acordo com Solomon e outros (2007) estas afirmações são baseadas em fatores como: aumento da temperatura média global do ar nos últimos 150 anos e também na aplicação de modelos para simulação do clima com o aumento de concentrações de gases de efeito estufa.

3.5 Gases emitidos por aterros sanitários

Durante o processo de degradação da matéria orgânica há a formação de uma série de gases que se não forem corretamente controlados serão encaminhados para a atmosfera, influenciando, assim, diretamente no fenômeno de “efeito estufa”. Mesmo após o fechamento do aterro, ainda ocorre a degradação da matéria orgânica por microrganismos e consequentemente a formação de gases. Com isso, é de extrema importância que seja realizado o monitoramento do aterro com a intenção de evitar problemas de saúde pública e ambientais (FERNANDES, 2009; GOUVEIA, 2012).

3.5.1 Compostos Orgânicos não-metanogênicos (NMOC)

Através de processos químicos e biológicos que ocorrem nos resíduos sólidos durante o processo de biodegradação, são gerados vários compostos provenientes do carbono, como álcool, acetona, ácidos orgânicos, furanos e compostos sulfurados. As concentrações destes compostos dependem do local onde está situado o aterro e também da natureza dos resíduos depositados. Tais compostos orgânicos constituem cerca de 1% do volume do biogás (FISCHER *et al.*, 1999).

3.5.2 Dióxido de Carbono (CO₂)

O CO₂ é um dos principais gases gerados no aterro sanitário. Tal fato ocorre, pois, o mesmo é decorrente da biodegradação dos resíduos sólidos e pode ser produzido tanto por bactérias aeróbias como por bactérias anaeróbicas. Sua concentração no solo varia entre 0,04% e 2%. Caso haja um aumento deste nível de concentração, haverá uma toxicidade que irá prejudicar consideravelmente o desenvolvimento de diversas plantas. No entanto, algumas plantas conseguem se desenvolver com uma taxa de CO₂ na faixa de 5%, mas isso varia de acordo com o tipo de espécie. O dióxido de carbono pode ser classificado como um gás intermediário entre tóxico e não-tóxico, que quando em baixas concentrações não apresenta risco eminente, porém, quando a sua concentração passa dos 5% há um grande risco associado (FISCHER *et al.*, 1999).

3.5.3 Hidrogênio (H₂)

O hidrogênio é produzido nos aterros sanitários por bactérias acetogênicas e fermentativas, e em seguida consumido por bactérias metanogênicas. Durante o processo de biodegradação ocorre uma produção de H₂ maior que a quantidade consumida, ocasionando no acúmulo deste gás em aterros sanitários, principalmente em aterros recém-construídos. A fiscalização da quantidade de H₂ em aterros sanitários é de extrema importância, porque além de sua característica inflamável, o mesmo é também um gás inodoro e incolor tornando difícil a percepção de algum tipo de vazamento, podendo vir a ocasionar possíveis explosões (FISCHER *et al.*, 1999).

3.5.4 Metano (CH_4)

De todo o biogás gerado no aterro sanitário, entre 45 a 60% da sua composição é composta de metano, sendo o restante da composição formada por CO_2 , vapor de água e outros gases. O CH_4 é proveniente da biodegradação da matéria orgânica através de bactérias anaeróbias metanogênicas. O mesmo é extremamente inflamável, tornando-se um dos principais gases responsáveis pelo aquecimento global (ROSE, 2009).

A maior causa geradora de fontes emissoras de metano na atmosfera tem origem antropogênica. Humer e Lechner (1999) afirmam que cerca de 40 a 60 milhões de toneladas de metano são anualmente gerados por aterros sanitários. Em um período de 10 a 40 anos um aterro sanitário pode gerar aproximadamente 125 metros cúbicos de metano para cada tonelada de resíduo. Devido a sua alta produção em aterros sanitários, tem-se feito o reaproveitamento deste biogás para a geração de energia elétrica.

3.6 Sistemas de cobertura final em aterros sanitários.

A escolha do tipo de camada de cobertura a ser utilizada no fechamento do aterro é um dos pontos mais importantes, uma vez que sua utilização está intimamente relacionada ao desempenho do aterro. Dentre as várias funções da camada de cobertura são evidenciadas a diminuição da proliferação de vetores e odores, proteção contra a ação antrópica, controle do fluxo de gás e diminuição da infiltração de água (VIEIRA, 2005).

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 intercalas 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).

A escolha da utilização de uma camada alternativa ou convencional irá depender das condições climáticas do local, da disponibilidade de material argiloso e do custo. Dentre todos estes fatores, a aplicação de camadas alternativas do tipo oxidativa e evapotranspirativa tem sido de grande interesse porque a mesma é capaz de controlar a emissão de gás para a atmosfera através de um baixo custo. Dentre os diversos materiais que podem ser utilizados, temos:

misturas de solos naturais com bentonita, materiais plásticos, papéis e compostos orgânicos (MARIANO, 2008).

3.6.1 *Camadas convencionais.*

A principal função de uma camada de cobertura é atuar como uma barreira impermeável entre o aterro e o ambiente externo. Esta barreira tem como finalidade garantir que a água proveniente das chuvas não penetre no interior do aterro e, conseqüentemente, produza ainda mais lixiviado. Nesse tipo de camada são utilizados solos com diferentes graduações e aplicação de material geossintético, que servirá para garantir ainda mais que a água da chuva não percole na massa do aterro (TEIXEIRA, 2008).

Segundo Fourie e Moonsammy (2002) um dos problemas do uso de camadas convencionais é ocasionado devido ao uso de materiais com baixa permeabilidade, fazendo com que o excesso de água da chuva não infiltre, acarretando assim em um escoamento superficial. Em regiões de clima semiárido este processo ocasiona alguns problemas como fissuras, derivando assim a fuga do gás presente no interior da célula do aterro, tornando a camada ineficiente. Em regiões de clima úmido e temperado este tipo de camada tem se mostrado eficiente, pois a cobertura mais próxima da superfície tende a se manter saturada devido ao excesso de precipitação sobre a evaporação, ou seja, nessas regiões chove-se mais do que se evapora.

3.6.2 *Camadas alternativas*

- *Camadas Evapotranspirativas*

A utilização de camadas evapotranspirativas tem se mostrado bastante eficiente na aplicação em aterros sanitários, uma vez que a mesma é capaz de fazer uma barreira econômica e eficaz. Por possuir uma funcionalidade estrutural natural, a camada evapotranspirativa participa dos processos naturais do ambiente, criando assim uma barreira que impeça a percolação de água (HAUSER *et al.*, 2001).

O funcionamento deste tipo de sistema de cobertura é baseado no estudo do balanço hídrico da região, logo são necessários conhecimentos da capacidade de armazenamento de água no solo, da precipitação incidente naquele local, do escoamento superficial, da infiltração

e por fim da evapotranspiração. A eficácia da camada se dará pela capacidade do solo em evaporar e armazenar a água incidente, garantindo assim que o mínimo de água seja percolada para a massa de resíduo (USEPA, 2003).

As camadas evapotranspirativas possuem em sua composição uma camada formada por um material fino, geralmente constituído por argila ou silte argiloso e também por outra camada de material mais grosso, como por exemplo areia. A quantidade de camadas a ser utilizada dependerá das características do solo do local onde o aterro está implementado. A utilização deste tipo de barreira é bastante útil, porque além de garantir que não haja infiltração da água das chuvas, consegue-se pelo mesmo motivo propiciar um ambiente ideal para que micro-organismos consigam interagir e alterar suas características antes da evasão do biogás para a atmosfera (TEIXEIRA, 2008).

- Camadas Oxidativas

Para a formação de camadas oxidativas em aterros sanitários, são utilizados compostos orgânicos, pois assim há a criação de um ambiente propício para os microrganismos responsáveis pelo consumo de metano gerado durante a biodegradação dos resíduos sólidos. O processo de oxidação do metano ocorre através de bactérias metanotróficas na presença de oxigênio, gerando no final deste processo dióxido de carbono e água. A aplicação de camadas oxidativas não garante a minimização da quantidade de biogás que irá para a atmosfera, porém auxilia na diminuição dos impactos ambientais que o mesmo pode ocasionar (HUMER *et al.*, 2009; MARIANO, 2008).

Segundo Rose (2009), dentre os fatores que podem comprometer o desempenho deste tipo de camada de cobertura podemos citar: teor de umidade, quantidade de oxigênio disponível, concentração de metano, pressão atmosférica, temperatura e grau de compactação da camada de cobertura. Dentre as diversas propriedades físicas, a porosidade da camada ganha destaque devido a sua capacidade de afetar o coeficiente de difusão do gás. Para garantir a funcionalidade deste tipo de camada e que ocorra a oxidação do metano gerado é necessário que o biogás atravesse essa camada (COSTA, 2015; KETTUNEN *et al.*, 2006).

De acordo com Gebert e outros. (2011), as propriedades químicas do material de cobertura bem como variáveis ambientais podem alterar significativamente a eficiência da oxidação do metano nestas camadas. A compactação e a textura do solo determinam tanto a eficácia da retenção de água na camada como a taxa de metano e oxigênio disponível para os

microrganismos que oxidam o metano. Gebert e outros (2011) realizou estudos de colunas e testes de difusão afim de verificar o efeito da porosidade e do grau de compactação na eficiência de oxidação do metano em camadas de cobertura. Neste estudo foi verificado que colunas de solo com grau de compactação na ordem de 75%, apontaram melhores resultados quando submetidos a um fluxo baixo de 3,5 g CH₄/m².h, apresentando eficiência de 100% na oxidação do metano pelas camadas de cobertura.

3.7 Oxidação do metano na camada de cobertura

Para que seja feito um aproveitamento do biogás gerado dentro do aterro é necessário que o aterro disponha de drenos capazes de canalizar esse gás até o local onde o mesmo será reaproveitado. Mesmo com todo o sistema de captação e canalização, ainda é possível que parte do metano gerado seja lançado para a atmosfera através das camadas de cobertura. Desta forma, a oxidação do metano no ambiente é um processo natural realizado pelas bactérias metanotróficas, que desempenham esta atividade quando entram em contato com o oxigênio e metano simultaneamente (HANSAN; HANSON, 1996).

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, a umidade, a 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, porque, esta característica afeta diretamente o coeficiente de difusão de gás (HILGER; 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 (NH₄⁺) no solo tende a inibir a atividade destas bactérias.

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 microbológica o metano será convertido em água, CO₂ e biomassa, sendo, por conseguinte, lançado para a atmosfera de forma menos poluente (BAHR *et al.*, 2006).

3.8 Uso de material compostado e solo na camada de cobertura

A compostagem é um processo biológico onde há decomposição da matéria orgânica em um produto estabilizado. O material resultante possui características e propriedades totalmente diferentes do material que lhe deu origem. O processo de biodegradação é uma alternativa para o tratamento de resíduos orgânicos (BIDONE, 2001). Para que o processo seja eficiente é necessário que uma série de condições como temperatura, umidade, aeração, pH, relação carbono/nitrogênio (C/N), dimensões das leiras e o tipo de composto orgânico estejam favoráveis para que haja interações entre os microrganismos durante o processo (PEREIRA; FIALHO, 2013).

Antes de começar a utilizar um composto orgânico como camada de cobertura é preciso verificar se o mesmo está estabilizado, pois caso o composto esteja imaturo podem ocorrer problemas de instabilidade devido a uma limitação de oxigênio, porque o material compostado também estará fazendo a sua respiração, além de que também serão formadas substâncias exopoliméricas (HUMER; LECHNER, 1999; HUMER, 2004).

O desempenho da camada de cobertura é melhorado quando se faz a utilização de composto, segundo Pereira Neto (2007) a matéria orgânica se liga aos componentes do solo formando pequenos grânulos capazes de ajudar no processo de drenagem da água incidente na camada. Esta mistura de solo com composto amplia a capacidade do solo em reter água, bem como aumenta a capacidade de permeabilidade do solo, sendo essa outra vantagem da utilização deste material.

De acordo com Humer e outros (2009), o aumento da matéria orgânica no solo fornece alimento para as bactérias metanotróficas, que por sua vez aumentarão a capacidade oxidativa da camada. A utilização de composto trará uma série de benefícios para o solo, como: aumento da capacidade de retenção de água, aumento da porosidade do solo, aumento da permeabilidade ao gás. Segundo Wilshusen e outros (2004) um solo com material compostado facilita a

oxidação do CH₄ e facilita a transformação do metano em um composto maduro e bem estruturado.

3.9 Fluxo de água e gás no solo

A precipitação é um dos fenômenos naturais que exerce maior influência sobre as atividades do homem e qualidade do meio ambiente. A quantidade de chuva a se inserir em um local está atrelada as condições do ambiente e também ao seu regime sazonal. Tal processo é capaz de afetar diretamente e indiretamente a população, o meio e a economia como um todo (NERY *et al.*, 2009).

A infiltração é um processo pelo qual a água penetra na superfície do solo. Esta infiltração vai depender das características do solo, como umidade e o perfil de sucção do mesmo (VIEIRA, 2005). A taxa de infiltração em aterros sanitários que utilizam material argiloso para fazer a sua cobertura final irá depender principalmente da umidade inicial do solo, da distribuição, tamanho dos poros e também da condutividade hidráulica do mesmo (MATEUS, 2008; TOZETTO, 2008).

Em aterros sanitários as ações das chuvas são capazes de influenciar a quantidade de gases que serão emitidos para a atmosfera, pois há um controle da umidade do solo e da sua temperatura. O solo com umidade adequada terá uma influência no teor de oxigênio da camada que, por conseguinte, afetará a atividade das bactérias metanotróficas nas camadas de cobertura Gebert e outros (2011). Estas bactérias desempenham melhor o processo de oxidação do metano em ambientes mais equilibrados e com umidade próxima da umidade ideal (ZHANG *et al.*, 2008; ZHANG *et al.*, 2013).

Para um melhor desempenho das camadas de cobertura é importante levar em consideração que diante dos processos de umedecimento e secagem, a camada vai perdendo com o decorrer do tempo um pouco de suas propriedades hidráulicas e, desta forma, se faz necessário um estudo prévio principalmente da frente de umedecimento, com a finalidade de evitar possíveis problemas por ressecamento (RÖMKENS; PRASAD, 2006).

O processo de percolação de gases no solo vai depender primordialmente das propriedades do solo, como: tipo do solo, disposição das partículas, índice e disposição dos vazios, porosidade, densidade, entre outras (MACIEL, 2003). Segundo Lopes (2011) fatores atrelados à mineralogia do solo e ao fluido percolante também influenciam na permeabilidade.

Teixeira (2008) ressalta que a movimentação e o transporte dos gases no interior do aterro se dá basicamente de duas formas: por difusão e por advecção. No fluxo advectivo, o gás tenta equilibrar o gradiente de pressão do ambiente, ou seja, o gás migra dos lugares de maior pressão para os lugares de menor pressão. Maciel (2003) afirma que o fluxo por difusão está atrelado a interação molecular, onde quando o gás está mais concentrado em algum lugar ele tende a se deslocar para a região de menor concentração.

Nos aterros sanitários as variações de pressão interna, gerada pela decomposição dos resíduos, e externa, devido as variações da pressão atmosférica, são as principais responsáveis pela movimentação do fluxo de gás por advecção. Mitchell (1991) ressalta que geralmente o transporte difusivo é bem menor quando comparado ao transporte advectivo, no entanto em situações em que o gradiente de pressão é nulo ou quando o coeficiente de permeabilidade do solo é inferior a 10^{-9} m/s, o transporte difusivo pode superar o transporte advectivo.

3.10 Sucção

A capacidade de sucção de um solo é caracterizada pela pressão existente nos poros de solos não saturados afim de uma maior absorção de água e também pela energia necessária para remoção de moléculas de água presente em poros de um material (MARINHO, 2006).

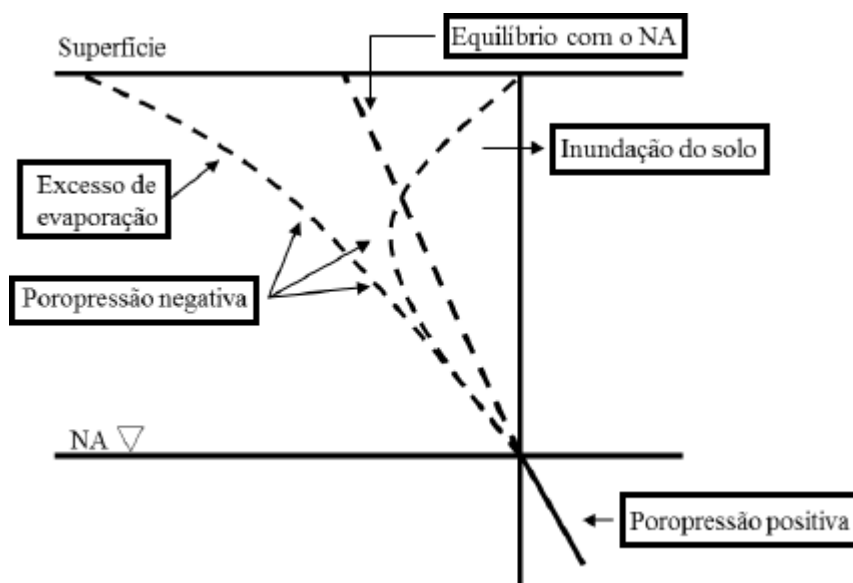
De acordo com Lee e Wray (1995), sucção é a energia do solo que está atrelada ao seu poder de retenção de água. Para que haja retirada desta água nos poros é necessário que tenha uma energia que contraponha ao poder de retenção do solo. Sendo assim, essa energia aplicada por unidade de volume de água é denominada como sucção do solo.

Segundo Jucá (1990) sucção é um estado de tensão onde o solo apresenta propriedades capazes de absorver ou de reter água, e que ainda pode ser subdividida em dois tipos, que são:

- **Sucção Matricial:** É definida como um fenômeno físico que ocorre na interface água-ar, devido a uma tensão superficial que é caracterizada como uma pressão negativa que a água exerce no solo devido a forças capilares e de adsorção.
- **Sucção Osmótica:** É a sucção que ocorre devido a presença de sais na água, ou seja, está ligada às concentrações químicas presentes no meio.

A variação da sucção matricial está atrelada a uma série de fatores, que vão desde as questões ambientais como o clima e nível do lençol freático, bem como às propriedades e características do solo, que são: granulometria, índice de vazios, mineralogia e grau de saturação. Devido à heterogeneidade do solo é possível que um mesmo solo apresente variação da sucção, desta forma, a Figura 1 elucida este fenômeno em um dado perfil de solo (MENEZES, 2013)

Figura 1: Variação da sucção em um perfil de solo



Fonte: O Autor (2017)

Nota: Adaptação de Fredlund, Rahardjo, 1993

De acordo com a Figura 1 é possível observar que a poropressão é positiva nas camadas de solo abaixo do lençol freático, ou seja, onde há a saturação do solo. Já nas partes acima do lençol freático a poropressão é negativa e a sucção aumenta em direção à superfície. Caso ocorra algum evento de infiltração ou de inundação no solo as taxas de sucção do solo podem reduzir drasticamente, já em relação a uma atenuação da taxa de evaporação os valores de sucção se elevam.

A capacidade de determinado solo reter e conduzir água depende de características granulométricas, mineralógicas e estruturais. De acordo com o coeficiente de Pearson, que é um indicador que mostra a relação existente entre as características do solo e a umidade retida, a argila detém uma correlação positiva enquanto que a areia apresenta uma correlação negativa.

A granulometria do solo é a característica que melhor descreve a sua eficiência na retenção de água no solo (URACH, 2007).

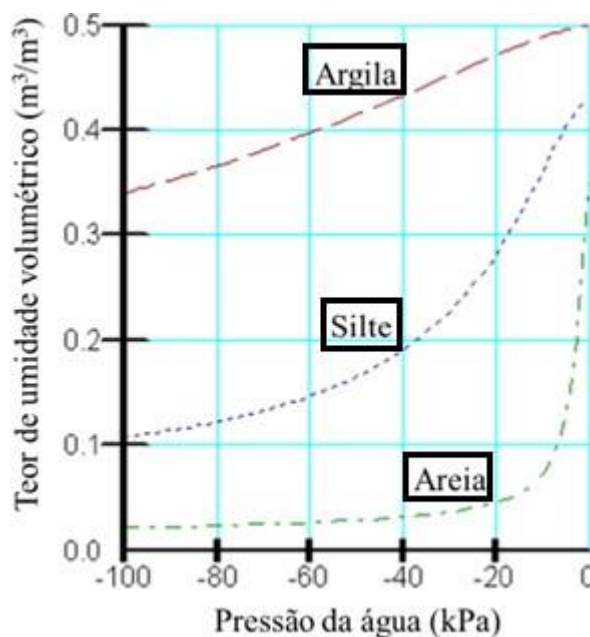
3.11 Curva de Retenção da água

A curva de retenção de água no solo é caracterizada pela relação entre a umidade e o potencial matricial do solo e seu conhecimento é fundamental para determinação das propriedades hidráulicas do solo (CICHOTA, 2004).

É importante salientar que a partir de algumas características do solo é possível que haja uma influência na curva de retenção, dentre estas particularidades podemos citar: forma, tamanho e arranjo das partículas do solo (SALTER; WILLIANS, 1965), presença de matéria orgânica, umidade, tamanho e estrutura dos poros (KUTLE, 1986).

De acordo com Santos (2015) dentre os fatores que são determinantes para caracterizar a forma e a inclinação da curva de retenção de água no solo, a composição mineralógica e a geometria dos poros presente são os mais significativos. A variação do teor de umidade de solos submetidos a sucção vai depender principalmente do efeito da capilaridade do mesmo, bem como da distribuição de poros no solo. Desta forma, em solos argilosos, mesmo quando submetidos a elevados valores de sucção, a água retida fica adsorvida às partículas, acarretando assim em um teor de umidade superior ao encontrado em siltes e areais. O Gráfico 1 mostra esta afirmação.

Gráfico 1: Curvas típicas de retenção de água para três tipos de solo



Fonte: O Autor (2017)

Nota: Adaptação de SEEP, 2012

De forma geral, com o aumento da sucção há uma redução no teor de umidade volumétrica, e dentre os três tipos de solo, a argila é a que apresenta a maior capacidade de retenção de água em relação ao silte e areia.

3.12 Parâmetros geotécnicos

- Ensaio de adensamento

Segundo Terzaghi (1943), os recalques ou adensamentos que podem ocorrer em campo são subdivididos em inicial, primário e secundário. Os recalques iniciais ocorrem após a aplicação de carga e esta deformação se procede sem que haja a expulsão de água. O recalque primário é associado pela expulsão de águas nos vazios presentes no solo. De forma geral, em solos finos, estes dois tipos de recalques ocorrem simultaneamente.

O recalque secundário é compreendido pelas deformações observadas no solo após o final do processo de adensamento, e seu resultado é em relação ao índice de vazios e o tempo, sob tensão efetiva constante. Comumente, o adensamento secundário é menor que o

adensamento primário, exceto em argilas muito plásticas e em solos orgânicos, onde os resultados de adensamento secundário são mais significativos.

Para a análise do comportamento de solos compressíveis quando submetidos a carregamentos verticais é utilizada a teoria desenvolvida por Terzaghi (1943). De acordo com a teoria de adensamento, há uma distribuição de poropressões ao longo da camada e várias hipóteses, como: solo homogêneo e saturado, validade da lei de Darcy, as partículas sólidas e a água são virtualmente incompressíveis, o adensamento é unidirecional e principalmente a redução linear do índice de vazios com o aumento das tensões efetivas (TERZAGHI, 1943).

- Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento do solo é definida como a tensão cisalhante que ocorre no plano de ruptura no instante da ruptura. O modelo proposto para determinação da resistência ao cisalhamento dos solos saturados foi proposto por Terzaghi (1936) e é baseado no critério de ruptura de Mohr-Coulomb (Equação 1).

$$\tau = c' + (\sigma - uw) \tan \phi'$$

EQUAÇÃO 1

Onde:

τ : tensão cisalhante;

c' : intercepto de coesão efetiva do solo;

σ : tensão total normal;

uw : poro-pressão do solo;

$(\sigma - uw)$: tensão efetiva normal;

ϕ' : ângulo de atrito efetivo do solo;

Para que ocorra a ruptura do solo é necessário que haja a formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa do solo. Durante o processo de ruptura, a camada de solo em torno da superfície de cisalhamento perde suas características, ocasionando assim uma zona cisalhada e uma superfície de cisalhamento, tal processo ocorre tanto em ensaios de cisalhamento como nos escorregamentos de taludes (GERSCOVICH, 2010).

De acordo com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e das variáveis de estado, Fredlund e outros (1978, apud FREDLUND; RAHARDJO 1993) definiu a resistência ao cisalhamento de solos não saturados da seguinte maneira (Equação 2).

$$\tau = c' + (\sigma - ua) \operatorname{tg} \phi' + (ua - uw) \operatorname{tg} \phi' b$$

EQUAÇÃO 2

Onde:

τ : tensão total;

c' : intercepto coesivo efetivo;

ϕ' : ângulo de atrito efetivo;

$\phi' b$: ângulo de atrito relacionado com a sucção matricial;

A Equação 2 é comumente representada em um gráfico tridimensional, onde a tensão cisalhante é representada no eixo das ordenadas e as variáveis de estado de tensão são plotadas no eixo das abscissas. Este gráfico tridimensional é denominado como envoltória de Mohr-Coulomb onde há uma representação da relação não linear entre a resistência ao cisalhamento e a sucção matricial (SANTOS, 2015).

Para determinar os parâmetros de resistência do solo (c' , ϕ'), normalmente são utilizados os ensaios de cisalhamento direto e triaxial. Dentre os ensaios triaxiais o ensaio comumente empregado é o ensaio consolidado não-drenado (CU). Neste experimento é feita saturação do corpo de prova e em seguida é aplicado uma pressão de fluido na câmara do equipamento até que o mesmo seja adensado. Com a aplicação da tensão de confinamento há a dissipação da poro-pressão e aumento da tensão desviadora até que ocorra a ruptura por cisalhamento. A condição não drenante durante o experimento é causante do aumento da poro-pressão. Através do ensaio de compressão triaxial é possível determinar a relação entre a tensão cisalhante versus deformação específica axial bem como a envoltória de Mohr-Coulomb para as tensões efetivas e tensões totais para cada tipo de material (SANTOS, 2015).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta para a realização deste estudo é dividida em duas etapas: 1) coleta, caracterização e propriedades geotécnicas dos solos e do composto que serão utilizados para a confecção das camadas oxidativas e 2) realização dos ensaios de coluna e verificação do comportamento da camada de cobertura final quando submetida ao fluxo de metano.

4.1 Coleta, caracterização e propriedades geotécnicas do material utilizado para a camada oxidativa

Para a confecção da camada oxidativa foi necessário fazer a mistura do composto orgânico com os dois tipos de solo. Inicialmente foi feito a coleta do solo de uma jazida localizada nas proximidades do Aterro da Muribeca, onde inclusive este mesmo solo era utilizado para a confecção das camadas de cobertura do próprio aterro. Para melhor diferenciação, este solo foi denominado "solo A". O segundo solo foi coletado dentro da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Agreste, na cidade de Caruaru, PE, Brasil. Este solo titularemos de "solo B". O composto orgânico utilizado foi oriundo de uma composteira localizada no Jardim Botânico da cidade do Recife, PE, Brasil.

Posteriormente foram feitos os ensaios de laboratórios para a caracterização física e determinação das propriedades dos materiais utilizados para a camada. Os ensaios foram realizados no solo puro A e B; produto compostado e nas misturas de solos com produto compostado, em uma proporção de 2:1 e 1:1 de solo composto.

Os ensaios executados foram:

- Preparação de amostras (NBR-6457/86);
- Análise granulométrica (NBR-7181/88);
- Limite de liquidez (NBR-6459/84);
- Limite de Plasticidade (NBR-7180/84);
- Peso específico dos grãos (γ_s)- método do picnômetro (NBR-6508/84);
- Ensaio Proctor Normal (NBR-7182-88);
- Ensaio de Compressão Triaxial - ASTM D4767;
- Ensaio de Adensamento Unidimensional (NBR 12007/90);
- Ensaio de Sucção do solo compactado – ASTM D5298-03;

- Permeabilidade a água – ASTM D 5084;
- Permeabilidade ao ar e com adaptações ao sistema do permeâmetro de parede flexível, Tri-flex 2 - Soil Test – ELE realizadas por Maciel (2003).

Todos os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia Ambiental, localizado na UFPE campus Recife.

4.1.1 Ensaios de Permeabilidade

Para execução dos ensaios de permeabilidade a água e ao ar, foram moldados corpos de prova com os dois tipos de solo que foram utilizados nas camadas de cobertura, nas proporções de 1:1 e 2:1 de solo composto. Ambos os corpos de prova foram compactados com energia de um Proctor Normal, com massa específica seca máxima, umidade ótima e formato cilíndrico com as seguintes dimensões: $H = 12,7$ cm; $D = 10$ cm e $A = 78,54$ cm².

- *Permeabilidade a água*

Para realização do ensaio de permeabilidade à água foi tido como base a norma ASTM D5084-10 (ASTM, 2010) e foi utilizado o permeâmetro de parede flexível modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE com algumas adaptações feitas por Maciel (2003), Mariano (2008) e Costa (2015). A Foto 1 ilustra o equipamento utilizado neste ensaio.

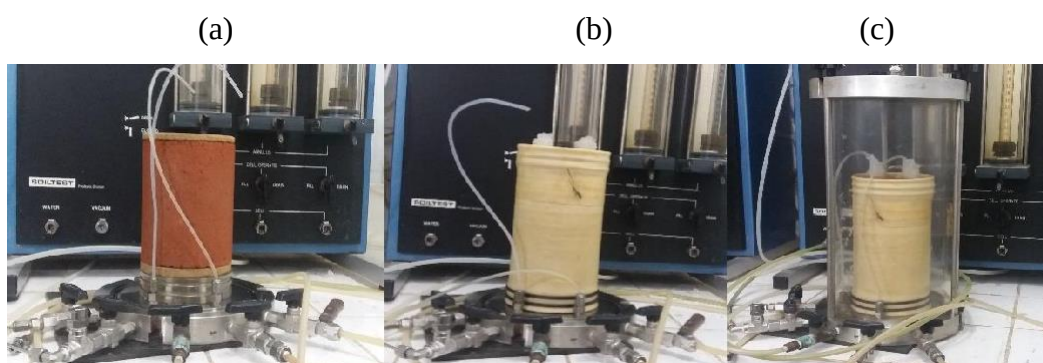
Foto 1: Equipamento Tri-flex 2 da Soil Test – ELE



Fonte: O Autor (2017)

Para dar início ao procedimento, coloca-se em cima do corpo de prova um conjunto composto de papel filtro, pedra porosa e “top cap”, seguindo esta sequência. Feito isto, coloca-se no corpo de prova uma membrana de látex e ligas de borracha, afim de evitar seu contato lateral com a água. Por fim, o corpo de prova é inserido na câmara de acrílico, como mostra a Foto 2 (SILVA, 2005).

Foto 2: Ensaio de permeabilidade à água



Fonte: O Autor (2017)

Nota: (a) Amostra com pedra porosa; (b) Amostra com membrana e ligas de borracha; (c) Amostra dentro da câmara de acrílico

Com a amostra já dentro da câmara faz-se a conexão da célula de acrílico ao equipamento através das tubulações, permitindo a entrada de água até encher a célula por

completo, em seguida faz-se a drenagem da água destilada até que não se tenha mais bolhas dentro das tubulações. Quando não houver mais ar dentro do canal das três buretas do equipamento aumenta-se a pressão confinante, que no presente estudo foi até 270kPa. E assim, dar-se início ao experimento (Foto 3).

Foto 3: Câmara de acrílico contendo amostra no momento da realização do ensaio de permeabilidade a água.



Fonte: O Autor (2017)

Após determinar o tempo que a água levou para percolar dentro da amostra é necessário determinar o coeficiente de permeabilidade, que é dado em função da Equação 3;

$$K = \frac{VL}{ATP} \text{ (cm/seg)}$$

EQUAÇÃO 3

Onde:

V= Volume percolado

L= Altura da amostra

A= Área da base do corpo de prova

T= Tempo médio p/ percolação de 5 cm³ (s)

P= Gradiente psi x 70.37 cm/psi (cm - H₂O)

- Permeabilidade ao ar

Para o ensaio de permeabilidade ao ar também foi utilizado o modelo Tri-flex 2 da Soil Test – ELE com as adaptações propostas por Maciel (2003), que dentre elas, inclui a colocação de um rotâmetro na saída do corpo de prova afim de fazer a medição da vazão do fluido percolado, que neste caso é ar comprimido. Os corpos de prova utilizados e a metodologia aplicada foram os mesmos que foram utilizados no ensaio de permeabilidade à água, diferindo apenas no tipo de fluido utilizado no processo.

O controle da pressão incidente na amostra aplicada pelo permeâmetro é regulado através do painel de controle do equipamento. Desta forma, é feita uma variação na pressão aplicada e na pressão confinante, onde é possível analisar através do rotâmetro a vazão de ar percolada para cada variação de pressão. O rotâmetro utilizado é modelo série 1900, com faixa de leitura de 3 a 30 Nl/h e erro de 5%. A Foto 4 ilustra a corpo de prova já submerso dentro da câmara com o rotâmetro acima.

Foto 4: Câmara de fluxo com rotâmetro



Fonte: O Autor (2017)

Para casos em que o fluxo de ar é muito pequeno a ponto de não ser possível medir a vazão de fluido que percola na amostra é necessário utilizar outro tipo de medidor de vazão, que pode ser um rotâmetro de vazão reduzida ou fazer o uso de um fluxímetro. O fluxímetro é utilizado após a câmara de ensaio e é capaz de medir a vazão do gás através da passagem de bolhas por duas marcas no equipamento com um volume de 25ml ($r = 1,44\text{cm}$ e $h = 15,35\text{cm}$). Uma forma de garantir que a bolha não seria estourada devido ao atrito no interior do

fluxímetro, foi passado previamente no interior do equipamento um pouco de detergente (Foto 5).

Foto 5: Fluxímetro com detergente no seu interior.



Fonte: O Autor (2017)

Tendo os valores da vazão percolada através de uma variação nas pressões aplicadas é possível determinar o coeficiente de permeabilidade do fluido percolante, que deve ser calculado segundo a Equação 4:

$$K_{ar} = \frac{qL}{A \cdot \Delta p}$$

EQUAÇÃO 4

Onde:

K_{ar} = permeabilidade ao ar (m/h)

q = vazão (Nm³/s)

A = Área (m²)

L = comprimento da amostra (m)

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

4.2.2 Ensaio de Sucção

Para cada tipo de solo estudado, foram moldados 9 anéis de aço inoxidável tipo shelby com dimensões de 2cm de altura e 7,26cm de diâmetro. Destes anéis, foram destinados 3 anéis para o material de solo puro (A e B); 3 anéis para a mistura 1:1 e 3 anéis para a mistura 2:1.

Para obtenção das curvas de retenção foi utilizado o método do papel filtro, normatizado pela ASTM D5298-92, tal método se baseia no princípio de absorção, uma vez que ao colocar em contato papel filtro com um material poroso mais úmido o papel tende a absorver a água presente no meio até que haja um equilíbrio no sistema. Com esta técnica é possível obter uma relação entre a umidade ou grau de saturação e a sucção do solo. A curva característica é a relação gráfica desta relação.

Para o ensaio foi adotado o mesmo período mínimo de equilíbrio proposto por Marinho (1995), que são de 7 dias. O papel filtro utilizado foi o Whatman nº 42 que possui umidade inicial de estado seco de 6%.

Procedimento do experimento:

- Foram moldados os nove corpos de prova na umidade ótima a partir de um solo deformado amostrado. Em seguida foram escolhidos para cada tipo de material um anel que se manteria na umidade ótima (UO) e outros dois que estariam acima e abaixo da umidade ótima, como elucida a Tabela 1.

Tabela 1:Esquema da utilização dos anéis.

ANEL	Umidade
03	ABAIXO DA ÓTIMA
04	ÓTIMA
05	ACIMA DA ÓTIMA

Fonte: O Autor (2017)

- Em seguida foram colocados um anel de cada tipo de material em cima de uma pedra porosa e dentro de uma bandeja com água destilada na altura da pedra porosa, tal mecanismo foi necessário para que houvesse a saturação do corpo de prova através do processo de capilaridade. Feito isto, os anéis permaneceram dentro da bandeja em um período de 24 horas.

- Posteriormente foi colocado o papel filtro Whatman nº 42 em todas as nove amostras. Para a determinação da sucção matricial foi colocado o papel filtro diretamente em contato com o solo e para a sucção total o papel filtro foi colocado no anel, mas com uma tela espessa impedindo o contato direto. A Foto 6 mostra o processo de colocação do papel filtro no anel.

Foto 6: Posicionamento do papel filtro no anel



Fonte: O Autor (2017)

- Em seguida os anéis com seus devidos papéis filtro foram envolvidos com várias camadas de papel filme e uma camada de papel alumínio (Foto 7). Após este processo as amostras foram colocadas dentro de uma caixa de isopor para que as amostras não entrassem em contato com a umidade do ambiente externo por um período de 7 dias.

Foto 7: Processo de isolamento dos anéis



Fonte: O Autor (2017)

- Passados os 7 dias o papel filtro foi retirado de cada amostra e pesado em uma balança com precisão de 0,0001g para assim determinar o seu peso úmido.
- Após o processo de pesagem, as amostras são deixadas em repouso para que ocorra perda de umidade ao ar livre
- O papel filtro retirado das amostras são colocados em cápsulas e encaminhados para a estufa onde permanecem por 24 horas a uma temperatura de 105°C. Após as 24 horas o papel filtro volta a ser pesado, como mostra a Foto 8.

Foto 8: Pesagem do papel filtro após secagem na estufa.



Fonte: O Autor (2017)

- Para a determinação da sucção foram utilizadas as equações propostas por Chandler e outros. (1986) e todo o processo foi repetido até que a amostra apresentasse uma umidade próxima a residual. Todo o ensaio teve duração de 16 semanas.

4.2 Realização dos ensaios de coluna

4.2.1 Montagem das colunas.

Para verificar o comportamento das camadas de cobertura analisadas foram feitos uma simulação utilizando colunas de PVC (policloreto de polivinila), e para a sua confecção foi utilizado a metodologia dos ensaios de Vieira (2005) e Oliveira e Marinho (2007).

As colunas utilizadas foram as mesmas que foram empregadas por Costa (2015), que tinham as seguintes características: segmentos confeccionados de tubo de PVC rígido tendo um diâmetro interno de 0,15m e com peças nas alturas de 0,15 e 0,30m. Cada coluna tem um segmento de 0,15m e dois segmentos de 0,30m. Para melhor conexão e vedação entre os segmentos, as peças detêm na base e no topo da tubulação uma placa de PVC. Para a vedação entre cada segmento foram utilizados anéis de borracha do tipo *o-rings*, parafusos ligando as placas das peças e foram aplicados cola de silicone dentro e fora das peças para melhor garantia da estanqueidade. Na base das colunas há a presença de torneiras de passagem para melhor controle da quantidade de gás que entrará na coluna.

Dentro das colunas foram colocadas misturas de solo com composto orgânico na proporção de 1:1 de solo composto. As colunas ficaram acomodadas em uma estrutura metálica visando a facilitação do manuseio e leitura dos equipamentos. O segmento de PVC na base da coluna tem altura de 0,15m, no qual foi colocada uma camada de brita de 0,05m, em seguida foi colocado uma tela galvanizada e um geotêxtil para servir de base para as misturas. Em seguida foi feito o preenchimento do segmento de base da coluna com as misturas e foi feito a compactação, utilizando um soquete, a cada 0,05m de espessura de solo. Para melhor entendimento, nomearemos as colunas como Coluna A e Coluna B, onde a Coluna A possui a mistura com o solo A e a Coluna B a mistura com o solo B. As Fotos 9 detalham o processo de confecção das colunas.

Foto 9: Confecção das Colunas A e B



Fonte: O Autor (2017)

Nota: (a) Segmento de coluna com a brita e tela galvanizada. (b) Segmento de coluna com o geotêxtil. (c) Início da colocação das misturas na coluna.

Posteriormente foram colocados os outros dois segmentos e sensores (medidores de temperatura, condutividade e umidade). Para o encaixe dos segmentos foram utilizados anéis de vedação, parafusos com rosca do tipo borboletas, arruelas e cola de silicone. A Foto 10 ilustra a colocação dos sensores na coluna.

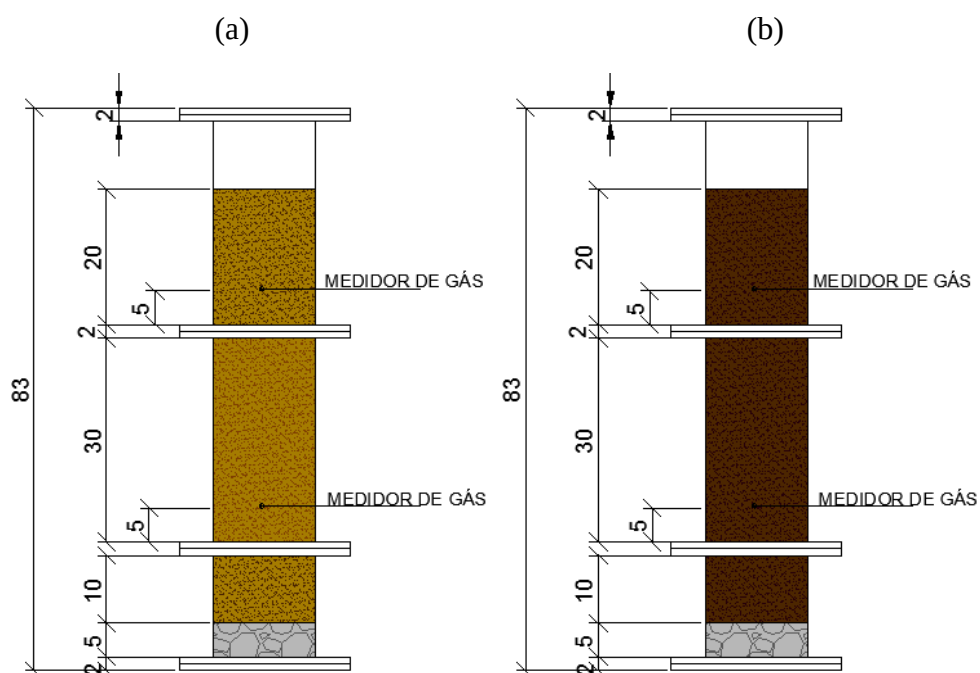
Foto 10: Detalhe do sensor dentro da coluna.



Fonte: O Autor (2017)

As compactações de ambas as misturas foram feitas na (UO) e com um grau de compactação de 75%, que é semelhante como o experimento realizado por Maciel e Jucá (2011) onde para camadas oxidativas em uma célula do Aterro da Muribeca foi utilizado um grau de compactação de 76%. A Figura 2 apresenta o esquema das colunas preenchidas utilizadas no ensaio.

Figura 2: Vista frontal das colunas preenchidas, medidas em centímetros.

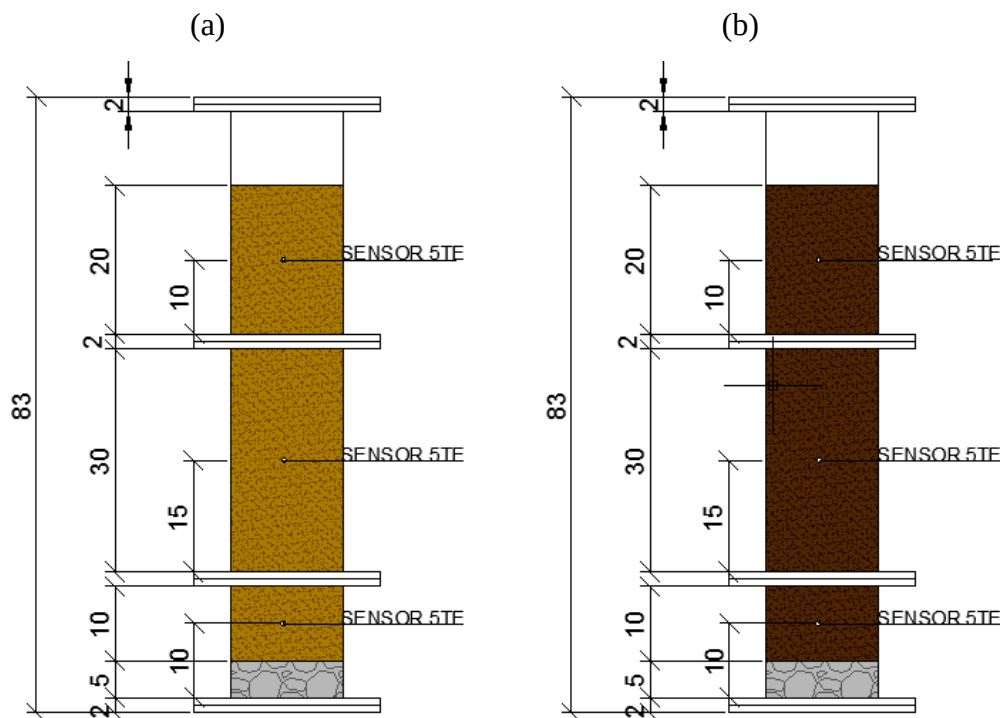


Fonte: O Autor (2017)

Nota: (a) Coluna A com Mistura A na proporção 1:1 (b) Coluna B com Mistura B na proporção 1:1

A instrumentação da coluna foi feita a partir de sensores de temperatura, umidade e condutividade elétrica e os dados foram coletados e armazenados em datalogger. Os sensores utilizados foram 5TE da marca Decagon Devices que tem capacidade de medir os três parâmetros simultaneamente. O datalogger operado foi o Em50 que é um gravador de dados compacto de 5 canais, compatível com os sensores 5TE. A Figura 3 apresenta a vista posterior da coluna onde é possível verificar a posição dos sensores.

Figura 3: Vista posterior das colunas preenchidas, medidas em centímetros.



Fonte: O Autor (2017)

Nota: (a) Coluna A com Mistura A na proporção 1:1 (b) Coluna B com Mistura B na proporção 1:1

4.2.2 Fluxo de Gás nas Colunas

O gás metano utilizado para o experimento foi adquirido em empresas de fornecimento de gases industriais, pois se trata de um gás comercial. O fluxo de metano adotado foi o mesmo proposto por Gebert e outros (2011) que para camadas oxidativas ensaiadas em laboratório adotou um fluxo de $3,5 \text{ g CH}_4/\text{m}^2.\text{h}$ para uma compactação de 75% e teve um resultado na ordem de 20-100% de eficiência na redução de CH_4 . Desta forma, a vazão de metano imposto em cada coluna foi de $0,08619 \text{ Nl/h}$ ($1,42 \text{ ml/min}$ ou $3,5 \text{ g CH}_4/\text{m}^2.\text{h}$).

Para verificar se a coluna é eficaz na oxidação do metano injetado, foi necessário fazer a medição de vazão da entrada do gás e também a coleta do gás nas saídas das colunas. Tendo feito a medição do gás na entrada e na saída é possível avaliar o desempenho da camada na retenção do gás injetado (SASSAKI, 2005). Sendo assim, para fazer a medição da vazão de entrada foi utilizada um termoanemômetro de modelo HT-9829 da marca Highmed e para a medição das concentrações de gases na saída foi utilizado um detector portátil do tipo X-am 7000 que tem capacidade de fazer a medição de até 5 gases. O limite de quantificação de gases

medidos neste equipamento é de 1% (v/v). Para o ensaio o equipamento foi ajustado para leitura dos seguintes gases: metano (CH_4), sulfeto de hidrogênio (H_2S), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2).

Para dar início ao ensaio de coluna foi verificado o tempo que seria necessário para que a coluna fosse saturada quando submetida a um fluxo de gás de $3,5\text{g CH}_4/\text{m}^2.\text{h}$, tal cálculo foi realizado baseado no índice de vazios e densidade de cada coluna. Após a saturação por completa de ambas as colunas, para garantir uma margem de segurança, triplicou o tempo necessário para a saturação.

Para a coleta dos gases nas saídas das colunas foi utilizado uma tampa com uma válvula reguladora que tinha como finalidade servir de encaixe para o equipamento X-am 7000. Durante todo o ensaio a coluna manteve-se aberta e coberta por um plástico afim de que as misturas não perdessem umidade para o meio (Foto 11).

O ensaio foi realizado durante trinta dias com injeção de um fluxo ininterrupto de metano e as medições foram realizadas em dias alternados, totalizando 12 medições.

Foto 11: Sistema de colunas em funcionamento



Fonte: O Autor (2017)

5 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de laboratório que tem como finalidade propor a utilização de camadas de cobertura do tipo oxidativas em aterros sanitários. A princípio serão apresentados os ensaios de caracterização física e em seguida os resultados referentes ao fluxo de gás nas colunas A e B.

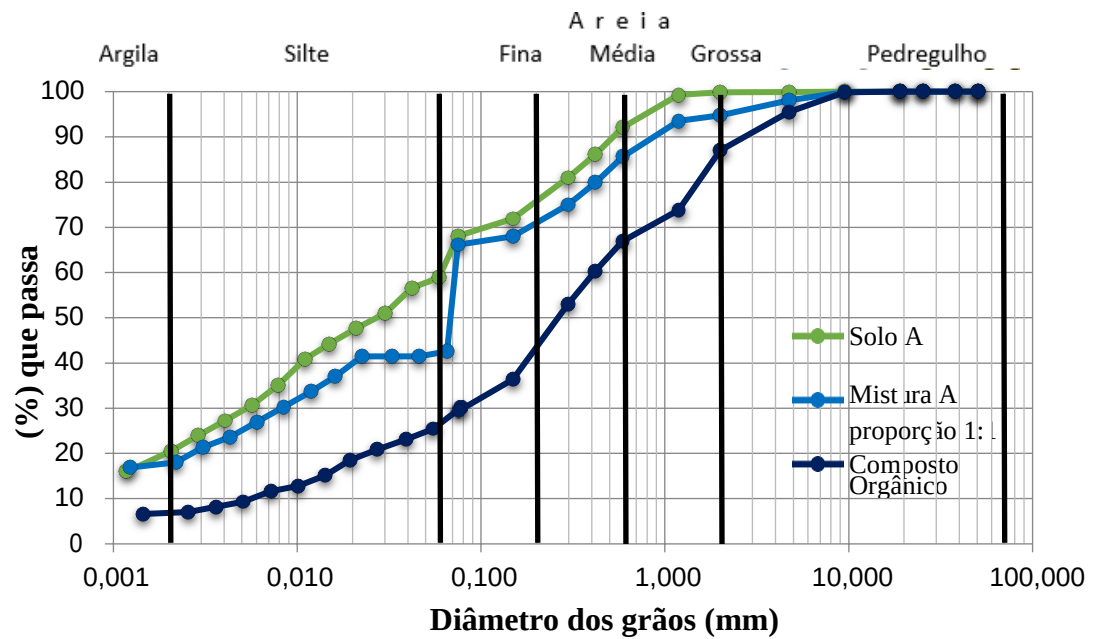
5.1 Ensaios de Caracterização Física

5.1.1 *Análise Granulométrica*

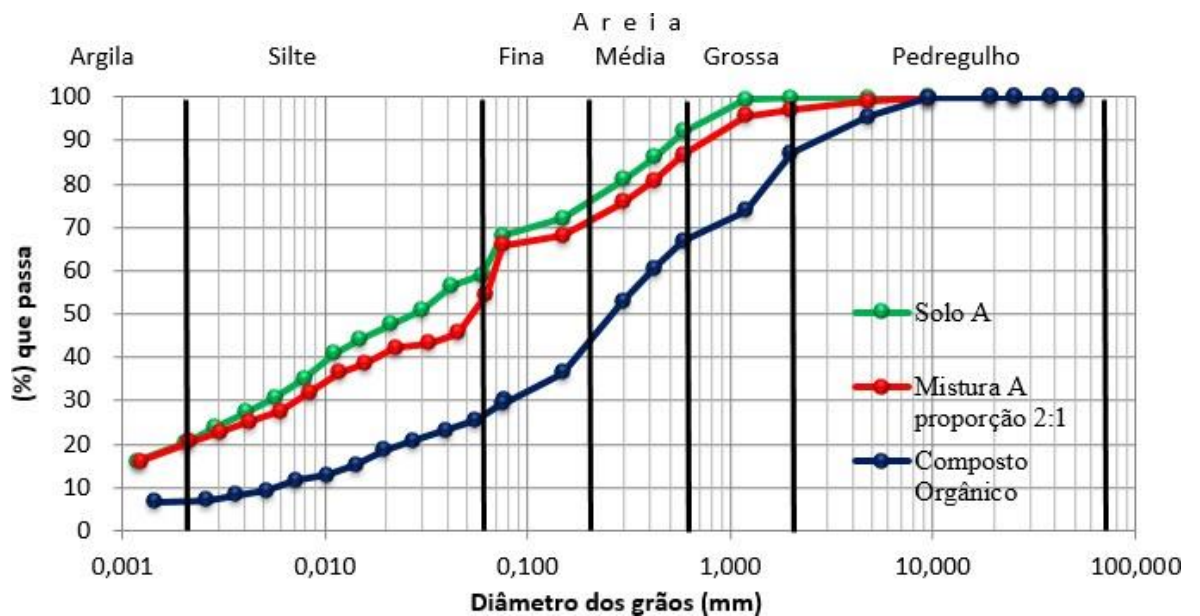
Como dito anteriormente, o ensaio de granulometria, que tem como finalidade caracterizar o solo que seria utilizado como camada de cobertura, foi executado no laboratório de geotecnia ambiental e foram utilizados como material os solos A e B, material compostado e também para as misturas A e B nas proporções de 1:1 e 2:1 de solo composto em volume.

- Mistura A proporção 1:1 e 2:1 de solo composto

Os Gráficos 2 e 3 apresentam a curva granulométrica do solo puro A em conjunto com o composto e as misturas A nas proporções 1:1 e 2:1 de solo composto. Observando as curvas de cada material constata-se que não há uma diferença significativa entre os três tipos de material.

Gráfico 2: Ensaio de granulometria com mistura A na proporção 1:1

Fonte: O Autor (2017)

Gráfico 3: Ensaio de granulometria com mistura A proporção 2:1

Fonte: O Autor (2017)

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) o solo A é classificada como silte arenoso (ML) de baixa compressibilidade. Os valores dos limites de plasticidade, liquidez, densidade dos grãos e percentagens da caracterização dos tipos de solo serão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização com Mistura A

Material		Solo A	Composto	Mistura A proporção 1:1	Mistura A proporção 2:1
Granulometria (%)	Argila	21	8	19	20
	Silte	38	19	24	35
	Areia Fina	13	18	26	16
	Areia Média	17	24	8	15
	Areia Grossa	11	20	18	12
	Pedregulho	0	11	5	2
Índice de Consistência (%)	LL	49,78	-	43,9	43,1
	LP	33,16	-	33,6	30,4
	IP	16,62	-	10,3	12,7
Densidade real dos grãos (g/cm ³)		2,72	2,181	2,541	2,581

Legenda: LL: Limite de liquidez – LP: Limite de Plasticidade – IP: Índice de Plasticidade

Fonte: O Autor (2017)

Analisando a Tabela 2 é possível constatar que o valor de argila presente no solo A é em torno de 21%, enquanto que na mistura A de proporção 1:1 é de 19%, 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 de 16% dos índices de materiais finos, e uma variação dos percentuais da fração grossa do solo, notadamente um aumento nos percentuais de areia fina e pedregulho. A mistura A na proporção de 1:1 pode ser classificada como uma Areia Fina Siltosa (SM).

Em relação aos resultados dos índices de consistência, a fração fina da mistura A de proporção 1:1 apresentou índice de plasticidade de 10,3%, caracterizando assim como um solo medianamente plástico, enquanto que o solo A apresentou um índice de plasticidade de 16,62%, que o enquadra como um solo plástico. Como o composto orgânico não tem características coesivas o mesmo não apresentou valores para os limites de liquidez e plasticidade. Quanto a densidade real dos grãos, a utilização de composto na mistura fez com que houvesse uma redução de 2,72 para 2,541 g/cm³.

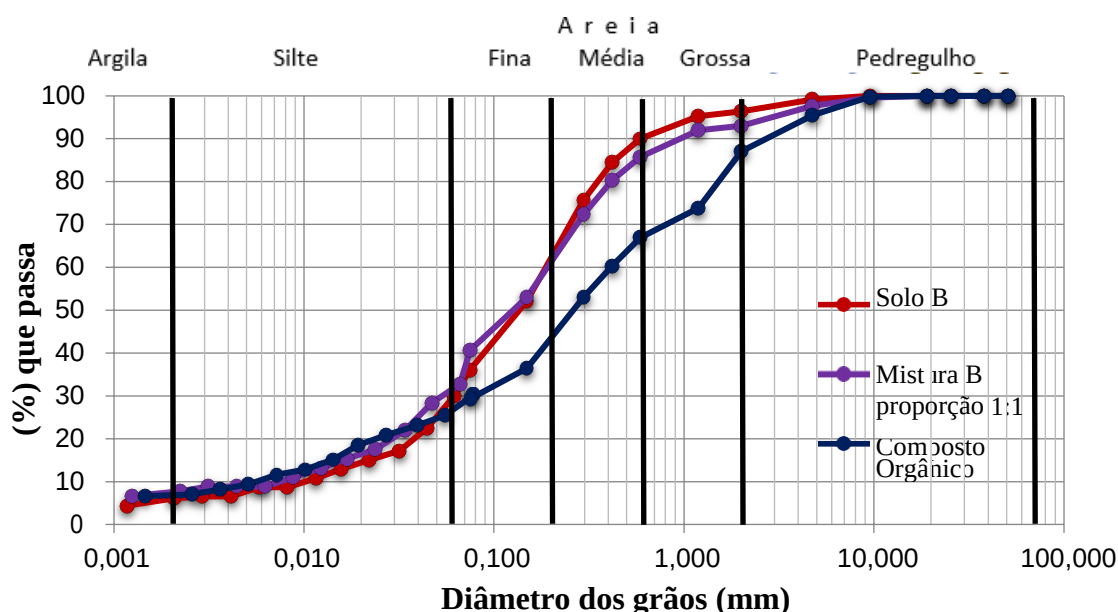
Em relação a mistura A de proporção 2:1, é possível constatar que a percentagem de material fino do solo A é de 59% enquanto que a da mistura A na proporção 2:1 é de 55%, o que confirma que a introdução de composto na mistura não altera significativamente a granulometria deste material e o tanto o solo quanto a mistura A na proporção 2:1 podem ser classificados como um silte de baixa plasticidade (SL).

Quanto aos resultados obtidos para o índice de consistência, foi verificado que a mistura A proporção 2:1 apresentou índice de plasticidade de 12,7%, o que a caracteriza como um solo medianamente plástico. Em relação a densidade real dos grãos, o acréscimo de composto orgânico fez com que tivesse uma redução de 2,72 para 2,581 g/cm³, que foi uma redução um pouco menor quando comparada com a mistura 1:1.

- Mistura B proporção 1:1 e 2:1 de solo composto

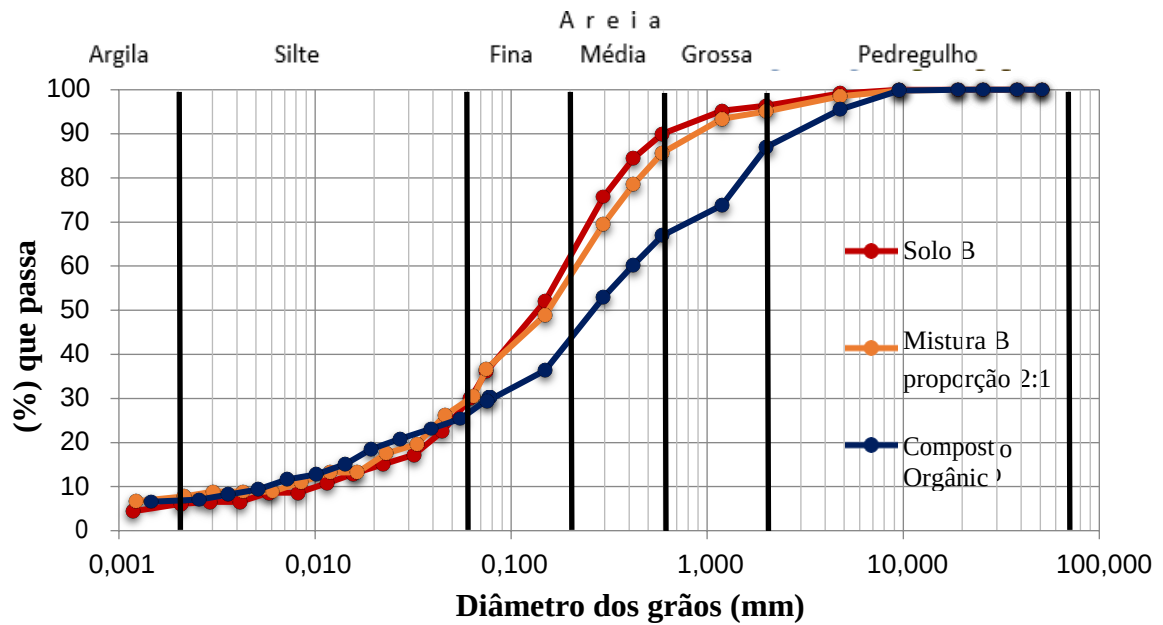
Os Gráficos 4 e 5 retratam a curva granulométrica dos materiais, usando desta vez a mistura B de proporção 1:1 e 2:1 de solo composto. Observando as curvas de cada material constata-se que não há uma diferença significativa entre os três tipos de material.

Gráfico 4: Ensaio de granulometria com mistura B proporção 1:1



Fonte: O Autor (2017)

Gráfico 5: Ensaio de granulometria com mistura B proporção 2:1



Fonte: O Autor (2017)

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) o solo B de é classificado como areia siltosa (SM) fracamente plástico. Os valores dos limites de plasticidade, liquidez, densidade dos grãos e percentagens da caracterização dos tipos de solo são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização com Mistura B

Material	Solo B	Composto	Mistura B proporção 1:1	Mistura B proporção 2:1
Granulometria (%)	Argila	7	8	8
	Silte	23	19	22
	Areia Fina	32	18	29
	Areia Média	29	24	25
	Areia Grossa	7	20	8
	Pedregulho	2	11	7
Índice de Consistência (%)	LL	31,8	-	35,7
	LP	24,6	-	33
	IP	7,2	-	2,7
Densidade real dos grãos (g/cm³)		2,829	2,181	2,577
				2,674

Legenda: LL: Limite de liquidez – LP: Limite de Plasticidade – IP: Índice de Plasticidade

Fonte: O Autor (2017)

Após análise da Tabela 3 é possível constatar que o valor de argila presente no solo B é em torno de 7%, enquanto que na mistura B de proporção 1:1 é de 8%, o que afirma que ao ser colocado uma parcela de composto não há uma diferença significativa no teor de argila, igualmente acontece com o teor de silte, não havendo mudança na percentagem após o acréscimo do composto orgânico.

Em relação aos resultados dos índices de consistência, a mistura B de proporção 1:1 apresentou índice de plasticidade de 2,7%, caracterizando assim como um solo fracamente plástico, enquanto que o solo B apresentou um índice de plasticidade de 7,2%, que o enquadra como um solo medianamente plástico. O composto orgânico não apresentou valores para os limites de liquidez e plasticidade e em relação a densidade real dos grãos, a utilização de composto na mistura fez com que houvesse uma redução de 2,829 para 2,577 g/cm³.

Quanto aos resultados da mistura B de proporção 2:1, é possível verificar que o valor de argila presente no solo B é em torno de 7%, enquanto que na mistura B de proporção 2:1 é de 8%, o que afirma que ao ser colocado uma parcela de composto não há uma diferença significativa no teor de argila, igualmente acontece com o teor de silte, onde ocorreu uma diferença de 1% após acréscimo do composto. Já em relação a quantidade de areia fina e média, ao acrescentar o composto orgânico é possível observar que houve uma queda nas porcentagens na ordem de 3 e 2% respectivamente.

Em relação aos resultados dos índices de consistência, a mistura B de proporção 2:1 apresentou índice de plasticidade de 7,4%, caracterizando assim como um solo medianamente

plástico, apresentando mesma classificação de consistência que o solo B. Em relação a densidade real dos grãos, a utilização de composto na mistura B de proporção 2:1 fez com que houvesse uma redução de 2,829 para 2,674 g/cm³. Na Tabela 4 é apresentado um quadro resumo com todos os resultados de caracterização das misturas.

Tabela 4: Resumo dos resultados de caracterização de todas as misturas

		Material			
		Mistura A 1:1	Mistura A 2:1	Mistura B 1:1	Mistura B 2:1
Granulometria (%)	Argila	19	20	8	8
	Silte	24	35	23	22
	Areia Fina	26	16	29	29
	Areia Média	8	15	25	27
	Areia Grossa	18	12	8	11
	Pedregulho	5	2	7	3
Índice de Consistência (%)	LL	43,9	43,1	35,7	36,1
	LP	33,6	30,4	33	28,7
	IP	10,3	12,7	2,7	7,4
Densidade real dos grãos (g/cm³)		2,541	2,581	2,577	2,674

Legenda: LL: Limite de liquidez – LP: Limite de Plasticidade – IP: Índice de Plasticidade

Fonte: O Autor (2017)

5.1.2 Compactação de Proctor Normal

O ensaio de compactação utilizado foi o de Proctor Normal, realizado segundo os procedimentos presentes na NBR-7182-88. O ensaio foi realizado para os solos A e B e as duas misturas com suas devidas proporções, os resultados serão detalhados a seguir.

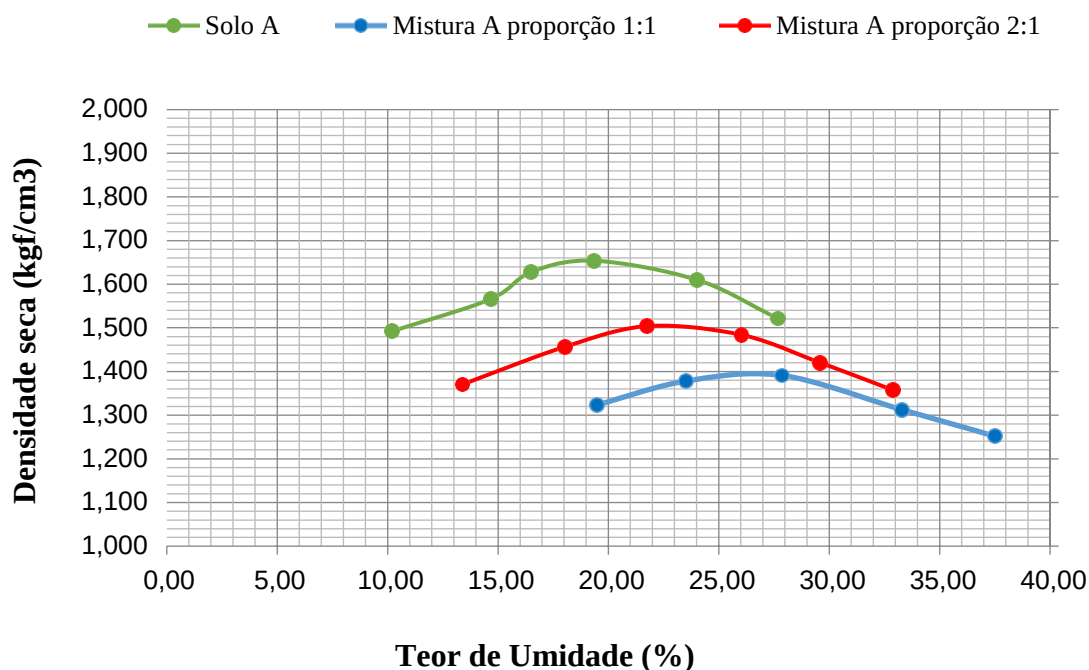
- Material A

A Tabela 5 mostra os valores de umidade ótima e peso específico aparente seco de cada material analisado e o Gráfico 6 mostra os resultados obtidos durante o ensaio.

Tabela 5: Resultados preliminares da compactação do Material A

Material	Umidade Ótima (%)	Peso específico aparente seco (kgf/cm ³)
Solo A	20	1,660
Proporção 2:1	23	1,506
Proporção 1:1	26	1,396

Fonte: O Autor (2017)

Gráfico 6: Curva de Compactação dos Materiais do tipo A.

Fonte: O Autor (2017)

Pela análise do gráfico é possível observar que o acréscimo de composto no solo altera sua curva de compactação. Neste sentido, observa-se que o aumento da quantidade de composto, diminui a densidade seca da mistura e aumenta sua umidade ótima, onde a mesma aumenta em até 6% a depender da quantidade de composto que foi utilizado, sendo esta uma boa característica para camadas de cobertura do tipo oxidativas. Já a diminuição do valor do peso específico aparente seco é justificada pelo menor peso específico do composto, então quanto maior sua proporção na mistura, menor será o peso específico na mistura em si. Salienta-

se que para camadas de cobertura do tipo oxidativas é interessante que a densidade do material utilizado seja o menor possível, pois tal fator é favorável para a eficiência da oxidação do gás (CAVALCANTI DA PURIFICAÇÃO, 2009).

- Material B

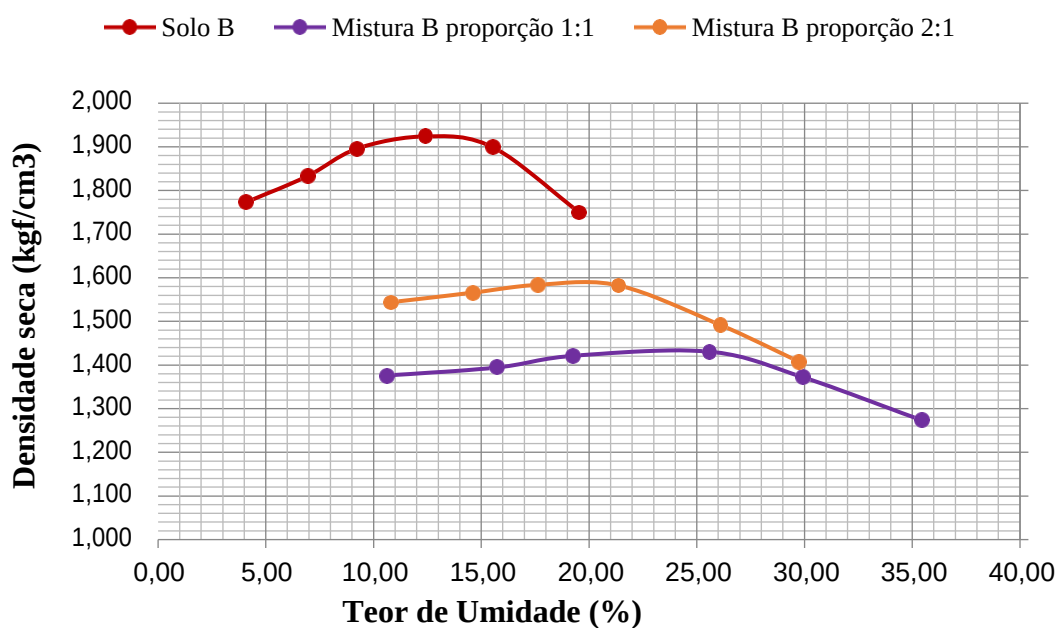
Para o solo B foi feito o mesmo procedimento feito com o solo A. Desta forma é demonstrado os valores de umidade ótima e peso específico aparente seco de cada material analisado (Tabela 6) e os resultados obtidos durante o ensaio (Gráfico 7).

Tabela 6: Resultados Preliminar da Compactação do Material B

Material	Umidade Ótima (%)	Peso específico aparente seco (kgf/cm ³)
Solo B	12,8	1,928
Proporção 2:1	19	1,590
Proporção 1:1	23	1,440

Fonte: O Autor (2017)

Gráfico 7: Curva de Compactação dos Materiais do tipo B.



Fonte: O Autor (2017)

O acréscimo de composto orgânicos no solo B alterou significativamente a umidade ótima do material, foi um aumento na ordem de quase 10% na mistura que recebeu maior quantidade de composto, ocorrendo assim uma diminuição do valor do peso específico aparente seco. Em comparação com os materiais A, a umidade ótima dos materiais B é consideravelmente menor. Já em relação aos valores obtidos para o peso específico aparente seco, os materiais A apresentaram menores resultados deste parâmetro.

5.1.3 Ensaio de Adensamento

O ensaio de adensamento foi realizado segundo as recomendações presentes na NBR 12007/90 e foram feitos para os solos A e B e suas respectivas misturas nas devidas proporções de 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.

- Material A

A Tabela 7 e os Gráficos 8 e 9 mostram os resultados encontrados durante o procedimento para umidade ótima e em condições inundadas e não inundadas.

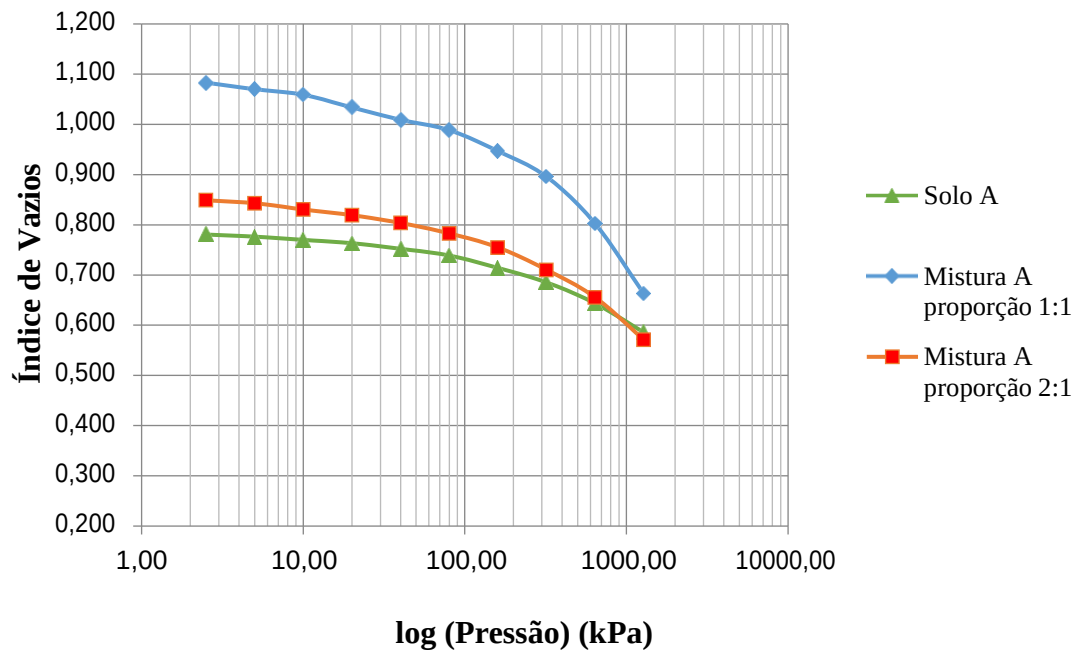
Tabela 7: Parâmetros dos ensaios de adensamento para o material A

Amostra	Umidade Ótima			Saturado		
	e_o	σ'_a (kPa)	Cc	e_o	σ'_a (kPa)	Cc
Solo A	0,790	200	0,175	0,828	150	0,230
Mistura A proporção 1:1	1,101	250	0,413	1,040	120	0,327
Mistura A proporção 2:1	0,863	200	0,288	0,878	180	0,243

Legenda: e_o : índice de vazios – Cc: índice de compressão - σ'_a : tensão de sobre adensamento

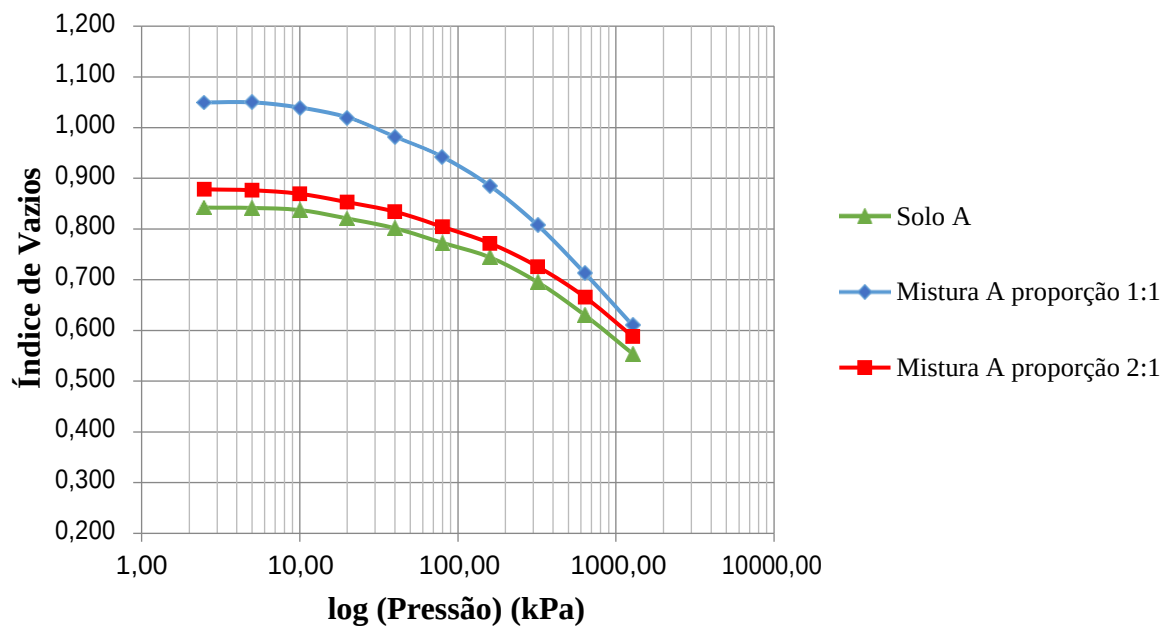
Fonte: O Autor (2017)

Gráfico 8: Ensaio de adensamento na umidade ótima em condições não inundadas do Material A.



Fonte: O Autor (2017)

Gráfico 9: Ensaio de adensamento na umidade ótima em condições inundadas do Material A.



Fonte: O Autor (2017)

Dentre os parâmetros obtidos durante o ensaio será analisado o índice de compressão (C_c), que corresponde à inclinação da reta de compressão virgem; tensão de sobre adensamento (σ'_a) e o índice de vazios. Como a mistura A de proporção 1:1 apresenta uma parcela de composto superior a mistura A de proporção 2:1, foi observado que a mesma apresenta um índice de vazios maior, e também um maior índice de compressão.

Observa-se que o acréscimo de composto na mistura aumenta tanto o seu índice de vazios, quanto o índice de compressão (C_c). Porém, para a mistura com maior quantidade de solo (Mistura A na proporção 2:1), ambos os valores estão mais próximos dos parâmetros do solo. Este aumento de índice de vazios, é favorável a atividade microbiana e consequentemente, é uma propriedade que se busca nas camadas oxidativas. O aumento do C_c , indica, a princípio, que para um mesmo carregamento, as deformações da camada serão maiores, quanto maior for seu C_c . Neste sentido, uma camada formada pela Mistura A na proporção 1:1 deformará mais que as demais. É importante salientar também que as camadas de coberturas de aterros sanitários não são dimensionadas para sofrerem sobrecargas.

Mesmo apresentando valores diferentes para os parâmetros, é possível concluir que não há uma diferença significativa entre os resultados encontrados para as diferentes misturas analisadas sob condições diferentes (na umidade ótima e condição saturada).

- Material B

A Tabela 8 e os Gráficos 10 e 11 mostram os resultados encontrados durante o procedimento para umidade ótima e em condições inundadas e não inundadas para o material B.

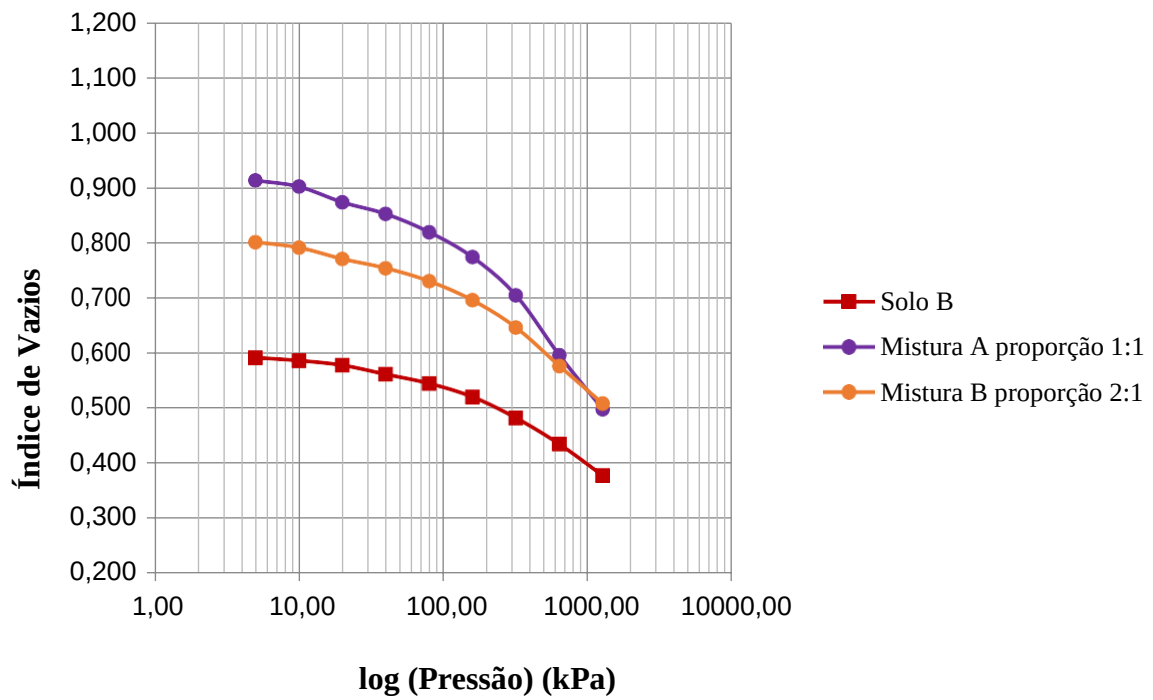
Tabela 8: Parâmetros dos ensaios de adensamento para o material B

Amostra	Umidade Ótima			Saturado		
	e_o	σ'_a (kPa)	C_c	e_o	σ'_a (kPa)	C_c
Solo B	0,599	140	0,170	0,571	133	0,146
Mistura B proporção 1:1	0,936	133	0,320	0,974	178	0,327
Mistura B proporção 2:1	0,814	122	0,221	0,724	128	0,209

Legenda: e_o : índice de vazios – C_c : índice de compressão – σ'_a : tensão de sobre adensamento

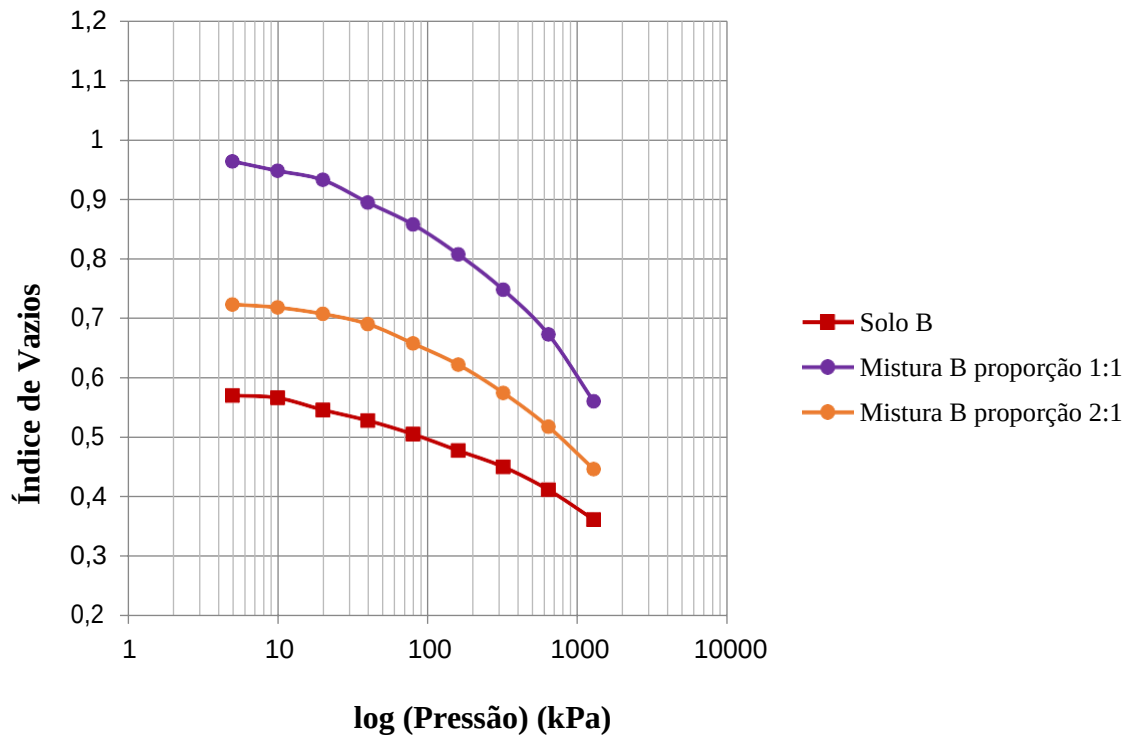
Fonte: O Autor (2017)

Gráfico 10: Ensaio de adensamento na umidade ótima em condições não inundadas do Material B



Fonte: O Autor (2017)

Gráfico 11: Ensaio de adensamento na umidade ótima em condições inundadas do Material B



Fonte: O Autor (2017)

Assim como o que aconteceu com o material A, o material B e suas respectivas misturas não apresentou diferença significativa entre os resultados. Em relação ao índice de vazios, a mistura B com proporção de 1:1 apresentou maiores resultados, devido a maior quantidade de composto inserido. Ao longo do tempo o adensamento desta mistura com proporção 1:1 tende a ser maior do que a mistura B com proporção 2:1.

Comparando o Solo A e suas respectivas misturas com o Solo B e suas misturas, observa-se que o solo A apresenta tanto maiores índices de vazios quanto índice de compressibilidade (para as condições de ensaio: umidade ótima e saturado). Neste sentido, as misturas de composto com solo A, por apresentar maior quantidade de finos e maior índice de vazios, poderão ser mais indicados para utilização como camada de cobertura final de aterros sanitários (MOLIN, 2009).

5.1.4 Ensaio de Permeabilidade

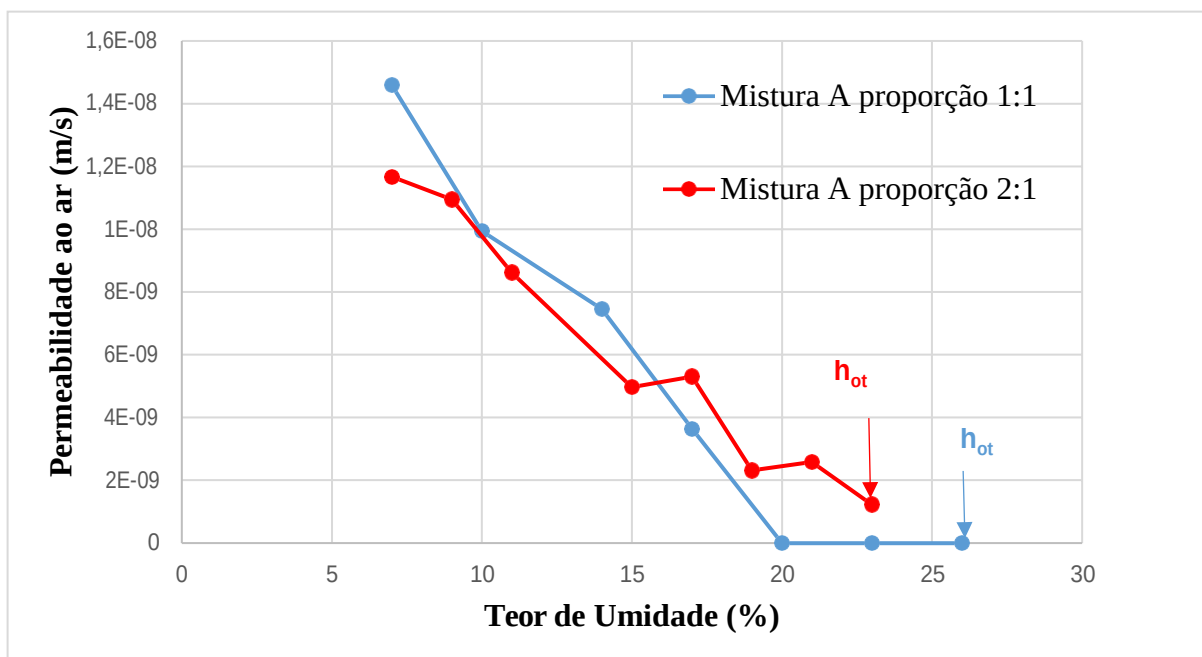
- Permeabilidade ao ar

Para determinar a permeabilidade ao ar das misturas A e B utilizadas para fazer a camada de cobertura, foram moldados quatro corpos de prova nas proporções de 1:1 e de 2:1 de solo composto, todas as amostras foram feitas com energia de um Proctor Normal na umidade ótima.

- Mistura A proporção 1:1 e 2:1 de solo composto

A trajetória dos ensaios das misturas A 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. No Gráfico 12 serão apresentados os resultados dos ensaios através da variação da permeabilidade em função do teor de umidade do corpo de prova.

Gráfico 12: Resultados dos ensaios de permeabilidade vertical ao ar para um mesmo corpo de prova nas misturas A com proporções 2:1 e 1:1 de solo composto



Fonte: O Autor (2017)

Como é possível observar pelo gráfico, que para teores de umidade acima da umidade ótima não foi possível determinar o valor de permeabilidade ao ar, isso ocorre pelo fato que próximo da umidade ótima os vazios de solo (por onde pode ocorrer fluxo) que não estão preenchidos por água são poucos e podem não estarem conectados, assim, mesmo o solo não estando saturado, a permeabilidade ao ar é muito baixa (menor que 10^{-9} m/s). Observa-se que para as duas misturas, o comportamento do solo é o mesmo, isto é, redução da permeabilidade ao ar com o acréscimo de umidade até chegar próximo da umidade ótima. A partir daí não foi possível mais medir o fluxo. Para o solo A foi observado a mesma ordem de grandeza que as suas respectivas misturas, estando na ordem de 10^{-9} m/s.

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 secos e chuvosos.

- Mistura B proporção 1:1 e 2:1 de solo composto

Como o solo do material B é caracterizado como uma areia siltosa, não foi possível fazer o mesmo procedimento de secagem do corpo de prova que foi feito com as misturas A. Devido a granulometria do solo, as misturas B são bastantes permeáveis e não foi

necessário fazer uma aplicação de uma pressão confinante muito elevada para obter os dados do coeficiente de permeabilidade. Sendo assim, para uma aplicação de uma pressão confinante de 10kPa (para os materiais do tipo A foram necessários uma pressão confinante de 50kPa) foi observado que a mistura B de proporção 1:1 apresentou coeficiente de permeabilidade de $1,061 \cdot 10^{-7}$ m/s enquanto a mistura 2:1 apresentou coeficiente de $5,3079 \cdot 10^{-8}$ m/s. Ambos os corpos de prova foram ensaiados na umidade ótima. Para o solo B foi observado um coeficiente de permeabilidade na ordem de 10^{-8} m/s.

- Permeabilidade à água

O ensaio de permeabilidade à água também é executado utilizando o Tri-Flex só que desta vez é injetado água invés de ar no corpo de prova. O procedimento foi feito para as duas misturas e suas respectivas proporções. A seguir será apresentado os resultados identificados para cada tipo de material.

- Mistura A proporção 1:1 e 2:1 de solo composto

Os resultados encontrados para a permeabilidade à água da mistura com proporção 1:1 foi de $2,77 \cdot 10^{-9}$ m/s e para a mistura 2:1 de $5,6 \cdot 10^{-9}$ m/s. Apesar de possuírem diferentes proporções de material compostado foi observado que ambas as misturas tiveram valores para a condutividade hidráulica na mesma ordem de grandeza. 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. Tanto a mistura A com proporção 1:1 como a mistura com proporção 2:1 apresentaram valores compatíveis com os encontrados por Maciel (2003), Lopes (2011) e Costa (2015).

- Mistura B proporção 1:1 e 2:1 de solo composto

Para o ensaio de permeabilidade à água a mistura com proporção 1:1 apresentou como resultado $3,593 \cdot 10^{-8}$ m/s enquanto que a mistura 2:1 apresentou $9,836 \cdot 10^{-9}$ m/s, para o solo B foi determinado um coeficiente de permeabilidade na ordem de 10^{-9} m/s. Todos os resultados com o material B ficaram abaixo da ordem de grandeza sugerido pela USEPA (2004) para camadas de cobertura, mostrando desta forma eficácia na retenção de água na camada. Neste sentido, mesmo o solo B sendo caracterizado como uma areia siltosa, salienta-se que estes

valores estão apenas 1 ordem de grandeza ou com a mesma ordem de grandeza que as misturas com o Solo A, indicando a influência do composto na permeabilidade do solo.

5.1.5 Ensaio de Compressão Triaxial

- Mistura A proporção 1:1 de solo composto

Durante a realização do ensaio foram aplicadas pressões hidrostáticas (S_3) no corpo de prova e foi observado os resultados de pressões axiais (S_1) correspondente para cada tensão aplicada. A Tabela 9 detalha o resultado correspondente para cada tensão.

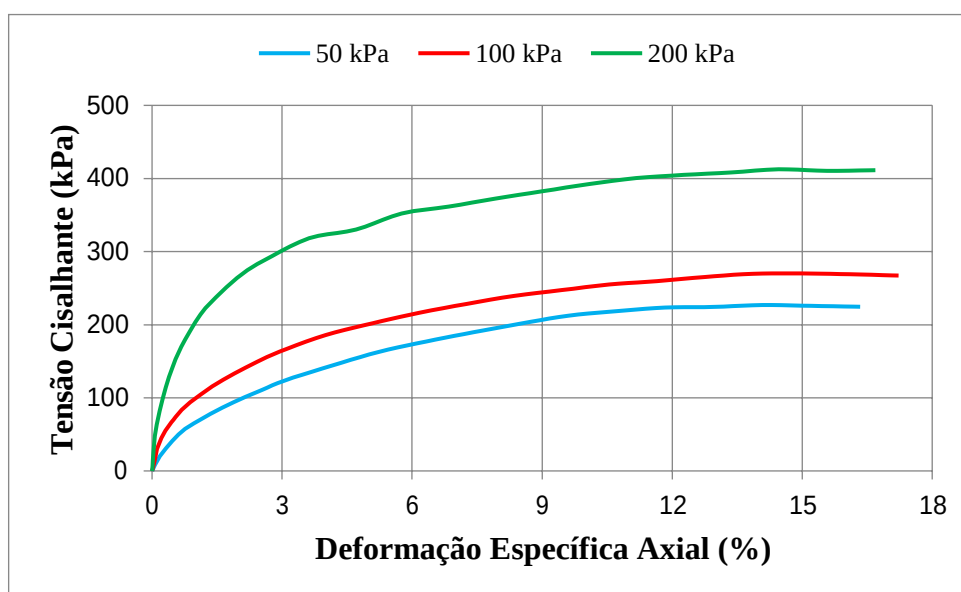
Tabela 9: Pressões hidrostáticas e axiais para cada corpo de prova da Mistura A com proporção 1:1

	S_3 (kPa)	S_1 (kPa)
Corpo de Prova 1	69	295,94
Corpo de Prova 2	84,7	354,79
Corpo de Prova 3	132,3	544,997

Fonte: O Autor (2017)

Em posse dos dados das tensões hidrostáticas e axiais, o Gráfico 13 retrata as curvas encontradas para a relação de tensão cisalhante e de deformação específica axial.

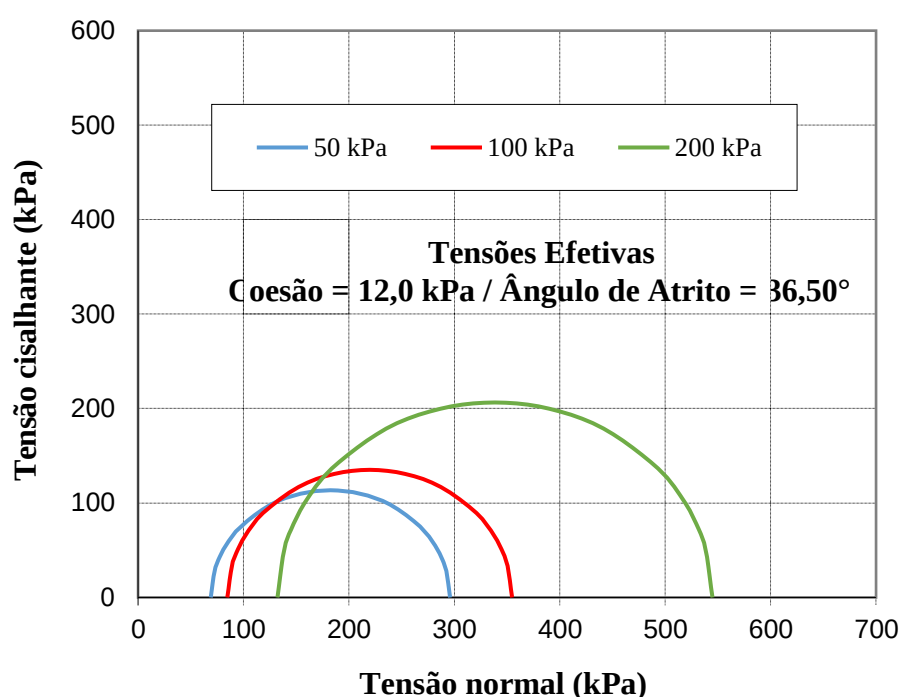
Gráfico 13: Relação Tensão x Deformação Mistura A com proporção 1:1



Fonte: O Autor (2017)

De acordo com o gráfico apresentado anteriormente foram observados que para todas as tensões aplicadas houve ruptura do corpo de prova. Para a tensão normal de 50kPa obteve-se uma tensão cisalhante de 224,56kPa. Na tensão normal de 100kPa, a tensão cisalhante foi de 267,17kPa e para a tensão normal de 200kPa, a tensão cisalhante foi de 411,56kPa. Para a determinação da coesão, ângulo de atrito e tensão de ruptura foi utilizado a envoltória de Mohr-Coulomb que será demonstrado no Gráfico 14 para tensão efetiva.

Gráfico 14: Envoltória de Mohr-Coulomb para Tensões Efetivas da Mistura A com proporção 1:1



Fonte: O Autor (2017)

Para a Mistura 1:1 foi verificado uma coesão de 12kPa, já em relação ao ângulo de atrito o valor encontrado foi de 36,50°. Em argilas, a coesão é a principal parcela da resistência ao cisalhamento e como a mistura 1:1 possui em sua parcela 50% de argila, é justificável que o seu resultado desse tão elevado.

- Mistura A proporção 2:1 de solo composto

Assim como foi feito com a Mistura com proporção 1:1, para a Mistura 2:1 foram aplicadas pressões hidrostáticas (S3) no corpo e prova e foi observado os resultados de pressões

axiais (S_1) correspondente para cada tensão aplicada. A Tabela 10 detalha o resultado correspondente para cada tensão.

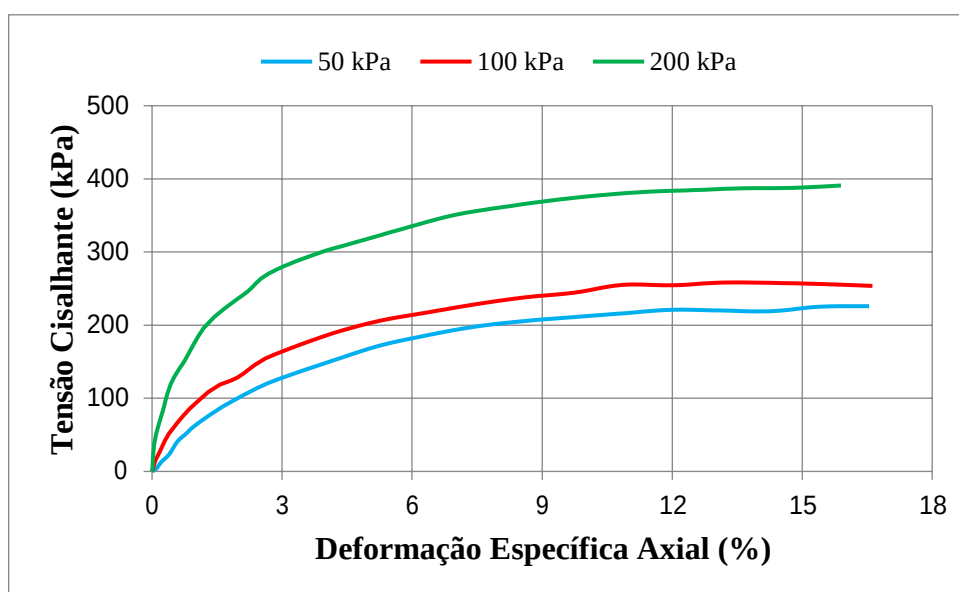
Tabela 10: Pressões hidrostáticas e axiais para cada corpo de prova da Mistura A de proporção 2:1

	S_3 (kPa)	S_1 (kPa)
Corpo de Prova 1	66	291,85
Corpo de Prova 2	94,4	352,5
Corpo de Prova 3	127,3	518,27

Fonte: O Autor (2017)

Após determinação das pressões atuantes no corpo de prova, foi verificado a relação da tensão cisalhante e de deformação específica axial, como mostra o Gráfico 15 a seguir.

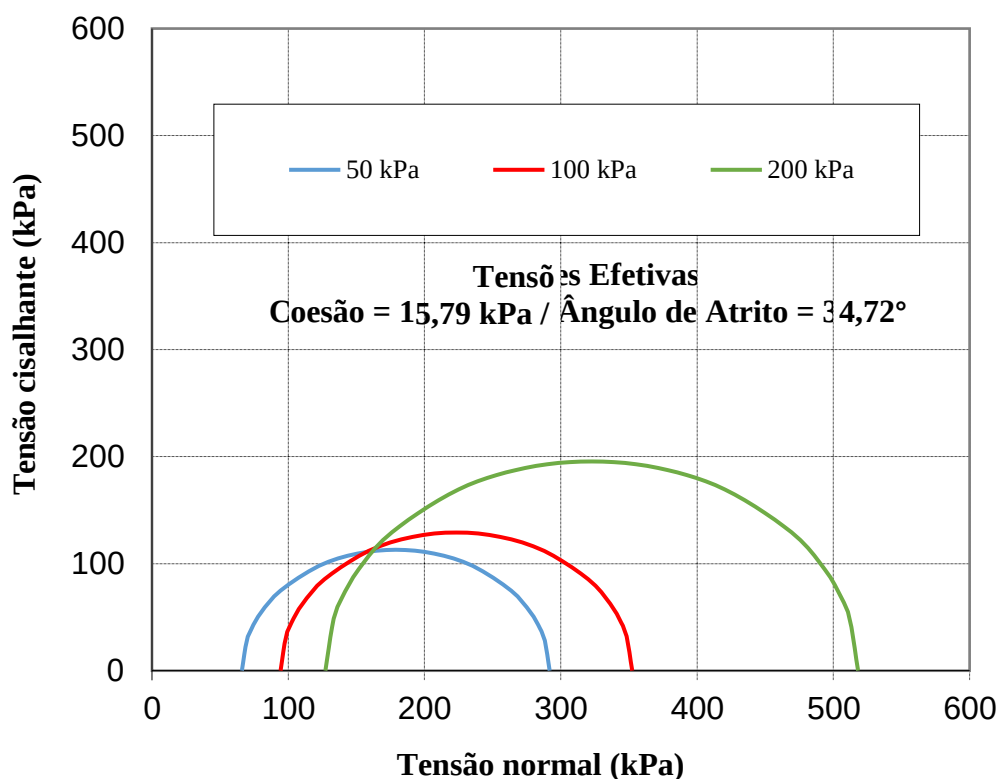
Gráfico 15: Relação Tensão x Deformação Mistura A de proporção 2:1



Fonte: O Autor (2017)

Assim como na Mistura A de proporção 1:1, foi observado também que houve ruptura nos corpos de prova da Mistura 2:1 para todas as tensões aplicadas. Desta forma, a tensão normal de 50kPa obteve-se uma tensão cisalhante de 225,85kPa. Na tensão normal de 100kPa a tensão cisalhante foi de 253,52kPa e para a tensão normal de 200kPa a tensão cisalhante foi de 390,97kPa. Para a determinação da coesão, ângulo de atrito e tensão de ruptura foi utilizado a envoltória de Mohr-Coulomb que será demonstrado no Gráfico 16 para tensão efetiva.

Gráfico 16: Envoltória de Mohr-Coulomb para Tensões Efetivas da Mistura A de proporção 2:1



Fonte: O Autor (2017)

Em ambas as misturas com o material A não foi observado nenhuma diferença significativa nos valores de coesão e no ângulo de atrito, tal episódio pode ser justificado pelo fato das misturas de solo com composto sejam realizadas em volume e não em peso, fazendo assim com que ambas as misturas possuam uma parcela maior de argila do que de composto.

O aumento do ângulo de atrito da Mistura A com proporção 1:1, que está relacionado com o aumento da resistência dos agregados, pode ser deslindado pelo fato que tal mistura apresenta uma maior quantidade de composto e conseqüentemente uma maior quantidade de pedaços de madeira, alterando assim as características reais da superfície de ruptura.

Devido à ambas as misturas apresentarem grandes quantidades de argila, foi observado valores elevados para a coesão, que pode ser procedente de uma influência da sucção neste resultado, ainda que seja uma alteração pequena (SANTOS, 2015).

- Mistura B proporção 1:1 de solo composto

Para o material B também foram aplicadas pressões hidrostáticas (S3) no corpo e prova e foi observado os resultados de pressões axiais (S1) correspondente para cada tensão aplicada. Na Tabela 11 será apresentado os resultados correspondentes para cada tensão.

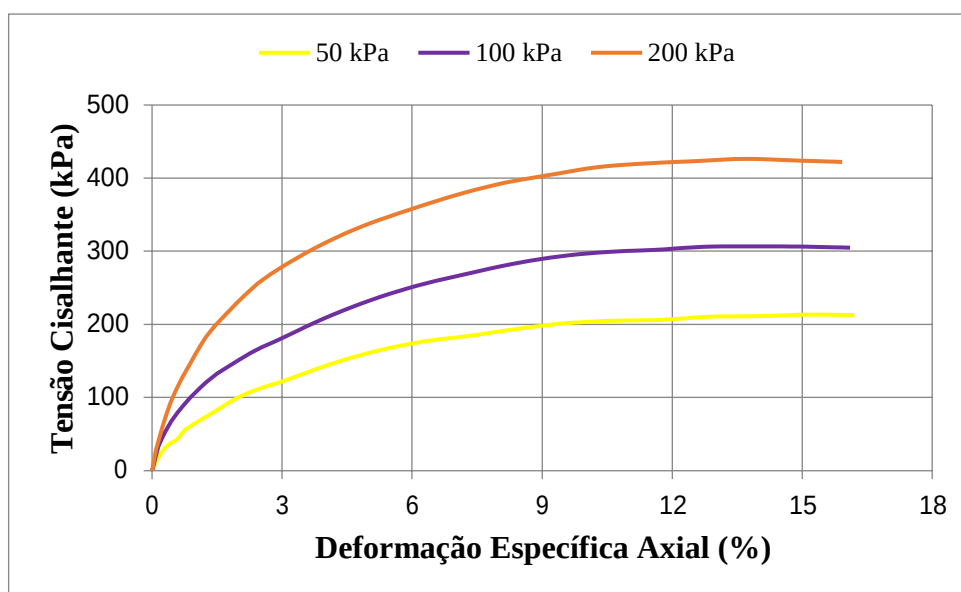
Tabela 11: Pressões hidrostáticas e axiais para cada corpo de prova da Mistura B de proporção 1:1

	S ₃ (kPa)	S ₁ (kPa)
Corpo de Prova 1	55,6	268,75
Corpo de Prova 2	87,6	394,12
Corpo de Prova 3	129,1	556

Fonte: O Autor (2017)

Após determinação das pressões atuantes no corpo de prova, foi verificado a relação da tensão cisalhante e de deformação específica axial, como mostra o Gráfico 17.

Gráfico 17: Relação Tensão x Deformação Mistura B de proporção 1:1

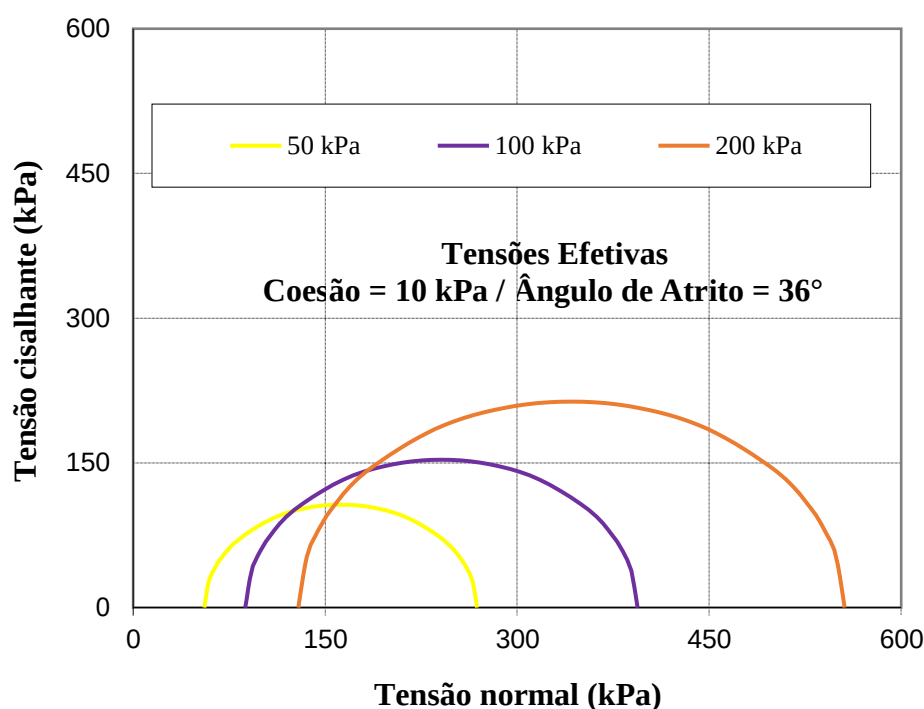


Fonte: O Autor (2017)

De acordo com o Gráfico 17 foram observados que para todas as tensões aplicadas houve ruptura do corpo de prova. Para a tensão normal de 50kPa obteve-se uma tensão cisalhante de 212,54kPa. Na tensão normal de 100kPa a tensão cisalhante foi de 304,73kPa e para a tensão normal de 200kPa a tensão cisalhante foi de 421,92kPa. Para a determinação da

coesão, ângulo de atrito e tensão de ruptura foi utilizado a envoltória de Mohr-Coulomb que será demonstrado no Gráfico 18 para tensão efetiva.

Gráfico 18: Envoltória de Mohr-Coulomb para Tensões Efetivas da Mistura B de proporção 1:1



Fonte: O Autor (2017)

Para a Mistura B de proporção 1:1 foi verificado uma coesão de 10kPa, já em relação ao ângulo de atrito o valor encontrado foi de 36°. Em solos arenosos a maior parcela da resistência ao cisalhamento é devido ao ângulo de atrito e mesmo esta mistura tendo 50% do seu constituinte de material arenoso não foi observado nenhuma diferença significativa no valor do ângulo de atrito quando comparado com as misturas feitas com o material A. Já em relação aos valores encontrados para coesão foi observado uma diferença na ordem de 2kPa para a mistura A de mesma proporção.

- Mistura B proporção de 2:1

Assim como foi feito com as outras misturas, para a mistura 2:1 foram aplicadas pressões hidrostáticas (S3) no corpo e prova e foi observado os resultados de pressões axiais

(S1) correspondente para cada tensão aplicada. A Tabela 12 detalha o resultado correspondente para cada tensão.

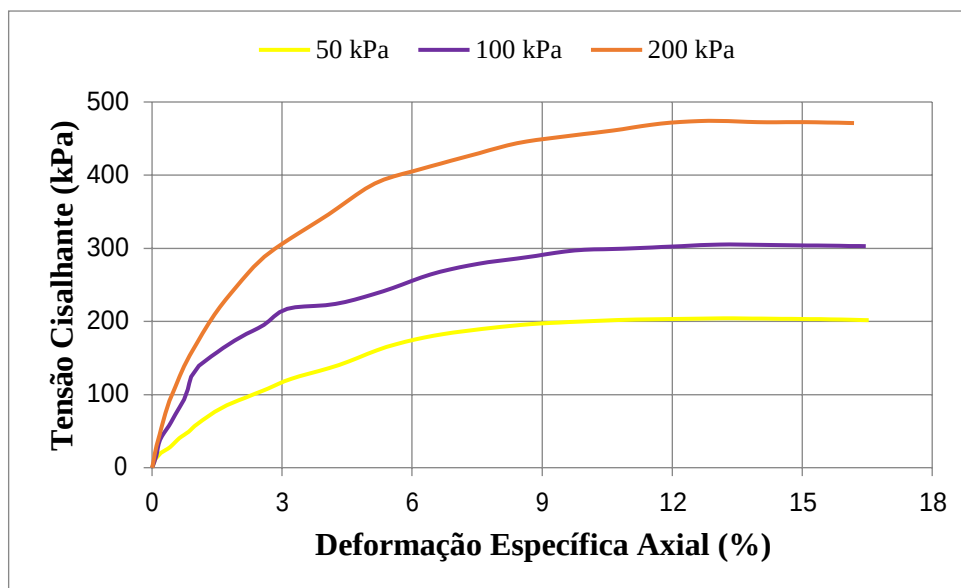
Tabela 12: Pressões hidrostáticas e axiais para cada corpo de prova da Mistura B de proporção 2:1

	S ₃ (kPa)	S ₁ (kPa)
Corpo de Prova 1	57,1	268,75
Corpo de Prova 2	95	400,84
Corpo de Prova 3	143,2	617,459

Fonte: O Autor (2017)

No Gráfico 19 será demonstrado as pressões atuantes no corpo de prova bem como a verificação da relação da tensão cisalhante e de deformação específica axial.

Gráfico 19: Relação Tensão x Deformação Mistura B de proporção 2:1

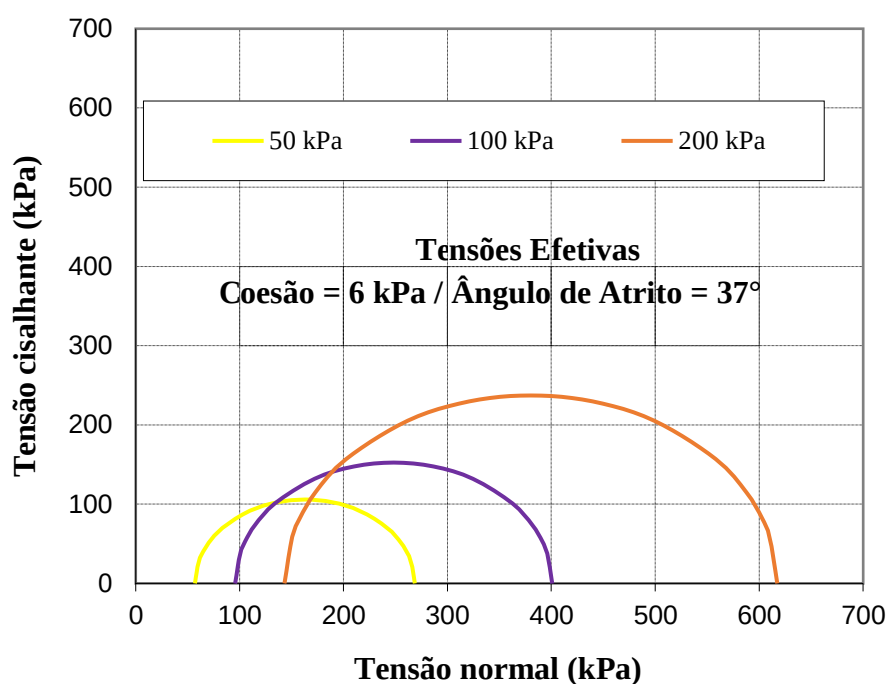


Fonte: O Autor (2017)

Assim como ocorreu com a outras misturas com os dois tipos de solos, foi observado também que houve ruptura nos corpos de prova da Mistura B de proporção 2:1 para todas as tensões aplicadas. Desta forma, a tensão normal de 50kPa obteve-se uma tensão cisalhante de 201,73kPa. Na tensão normal de 100kPa a tensão cisalhante foi de 302,89kPa e para a tensão normal de 200kPa a tensão cisalhante foi de 471,29kPa. Para a determinação da coesão, ângulo

de atrito e tensão de ruptura foi-se utilizado a envoltória de Mohr-Coulomb que será demonstrado no Gráfico 20 para tensão efetiva.

Gráfico 20: Envoltória de Mohr-Coulomb para Tensões Efetivas da Mistura B de proporção 2:1



Fonte: O Autor (2017)

A adição de composto no solo B caracterizou como um aumento na resistência ao cisalhamento na parcela da coesão, na ordem de 4kPa, já em relação ao ângulo de atrito, foi observado que a mistura que apresentava menor quantidade de composto teve uma parcela de ângulo maior, na ordem de 1 grau. O aumento na parcela de coesão da mistura B de proporção 1:1 pode ser justificado pelo fato que esta mistura apresenta uma maior quantidade de composto e conseqüentemente maior quantidade de pedregulhos, alterando assim características reais da superfície de ruptura. A Tabela 13 apresenta um resumo de todos os dados observados durante o ensaio para todas as misturas.

Tabela 13: Classificação dos parâmetros de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento direto

Tipo de Ensaio	Solo	Deslocamento de Pico	
		Coesão (kPa)	Ângulo de atrito
Cisalhamento Direto	Material A		
	1:1 Solo Composto	12	36,5°
	2:1 Solo Composto	15,79	34,72°
	Material B		
	1:1 Solo Composto	10	36°
	2:1 Solo Composto	6	37°

Fonte: O Autor (2017)

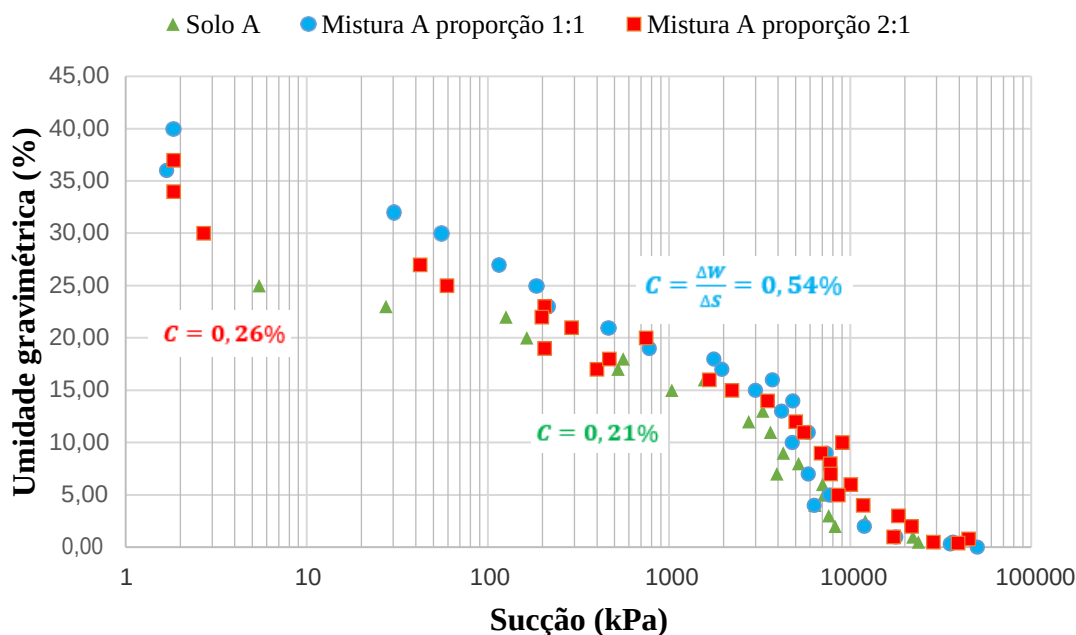
Observando a Tabela 13 pode-se dizer que as misturas estudadas apresentam valores de parâmetros de resistência equivalentes ao de uma areia fofa a compacta e também que não ocorreu uma grande variação em relação aos parâmetros de resistência das misturas estudadas. Indicando que, em relação a resistência, ambas as misturas, em qualquer das proporções estudadas, poderiam ser utilizadas.

5.1.6 Curvas Características

A representação da variação de sucção no solo devido a mudanças na umidade é denominada como curva característica. Nesta dissertação, a quantidade de água presente nos vazios do solo foi representada pelo teor de umidade gravimétrico e as curvas características serão retratadas pela relação da sucção e do seu respectivo grau de saturação.

- Mistura A proporção 1:1 e 2:1 de solo composto

A continuidade do ensaio se deu pela secagem das amostras e a verificação da sucção para cada umidade, como mostra o Gráfico 21.

Gráfico 21: Curvas de retenção de água do Material A

Fonte: O Autor (2017)

Segundo a relação entre variação de umidade e sucção ($C = \Delta w / \Delta s$), foi verificado que a mistura A com proporção 1:1 apresentou maior capacidade diferencial de umidade que as outras amostras com o material A (solo A e mistura A proporção 2:1). Inicialmente, para o solo A foi observado uma umidade gravimétrica máxima de 25%, tendo uma diferença na ordem de 12% para a mistura 2:1 e de 15% para a mistura 1:1. Pelo gráfico é possível observar que a curva apresenta uma inclinação suave até a sucção de 1000kPa para solo A, de aproximadamente 1700kPa para a mistura 2:1 e 2000kPa para a mistura 1:1, e posteriormente há uma atenuação da inclinação, sendo estes os valores de sucção os pontos de entrada de ar.

Devido a capacidade de retenção de água do composto orgânico, as misturas apresentaram valores de umidade superiores ao solo A e as suas curvas apresentaram uma inclinação mais acentuada na fase mais úmida e uma inclinação mais suave na fase mais seca. Em relação ao solo A, é observado que o mesmo apresentou uma inclinação mais suave na fase mais úmida e uma inclinação mais acentuada na fase seca. Tal comportamento também foi verificado em Santos (2015) e Costa (2015).

Ainda em relação as misturas, tanto a mistura 1:1 como a mistura 2:1 apresentam valores de entrada de sucção, que é o ponto ao longo da curva de secagem que o gradiente de saturação é alterado, bastante reduzidas quando comparadas com o solo A, indicando desta

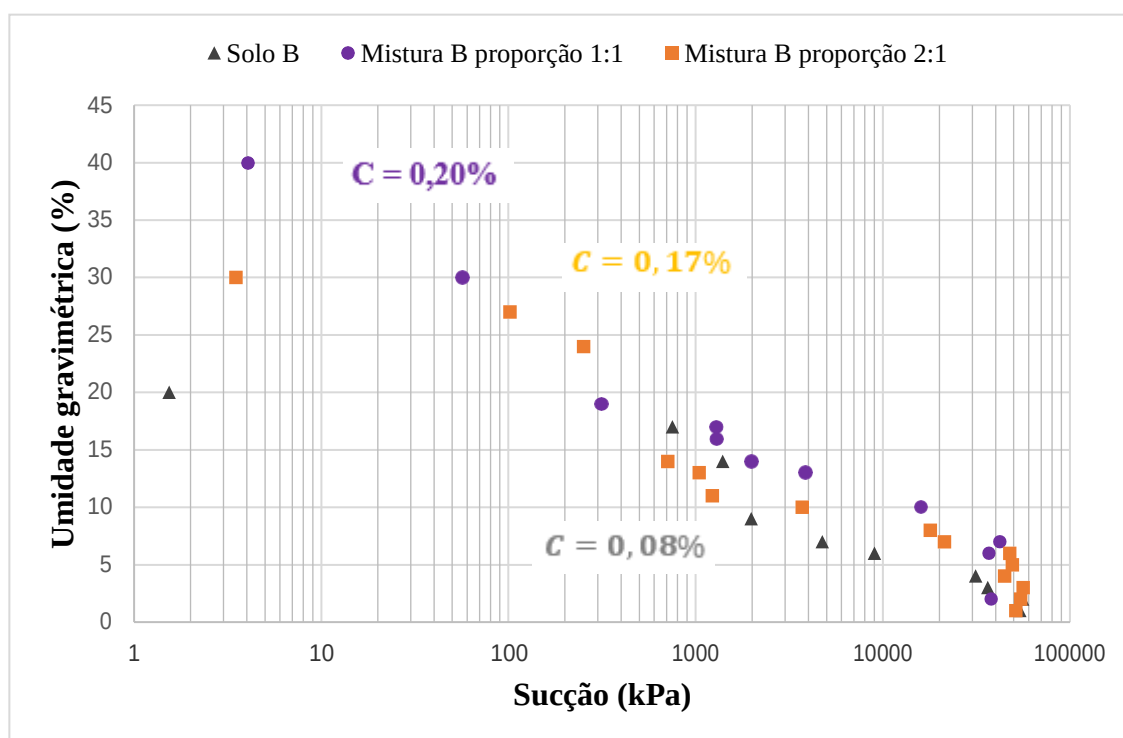
maneira uma zona de efeito capilar reduzida, mesmo que ambas as misturas apresentem umidade de saturação bastante elevada em relação ao solo A.

Devido a capacidade de retenção de água que o composto garante a mistura, a sua utilização se torna eficaz em camadas de cobertura de aterros sanitários, pois esta característica garante uma menor produção de lixiviado e de emissão de biogás para a atmosfera (OLIVEIRA, 2013).

- Mistura B proporção 1:1 e 2:1 de solo composto

Assim como foi feito com as misturas A, o mesmo procedimento foi feito com as misturas B. O Gráfico 22 retrata a trajetória de secagem destes materiais e o ponto inicial é determinado pela saturação do anel.

Gráfico 22: Curvas de retenção de água do Material B



Fonte: O Autor (2017)

A umidade gravimétrica máxima do solo B foi de 20% enquanto que para a mistura B de proporção 2:1 foi 30% e para a mistura B de proporção 1:1 foi de 40%. Os pontos de entrada de ar do material B foi de 1400kPa para o solo B, 1250kPa para a mistura 2:1 e 1600kPa para a mistura 1:1. A umidade gravimétrica no ponto de entrada de ar de ambos os materiais (A e B)

não tiveram diferença significativa, mas o valor de sucção do solo B foi cerca de 400kPa superior que o solo A.

Igualmente como as misturas com o material A, ambas as misturas com material B detêm umidade gravimétrica inicial superior ao solo B, também justificado pela capacidade de retenção de água do composto orgânico. Diferentemente do gráfico com o material A, que é possível observar uma mudança brusca nas inclinações da reta, o mesmo não acontece com o material B, justificando mais uma vez a interferência da granulometria na capacidade de retenção de água do solo.

Tabela 14: Tabela resumo dos parâmetros obtidos no ensaio de sucção.

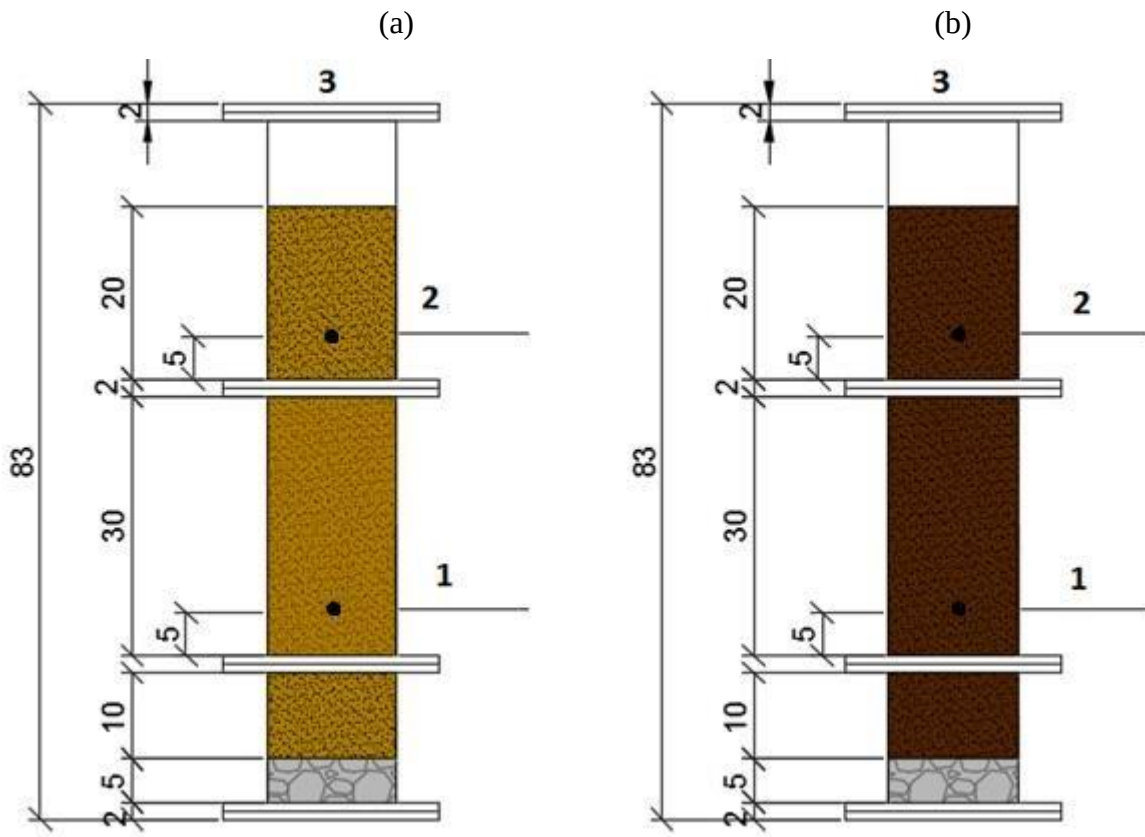
Solo	Ponto de Entrada de Ar (kPa)	Umidade Inicial (%)	$C = \Delta w / \Delta S$ (%)
Solo A	1000	25	0,21
1:1 Solo Composto	2000	40	0,54
2:1 Solo Composto	1700	37	0,26
Solo B	1400	20	0,08
1:1 Solo Composto	1600	40	0,20
2:1 Solo Composto	1250	30	0,17

Fonte: O Autor (2017)

5.2 Ensaios de Coluna

- Fluxo de Gás metano nas Colunas A e B

Assim como mostrado na Figura 15, cada coluna apresenta três locais de medição de gás, estando o primeiro furo localizado a uma distância de 15 cm da base, o segundo furo localizado a 50 cm da base e o terceiro furo está localizado na parte final da coluna, em uma distância de 75cm da base. Como dito anteriormente, as camadas foram compactadas com grau de compactação de 75% e umidade ótima. Após saturada as camadas, iniciou-se o ensaio de coluna com injeção de 100% de metano à um fluxo de gás de 3,5g CH₄/m².h. A Figura 4 mostra as numerações de cada local de medição.

Figura 4: Pontos de medição de gás

Fonte: O Autor (2017)

Nota: (a) Coluna A com Mistura A na proporção 1:1 (b) Coluna B com Mistura B na proporção 1:1

Na Tabela 15 estão apresentados os resultados das leituras de gases nos locais de medições nas colunas A e B.

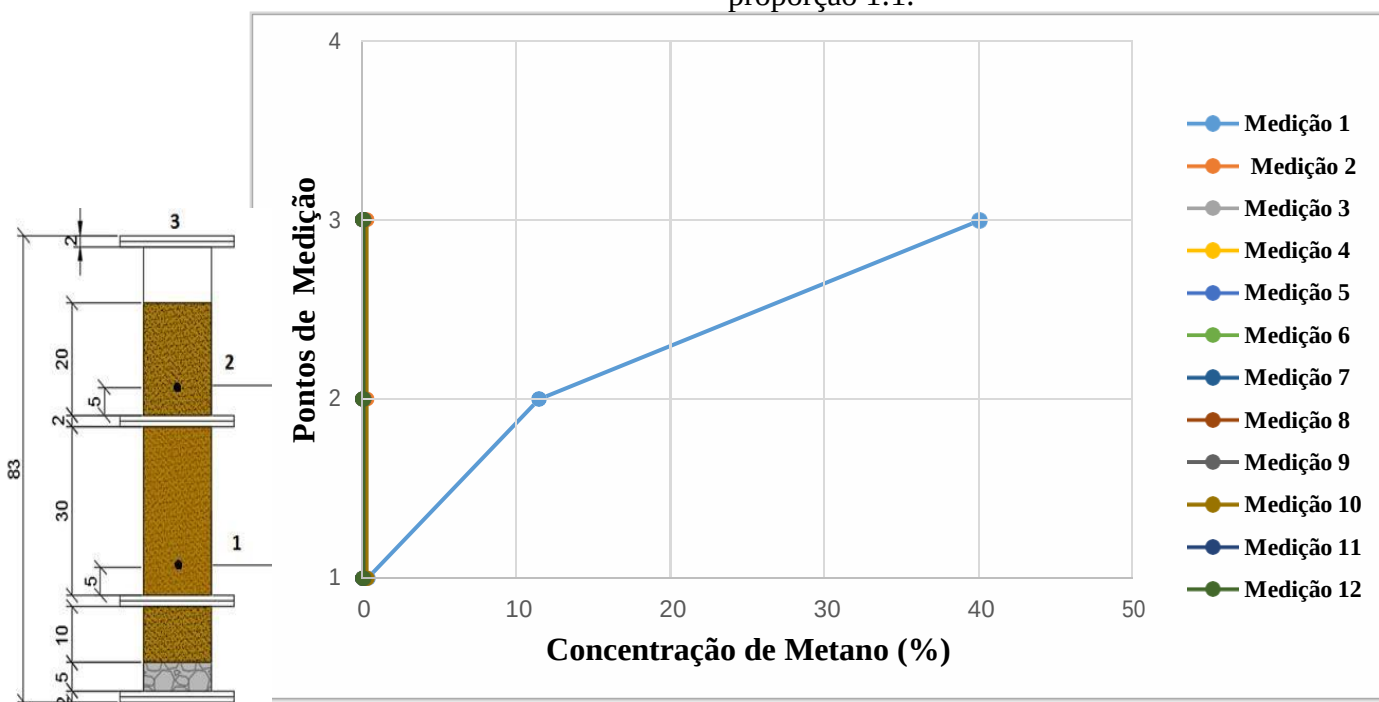
Tabela 15: Resultados das leituras de gás das colunas A e B

	Coluna A						Coluna B					
	Concentração dos Gases (%)											
	Metano- CH4			Dióxido de Carbono- CO2			Metano- CH4			Dióxido de Carbono- CO2		
Ponto de Medição	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1
Medição												
1	40	11,4	0,3	1,4	4,4	0,2	9,6	2,6	0,2	2,8	2,4	0
2	0,2	0,2	0,2	0,6	3,6	4,8	0,2	0,3	0,6	0,8	2,2	7
3	0	0	0,2	0,6	4	7,4	0	0,2	0,3	0,4	2,8	4,8
4	0	0	0	0	3,4	6,8	0	0	0	0	2,6	4,2
5	0	0	0	0	3,6	7	0	0	0	0	2,8	4,2
6	0	0	0,1	0	4,6	7,6	0	0	0	0	3,2	4,4
7	0	0	0	0	2	5,4	0	0	0	0	1,4	2,6
8	0	0	0	0	2	5,2	0	0	1,1	0	2	3,2
9	0	0	0	0	2,4	5,6	0	0	0	0	1,6	3
10	0	0	0,2	0	1,6	4,4	0	0	0,7	0	1	2,4
11	0	0	0	0	1,2	4	0	0	0	0	1,4	2,4
12	0	0	0	0	1,8	3,8	0	0	0,2	0	1,4	2,4

Fonte: O Autor (2017)

Para melhor entendimento dos resultados, no Gráfico 23 estão apresentados os resultados do comportamento da coluna A quando submetida ao fluxo de gás nos 30 dias de ensaio com medição em dias alternados.

Gráfico 23: Resultados das leituras de concentrações de metano na Coluna A- Mistura A com proporção 1:1.

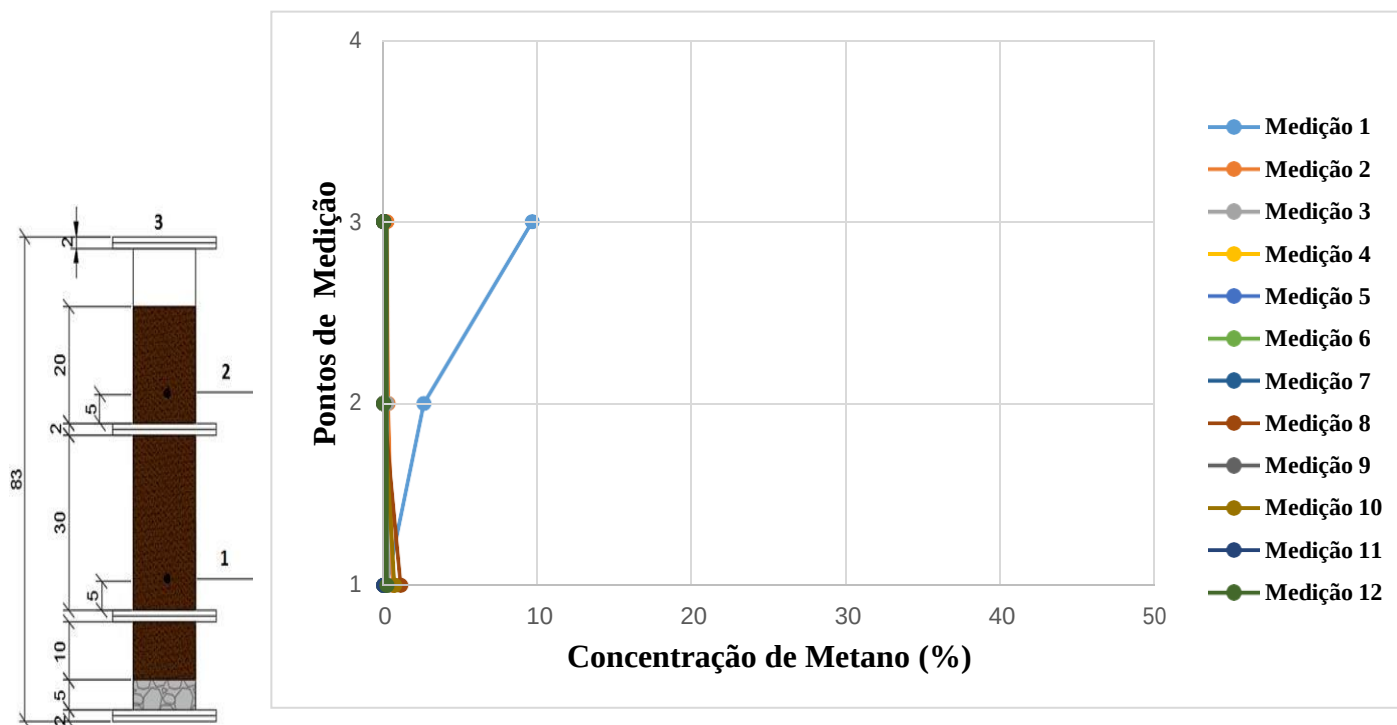


Fonte: O Autor (2017)

Como é possível observar no Gráfico 23, apenas no primeiro dia obteve-se resultado de metano, em todos os outros dias a coluna apresentou nos diferentes pontos de medição uma concentração nula de CH_4 . Tendo ciência que durante todo o ensaio foi injetado na coluna um fluxo de gás com 100% de metano, apenas no primeiro dia a concentração de metano foi na ordem de 40% para o ponto de medição 3, 11,4% para o ponto 2 e 0,3% para o ponto 1, em todos os outros dias não foi observado valores para o gás. Como inicialmente foi feito a saturação da coluna é descartado a possibilidade de dificuldade de percolação do metano e começa-se a considerar tendência de oxidação deste gás pelas bactérias metanotróficas.

Para a coluna B foi realizado o mesmo procedimento e no Gráfico 24 é apresentado os resultados obtidos durante os dias de ensaio.

Gráfico 24: Resultados das leituras de concentrações de metano na Coluna B- Mistura B proporção 1:1.



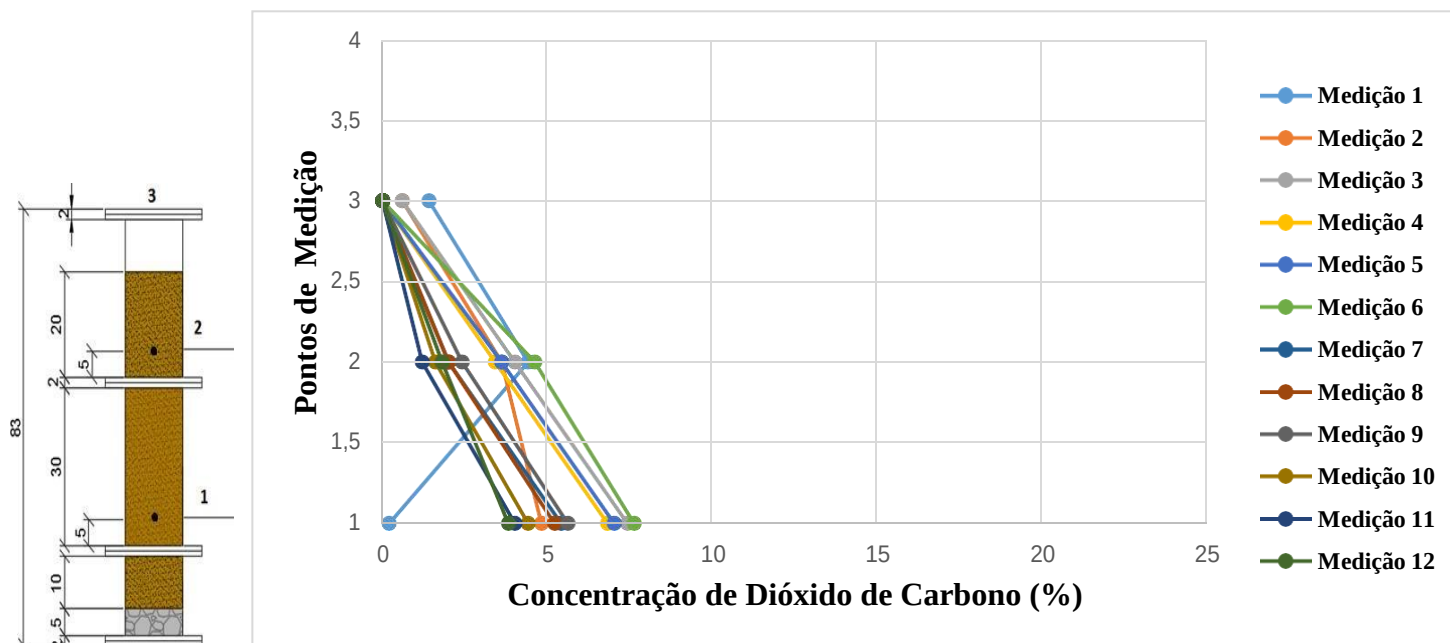
Fonte: O Autor (2017)

Para a coluna B foi constatado que no primeiro dia de medição, as concentrações de metano foram de 9,6 % para o ponto 3, 2,6% para o ponto 2 e 0,2% para o ponto 1. Em relação a coluna A e ao primeiro dia de medição, a coluna B apresentou uma diferença na ordem de 30,4% para o ponto 3, 8,8% para o ponto 2 e 0,1% para o ponto 1. A diferença significativa entre as duas colunas é justificada pela diferença entre granulometrias. Por apresentar um solo mais arenoso, a coluna B possui uma maior permeabilidade ao ar quando comparada a coluna A, fundamentando assim em uma menor retenção de gás metano para o primeiro dia.

Para todos os outros dias, a coluna apresentou concentrações bastante reduzidas de metano, próximas de zero, e só foi melhor observado fluxo no ponto de medição 1, que é o ponto mais próximo da entrada de gás. Assim como ocorreu com a coluna A, a concentração final de metano não é significativa quando comparado ao fluxo de 100% de gás que estava sendo introduzido, considerando assim que, quase em totalidade, o gás introduzido foi oxidado.

No Gráfico 25 estão apresentados a relação das concentrações de dióxido de carbono ao longo dos dias de acordo com a profundidade da coluna A.

Gráfico 25: Resultados das leituras de concentrações de dióxido de carbono na Coluna A

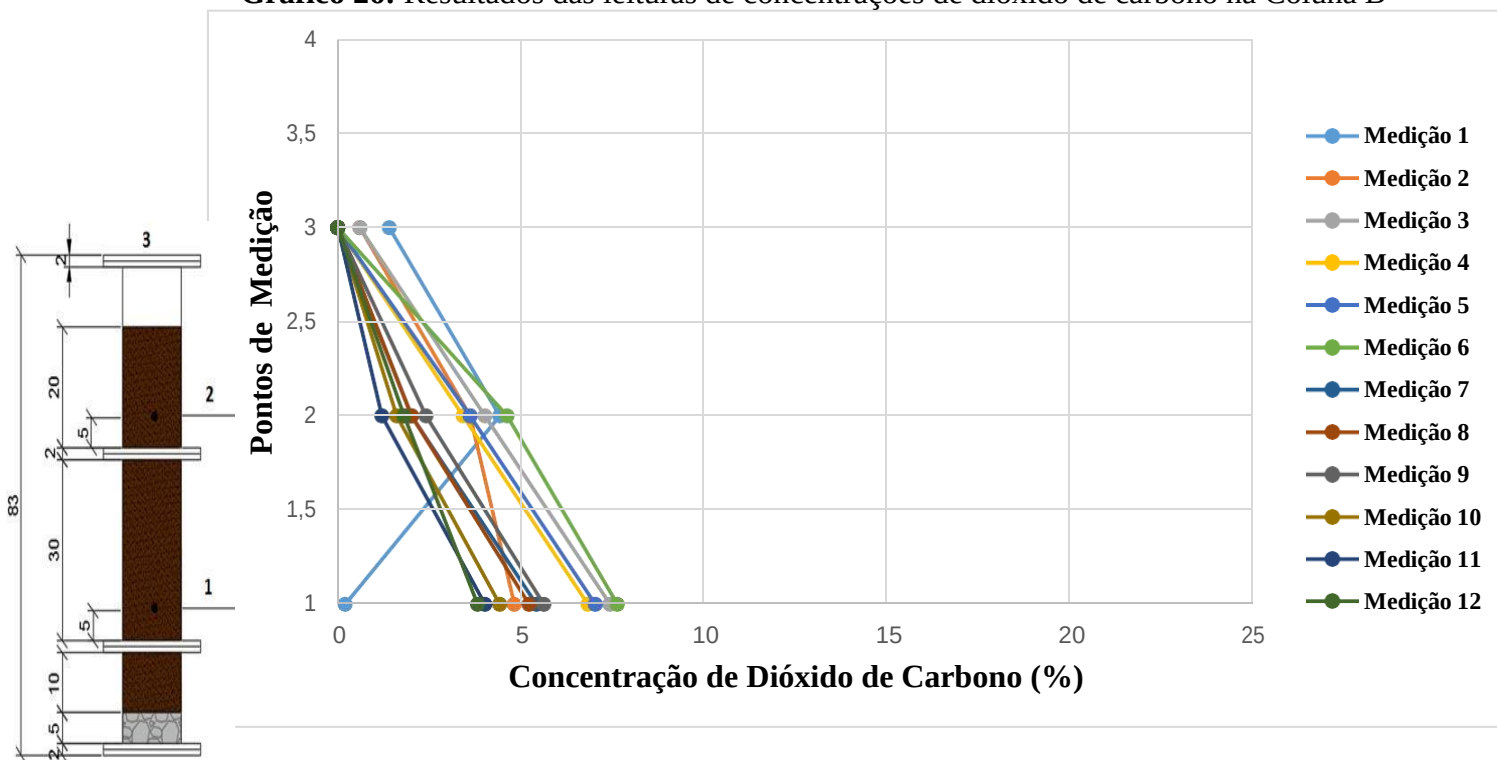


Fonte: O Autor (2017)

De acordo com o Gráfico 25, no primeiro dia de medição da coluna A, constatou-se que as concentrações de CO₂ no ponto 1 apresentou o menor valor, tal resultado pode ser justificado pelo fato que as bactérias que estavam no ponto 1, que era o ponto mais próximo da entrada do fluxo de gás, ainda estavam em processo de adaptação para então assim trabalhar no processo de oxidação. Nos pontos 2 e 3, também para o primeiro dia, as concentrações foram mais elevadas se comparado com os resultados de outros dias.

Em todo o perfil do gráfico é observado uma similaridade. O pico de concentração de CO₂ foi observado no dia 6, com 7,6% no ponto 1, 4,6% no ponto 2 e 0% no ponto 3. No mesmo dia 6, para concentração de metano em ambas as colunas as concentrações de metano foram de 0%. Nas medições 11 e 12, as concentrações de CO₂ foram reduzidas tendendo a uma estabilização, uma vez que há a ausência de concentrações significativas de metano, que é o substrato para a geração de dióxido de carbono.

Os resultados das concentrações de CO₂ para a coluna B são apresentados no Gráfico 26.

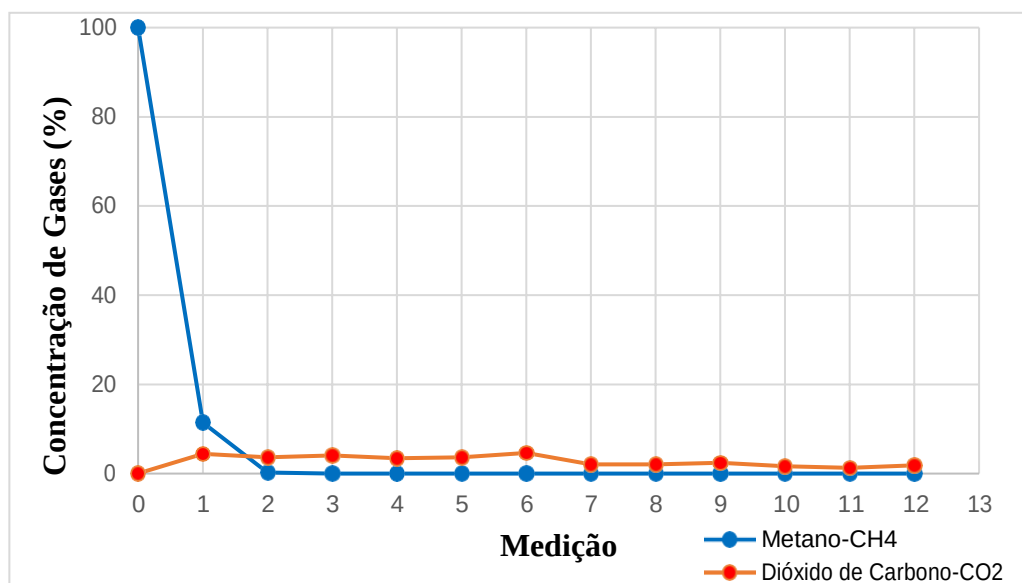
Gráfico 26: Resultados das leituras de concentrações de dióxido de carbono na Coluna B

Fonte: O Autor (2017)

Para a coluna B, as concentrações de CO₂ teve o seu pico na medição 2, apresentando 7% no ponto 1, já nos pontos 2 e 3 deste mesmo dia foram de 2,2% e 0,8% respectivamente, sendo valores similares aos encontrados nos outros dias neste mesmo ponto. Para a medição 1, as concentrações de CO₂ para o ponto 1 deram 0%, resultado sem diferença significativa para este mesmo ponto e dia na coluna A. Tal evento também pode ser justificado pelo processo de adaptação das bactérias antes de iniciar o processo de oxidação do metano. Em relação a coluna A, a coluna B apresentou concentrações mais reduzidas de dióxido de carbono, que pode ser justificado pela maior permeabilidade que a mistura B apresenta, facilitando o escape deste gás para a atmosfera invés da sua retenção na coluna e atividade oxidativa.

Assim como ocorreu com a coluna A, na coluna B a medição 6 também foi um dia de altas concentrações de CO₂ nos pontos 1 e 2, já no ponto 3 a concentração também foi nula. Para medição de gás em profundidade rasa de uma coluna, assim como ocorre no ponto 3, é observado uma tendência a nulidade das concentrações de metano e de dióxido de carbono, tal evento também foi verificado em Gebert e outros (2011) para esta mesma compactação de 75%.

A relação de concentração de gases da coluna A de acordo com os pontos de máximo e mínimo observados na coluna são apresentados no Gráfico 27.

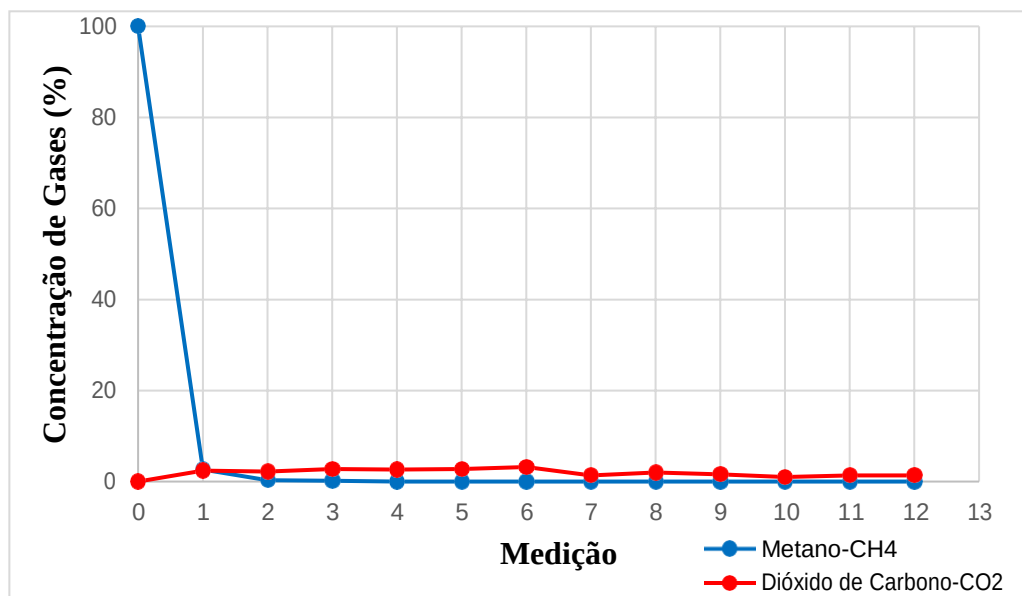
Gráfico 27: Concentração de gases da coluna A no ponto 2

Fonte: O Autor (2017)

O gás introduzido na coluna A é de 100% de metano, com o passar dos dias, as concentrações de metano se reduzem até chegar a zero enquanto que as concentrações de dióxido de carbono aumentam. A partir da medição 2 já é observado a inversão dos valores de CH₄ e CO₂, onde também é verificado que as concentrações internas de metano estabilizam-se apresentando apenas valores de CO₂. Após o ponto de pico de concentração de dióxido de carbono, observa-se que o mesmo tende a se manter estável com o passar dos dias. De acordo com os dados, a utilização de composto aliado ao tipo de solo empregado e o grau de compactação, comprova que a camada oxidativa apresenta tendência de eficácia na oxidação do metano

O Gráfico 28 apresenta os resultados das concentrações de gases da coluna B de acordo com os pontos de máximo e mínimo observados na coluna.

Gráfico 28: Concentração de gases da coluna B no ponto 2



Fonte: O Autor (2017)

Assim como ocorreu com a coluna A, na coluna B as concentrações de metano tendem a redução a partir da medição 1 e na medição 2 já é verificado que há uma inversão de valores nas concentrações de metano e dióxido de carbono. A partir deste dia, as concentrações de CH₄ tendem a nulidade e apresentam uma estabilização. O pico de concentração de CO₂ é observado na medição 2 e depois deste evento há uma queda nas concentrações deste gás e é observado uma consolidação dos resultados de dióxido de carbono. Exceto pelo pico de CO₂ na medição 2, as duas colunas apresentam similaridade e mesma conformação de gráfico.

A coluna A apresenta maiores concentrações de dióxido de carbono devido ao poder de retenção que solos argilosos apresentam quando comparado com solos arenosos, ou seja, devido à alta permeabilidade ao ar que solos arenosos possuem, o escape do gás é facilitado. Em relação as concentrações de metano, ambas as colunas apresentaram tendência a redução das emissões, comprovando que a utilização de camadas do tipo oxidativas são efetivas na diminuição de emissões de gases do efeito estufa.

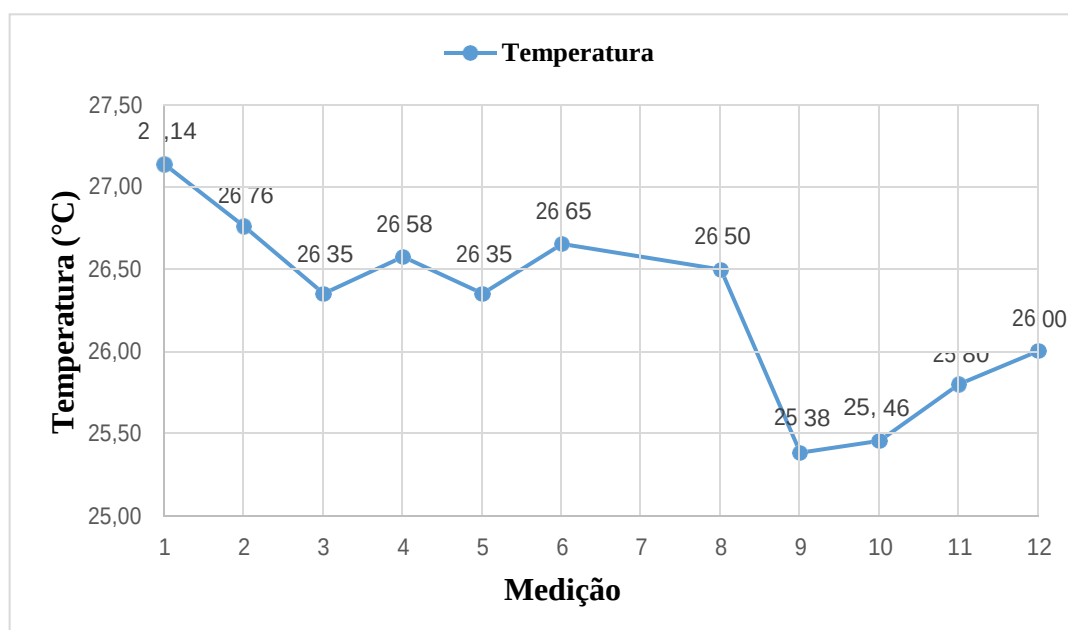
Em relação aos dados obtidos com os sensores 5ET, que tinham como capacidade de captar e armazenar dados de umidade, condutividade elétrica e temperatura, foi feito a medição durante uma semana, constatou-se que no parâmetro umidade em ambas as colunas teve uma

variação média na ordem de 2%, quando comparado com a umidade em que as misturas estavam no início da montagem da coluna (26% para a coluna A e 23% para a coluna B). A queda no parâmetro da umidade é justificada pelo fato que a coluna se manteve aberta durante todo o ensaio e as misturas perderam umidade para o ambiente.

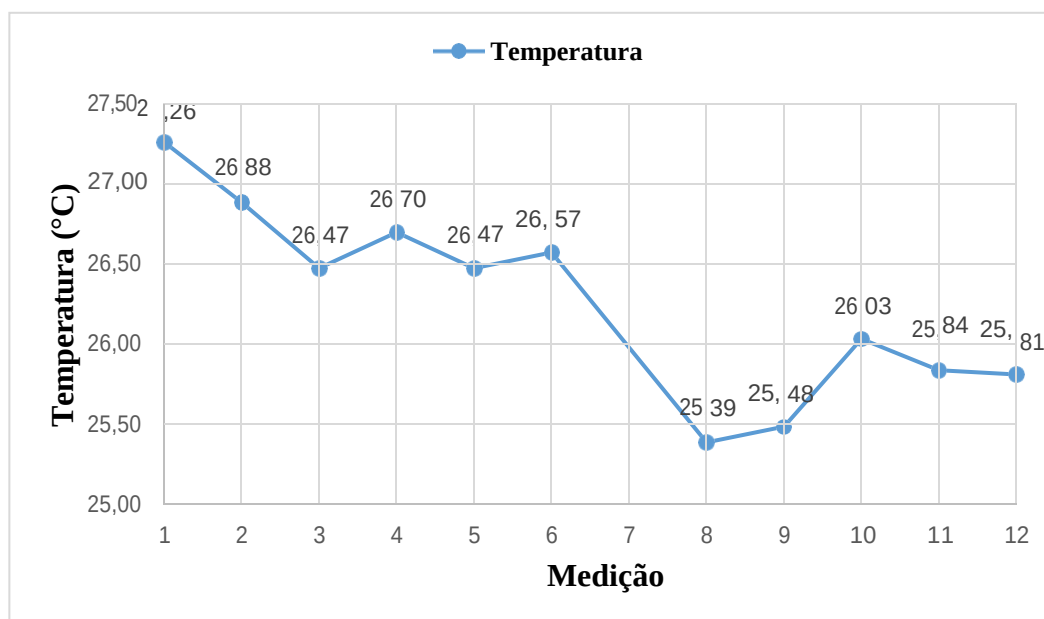
Para o parâmetro de condutividade elétrica, ambas as colunas mantiveram valores constantes durante todo o ensaio. Para a coluna A foi verificado uma condutividade elétrica de $0,58 \mu\text{S}/\text{cm}$ e para a coluna B foi de $0,42 \mu\text{S}/\text{cm}$. De acordo com Nadler e Frenkel, (1980), a condutividade elétrica é a capacidade que o solo detém de conduzir corrente elétrica, seja através da água intersticial ou através de cátions eletricamente móveis. Esse parâmetro é uma propriedade intrínseca do material, assim como densidade e porosidade. Em Molin & Rabello, (2011) quando comparado condutividade elétrica de diferentes tipos de solo, também foi verificado uma condutividade maior em solos argilosos que em solos arenosos.

Quanto ao parâmetro de temperatura interna das colunas, foi observado que não teve nenhuma diferença significativa entre as colunas. Para a coluna A, foi observado uma temperatura média de $25,85^\circ\text{C}$ e para a coluna B de $25,97^\circ\text{C}$. Os Gráficos 29 e 30 mostram a variação da temperatura das colunas em função dos dias.

Gráfico 29: Variação da temperatura da coluna A



Fonte: O Autor (2017)

Gráfico 30: Variação da temperatura da coluna B

Fonte: O Autor (2017)

A temperatura do ambiente variou em torno de 27°C, desta maneira, não foi verificado diferença significativa entre a temperatura interna da coluna com a temperatura do ambiente.

Analisando de forma geral, a aplicação de camadas oxidativa mostrou-se como uma alternativa eficiente para cobertura de aterros sanitários, garantindo de forma segura a minimização de emissões de gases de metano.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adição de composto nos solos A e B, nas proporções 1:1 e 2:1 em volume, não alterou significativamente as características granulométricas destes materiais. O acréscimo de composto ocasionou um aumento na parcela de granulometria mais grossa, devido a presença de restos de podas encontradas no composto.

Quanto ao ensaio de compactação, é possível constatar que as misturas apresentaram uma menor densidade quando comparada com o solo puro, que é justificado pelas propriedades do composto, bem como a sua quantidade de vazios. Em ambas as misturas, nas diferentes proporções, foi observado um aumento na umidade ótima, devido a capacidade de retenção de água do composto. Esta característica é benéfica, pois mantém a camada de cobertura mais úmida, evitando assim problemas como ressecamento e fissuras, que ocasionam em problemas como escape do gás gerado no aterro bem como no aumento do volume de lixiviados que necessitam de tratamento.

Em relação aos resultados de compressibilidade dos materiais, os coeficientes obtidos para os diferentes materiais apresentam grande similaridade. A adição de composto não alterou notoriamente perda na capacidade geotécnica da camada, exceto pelas misturas 1:1 que por apresentarem um maior índice de vazios apresentou um comportamento mais compressível, o que era esperado, uma vez que o composto alterou a densidade dos materiais. Como as camadas de cobertura são utilizadas no fechamento de aterros sanitários, esta diferença de compressibilidade entre os solos puro e as misturas não chega a acarretar nenhum problema para a eficiência e viabilidade do aterro sanitário.

Quanto aos resultados de permeabilidade ao ar, verificou-se que o solo A e as suas respectivas misturas apresentaram melhores resultados para retenção de gás quando comparado ao solo B e suas misturas. Neste quesito, a utilização dos materiais A é mais eficiente pois há uma maior dificuldade de escape dos gases gerados no aterro durante a biodegradação. Avaliando os parâmetros de permeabilidade à água, ambos os materiais apresentaram eficiência na capacidade de retenção de água, sem diferenças significativas.

Com o ensaio da coluna, foi possível verificar a eficiência da camada oxidativa na retenção do gás metano introduzido, uma vez que em ambas as camadas ocorreu a formação de dióxido de carbono e redução de metano. Esta formação de dióxido de carbono é decorrente da atividade microbiana existente nas camadas oxidativas. Neste sentido, observa-se que as camadas com mistura com solo fino (solo A) apresentou maior eficiência que a camada com

mistura com solo grosso (Solo B). Em relação a efetividade de ambas as colunas, observou-se que a coluna A apresentou maior geração de dióxido de carbono, o que é justificado pela menor permeabilidade que a mistura A possui quando comparada com a mistura B. Mesmo tendo esta diferença entre as duas colunas, no quesito de minimização de emissões de gases de efeito estufa para atmosfera o uso de camada oxidativas se mostra como uma alternativa viável principalmente em aterros sanitários que não possuem um sistema de coleta e canalização eficiente de gás.

Sendo assim, a utilização destes tipos de solos e suas respectivas misturas com composto orgânico se mostram potencialmente adequados para uso em camadas oxidativas em aterros, diminuindo assim o uso de grande quantidade de material argiloso, evitando por conseguinte problema de fissuras e trincas, sem contar que a utilização de composto também se torna uma alternativa mais econômica.

7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Verificar o comportamento das colunas quando submetidas a diferentes fluxos de metano e a sua respectiva relação com a oxidação deste gás.
- Análise do comportamento da coluna quando submetida a um fluxo de água.
- Identificação e quantificação das bactérias presentes nas colunas e determinar a sua relação diante de diferentes proporções de misturas.

REFERÊNCIAS

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. Recife-PE.

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

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

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

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

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

_____(1988) **NBR 7.181/88 – Análise granulométrica para solos, com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material**. Rio de Janeiro, RJ.

ASTM, D5084-10. Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. American Society for Testing and Materials. Volume 04.08. **Soil and Rock (I): D420 - D5876**. 2010.

AUGENSTEIN, D.; PACEY, J. Modelling landfill methane generation. **Proceedings of the Third International Landfill Symposium**, Sardenha, Italia, v. 1, p115-148, 1991.

BAHR, T.; FRICKE, K; HILLEBRECHT, K.; KOLSH, F.; REINHARD, B. **Clean Development Mechanism – Tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões**. 2006.

BIDONE, F.R.A. **Conceitos básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos – EESC/USP, 120p, 1999.

BIDONE, F. R. A. **Resíduos sólidos provenientes de coletas especiais: Eliminação e valorização**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). Rio de Janeiro. 2001.

BOLTZE, U. & de FREITAS, M. H. (1996) **Changes in atmospheric pressure associated with dangerous emissions from gas generating sites**. The “explosion risk threshold” concept. Proceedings of the Institution of Civil Engrs. Geotechnical Engng., v. 119, July. Pp. 177-181.

BRASIL. **Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Publicada no D.O.U. em 03/08/2010. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em 23 de maio de 2016.

CABRAL, A. R. ARTEAGA, K. RANNAUD, D. AÏT-BENICHOUE, 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.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; LANGE, L. C.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Rio de Janeiro: ABES / RiMa, 294 p., 2003.

CAVALCANTI DA PURIFICAÇÃO, R. **Utilização de biocamada metanotrófica como alternativa para reduções de metano por aterros sanitários**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

CHANDLER, R. J. & GUTIERREZ, C. I. **The filter-paper method of suction measurement**. Geotechnique. 1986. vol. 36, nº 2 – pp 265-268.

CHRISTENSEN, T. H.; KJELDSSEN, P.; BJERG, P. L.; JENSEN, D. L.; CHRISTENSEN, J.B.; BAUN, A.; ALBRECHTSEN, H. J.; HERON, G. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. **Applied Geochemistry (Journal of the International Association of GeoChemistry)**, v.16, n 7-8, pp.659-718, 2001b.

CICHOTA, R. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.585-596, 2004.

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.

EINOLA, J. K. M., KARHU, A. E. e RINTALA, J. A. (2008). “Mechanically-Biologically Treated Municipal Solid Waste as a Support Medium for Microbial Methane Oxidation to Mitigate Landfill Greenhouse Emissions”. *Waste Manag.*, v.28, p.97-111

ENVIRONMENT AGENCY. **Guidance on monitoring landfill gas surface emissions**. Inglaterra, 63 p, 2004.

FERNANDES, Juliana Gonçalves. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental**. 2009. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado) em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2009.

FISCHER, C.; MAURICE, C.; LAGERKVIST, A. **Gas Emission from Landfills an overview of issues and research needs**. Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden. 55p, 1999.

FREDLUND, D. G., RAHARDJO H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. John Wiley e Sons, USA, 1993, 539 p.

FOURIE, A.B. e MOONSAMMY, M. (2002) – **Store and release covers for landfills in semi-arid climates** Unsaturated soils, Recife, Brazil Anais, pp. 823-826.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. Ed. John Wiley & Sons, Inc, New York, 1993. 486p.

GEBERT, J. GROENGROEFT, A. PFEIFFER, E. M. Relevance of soil physical properties for the microbial oxidation of methane in landfill covers. **Soil Biology & Biochemistry** 43. 2011. 1759-1767.

GERSCOVICH, D. M. S. (2010). Apostila Estruturas de Contenção, Empuxos de Terra. Faculdade de Engenharia/UERJ. Departamento de Estruturas e Fundações. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro

GOMES, T. L.; GEHLING, G. R. O aterro da caturrita em Santa Maria – RS: uma atualização quanto aos potenciais da digestão anaeróbia. **Tecno-Lógica**, v. 13, n. 2, p. 75–85, 2009.

GOUVEIA, Nelson. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. Ciênc. **saúde coletiva** [online]. 2012, vol.17, n.6, pp.1503-1510. ISSN 1413-

HANSAN, R. and HANSON, T.(1996) “**Methanotrophic bacteria**” **Microbiological Reviews**, v 60, n° 2, pp.439-471.

HAUSER, V. L., WEAND, B. L. & Gill, M. D. (2001). **Alternative Landfill Covers**. **Air Force Center for Environmental Excellence Technology Transfer Division**. 338p.

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

HILGER, H. A. e HUMER M. (2003) – **Biotic landfill cover treatments for mitigating methane emissions** . – Environmental Monitoring and Assessment. vol. 84, pp. 71-84.

HRAD, M., HUMER, M., WIMMER, B. REICHENAUER, T.G. **Design of top covers supporting aerobic in situ stabilization of old landfill – An experimental simulation in lysimeters**. Waste Management, 2012, v. 32. 2324-2335.

HUMER M. e LECHNER P. (1999) – Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills. – **Waster Management & Research**.vol. 17, pp. 443-452.

HUMER M. e LECHNER P. (2003) – Effect of Methane oxidation on the water balance of the landfills cover and the vegetation layer. - Proc. Ninth International Waster Management and Landfill Symposium. **Anais**. Cagliari, Italy

HUMER, M. **Abatement of landfill methane emissions by microbial oxidation in biocovers made of compost**. PhD Thesis, University of Natural Resources and Applied Life Sciences (BOKU), Vienna, 2004, 279 p.

HUMER, M. RÖDER, S. LECHNER, S. Approaches to assess biocover performance on landfills. **Waste Management**, v. 29, 2009. p. 2092–2104.

HUBER-HUMER, M.; KJELDSSEN, P.; SPOKAS, K. A. Special issue on landfill gas emission and mitigation. **Waste Management**, v. 31, n. 5, p. 821–822, 2011.

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

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

Klute, A. and Dirksen, C. (1986) **Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods**. In: Klute, A. Ed., *Methods of Soil Analysis - Part 1 - Physical and Mineralogical Methods*, American Society of Agronomy, Madison, 687-734

LEE, H. C., WRAY, W. K. 1995. Techniques to Evaluate Soil Suction – A Vital Unsaturated Soil Water Variable. **Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soil**, v. 2. Paris, France. Balkema. p. 615-622.

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.

MCBAIN, M.C.; WARLAND, J.S.; MCBRIDE, R.A.; RIDDLE, C. W. Micrometeorological measurements of N₂O and CH₄ emissions from a municipal solid waste landfill. **Waste Management & Research**. n° 23. p 409-419, 2005.

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.

MACIEL, F. J. JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. **Waste Management**. v.31. 2011, p. 966-977.

MATEUS, M. S. C. S. **Proposta de Modelo para Avaliação do Balanço Hídrico e Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso do Aterro Metropolitano Centro de Salvador-BA**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro. 2008. 312p.

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, 18 a 20 de outubro de 1995.

MARINHO, F.A.M. & OLIVEIRA, O.M. The filter paper method revisited. **Geotech. Test. J.**, 29:1-9, 2006.

MENEZES, L. P. **Determinação da curva de retenção de água em solos utilizando bomba de fluxo**. 2013. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

MOLIN, J. P.; Rabello, L. M. **Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo**. Engenharia Agrícola, v.31, p.90-101, 2011

NADLER, A.; Frenkel, H. (1980). **Determination of Soil Solution Electrical Conductivity from 372 Bulk Material Electrical Conductivity**, Measurements by the Four-Electrode Method. Soil 373 Science Society of American Journal, v. 44, p. 1216-1221.

NERY, J. T. CARFAN, A. C. PARIZOTTO, T. M. Análise da precipitação pluvial na Bacia do Paranapanema. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 5, setembro de 2009.

OLIVEIRA, O. M. MARINHO, F. A. M. Estudo de Barreiras Capilares por Meio de Simulação de Chuva em Coluna de Solo. VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados – Salvador-Bahia. **Anais**, 2007.

OLIVEIRA, L. R. G. **Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos** Tese de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

PARK, J.W. E SHIN, H.C. Surface emission of landfill gas from solid waste landfill. **Atmospheric Environment**. v. 35 , p. 3445-3451, 2001.

PEREIRA, L. A. A. FIALHO, M. L. Gestão da sustentabilidade: compostagem otimizada em resíduos sólidos orgânicos com a utilização de metodologia enzimática na implantação de uma usina de compostagem de lixo no município de Santa Juliana/MG. **International Journal of Knowledge Engineering and Management**, ISSN 2316-6517, Florianópolis, v. 2, n. 2, 2013, p. 52-85.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de Compostagem**. Ed. UFV – Viçosa. 2007.

PINTO, S. C., **Curso Básico de Mecânica dos Solos**, Ed. Oficina de Textos, S.P., 2000.

RICKEN AX, Savelsbergh GJ, Bennett SJ. Coordinating degrees of freedom during interceptive actions in children. **Experimental brain research**. 2004: 156(4): 415-421.

RÖMKENS M. J. M. PRASAD S. N. Rain Infiltration into swelling/shrinking/cracking soils. **Agricultural Water Management**, v. 86. 2006. P.196–205.

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.

SALTER, P.J. & WILLIAMS, J.B. **The influence of texture on the moisture characteristics of soils. II.** Available water capacity and moisture release characteristics. J. Soil. Sci. 16:310-317, 1965.

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

SASSAKI, R. A. **Distribuição de tempos de residência em sistemas alimentados com vazão variável.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. 2005.

SEEP/W. 2012. Seepage Modeling with SEEP/W. An Engineering Methodology. Edition GEO-SLOPE International Ltd.

SILVA, A. M. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

SOLOMON, S.; CHANGE, I. P. on C.; I., I. P. on C. C. W. G. **Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC.** Cambridge University Press, 2007. (Assessment report (Intergovernmental Panel on Climate Change).: Working Group). ISBN 9780521705967.

TEIXEIRA, P. F. LIOTTI, R. G. TORVES, J. C. FINOTTI, A. R. CABRAL, A. VAZOLLER, R. F. TEIXEIRA, C. E. MARINHO, F. A. M. **Processo de Oxidação do metano através das bactérias metanotróficas em coberturas de aterros sanitários.** VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados – Salvador, **Anais**, 2007.

TEIXEIRA, P. F. **Oxidação Biológica do Metano em Coberturas de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos: Dinâmica do Processo e Aspectos Geotécnicos.** Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008. 168p.

TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics.** New York, John Wiley & Sons, Inc, 1943.

TCHOBANOGLIOUS, G., THIESEN, H., VIGIL, S. A.. **Integrated solid wastemanagement - engineering principles and management issues.** New York: McGraw-Hill International Editions. 978 p, 1993.

TOZETTO, C. M. **Modelagem matemática de aterros sanitários com a simulação hidrológica da geração de lixiviado: Estudo de caso do aterro sanitário de Curitiba.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

UNEP. **Vital Climate Graphics.** [S.l.], 2005.

UNEP, United Nation Environment Program. 2011, **Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication**. Disponível em: <<http://www.unep.org/greeneconomy/>> . Acesso em 29 ago .2017.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). **Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills – Background Information for Proposed Standards and Guidelines**. Emission Standards Division. 1991.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Evapotranspiration landfill cover system**. Fact sheet. 12 p, 2003.

URACH, F. Estimativa da retenção de água para fins de irrigação. 2007. 78f. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, RS.

VIEIRA, A. M. **Estudo de barreiras capilares como Cobertura final de aterro de resíduos**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005. 287p.

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

ZHANG, H. H. HE, P.J. SHAO, L. M. N₂O emissions from municipal solid waste landfills with selected infertile cover soils and leachate subsurface irrigation. **Environmental Pollution**, 2008. 156(3):959–65.

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