

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**NAYARA TORRES BELFORT ACIOLI**

**AVALIAÇÃO DE CAMADA DE COBERTURA EM MISTURA DE SOLO  
E MATÉRIA ORGÂNICA COMPACTADOS NÃO SATURADOS**

**RECIFE, 2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**NAYARA TORRES BELFORT ACIOLI**

**AVALIAÇÃO DE CAMADA DE COBERTURA EM MISTURA DE SOLO  
E MATÉRIA ORGÂNICA COMPACTADOS NÃO SATURADOS**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Federal  
de Pernambuco para obtenção do  
título de Engenheira Civil**

**Área de concentração:  
Engenharia Civil**

**Orientador: DSc. José Fernando T.  
Jucá**

**RECIFE, 2015**

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

A181a Acioli, Nayara Torres Belfort.

Avaliação de camada de cobertura em mistura de solo e matéria orgânica compactados não saturados. / Nayara Torres Belfort Acioli - Recife: O Autor, 2015.

71folhas, Ils., Abr.; Sig. e Tabs.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. José Fernando T. Jucá.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Departamento de Graduação em Engenharia Civil, 2015.

Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Camada de cobertura oxidativa. 3. Permeabilidade. 4. Sucção. I. Jucá, José Fernando T (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-037



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

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

**CANDIDATO: NAYARA TORRES BELFORT ACIOLI**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Orientador: JOSÉ FERNANDO THOMÉ JUCÁ**

**Examinador 1 AMARO HENRIQUE PESSOA LINS**

**Examinador 2 MARIA ODETE HOLANDA MARIANO.**

**TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: AVALIAÇÃO DE CAMADA DE COBERTURA EM MISTURA DE SOLO E MATÉRIA ORGÂNICA COMPACTADOS NÃO SATURADOS**

**LOCAL: SALA JAIME GUSMÃO DEC/UFPE HORÁRIO DE INÍCIO: 11 horas**

Em sessão pública, após exposição de cerca de 40 minutos, o candidato foi argüido oralmente pelos membros da banca, sendo considerado:

1)  **aprovado(s)**, pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito

**Sem revisões.**

**Com revisões**, a serem feitas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias. (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

2)  **reprovado(s).**

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

**Recife, 11 de Fevereiro de 2015**

Orientador:.....

Examinador 1.....

Examinador 2.....

Candidato 1.....

Dedico esse trabalho a Deus, aos meus pais e a minha irmã, os quais me deram todo apoio para a realização desta etapa da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me criar e dar suporte para que eu consiga realizar meus sonhos e finalizar os trabalhos aos quais me comprometo, por me dar saúde e disposição para batalhar e correr atrás da minha realização profissional.

Aos meus familiares, meus pais e minha irmã, que foram essenciais na conclusão dessa etapa. Agradeço ainda o apoio, os conselhos e os momentos de afeição. Nos momentos de felicidade, de angústia, de tristeza e de conquista, com vocês tenho conforto e força para batalhar.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Jucá, que me deu conselhos profissionais e pessoais, os quais, a partir do seu rigor e sinceridade, me ajudaram a construir meu perfil profissional. Agradeço pela orientação, dedicação e por me dar essa oportunidade de realizar esse trabalho com todo suporte necessário e com um convívio surpreendente, de um professor de engenharia e da vida. Por fim, agradeço por corrigir minhas falhas, por me fazer enxergar minhas qualidades e me ensinar a ser engenheira.

Aos meus colegas de faculdade e do Grupo de Resíduos Sólidos pelos momentos de reuniões, debates, conselhos, incentivos e compreensão em toda essa jornada. Agradeço pelo convívio harmonioso durante toda a realização desse trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente participaram, torceram por mim e me deram apoio em mais essa conquista.

Muito obrigada!

## RESUMO

A emissão incontrolada de gases em aterros de resíduos urbanos localizados próximos a zonas urbanas é um problema socioambiental comum nas grandes cidades brasileiras. Diversos impactos ambientais a níveis local e global podem ser gerados a partir da contaminação do ar atmosférico através do biogás proveniente da decomposição dos resíduos sólidos urbanos. No Brasil, os municípios de pequeno porte se mostram em um percentual de 90%, com população inferior a 50.000 habitantes segundo o censo do IBGE de 2011, e a maioria dos aterros no país são cobertos com solo argiloso, puro. Os aterros executados com solo puro podem chegar até 60% de retenção do metano, sendo os outros 40% dispersos pela atmosfera. Diante desses dados a camada de cobertura oxidativa ganha espaço de estudo, visando reduzir esse percentual disponível para a atmosfera, liberando, no lugar do metano, gás carbônico, que é cerca de 20 vezes menos poluente do que o mesmo. Esse trabalho exhibe resultados de estudos das características do solo usado na camada de cobertura oxidativa do aterro experimental de resíduos sólidos urbanos (RSU), construído na Muribeca-PE localizada no Brasil, com apoio do Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) que fica na Universidade Federal de Pernambuco, através dos ensaios laboratoriais de sucção (com a determinação da curva característica), granulometria e permeabilidade. A sucção foi objeto de estudo, assim como os outros ensaios, a partir da divisão da prospecção de uma camada de cobertura oxidativa de 60cm em metade superior (0.1m a 0.3m) e metade inferior (0.4m a 0.6m). Serão, portanto, apresentadas consequências da lixiviação de materiais finos após 5 anos da finalização do aterro, que fez com que sua permeabilidade aumentasse. Quanto à sua umidade, fica mais retida na parte superior, com uma diferença da ordem de 8%, que possui o composto, ficando a sua sucção maior na superfície. Esses resultados mostraram a eficiência da camada de cobertura oxidativa, na retenção de água das chuvas, sabendo-se do baixo custo em relação às demais camadas de cobertura, oferecendo maior abrangência dessa camada como escolha de solução para a correta disposição dos rejeitos.

Palavras-chave: Camada de cobertura oxidativa. Permeabilidade. Sucção.

## **ABSTRACT**

The uncontrolled emission of gases in urban residues' embankment located near urban areas is a social and environmental problem, common in Brazilian cities. Several environmental impacts in the local and global scope may be generated by atmospheric air contamination by the biogas resulted from the decomposition of solid urban materials. In Brazil, the cities of small size figure mostly with 90% of all cities, with the population smaller than 50,000 inhabitants, according to the 2011 IBGE' censos, most of the landfill covering layer is composed of clayey, pure soil. The embankments undertaken with pure soil may reach up to 60% of retention of methane, for the other 40% it may be disperse into the atmosphere. In face of this figures the oxidative covering layer is granted some space of study, envisaging to reduce this perceptual available in the atmosphere, releasing, in spite of methane, carbonic gas which is almost 20 times as less polluting than Methane. This paper exposes the results of studies on the characteristics of the soil used for the oxidative coverage layer of the experimental embankment of Solid Urban Residues (SUR), built in Muribeca-PE, Brazil, supported of the Group of Solid Residues (GSR), located at Federal University of Pernambuco, through laboratory vacuum experiments (determining the characteristics curve), granularity, and permeability, that in soil with saturation over 85% offers dramatic drops in the test of permeability to the air, by little increments of water, based in the existing Brazilian norm for this procedure. The suction was studied, as in the other tests, from the division of prospection of an oxidative coverage layer of 60cm, in the upper half (0.1 m to 0.3 m) and lower half (0.4 m to 0.6 m). Therefore, the consequences to be presented from the lixiviation of the fine materials after 5 years of finalization of the embankment, what made its permeability to increase. Concerning its humidity, it is most retained in the upper part, that comprises the compound, with a difference in the order of 8 per cent the superior half to inferior half, retaining the least suction from the surface. These results reveal the efficiency of the oxidative coverage layer in retaining the rain water, it has a lower cost when compared to the other types of layer, offering larger availability of this layer as an alternative for a solution for the appropriate disposal of residues.

Keywords: Oxidative coverage layer. Permeability. Suction.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - TEOR DE UMIDADE A 0,2 M DE PROFUNDIDADE NOS PERFIS DA CAMADA DE COBERTURA CAPILAR.....	20
FIGURA 2 - BALANÇO HÍDRICO EM UM ATERRO SANITÁRIO.....	21
<b>FIGURA 3 - PRINCIPAIS FATORES QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DE GERAÇÃO DE GASES.</b> .....	24
FIGURA 4 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE AO AR (KA) E A ÁGUA (KW) EM FUNÇÃO DA SATURAÇÃO.....	26
FIGURA 5 - FORMA GERAL DA CURVA DE RETENÇÃO DE ACORDO COM A DISTRIBUIÇÃO DE POROS.....	26
FIGURA 6 - VARIAÇÃO DA PERMEABILIDADE AO AR COM A SUCÇÃO MATRICIAL DO SOLO .....	28
FIGURA 7 - CÉLULA EXPERIMENTAL LOCALIZADA NA MURIBECA, JABOATÃO DOS GUARARAPES - PE.....	29
<b>FIGURA 8 - TIPO DE CAMADA DE COBERTURA DO ATERRO SANITÁRIO DA MURIBECA - PE.</b>	30
FIGURA 9 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA (GRAU DE SATURAÇÃO X SUCÇÃO MATRICIAL). .....	31
FIGURA 10 - CURVAS DE RETENÇÃO EXPERIMENTAIS REFERENTES A UMIDADE VOLUMÉTRICA DOS SOLOS ANALISADOS.....	32
FIGURA 11 - PRODUÇÃO DE METANO E RECUPERAÇÃO AO LONGO DA VIDA DO ATERRO. (HUBER-HUMER ET. AL., 2008 APUD LOPES, 2011).....	35
FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DOS INFILTRÔMETROS NA CÉLULA EXPERIMENTAL. (LOPES, 2011).....	38
FIGURA 13 - CURVA GRANULOMÉTRICA DAS CAMADAS DE COBERTURA DA CÉLULA EXPERIMENTAL, DO SOLO USADO NO INFILTRÔMETRO E DO COMPOSTO.....	38
FIGURA 14 - MAPA DE SITUAÇÃO, LOCALIZAÇÃO DO ATERRO A SER ESTUDADO.....	41
FIGURA 15 - ATERRO DA MURIBECA E CÉLULA EXPERIMENTAL .....	41
FIGURA 16 - ESTAÇÃO METEOROLÓGICA NO ATERRO EXPERIMENTAL DA MURIBECA.....	42
FIGURA 17 - ÉTAPA DE REGULARIZAÇÃO PARA COLOCAÇÃO DA CAMADA OXIDATIVA ACIMA DO SOLO COMPACTADO E A COMPACTAÇÃO DA MISTURA DE SOLO E COMPOSTO.....	45
FIGURA 18 - LOCAÇÃO DE PONTOS DE COLETA DAS AMOSTRAS.....	46
FIGURA 19 - LIMPEZA DO SOLO PARA COLETAR AMOSTRAS DO FURO 1 .....	46

FIGURA 20 - VASELINA PARA PROTEGER A AMOSTRA DE DEFORMAÇÕES E FACILITAR A COLETA DO MATERIAL.....	47
FIGURA 21 – (A) RETIRADA DA AMOSTRA 1 (0.1M – 0.3M) DO FURO 1, (B) RETIRADA DA AMOSTRA 2 (0.4M – 0.6M) DO FURO 1, (C), (D) CORREÇÃO DAS FACES E ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS.....	47
FIGURA 22 – (A), (B) PREPARAÇÃO E MOLDAGEM DAS AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE SUCÇÃO, (C) SATURAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	49
FIGURA 23 - A) RETIRANDO A PROTEÇÃO DA AMOSTRA JÁ UNIFORMIZADA NAS FACES E MEDIDA SUA ALTURA, DIÂMETRO E ALTURA, (B) CENTRALIZAÇÃO DA AMOSTRA E COLOCAÇÃO DO CILINDRO COM SAÍDAS INTERNAS SUPERIORES.....	52
FIGURA 24 - (A) ENCAMISAMENTO DA AMOSTRA COM MEMBRANA RESISTENTE, (B) ALOCANDO OS CANAIS DE CONEXÃO DO INTERIOR COM A MÁQUINA, (C) AMOSTRA PRONTA PARA O ENSAIO, COM A CONEXÃO DOS CANAIS NECESSÁRIOS, (D) CÉLULA TRI-FLEX 2 FECHADA, (E) AMOSTRA CONFINADA COM FLUIDO EXTERIOR, ÁGUA DESTILADA, (F) AMOSTRA CONFINADA E ROTÂMETRO, ACIMA DA CÉLULA, JÁ CONECTADO PARA ENSAIO DE PERMEABILIDADE AO AR..	54
FIGURA 25 - DADOS CLIMATOLÓGICOS DE TEMPERATURA E PRECIPITAÇÃO MÉDIOS DOS ANOS DE 2009 A 2014. ....	57
FIGURA 26 - DÉFICIT HÍDRICO MÉDIOS DOS ANOS DE 2009 A 2014 .....	57
FIGURA 27 - ENSAIO DE GRANULOMETRIA FURO 1 E 2 E DA JAZIDA. ....	58
FIGURA 28 - CURVA DE RETENÇÃO DOS FUIROS 1 E 2; UMIDADE VOLUMÉTRICA .....	62
FIGURA 29 - CURVA DE RETENÇÃO DOS FUIROS 1 E 2 - UMIDADE GRAVIMÉTRICA.....	62
FIGURA 30 - CURVA SUCÇÃO X GRAU DE SATURAÇÃO.....	64
FIGURA 31 - CURVA DE SUCÇÃO X ÍNDICE DE VAZIOS.....	65

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TAXA DE OXIDAÇÃO E SUBSTRATO. ....	24
TABELA 2- CARACTERÍSTICA DO PAPEL FILTRO WHATMAN Nº 42.....	27
TABELA 3- FLUXOS DE METANO E GÁS CARBÔNICO NORMALIZADO PELA ESPESSURA EM MÉDIA. ....	33
TABELA 4 - EMISSÃO SUPERFICIAL E FATORES DE INFLUÊNCIA NO FLUXO DE GÁS NA CAMADA DE COBERTURA.....	34
TABELA 5 - RESULTADOS DA PERMEABILIDADE EM FUNÇÃO DA UMIDADE DE COMPACTAÇÃO. ....	36
TABELA 6 - GRANULOMETRIA DO SOLO DA COBERTURA SUPERIOR DA CÉLULA EXPERIMENTAL.....	37
TABELA 7 - LIMITES DE ATTEMBERG, COMPACTAÇÃO PROCTOR E PERMEABILIDADE À ÁGUA DO SOLO. (MACIEL,2009).....	37
TABELA 8 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS EM CADA TIPO DE CAMADA DE COBERTURA.....	39
TABELA 9 - VALORES DO COEFICIENTE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	44
TABELA 10 – POROSIDADE E ABSORÇÃO DO SOLO .....	59
TABELA 11 – CARACTERÍSTICAS DO SOLO DA JAZIDA E DOS FUROS 1 E 2, TOPO E BASE....	60
TABELA 12 - RETENÇÃO (C) .....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
ARM	Associação de Recicladores da Muribeca
ARSU	Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos
CH	Argila de Alta Compressibilidade
CH <sub>4</sub>	Metano
CL	Argila de Baixa Compressibilidade
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
EMLURB	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana
EUA	Estados Unidos da América
GAE	Ponto de Entrada Generalizada de Ar
GCL	Geocomposto de Bentonita
GRS	Grupo de Resíduos Sólidos
H <sub>2</sub> O	Água
Kar	Permeabilidade ao ar
Ksat	Permeabilidade à água
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
ML	Silte de Baixa compressibilidade
NBR	Norma Brasileira
O <sub>2</sub>	Oxigênio
OH	Orgânico de Alta Compressibilidade

PE	Pernambuco
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVC	Policloreto de Polivinila
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SC	Areia Argilosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
1.3	OBJETIVOS .....	15
1.4	ESTRUTURA .....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1.	CAMADA DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS .....	17
2.2.	CAMADAS ALTERNATIVAS.....	18
2.3.	INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NA CAMADA DE COBERTURA .....	19
2.4	GERAÇÃO E EMISSÃO DE GASES ATRAVÉS DA CAMADA DE COBERTURA.....	22
3.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	40
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	40
3.2	DADOS CLIMÁTICOS .....	42
3.3	DESCRIÇÕES DA CAMADA DE COBERTURA OXIDATIVA ESTUDADA .....	44
3.4.	CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS DE SOLO DA CAMADA DE COBERTURA OXIDATIVA .....	45
3.4.1.	CURVA DE RETENÇÃO .....	49
3.4.2.	PERMEABILIDADE .....	51
4.	RESULTADO E DISCUSSÃO .....	56
4.1.	EFEITOS DO CLIMA.....	56
4.2.	CARACTERIZAÇÕES E PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS ESTUDADOS .....	58
4.3.	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA.....	62
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	66
5.1	CONCLUSÕES.....	66
5.2	SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS .....	67
6.	REFERÊNCIAS .....	68

## **1. INTRODUÇÃO**

---

### **1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A geração diária de resíduos sólidos é inerente ao ser humano no desenvolvimento de suas atividades e caso não haja uma correta destinação desses resíduos, por exemplo, essa geração gera poluição. Logo, a destinação dos resíduos sólidos deve ser prioridade para a sociedade, visando a preservação do ambiente natural e a manutenção de condições salubres de vida.

O aterro sanitário tem função principal de proteger a população dos resíduos urbanos, acondicionando-os no mesmo. Para tanto, a camada de cobertura tem fundamental importância, impedindo que haja infiltração de águas pluviais (que ao entrar em contato com os resíduos provoca um aumento da produção de gases e de lixiviado, tóxicos para a população) e impermeabilizando a passagem dos gases gerados pelos resíduos para a atmosfera.

Nessa condição, o aterro sanitário é um meio de controle da poluição e de proteção para a população, permitindo o tratamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no seu acondicionamento, permitindo a degradação, dos resíduos e de seus produtos até seus componentes se tornarem inertes.

### **1.2 JUSTIFICATIVA**

Para a execução de aterros sanitários, existe uma busca por materiais alternativos para o sistema de camada de cobertura, com aspectos geotécnicos e químicos da camada coerentes com o objetivo da camada, que é evitar infiltração de águas pluviais e a passagem de biogás para a atmosfera.

Na ocorrência de dificuldade de encontrar materiais disponíveis com os parâmetros adequados, procura-se por alternativas de camadas de cobertura. Dessa forma, existem camadas de solo misturadas com lama/lodo de estações de tratamento de água e esgoto, pneus triturados, composto orgânico, entre outros.

As normas brasileiras relativas ao projeto, implantação e operação de aterros sanitários não apresentam nenhuma especificação técnica a respeito das

propriedades geotécnicas das camadas de coberturas em geral, apenas um limite para a sua permeabilidade da ordem de  $10^{-7}$  m/s.

Por tanto, nesse estudo serão aprofundadas as características da camada de cobertura misturando-se solos com matéria orgânica proveniente dos resíduos sólidos urbanos (camadas oxidativas), com a finalidade de oferecer suporte técnico para esse tipo de alternativa. Dessa forma, aterros sanitários que possuam resíduo velho ou baixa taxa de matéria orgânica, mas que possuam este tipo de camadas de cobertura poderão ter uma redução de emissões de metano (gerado pelos resíduos), pelo processo de oxidação destes gases quando passam através da camada de cobertura.

### **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo do presente estudo é avaliar o comportamento geotécnico da camada de cobertura do Aterro Experimental da Muribeca, Jaboatão dos Guararapes – PE, após 5 anos do seu fechamento. Para isso, será apresentado o estudo da interação da camada de cobertura com o meio ambiente com respeito a sua perda de estanqueidade e aumento da permeabilidade devido à lixiviação de partículas superiores da camada para camadas inferiores. Além disso, serão estudadas as propriedades destas camadas, incluindo a sucção atuante. Dessa forma, foram desenvolvidos ensaios laboratoriais no Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), para que sejam estudados na camada de cobertura oxidativa em sua face superior (0.1–0.3 m) e base (0.4–0.6 m).

### **1.4 ESTRUTURA**

Esse trabalho está estruturado de forma a introduzir os objetivos que motivaram esse estudo, seguindo com a revisão bibliográfica e os resultados encontrados e suas análises.

Na Introdução estão descritas as considerações gerais sobre o tema, seguindo com a justificativa, o objetivo da pesquisa e a presente estrutura do trabalho descrito.

Na Revisão se encontra o estudo da camada de cobertura e de parâmetros de influência em suas propriedades mecânicas, que enriquece a metodologia utilizada e que dá suporte às análises e conclusões dos resultados da pesquisa.

Em Materiais e Métodos está apresentada a metodologia utilizada para a realização do estudo a partir de coleta de amostras, ensaios laboratoriais e dos levantamentos de dados referentes ao clima de uma estação meteorológica próxima ao aterro estudado.

Em Resultados e discussão são apresentados os ensaios de laboratório e as análises dos dados obtidos na pesquisa.

Por fim, em Conclusões e Sugestões para Novas Pesquisas, estão descritas as considerações finais de forma sucinta, em seguida apresentadas sugestões para futuras pesquisas e as referências estudadas nesse estudo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

As camadas de cobertura finais de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (ARSU) têm como finalidade evitar a infiltração de águas pluviais, e impedir que gases gerados na degradação da matéria escapem para a atmosfera (COELHO *et al.*, 2005).

O sistema de impermeabilização superior de um aterro sanitário é composto pela sua camada de cobertura final, que, formada de uma camada de solo compactado, objetiva isolar a massa de resíduos armazenada do ambiente externo, evitando, portanto, a geração de lixiviado, pela infiltração da água, a atração de vetores e a saída de gases para atmosfera, devendo, para tanto, possuir baixa permeabilidade à água e ao ar e ter uma vida útil de longa duração, pois ficam suscetíveis às intempéries, escavações por animais, erosão, recalques da massa de resíduos dentre outros elementos (MARIANO, 2008).

No Brasil, a maioria dos aterros são operados com uma camada homogênea de solo argiloso compactado, já que esse material possui as propriedades

necessárias de baixa permeabilidade à água e baixo custo, principalmente quando encontradas jazidas próximas ao local da execução (MARIANO, 2008).

Já nos EUA, a regulamentação é baseada em camadas com propriedades resistivas, que possuem baixa condutividade hidráulica, portanto, são utilizados solos argilosos compactados ou incrementados com geossintético (GCL) com ou sem geomembrana, um material mais oneroso do que a argila (ABICHOU *et. al.*, 2003, adaptado).

## **2.1. CAMADA DE COBERTURA DE ATERROS SANITÁRIOS**

A NBR 13.896 (ABNT, 1997, p. 9) indica que a cobertura final deve “minimizar a infiltração de água na célula, exigir pouca manutenção, não estar sujeita a erosão, acomodar assentamento sem fratura e possuir um coeficiente de permeabilidade inferior ao solo natural da área do aterro”. Esta recomenda a execução de aterros em áreas onde o subsolo tenha coeficiente de permeabilidade inferior a  $5 \times 10^{-7}$  m/s, mas considera desejável existência de um depósito natural de material com permeabilidade inferior a  $10^{-8}$  m/s. Com relação a coberturas diárias, tal norma não menciona nenhuma recomendação.

Para um solo argiloso ser considerado adequado como impermeabilização de aterros – tanto em camadas de base (inferior) como coberturas (superior) – deve atender às seguintes características (ROCCA *et al.*, 1993):

- I. Ser classificado como CL, CH, SC ou OH, segundo sistema unificado de classificação de solo (ASTM D2487-00);
- II. Apresentar uma porcentagem maior do que 30 % de partículas passando pela peneira nº 200 da ASTM (Análise de Granulometria por Peneiramento e Sedimentação conforme NBR 7181/84);
- III. Limite de Liquidez (LL) maior ou igual a 30 % (conforme NBR 6459/84);
- IV. Índice de Plasticidade (IP) maior ou igual a 15% (conforme NBR 7180/84);
- V. pH maior ou igual a 7;
- VI. Coeficiente de permeabilidade (k) inferior a  $10^{-9}$  m/s quando compactado.

Quanto maior o percentual de argilas, menos permeável será o solo. Por isso um dos principais parâmetros considerados na cobertura final é a permeabilidade,

pois o solo com baixa permeabilidade reduz as possibilidades de contaminação do aquífero.

Segundo Caputo (1974) a compactação do solo é um processo manual, ou mecânico, realizado através de impacto, vibração estática, dinâmica ou vibração, que visa diminuir os vazios do solo, aumentando sua resistência à compressão e ao cisalhamento. Ainda segundo este autor, esse ensaio é simples e muito importante por torná-lo mais estável, já que o objetivo é minimizar os problemas na camada de cobertura quanto a fissuras, compressibilidade, resistência, absorção e permeabilidade ao ar e à água, situações de extrema importância para o nosso estudo.

As camadas impermeabilizantes de argila quando forem compactadas devem seguir as seguintes orientações (ROCCA *et al.*, 1993):

1. Camadas compactadas de no máximo 0,2 m de espessura;
2. Umidade em torno da ótima obtida em ensaio de compactação com Proctor normal;
3. Densidade de no mínimo 95% da densidade máxima obtida no ensaio de compactação Proctor Normal;
4. Coeficiente de permeabilidade (k) de no máximo  $10^{-9}$  m/s.

## **2.2. CAMADAS ALTERNATIVAS**

As camadas oxidativas são construídas com a finalidade de reduzir as emissões de CH<sub>4</sub> (metano) para a atmosfera, já que nela ocorre a oxidação do metano devido à presença de bactérias oxidativas, que consomem o CH<sub>4</sub> na presença de oxigênio produzindo CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e H<sub>2</sub>O (água) (MARIANO, 2008).

O potencial dessa oxidação pode ter a influência de diversos fatores, segundo ROSE (2009), como pressão atmosférica, quantidade de oxigênio disponível, teor de umidade, temperatura, concentração de metano na camada e o grau de compactação na camada de cobertura. Outros fatores importantes são a disponibilidade de bactérias e nutrientes, da composição do resíduo aterrado, da idade do aterro, da umidade, da presença de oxigênio, da temperatura e do pH (MACIEL, 2003).

A plantação de vegetais com raízes discretas, portanto, permite a troca de oxigênio nas raízes, o que favorece a oxidação do metano pelas bactérias, que precisam de oxigênio, metano e água.

De acordo com Corey (1957) e Matyas (1967) citados por Fredlund e Rahardjo (1993), o fluxo de ar em um solo não saturado geralmente se torna descontínuo quando o grau de saturação se eleva para valores entre 85%-90%, e para valores acima destes, o fluxo é aproximadamente igual a zero, com a passagem de ar se reduzindo apenas ao processo de difusão. Já segundo Maciel e Jucá (2002), a partir da saturação de 70% a permeabilidade do fluxo de ar se torna descontínua.

Quanto ao pH, o ideal para as bactérias segundo Boeckx e Cleemput (2000) é o neutro, mas isso não significa que elas não possam se adaptar a outros valores de pH do solo e desenvolver sua atividade oxidativa.

Nos estudos observados por Maciel (2009), além da umidade e temperatura do solo e da proporção de CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> no ambiente, o tipo de solo, a velocidade de percolação do gás, o pH, o teor de amônia, nitrito e matéria orgânica e presença de outras substâncias inibidoras são outros parâmetros que influenciam as taxas de oxidação.

### **2.3. INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NA CAMADA DE COBERTURA**

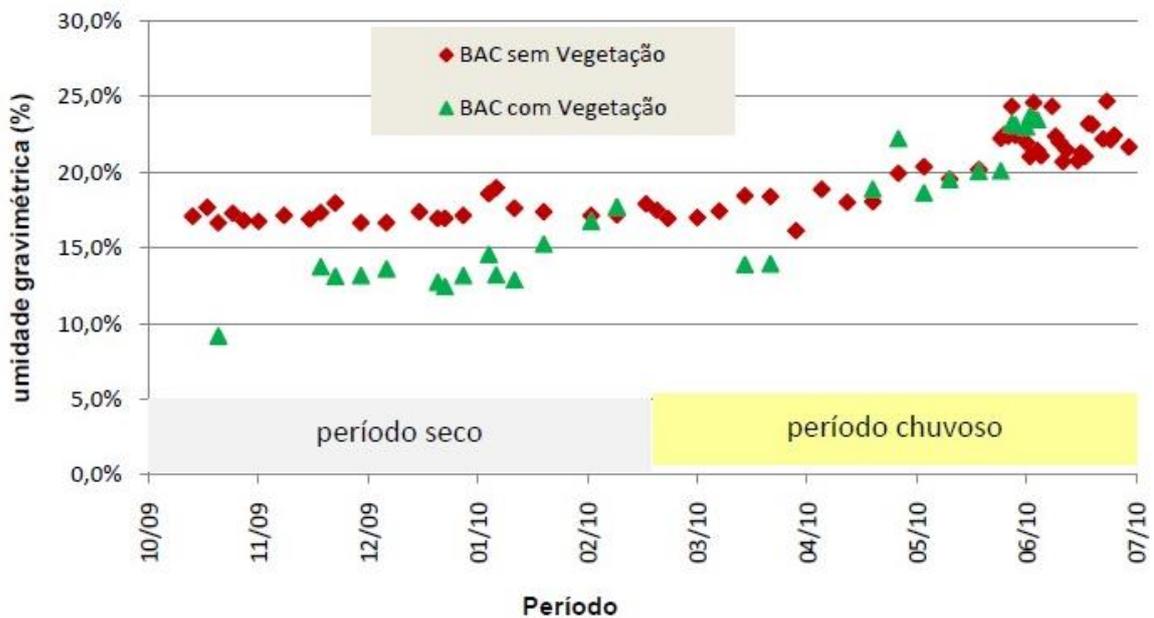
Segundo Lopes (2011) a vazão de líquidos gerados pela massa de lixo do aterro é função da infiltração de água através da camada de cobertura do mesmo. Por esse motivo a permeabilidade da camada de cobertura do aterro deve ser estudada e avaliada, deve haver a infiltração de água, com a finalidade de permitir a sobrevivência dos microrganismos decompositores da matéria orgânica existente na massa de lixo, porém, essa água infiltrada não pode ser suficiente para saturar a camada de cobertura, chegando ao limite de retenção de líquidos pelo solo e extravasando para o interior do aterro, e nem para tornar alta a vazão dos fluídos que escoam do aterro, pois esse fluído, chamado lixiviado, é muito tóxico, e pode contaminar águas de lençóis que abasteçam alguma cidade (LOPES, 2011).

No estudo de infiltração de água pela camada de cobertura, o tipo de vegetação plantada no solo tem total influência, pois há variedades que retiram

umidade do ar e transferem para o solo, e outras quem realizam o inverso, retirando umidade do solo e lançando ao ar, isto é o que é esperado da vegetação, assim, a quantidade de chuva necessária para a água chegar à massa de lixo é maior. Na implantação da vegetação, essa não deve ter raízes profundas, pois isso poderá gerar caminhos preferenciais no solo, aumentando a permeabilidade (JUCÁ, 2014).

Lopes (2011), quando descreve a variação de umidade da camada de cobertura em função das chuvas, com e em vegetação, conforme a Figura 1, e descreve que o que explica essa diferença de umidade do solo é a absorção da água pela vegetação e seu lançamento para a atmosfera através da evapotranspiração.

**Figura 1 - Teor de umidade a 0,2 m de profundidade nos perfis da camada de cobertura capilar.**



Fonte: LOPES, 2011

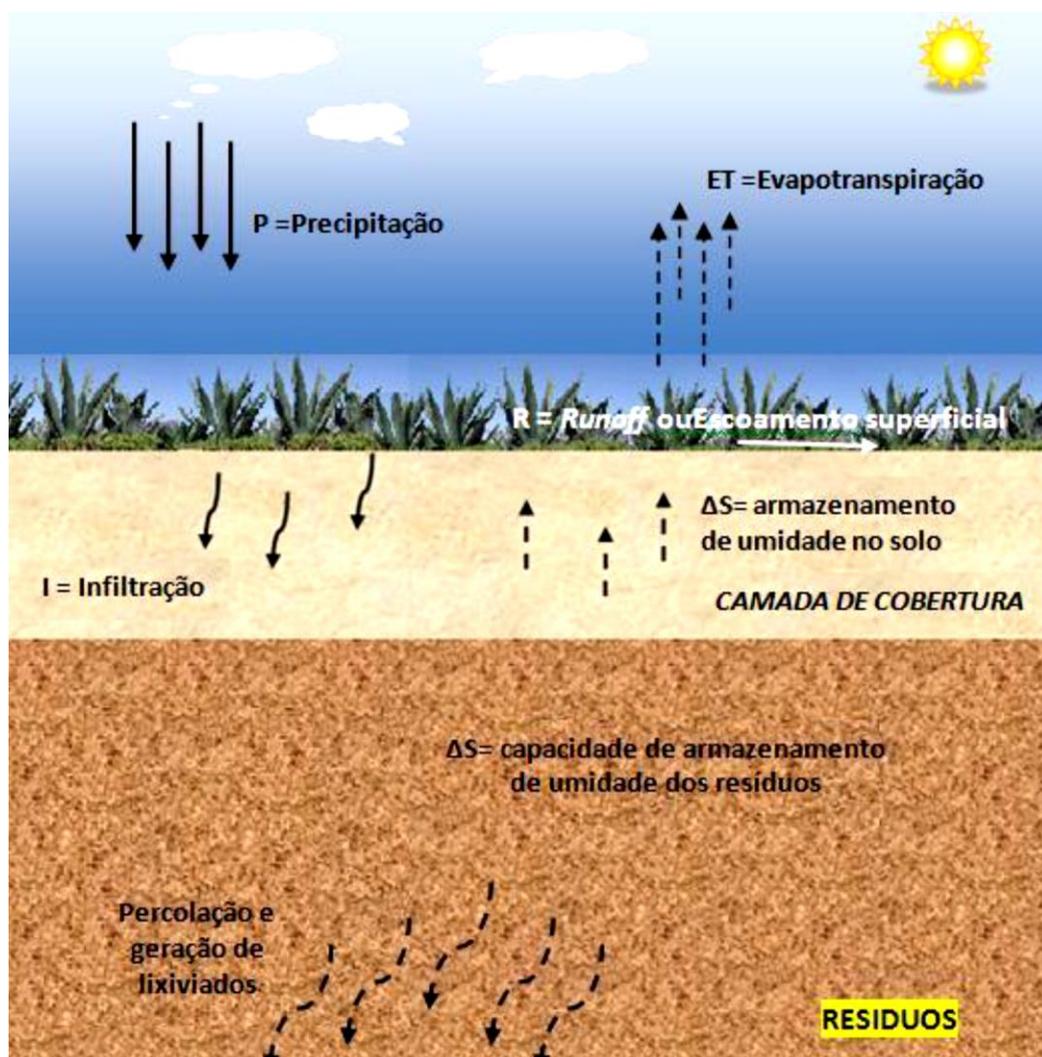
A inclinação da superfície da camada é outro item importante para a redução da infiltração de água pela camada, já que quanto mais íngreme for a sua superfície, menor a quantidade de água que se infiltra.

Ainda sobre a influência de fatores da camada de cobertura, Jang *et. al.*, 2002, em seu estudo baseado em modelo computacional de avaliação do balanço

hídrico e previsão da variação do nível de lixiviado no aterro de Kimpo, na Coreia do Sul, afirma que o grau de compactação das camadas intermediárias do aterro e da massa de lixo se mostraram condicionantes mais fortes do que a espessura da camada de cobertura. O balanço hídrico encontra-se apresentado na Figura 2.

Na análise da compactação em relação à infiltração de água pela camada de cobertura, Lange *et. al.*, 2006, observou que a compactação de 90% se mostrou uma solução tecnicamente mais viável do que uma compactação de 100%, em virtude do aumento do custo necessário para obter tal compactação que visava diminuição do volume de lixiviado gerado.

**Figura 2 - Balanço hídrico em um aterro Sanitário**



Fonte: LOPES, 2011, apud QIAN *et. al.*, 2002

## 2.4 GERAÇÃO E EMISSÃO DE GASES ATRAVÉS DA CAMADA DE COBERTURA

Gases tóxicos são gerados pelos resíduos na sua decomposição, ficando armazenados entre o subsolo e a camada de cobertura do aterro. Essa geração de gás pelos resíduos se dá de diversas formas: decomposição bacteriana, volatilização de matéria orgânica no estado sólido ou líquido e reações químicas, podendo ser influenciada por diversos fatores como a composição dos resíduos, a sua idade, a presença de oxigênio na camada de cobertura, a umidade e a temperatura (ATSDR, 2001).

ATSDR, (2001), analisando a percolação dos gases, cita que essa pode ser influenciada pela concentração dos gases, pressão relativa e permeabilidade, descritos a seguir.

- Difusão/Concentração – É a tendência natural do gás percolar à procura de uniformizar sua concentração no espaço obtido. A tendência do gás é seguir de áreas de maior concentração para áreas de menor concentração, seguindo para o equilíbrio (ATSDR, 2001). Segundo a Lei de Fick, a difusão é definida como o transporte de contaminantes (líquidos ou gasosos) de uma região de alta concentração (potencial químico) para regiões de baixa concentração química e o fluxo difusivo se anula quando a concentração do gás se tornar constante (MACIEL,2003). E segundo Maciel (2003), a difusão está associada dispersão mecânica do fluido, que é influenciada pela irregularidade do solo, gerando caminhos preferenciais.
- Pressão – A tendência de migração dos gases para uniformidade é seguir de áreas de maior pressão para as de menor pressão. A geração de gases pelos resíduos é ininterrupta, mas a sua migração para ambientes de menos pressão é interrompida pela camada de cobertura, gerando ambientes de maior pressão dentro das camadas, por isso a compactação é essencial. Esse fluxo de gás por diferença de pressões se chama advecção, e menciona que a diferença de pressões se dá principalmente pela decomposição biológica dos resíduos e na existência de advecção predominará sobre o fluxo

difusivo, pois a magnitude das ordens de fluxo por advecção é muito maior do que a da difusão. (ATSDR, 2001)

- Permeabilidade – O gás tende a migrar pelo caminho que oferece menor resistência através dos poros do sólido e quanto mais poros, maior a permeabilidade. Por exemplo, nas areias e nos pedregulhos a permeabilidade é maior quando comparadas com as argilas e com os siltes, por isso as camadas de cobertura de aterros, que tem por finalidade baixa permeabilidade, têm sua operação à base de argilas (ATSDR, 2001).

Segundo Jucá (2014), as trocas gasosas entre o resíduo e atmosfera são de fundamental importância para a vida existente na camada de resíduos, influenciando na velocidade de degradação do resíduo.

A geração do gás é realizada por reações químicas que resultam na geração de substâncias gasosas e no acréscimo da temperatura favorecendo o aumento da velocidade das reações e conseqüentemente a liberação de gases (MACIEL, 2003).

Segundo MACIEL (2003), os fatores que mais influenciam a geração de biogás em aterros de resíduos sólidos são:

- I. Geometria do aterro: A altura da massa de resíduos e o seu sistema de cobertura final podem sofrer maior ou menor influência das condições atmosféricas;
- II. Composição dos resíduos: A composição dos resíduos afeta quantitativamente e qualitativamente a produção dos gases. A disponibilidade de matéria orgânica, frações mais facilmente degradáveis (carboidratos, proteínas e lipídios), significa uma maior quantidade de substrato para a degradação por microrganismos;
- III. Variáveis do ambiente interno: Presença de metais pesados ou outros componentes que possuam capacidade de favorecimento ou inibição das atividades bacterianas e a variação dos condicionantes externos, na ocasião de haver entrada de O<sub>2</sub> através da camada de cobertura, tanto na forma dissolvida, pelas águas pluviais, quanto na forma de gás devido ao aumento da pressão atmosférica local.
- IV. Variáveis do ambiente externo: A ocorrência de chuvas, com aumento da saturação do solo, que diminui a percolação de ar, mas aumenta a de água, a

variação da pressão atmosférica, a temperatura, a evapotranspiração e umidade relativa, que interagem diretamente com a erosão, fissuração e lixiviação do solo.

Esses fatores que influenciam a geração de gases pelos resíduos, descritos por Maciel (2003) estão resumidos na Figura 3.

**Figura 3 - Principais fatores que influenciam no processo de geração de gases.**

Geometria e operação do aterro	Caract. iniciais dos resíduos	Ambiente interno	Ambiente externo
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensão do aterro;</li> <li>- impermeabilização do aterro;</li> <li>- Compactação do lixo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Composição do lixo;</li> <li>- Umidade do lixo;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umidade da massa na degradação;</li> <li>- pH nas células;</li> <li>- Temperatura;</li> <li>- Disponibilidade de nutrientes/bactérias;</li> <li>- Presença de agentes inibidores;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Precipitação e infiltração;</li> <li>- Variação pressão atmosférica;</li> <li>- Temperatura;</li> <li>- Evapotranspiração;</li> <li>- Umidade relativa do ar</li> </ul>

Fonte: MACIEL, 2003

Há complexidade em mensurar a geração de gás pelos resíduos, pois a composição física, química e biológica dos resíduos varia muito e, nessa composição, a biológica influencia muito, visto que seus processos microbiológicos são os principais formadores de gás no aterro (MACIEL, 2003).

Rose *et. al.* (2009) descreveu a taxa de oxidação de metano máxima que um tipo de substrato poderia realizar, Tabela 1.

**Tabela 1 - Taxa de oxidação e substrato.**

Fonte	Vazão de CH <sub>4</sub>	Substrato	Taxa de oxidação de CH <sub>4</sub> máxima	
			(g/m <sup>2</sup> /dia)	%
Rose <i>et al.</i> (2009)	5 ml/min	Solo	450*	68
		Solo e composto (3:1)	450*	96
		Solo e composto (1:1)	590*	16
		Composto	1000*	98

Fonte: Rose *et. al.*, 2009

O meio no qual ocorre a oxidação do metano formado pela degradação do Resíduo Sólido Urbano (RSU) é a camada de cobertura do aterro, sendo esta de solo ou solo agregado a outro material. Nesse caso as características geotécnicas do meio influenciam diretamente na permeabilidade e na oxidação dos gases. (MALDANER, 2011)

Para que a camada de cobertura oxidativa realize sua função de oxidar o gás metano, é necessário haver a presença de bactérias metanotróficas misturadas ao solo com uma composição de solo e composto - essa eficiência em proporções diferentes foi estudada por Maldaner (2011) - e permeabilidade ao ar, para que o metano passe através da cobertura oxidativa.

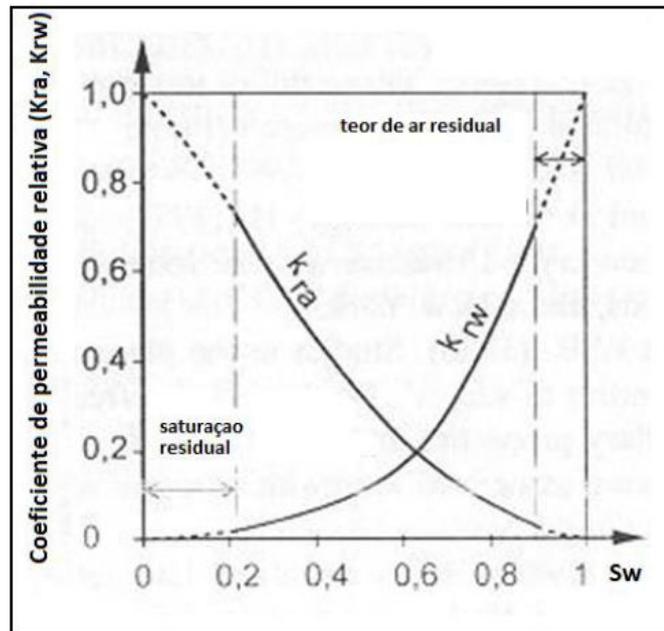
A questão do composto para a oxidação do metano é de grande importância, principalmente em regiões secas, pois a camada de cobertura pode ficar com sua permeabilidade ao ar máxima devido à baixa umidade e, conseqüentemente, pequena quantidade de água ocupando os vazios.

Ainda que haja possibilidade de geração dos gases, de aterros sem estudo dos resíduos para saber a quantificação da geração de gases, a permeabilidade do solo ao ar e alguns fatores que influenciam o processo de geração e emissão dos gases podem ser controlados, como as características geotécnicas (granulometria, porosidade, capacidade de retenção de água, tipo e concentração de matéria orgânica, entre outros) (LOPES, 2011).

Lopes (2011) realizou ensaios em uma camada oxidativas constituída de solo argiloso e composto orgânico de resíduos de podas (na proporção 1:1) e encontrou uma eficiência de oxidação de metano de 64,9%.

No estudo da porosidade dos solos, o ensaio de sucção dá subsídios para a verificação dessa disposição das partículas e da possibilidade de retenção de água do solo, que impossibilitaria a permeabilidade do ar através da camada, Figura 4.

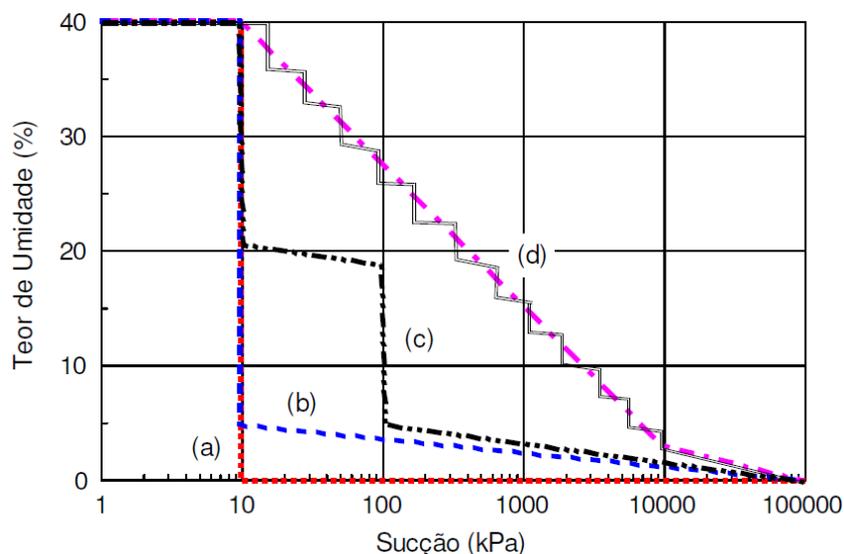
**Figura 4 - Coeficiente de permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) e a água ( $K_w$ ) em função da saturação.**



Fonte: WYCKHOFF e BOTSET, 1936, apud JUCÁ, 2009

Marinho (2005), afirmou que a curva de retenção varia com a distribuição dos poros de uma amostra, uma amostra com variação do tamanho dos poros deve possuir uma redução de umidade de forma mais gradual com o aumento da sucção, do contrário, se uma amostra possui uma pequena variação do tamanho dos poros, sua redução deve ser não linear (plotada em gráfico mono-log), assim está ilustrado na Figura 5.

**Figura 5 - Forma geral da curva de retenção de acordo com a distribuição de poros.**



Fonte: MARINHO, 2005

Nesse gráfico, Marinho (2005) afirma que quanto mais bem graduado o solo for, mas ele se comporta semelhante ao solo (d), e à medida que o solo se torna mal graduado, com diâmetro dos grãos uniformes, mais ele se assemelha ao solo (a).

Para a obtenção dos resultados do ensaio de sucção, Marinho (2005) utilizou o papel filtro Whatman nº 42, que possui aproximadamente 6% de umidade no estado seco, com suas referências descritas na Tabela 2.

**Tabela 2- Característica do papel filtro Whatman nº 42.**

Retenção de partículas	Fluxo de ar (s/100ml/in <sup>2</sup> )	Ash	Espessura típica (µm)	Massa base (g/m <sup>2</sup> )	Resistência	
					Úmida	Seca
2.5	107	0.007	200	100	.7	25

Fonte: MARINHO, 2005

## 2.5. FLUXO DE FLUÍDOS ATRAVÉS DA CAMADA DE COBERTURA

Analisando a percolação dos fluídos em camadas de solo compactado, Maciel (2003), verificou ela está diretamente relacionada com as propriedades de cada fluído, como a viscosidade, por exemplo, já que a permeabilidade do solo é influenciada por este fator. Quanto maior a viscosidade, menor a permeabilidade do solo ao fluído. No caso de água e gás, a água é mais viscosa, por tanto o gás tem maior facilidade de permear em um ambiente poroso.

Segundo Maciel (2003) a maioria das camadas de cobertura dos aterros é formada por argila compactada em uma camada homogênea. Ainda segundo este autor, os parâmetros de permeabilidade do solo ao gás são imprescindíveis para o estudo da percolação do mesmo pela camada na intenção de prever caminhos, avaliar retenção de compostos gasosos no solo e monitorar as emissões dos poluentes gerados pelo lixo e lançados na atmosfera através da camada de cobertura.

Para o estudo de ensaios que estipulem a percolação do ar em solo não saturados não há ainda norma nacional que direcione a execução do ensaio. Maciel (2003) realizou um estudo sobre esse tema, a fim de contribuir no desenvolvimento

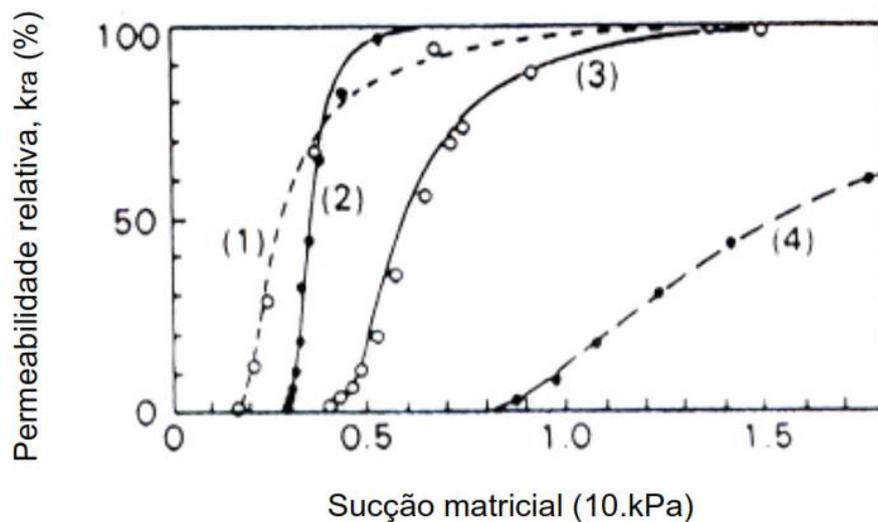
de técnicas de laboratório, através do equipamento do “*Tri-Flex*” adaptado para percolação ao ar, e campo, com uma placa de fluxo projetada e desenvolvida para o estudo.

No estudo da sucção dos solos, a curva característica nos dá a relação de sucção e umidade, que segundo Jucá (1990) depende da geometria dos poros, da magnitude e da composição mineralógica da fração final.

A sucção do solo tem influência na permeabilidade do solo, ao ar e à água, pois essa sucção varia de acordo com a presença de água nos poros do solo, pois quanto mais úmido, menor a capacidade do mesmo solo absorver água. Assim, pode-se afirmar que o aumento da capacidade de sucção do solo aumenta a permeabilidade do solo ao ar e, por tanto, pode-se avaliar a capacidade de retenção de água pelo solo (MACIEL, 2003).

Maciel (2003), afirma que para solos compactados argilosos, comparados a solos compactados areno-siltosos, a curva característica se apresenta com inclinação mais suave, com menos declividade Maciel (2003) exemplifica solos e suas curvas características conforme a Figura 6.

**Figura 6 - Variação da permeabilidade ao ar com a sucção matricial do solo**



Fonte: Desconhecida

Já de acordo Guedes (2007), uma das condicionantes ambientais mais importantes para o fluxo de gases pela camada de cobertura é a pressão atmosférica, visto que o fluxo de gás se desloca de região de maior pressão para região de menor pressão, assim, quando a pressão atmosférica é elevada, o ar atmosférico chega ao interior aterro através camada de cobertura. Na condição oposta, a pressão atmosférica tende a aumentar o fluxo fugitivo do biogás.

Mostrando que a condicionante pressão é de grande influência no fluxo de gases pela camada de cobertura, como afirmam Guedes (2007) e Lopes, em 2011, o período crítico para as emissões se deu nos meses de maiores temperaturas e menores pressões atmosféricas (setembro a fevereiro), que é um período de menor precipitação na região do Aterro da Muribeca em Jaboatão dos Guararapes - PE.

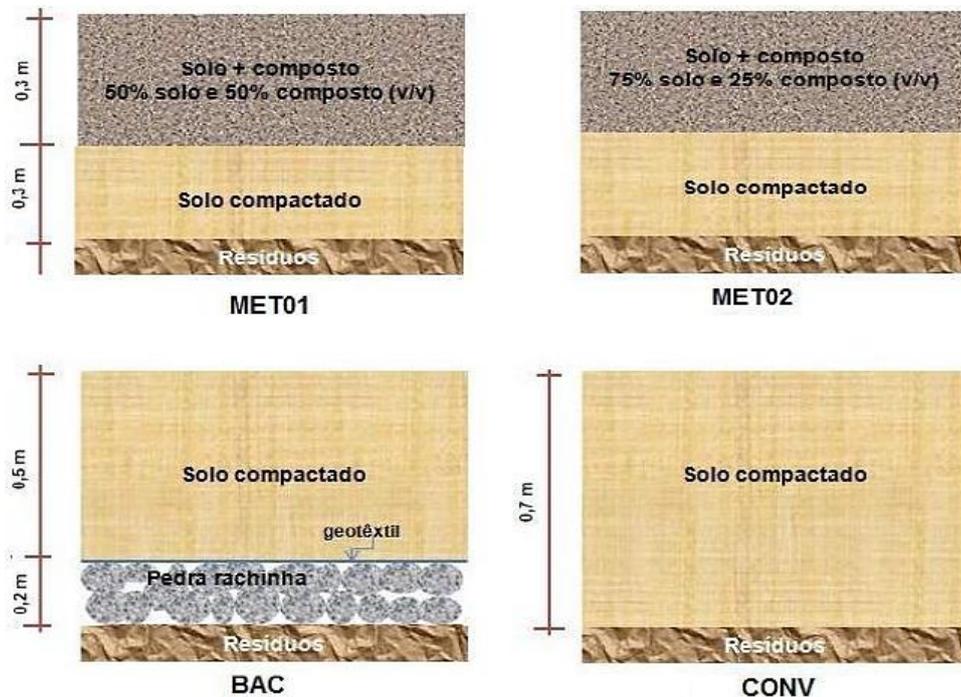
Lopes, 2011, realizou o estudo de quatro tipos de camada de cobertura do Aterro Sanitário da Muribeca, localizado em Jaboatão dos Guararapes – PE, ilustrado na Figura 7. Nesse ínterim, o autor faz uma correlação das camadas com as características influenciáveis da emissão de gás por cada camada ilustrada na Figura 7.

**Figura 7 - Célula experimental localizada na Muribeca, Jaboatão dos Guararapes - PE.**



Fonte: LOPES, 2011

**Figura 8 - Tipo de camada de cobertura do Aterro Sanitário da Muribeca - PE.**



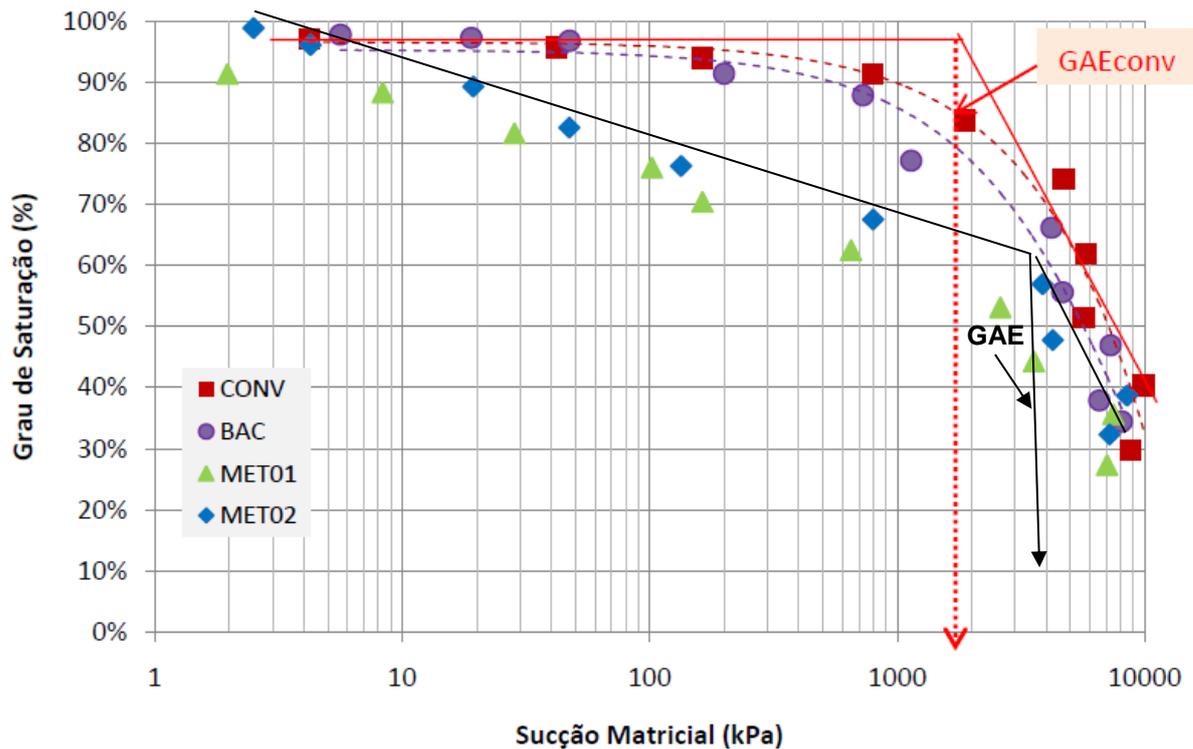
Fonte: LOPES, 2011

A camada de cobertura oxidativa MET01 é composta de solo compactado na base com 0,3 m e acima uma mistura compactada de 0,3 m na proporção 50% solo e 50% composto; a camada MET02 é a camada oxidativa, assim como a MET01, composta de solo compactado na base com 0,3 m, mas acima uma mistura compactada de 0,3 m na proporção 75% solo e 25% composto. A BAC é a camada de cobertura capilar ou evapotranspirativa, composta de pedra rachinha, com diâmetro médio de 0,1 m, na base com 0,2 m e solo compactado acima com 0,5 m, e a CONV é a camada de cobertura convencional, composta de 100% solo compactado com 0,7 m (LOPES, 2011).

Lopes (2011) avaliando o Aterro Experimental da Muribeca, realizou o ensaio de sucção para as camadas convencional (solo puro da jazida), metanotrófica 1 (solo puro-50% e composto -50%), metanotrófica 2 (solo puro-75% e composto-25%) e capilar (solo puro e pedra rachinha abaixo). Nesse estudo, a mesma autora obteve uma maior retenção para a camada metanotrófica 2 e uma retenção de água máxima em torno de 40%. Nessa avaliação, pode-se estimar uma sucção de entrada

de ar (ponto de mudança acentuada na curva de dessaturação do solo - ponto de entrada generalizada de ar - GAE) para a metanotrófica 2 em torno de 5.000 KPa com cerca de 62% de grau de saturação e para a convencional 1.800 KPa de sucção e 97% de grau de saturação.

**Figura 9 – Curva de retenção de água (Grau de Saturação x Sucção Matricial).**

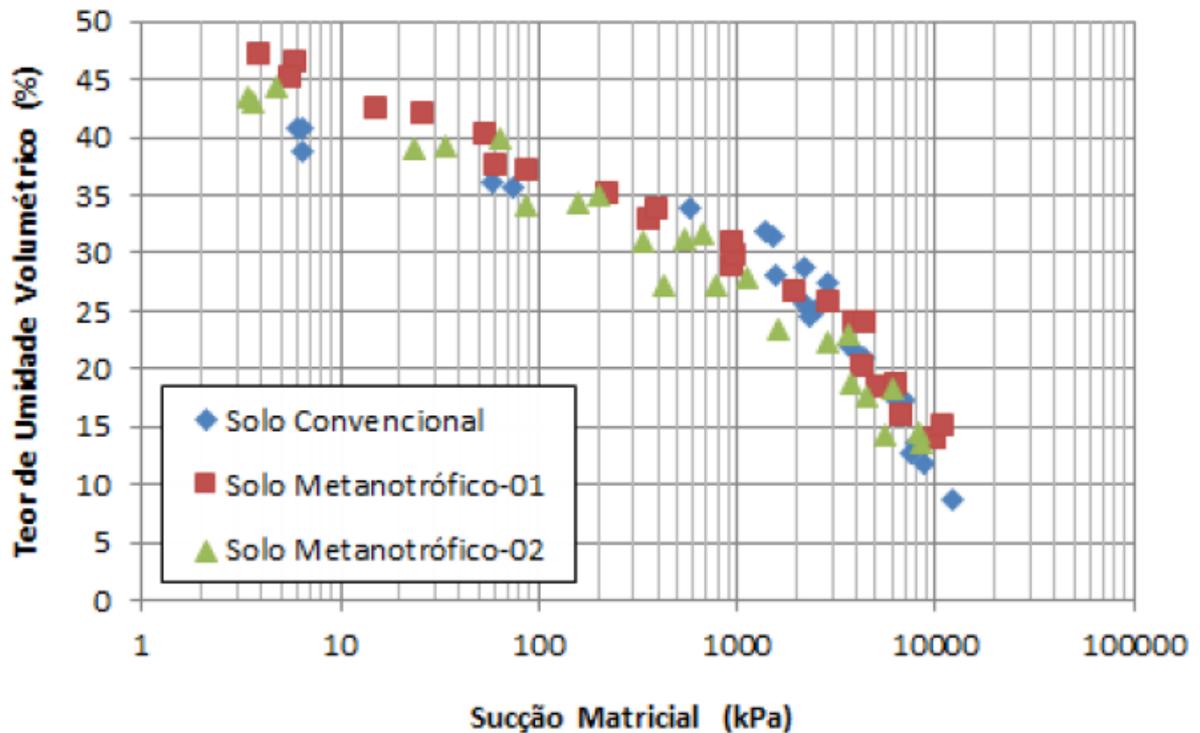


Fonte: LOPES, 2011

Santos et. al. (2014) avaliando, também, o Aterro Experimental da Muribeca, realizou ensaios de sucção das camadas existentes (convencional, metanotrófica 1 e metanotrófica 2), conforme a Figura 10. Nesse estudo, o mesmo autor obteve uma máxima retenção pela camada metanotrófica 1, na qual o valor máximo de absorção foi em torno de 48% de umidade.

Ainda o mesmo autor encontrou uma porosidade para a camada convencional de 39%, para a metanotrófica 1 de 42% e para a metanotrófica 2 de 48%.

**Figura 10 - Curvas de retenção experimentais referentes a umidade volumétrica dos solos analisados.**



Fonte: SANTOS et. al., 2014

De acordo com Lopes (2011), em relação a variações de emissões, a camada de cobertura oxidativa MET01, em comparação com a oxidativa MET02 (tanto a convencional quanto a capilar) possuiu maior correlação com as condições climáticas, devido a sua presença de poros para ocorrência da oxidação do gás metano. Ainda assim, na camada oxidativa havia a presença da vegetação, representando melhores condições para a oxidação do  $\text{CH}_4$  e reduzindo a emissão do gás metano gerado.

Nesse estudo de Lopes (2011), em relação às emissões fugitivas das camadas de cobertura, como mostra na Tabela 3, foi avaliado e verificado que a camada convencional apresentou fluxo de metano quatro vezes superior à camada oxidativa MET01, cinco vezes superior à camada MET02 e sete vezes superior à barreira capilar.

**Tabela 3- Fluxos de metano e gás carbônico normalizado pela espessura em média.**

Período	Camada	E(m)	Variação Fluxo g/m <sup>2</sup> .dia		Fluxo normalizado pela espessura da camada g/m <sup>2</sup> .dia.m	
			CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
Set/08 a fev/09	MET01	0,53	0 a 10,9	0 a 80,2	2,56	24,12
	MET02	0,57	0 a 74,1	0 a 115,8	16,03	43,31
	BAC	0,68	0 a 63,4	0 a 119,1	9,78	27,06
	CONV	0,71	2,1 a 984,7	6,75 a 1899,7	106,88	260,36
Mar a ago/09	MET01	0,60	0	0 a 38,0	0,00	8,22
	MET02	0,58	0 a 31,6	0 a 124,8	4,58	27,32
	BAC	0,68	0 a 6,7	0 a 29,0	0,57	2,82
	CONV	0,68	0 a 194,9	0 a 381,5	27,03	169,29
Set/09 a Fev/10	MET01	0,59	0 a 151,9	0 a 674,7	30,61	137,95
	MET02	0,52	0 a 123,7	60,7 a 343,5	14,21	65,16
	BAC01	0,70	0 a 37,0	0 a 233,9	15,67	67,33
	BAC02	0,63	0 a 45,0	0 a 148,2	7,81	22,20
	CONV01	0,69	5,1 a 433,9	18,7 a 526,0	73,01	158,73
	CONV02	0,78	0 a 43,8	0 a 388,7	8,04	102,03
GERAL	MET01	0,60	25,1±50,7	129,9±190,7	15,1	77,9
	MET02	0,52	24,2±31,6	94,4±72,8	12,6	49,1
	BAC	0,67	12,6±17,4	45,1±63,1	8,4	30,2
	CONV	0,71	88,0±174,6	226,7±346,7	61,6	161,0

*E = espessura média; BAC01 e CONV01 são áreas sem vegetação; BAC02 e CONV02 são áreas com vegetação nas camadas convencional e barreira capilar*

Fonte: (LOPES, 2011)

Lopes (2011) notificou que o aumento das emissões de gás se deve a possíveis modificações nas características da camada, como lixiviação do solo e presença de fissuras por influência de estações secas e chuvosas. Nesse aspecto a presença de vegetação foi um fator condicionante para as taxas de oxidação, ainda que tenham sido consideradas espessuras diferentes das camadas estudadas. Essa espessura se deve à declividade transversal (1,5%) e longitudinal (0,5%) da cobertura para escoamento das águas pluviais. A Tabela 4 exhibe as correlações dos fatores influenciáveis de forma resumida.

**Tabela 4 - Emissão superficial e fatores de influência no fluxo de gás na camada de cobertura.**

Camada	Variação de emissão (g/m <sup>2</sup> dia)	Fatores de influência
MET01	0 a 50	Saturação superior a 85%, compactação acima de 90%.
	> 50	Proximidade de fissuras, gradiente de pressão, saturação menor que 60%.
MET02	0 a 50	Baixa concentração de CH <sub>4</sub> na base, grau de saturação acima de 80%.
	> 50	Saturação inferior a 40%, ausência de vegetação, proximidade de fissuras.
BAC	0 a 50	Baixa concentração de CH <sub>4</sub> na base, grau de saturação acima de 60%, maior espessura.
	> 50	Proximidade de taludes laterais, descontinuidade de pedras na base.
CONV	0 a 50	Grau de compactação acima de 90%, grau de saturação acima de 80%, presença de vegetação.
	50 - 250	Alta concentração de CH <sub>4</sub> na base, grau de compactação inferior a 90%.
	>250	Saturação inferior 60%, existência de gradiente de pressão e área sem vegetação.

Fonte: LOPES, 2011

Huber-Humer *et. al.*(2008) afirma que a extração do biogás gerado pelos resíduos sólidos pode ser realizada por um período útil inferior ao período no qual o aterro gera o biogás, já que sua geração vai diminuindo e a pressão do gás no interior também, podendo adentrar oxigênio devido a extração forçada de biogás, o que pode causar mudança na degradação da matéria orgânica e conseqüentemente no gás gerado.

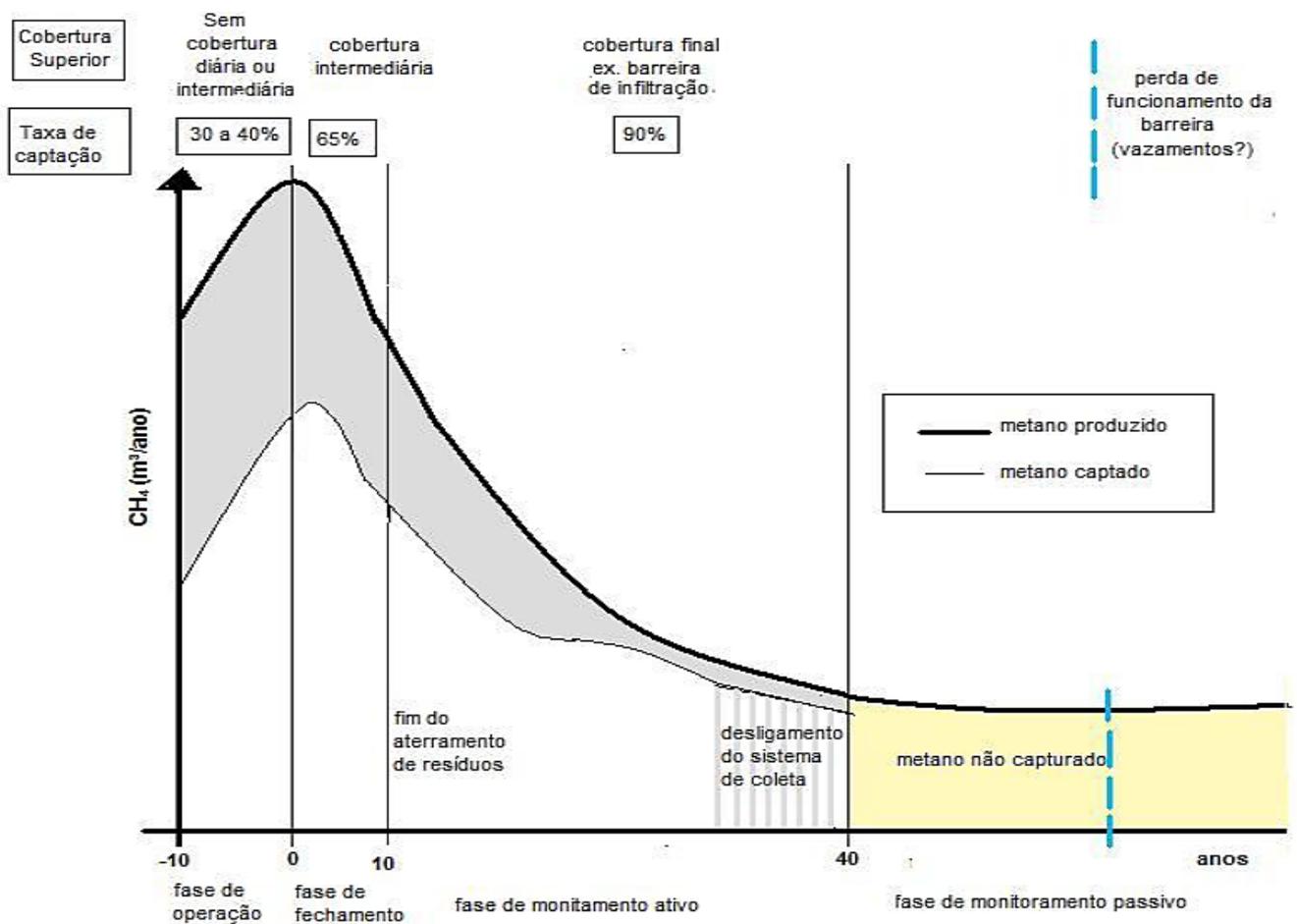
A Figura 11 ilustra a capacidade de produção de metano pelo aterro e a possibilidade de captação do gás ao longo dos anos.

Mesmo havendo eficiência na drenagem do gás, nem todo biogás produzido será captado pelo sistema, parte dele passará através da camada de cobertura, podendo ser oxidado ou emitido, como na Figura 11 (LOPES, 2011).

É importante salientar que após 40 anos do encerramento das atividades do aterro, como mostra ainda a Figura 11, o metano emitido não é mais capturado para aproveitamento energético ou tratamento, porque não há mais viabilidade econômica. No entanto, as emissões que chegam à atmosfera são ambientalmente significativas, necessitando de alternativas para oxidar o metano, diminuindo a capacidade de o biogás poluir o ambiente em cerca de 20 vezes.

Maciel (2003), com seu estudo em laboratório de solo coletado da jazida utilizada no aterro da Muribeca, avaliou a permeabilidade dos corpos de prova em função da umidade de compactação da amostra e verificou que os dados a serem obtidos com uma compactação nesse referencial com a mesma energia utilizada com o Proctor normal seria as permeabilidades demonstradas na Tabela 5.

**Figura 11 - Produção de metano e recuperação ao longo da vida do aterro. (HUBER-HUMER et. al., 2008 apud LOPES, 2011)**



Fonte: HUBER-HUMER et. al., 2008 apud LOPES, 2011

**Tabela 5 - Resultados da permeabilidade em função da umidade de compactação.**

Número C.P.	$h_{\text{ensaio}}$ (%)	$\gamma_{\text{compd}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\Delta P$ (kPa)	Veloc. fluxo $v$ (m/s)	Permeab. Intrín $K_a$ (m <sup>2</sup> )	Coef. permeab. ( $\kappa_a$ ) (m/s)
CP-1	10,2	16,34	4,0	$1,87 \times 10^{-3}$	$5,2 \times 10^{-13}$	$3,3 \times 10^{-7}$
CP-2	11,0	16,27	4,0	$1,99 \times 10^{-3}$	$6,6 \times 10^{-13}$	$4,2 \times 10^{-7}$
CP-3	12,0	16,91	4,0	$1,96 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-13}$	$3,6 \times 10^{-7}$
CP-4	16,7	18,44	4,0	$8,14 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-13}$	$1,6 \times 10^{-7}$
CP-5	19,6	19,05	4,0	$5,22 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-15}$	$9,9 \times 10^{-9}$
CP-6	22,5	19,66	10,0	$3,58 \times 10^{-6}$	$3,8 \times 10^{-16}$	$2,4 \times 10^{-10}$
CP-7	22,9	19,76	4,0	$8,17 \times 10^{-6}$	$2,4 \times 10^{-15}$	$1,5 \times 10^{-9}$
CP-8	24,3	19,54	10,0	$5,53 \times 10^{-7}$	$5,3 \times 10^{-17}$	$3,4 \times 10^{-11}$
CP-9	26,5	18,97	10,0	N.D	Impermeável	Impermeável
CP-10	29,0	18,64	10,0	N.D	Impermeável	Impermeável

Obs.: N.D. = Fluxo não detectado;  $\gamma_{\text{compd}}$  = densidade do solo úmido na compactação.

Fonte: MACIEL, 2003

Maciel (2003), faz, diante desses resultados, considerações de que, com o acréscimo de umidade ao material compactado, a permeabilidade decresce lentamente, até que acima da umidade ótima ( $h = 23\%$ ) desse material existe uma queda drástica da permeabilidade ao ar.

Este mesmo autor, em 2009, caracterizou solos do aterro experimental como areno-argiloso ou areno-siltoso, conforme detalhado nas Tabela 6 e Tabela 7. de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). Determinou ainda o peso específico seco máximo de  $1,696 \text{ g/cm}^3$ , umidade ótima de  $16,5\%$  e permeabilidade à água em laboratório de  $2,0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ , coerentes com o tipo de solo em questão.

O composto misturado na camada metanotróficas foi caracterizado e obteve características de  $34,7\%$  de areia fina,  $52,4\%$  de areia média e  $7,3\%$  de areia grossa. O teor de sólidos voláteis médio foi de  $46,8\% \pm 1,6\%$ , teor de umidade de  $53,0\% \pm 1,4\%$ , teor de carbono de  $26\%$  e a relação C/N de  $16,6$ .

**Tabela 6 - Granulometria do solo da cobertura superior da Célula Experimental.**

Amostra	%argila	% silte	%areia fina	%areia média	%areia grossa	% pedregulho
1	33	20	24	21	1	1
2	23	23	32	20	1	1
3	15	22	35	25	1	2

Fonte: MACIEL, 2009

**Tabela 7 - Limites de Attemberg, compactação Proctor e permeabilidade à água do solo. (MACIEL,2009)**

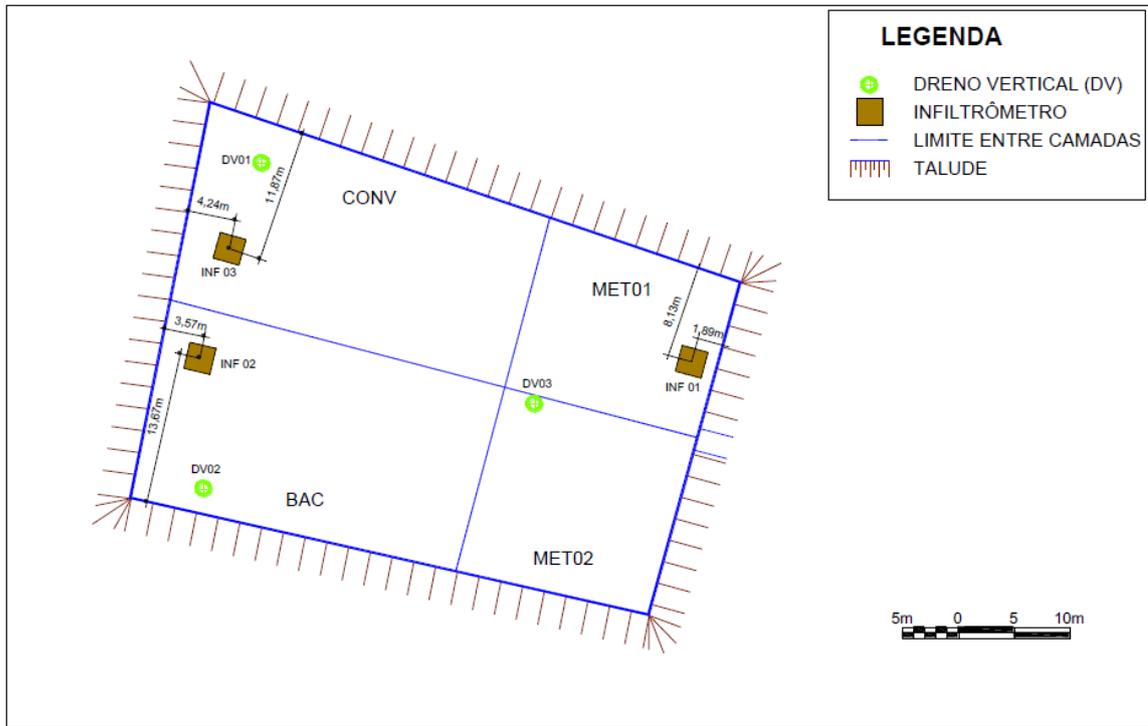
Amostra	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Peso específico máximo (g/cm <sup>3</sup> )	Umidade ótima (%)	Permeab. (cm/s)	Classifi. USCS
1	48,02	36,84	11,18	1,678	11,82	$3,6 \times 10^{-6}$	ML
2	-	-	-	1,713	17,22	$4,4 \times 10^{-7}$	SM
3	-	-	-	1,697	13,67	$3,6 \times 10^{-6}$	SM

Fonte: MACIEL, 2009

Já Lopes (2011), com a análise de campo por infiltrômetros no aterro experimental da Muribeca, apresentou resultados apresentados na Figura 13 e na Tabela 8 dentre eles, resultados de caracterização e permeabilidade do solo utilizado em cada tipo de camada de cobertura na área dos infiltrômetros, ilustrados na Figura 12.

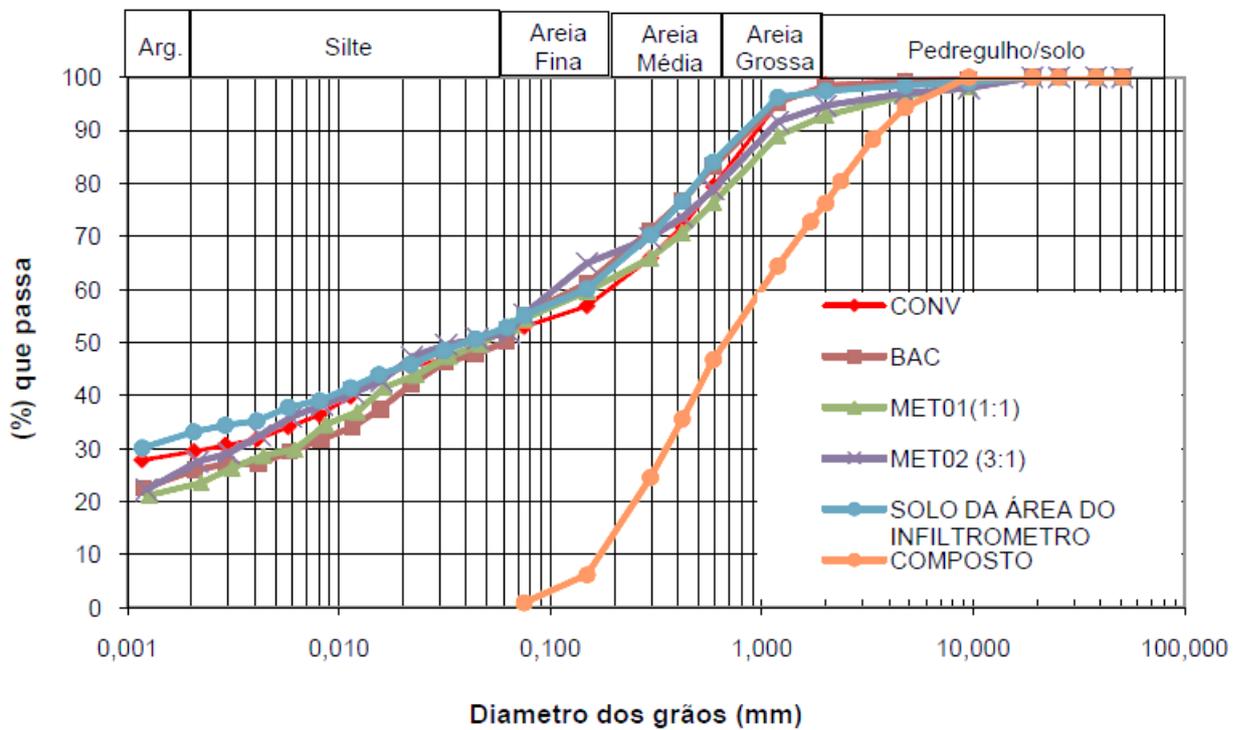
Lopes (2011), afirmou ainda que os parâmetros obtidos estão coerentes com os resultados da caracterização da jazida para execução das camadas da célula experimental apresentadas por MACIEL, 2009.

Figura 12 - Localização dos infiltrômetros na célula experimental. (LOPES, 2011)



Fonte: LOPES, 2011

Figura 13 - Curva Granulométrica das camadas de cobertura da célula experimental, do solo usado no infiltrômetro e do composto.



Fonte: LOPES, 2011

Lopes (2011), também afirmou baseada em Quian *et. al.*, 2002, que solos com IP acima de 10% e faixas de permeabilidade saturada encontradas entre  $10^{-8}$  e  $10^{-9}$  m/s são considerados adequados para utilização em camadas de cobertura de aterros, mas quando submetidos a grandes variações de temperatura podem aparecer fissuras, ocasionadas pela evaporação da água intersticial e contração volumétrica (ALCÂNTARA, 2007). Nesse caso a camada de cobertura deve ser constantemente monitorada, além de se fazer necessária vegetação superficial para evitar fissuras superficiais.

**Tabela 8 - Caracterização dos materiais utilizados em cada tipo de camada de cobertura.**

		Análise	CONV	BAC	MET01	MET02	INFIL	COMP
Ensaio de Laboratório	Granulometria	%argila	29	25	23	27	33	0
		%silte	23	24	29	25	19	1
		%areia fina	8	15	10	15	11	12
		%areia média	20	19	15	12	21	32
		%areia grossa	19	15	16	16	13	31
		%pedregulho	1	2	7	5	3	24
		<0,0075mm (%)	53	55	54	55	55	1
	Limites de consistência	LL (%)	42	43	52	50	48	-
		LP (%)	29	31	39	33	25	-
		IP (%)	13	13	12	17	23	-
		$\gamma_{d\text{máx}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	16,1	16,6	13,0	14,6	16,2	-
		W <sub>óti</sub> (%)	19,9	19,0	22,9	18,4	19,8	-
		Massa específica dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	26,2	26,3	24,5	25,3	26,2	-
		K <sub>sat</sub> (m/s)	$1,5 \times 10^{-9}$	$4,4 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-6}$	$9,2 \times 10^{-8}$	$4,7 \times 10^{-8}$	-
		K <sub>ar</sub> (m/s)	$4,0 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-5}$	$3,2 \times 10^{-7}$	-	-
		W <sub>cc</sub> (%)	22,2	20,4	28,7	24,0	19,8	-
<b>Classificação Sistema Unificado</b>		<b>ML</b>		<b>MH</b>		<b>CL</b>	<b>-</b>	
Ensaio de campo	$\gamma_{d\text{méd}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,1	14,9	12,3	13,5	-	5,9	
	Porosidade média (n)	0,43	0,43	0,52	0,49	-		
	Grau de Compactação <i>in situ</i> (%)	93,6	90,6	95,4	93,4	-	-	

Fonte: LOPES, 2011

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

---

Na presente pesquisa será abordado os estudos para análise de possíveis mudanças das características físicas da camada de cobertura oxidativa após 5 anos de fechamento do Aterro Experimental da Muribeca, Jaboatão dos Guararapes - PE.

Torna-se, dessa forma, imprescindível a análise das características geotécnicas da camada de cobertura a fim de analisar a influência da lixiviação dos materiais da camada de cobertura na permeabilidade e estanqueidade após 5 anos do fechamento do Aterro da Muribeca.

Sendo assim, para garantir que essa camada esteja conforme as especificações necessárias à segurança, foram realizados ensaios geotécnicos na camada de cobertura oxidativa do Aterro da Muribeca, tais como análise granulométrica, massa específica dos grãos, curva de retenção e permeabilidade, ao ar e à água.

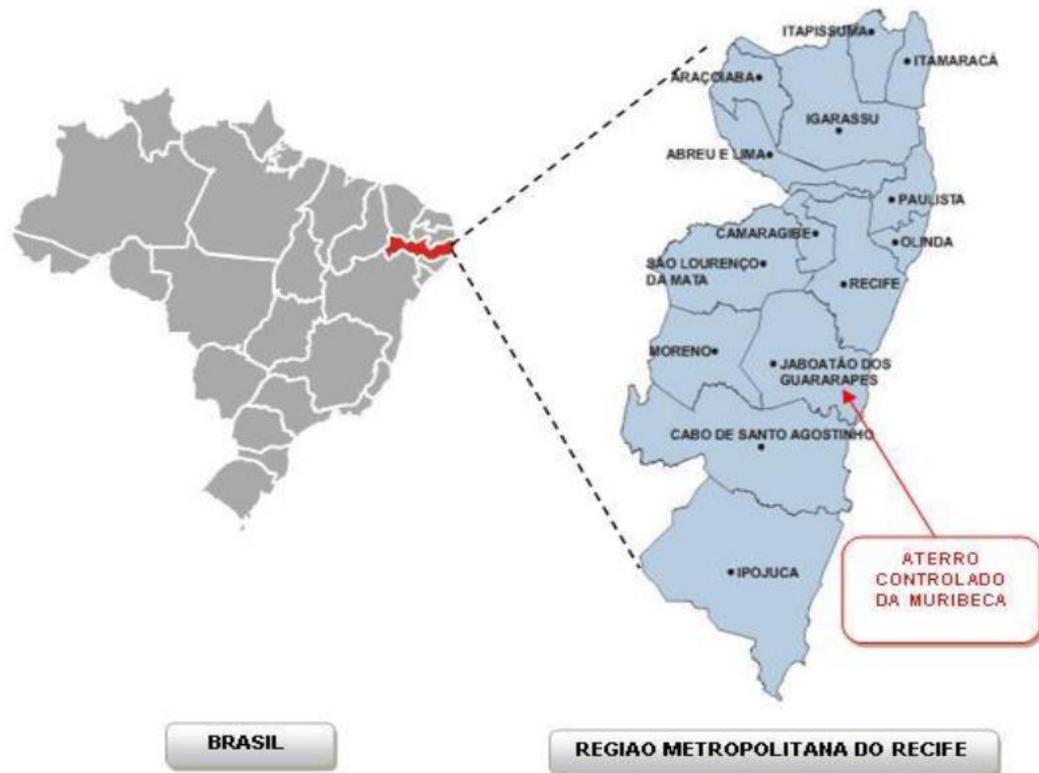
#### **3.1 ÁREA DE ESTUDO**

A área estudada corresponde a uma camada de cobertura de um aterro experimental, localizado no Aterro da Muribeca no bairro de mesmo nome, que, por sua vez, se situa no município de Jaboatão dos Guararapes - PE, ilustrada na Figura 14.

O aterro da Muribeca, Figura 15, ocupa uma área média de 62 hectares e teve seu funcionamento de 1985 até 2009 como depósito de resíduos sólidos urbanos (RSU) do Recife e de Jaboatão dos Guararapes, dos quais recebia diariamente em torno de 3.000 toneladas/dia de RSU.

Seu gerenciamento foi instituído através de convênio firmado entre o Governo do Estado, a Prefeitura do Recife e a Prefeitura de Jaboatão dos Guararapes, através da gestão compartilhada. Além de servir como depósito dos resíduos sólidos das cidades abrangentes, hoje, a Associação de Recicladores da Muribeca (ARM) gera um rendimento para os catadores e contribui para a erradicação do trabalho infantil no local. A sede da Associação é no próprio Aterro (EMLURB, 2014).

**Figura 14 - Mapa de situação, localização do aterro a ser estudado.**



Fonte: RODRIGUES, 2009 – Apud LOPES, 2011

**Figura 15 - Aterro da Muribeca e Célula Experimental**



Fonte: Acervo EMLURB - abril/2009

### 3.2 DADOS CLIMÁTICOS

Os dados climatológicos da Muribeca, onde se encontra o aterro experimental estudado, foram obtidos pela estação meteorológica localizada no próprio aterro, como ilustrado na Figura 16.

**Figura 16 - Estação meteorológica no aterro experimental da Muribeca**



Fonte: Acervo EMLURB - abril/2009, adaptado

Dessa forma, os parâmetros obtidos são de boa precisão para as análises necessárias, uma vez que a avaliação é realizada com base no microclima local.

O estudo realizado visa verificar a influência do clima no comportamento do solo da camada de cobertura nas épocas secas e chuvosas da região, de tal forma que na época de chuvas existe um excedente hídrico e na seca um déficit hídrico.

Foram obtidos dados pluviométricos referentes aos anos de 2009 até 2014. Esses dados estão dispostos com médias de cada mês dos referidos anos de análise.

A região na qual se localiza o aterro estudado possui duas estações características, uma de verão e outra de inverno. A precipitação é abundante durante o ano, com concentração dos meses mais chuvosos no inverno e essa precipitação se apresenta de forma irregular ao longo do tempo.

Em seguida, para a determinação da evapotranspiração foi utilizado o método de Thornthwaite modificado por Camargo *et. al.*, 1999, verificado em Lopes (2011). Para isso necessita-se dos seguintes parâmetros:

- i. **Temperatura média (Tef):** amplitude térmica local.

$$T_{ef} = 0,36 \times (3 \times T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) \quad Eq. 1$$

- ii. **Índice mensal de calor (I):** determinado a partir da temperatura mensal média dos meses estudados e encontrado a partir da Eq. 2.

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \times T_m)^{1,514} \quad Eq. 2$$

- iii. **Evapotranspiração Potencial (ETP):**

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 0,017292 \times I + 0,49239 \quad Eq. 3$$

$$ETp = 16 \times \left(10 \times \frac{T_{ef}}{I}\right)^2 \quad p/ T_{ef} \leq 26,5 \quad Eq. 4$$

$$ETp = -415,85 + 32,24 \times T_{ef} - 0,43 \times T_{ef}^2 \quad P/ T_{ef} > 26,5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad Eq. 5$$

**Legenda:**

**I = Índice mensal de calor**

**a = Função cúbica do índice de calor**

**ETp = Evapotranspiração Potencial (mm)**

***T<sub>ef</sub> = Amplitude térmica (°C)***

Para estimar o escoamento superficial foi considerada inclinação de 1,5% e o tipo de solo da camada de cobertura oxidativa. Para tanto, a Tabela 9 foi considerada para os parâmetros de cálculo:

***Tabela 9 - Valores do coeficiente de escoamento superficial***

	<b>Superfície</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Valor Esperado</b>
Cobertura: grama em solo arenoso	Plano (2%)	0,05 a 0,10	0,08
	Declividade Média (2 a 7%)	0,10 a 0,15	0,13
	Declividade alta (7%)	0,15 a 0,20	0,18
Cobertura: grama em solo argiloso	Plano (2%)	0,13 a 0,17	0,15
	Declividade Média (2 a 7%)	0,18 a 0,22	0,20
	Declividade alta (7%)	0,25 a 0,35	0,30

Fontes: Pruski et. al., 2004)

O escoamento superficial foi dado pela Eq. 6, considerando para cada ano as condições de precipitação em cada ano e época (seca e chuvosa) referida.

$$ES = P \times C$$

**Eq. 6**

**Legenda:**

**ES = Escoamento superficial (mm);**

**P = Precipitação (mm);**

**C = Coeficiente de escoamento superficial (adimensional).**

### **3.3 DESCRIÇÕES DA CAMADA DE COBERTURA OXIDATIVA ESTUDADA**

A camada de cobertura estudada foi a oxidativa MET02 da célula experimental do Aterro da Muribeca. Essa camada é formada por 0.3 m de solo puro compactado sobre o lixo seguido de uma camada de 0.3 m de solo compactado numa proporção de 75% solo e 25% composto.

Segundo Lopes (2011) a camada da célula experimental foi executada em fevereiro de 2008, tendo sido realizada a geometrização final do lixo e execução do platô superior da célula. Foi utilizado solo da mesma jazida para execução do platô, taludes e bermas. A compactação foi realizada com trator de esteira, apenas, de 150 HP, durante o espalhamento do material, sem controle de compactação e umidade durante a execução, essas etapas estão ilustradas na Figura 17.

**Figura 17 - Etapa de regularização para colocação da camada oxidativa acima do solo compactado e a compactação da mistura de solo e composto.**



Fontes: LOPES, 2011

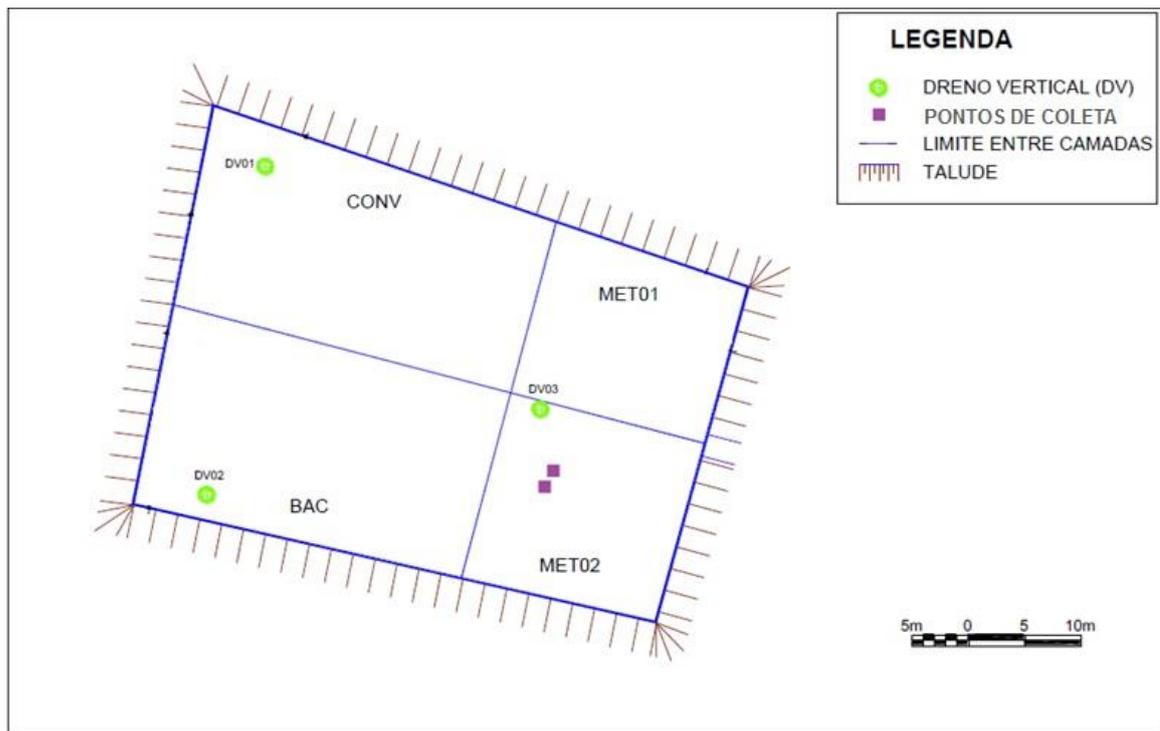
### **3.4. CARACTERIZAÇÕES DAS AMOSTRAS DE SOLO DA CAMADA DE COBERTURA OXIDATIVA**

Na camada de cobertura oxidativa MET02 da célula experimental da Muribeca foram retiradas em dois pontos amostras indeformadas, de aproximadamente 0,2 m de altura, concomitante com amostras amolgadas do mesmo furo para caracterização, com aproximadamente 2 Kg nas profundidades desejadas, sendo essas a primeira 0.1 – 0.3 m e a segunda entre 0.4 – 0.6 m. A locação dessas amostragens está na Figura 18.

Para a coleta foi realizada a retirada da camada superficial, conforme a Figura 19. Em seguida foram coletadas quatro amostras indeformadas em cilindros de PVC, de 0,15 m de diâmetro e 0,2 m de altura, besuntados internamente com vaselina em 2 furos de sondagem, 2 amostras em cada furo nas profundidades desejadas descritas anteriormente e ilustradas conforme as Figura 20 e Figura 21.

Também foram coletadas, através de pá e picareta, amostras deformadas e acondicionadas em sacos para caracterização dos mesmos 2 furos realizados com 2 amostras de profundidades diferentes em cada furo de sondagem. Da mesma forma foram obtidas amostras deformadas do solo da jazida para caracterização.

**Figura 18 - Localização de pontos de coleta das amostras.**



Fonte: Incremento na ilustração obtida por LOPES, 2011

**Figura 19 - Limpeza do solo para coletar amostras do Furo 1**



Fonte: a autora

**Figura 20 - Vaselina para proteger a amostra de deformações e facilitar a coleta do material.**



Fonte: a autora

**Figura 21 – (a) Retirada da amostra 1 (0.1m – 0.3m) do Furo 1, (b) Retirada da amostra 2 (0.4m – 0.6m) do Furo 1, (c), (d) Correção das faces e acondicionamento das amostras.**



Fonte: a autora

Foram realizadas três caracterizações, a saber:

- Caracterização do solo puro da jazida;
- Caracterização da camada oxidativa na profundidade de 0.1 - 0.3 m;
- Caracterização da camada oxidativa na profundidade de 0.4 - 0.6 m.

Os ensaios geotécnicos, por sua vez, foram realizados em conformidade com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- ABNT NBR 7181:1984 Solo – Análise granulométrica
- ABNT NBR 6459:1984 Solo – Determinação do limite de liquidez
- ABNT NBR 7180:1984 Solo – Determinação do limite de plasticidade

Para a verificação da massa específica dos grãos foram realizados dois ensaios, para as duas profundidades de solo estudada, com o picnômetro de capacidade para 50 ml, no qual colocou-se aproximadamente 10 g de cada amostra de solo tendo sido peneirada na peneira de 2,0 mm, conforme a NBR 6508/1984.

Desse ensaio pode se verificar a porosidade do solo ( $n$ ) em função do índice de vazios ( $e$ ) de cada solo:

$$e = H/H_s \quad H_s = W / (d * A)$$

**Legenda:**

**$e$  = índice de vazios;**

**$H$  = Altura do corpo de prova;**

**$H_s$  = Altura de sólidos;**

**$W$  = Peso seco da amostra;**

**$d$  = Densidade real dos grãos;**

**$A$  = Área da amostra;**

A porosidade ( $n$ ) é dada por :

$$n = e / (1+e)$$

### 3.4.1. CURVA DE RETENÇÃO

Esse ensaio é fundamentado na transferência de umidade do solo, que possui menor sucção, para o papel, que possui maior sucção, até que o equilíbrio seja estabelecido. (MACIEL, 2003)

Para a realização do ensaio de Curva de Retenção foram utilizadas as amostras indeformadas coletadas da camada oxidativa do aterro da Muribeca à profundidade de aproximadamente 0.1 - 0.3m e 0.4 - 0.6m. Dessas amostras indeformadas, foram moldados anéis, em laboratório, para os ensaios de sucção, conforme a Figura 22.

**Figura 22 – (a), (b) Preparação e moldagem das amostras para o ensaio de sucção, (c) saturação das amostras.**



Fonte: a autora

A Curva de Retenção de cada amostra indeformada, da camada oxidativa de profundidades diferentes, foi obtida através do método do papel filtro, esse método foi realizado conforme a norma ASTM D5298-92 e segundo Marinho (1994).

A curva de calibração utilizada nessa pesquisa foi proposta por Chandler *et. al.*, 1992, descritas nas Equações 1 e 2.

$$\log \psi = 8,84 - 0,0622 \times wf \quad \text{Para } wf \leq 47\% \quad \text{Eq. 1}$$

$$\log \psi = 6,06 - 2,48 \times wf \quad \text{Para } wf > 47\% \quad \text{Eq. 2}$$

**Legenda:**

$\psi$  = sucção (kPa)

$wf$  = umidade gravimétrica do papel filtro (%)

Para obter o equilíbrio de umidade entre o solo e o papel filtro, foram esperados 07 (sete) dias - avaliados por MARINHO, 1994 como suficientes - para cada ponto da curva de sucção e umidade do material estudado.

Os pontos da curva foram obtidos a partir dos seguintes procedimentos:

- Preparação das amostras nos seus respectivos anéis;
- Saturação das amostras ao ar sobre pedras porosas, submersas em água, cobertas por papel filtro para a homogeneização da absorção da água pelas amostras, ilustrada na Figura 22 (c).
- Percolação das amostras até constância de peso, 3 dias;
- Pesagem das amostras;
- Colocação de papel filtro nos dois lados de cada amostra;
- Acondicionadas as amostras com papel laminado, para evitar a perda de umidade, e papel alumínio, para não permitir a passagem da luz;
- Repouso da amostra por 07 dias para homogeneização da umidade;
- Pesagem do papel filtro numa balança de precisão 0,0001g, para determinar o peso úmido do papel;
- Colocação do papel em estufa de 105° por 24h;
- Pesagem, na mesma balança de precisão, do papel após as 24h na estufa para verificação do peso seco;

- Determinação da umidade dos papéis filtro de cada lado de cada amostra e da sucção das respectivas amostras utilizando as equações propostas por Chandler et. al., 1992, citadas.
- Repetição dos ensaios para uma perda sucessiva de 6% de umidade até o corpo de prova apresentar uma umidade residual, chegando a 5 semanas de ensaio contabilizadas.

### **3.4.2. PERMEABILIDADE**

Para a realização desse ensaio foram coletadas duas amostras indeformadas, conforme a Figura 21, em cilindros de PVC com características de 0,15 m de diâmetro e 0,2 m de altura nas profundidades 0.1 - 0.3 m e 0.4 – 0.6 m de cada furo estudado, o procedimento para a amostragem foi previamente descrito e ilustrado no item 3.4.

Para a realização do ensaio foram seguidas as seguintes etapas:

- Desembalagem e regulação das amostras para que suas faces estejam paralelas;
- Pesagem dos corpos de prova;
- Colocação de papel filtro e pedra porosa na base e no topo da amostra, seguido, o topo, de um material acrílico no mesmo formado do corpo de prova, circular, pelo qual percolará o fluído no interior da amostra;
- Envolvimento do corpo de prova com uma membrana para evitar o contato da amostra com o fluído confinante, nesse caso a água;
- Fechamento da Célula de acrílico;
- Inserção das tubulações que conectam o fluído confinante com o equipamento controlador das tensões e do fluído interior com a atmosfera, no caso da permeabilidade ao ar, ou com o equipamento controlador, no caso da permeabilidade à água;
- Preenchimento da célula com água destilada para atuar como pressão confinante de 50 KPa para iniciar o ensaio com remoção do ar das pedras porosa e das tubulações;

- Preenchimento dos 03 (três) canais da bureta até regular o nível de água;
- Desaeração das buretas, removendo a entrada de ar, no qual se conclui o procedimento quando o canal não volver bolhas de ar perceptíveis;
- Aumento pressão confinante a 108 KPa até saturação;
- Fechamento das válvulas de entrada de pressão no topo e na base da amostra, modificando o comando para “pressure” (no Tri-flex 2);
- Abertura das válvulas de entrada de água no interior da amostra e permanece 24 h para verificação de saturação da amostra, verificado quando o volume de entrada de água na base da amostra se torna igual ao de saída pelo topo na aplicação de 30 KPa. Quanto mais argiloso e menos poroso o material, maior o tempo necessário à saturação;
- Realização de ensaio de permeabilidade à água, após a saturação;
- Fechamento as válvulas de pressão de topo e base;
- Colocação de um gradiente hidráulico de fluxo ascendente de 30 KPa;
- Abertura das válvulas de topo e base da célula e verifica-se o tempo necessário para percolar 5 cm<sup>3</sup> de água pela amostra;
- Repetição do procedimento para se obter uma média de três leituras de tempo variando +/- 5%.

Após o ensaio de permeabilidade saturada da amostra realizado, como ilustrado nas Figura 23 e Figura 24.

**Figura 23 - a) Retirando a proteção da amostra já uniformizada nas faces e medida sua altura, diâmetro e altura, (b) Centralização da amostra e colocação do cilindro com saídas internas superiores.**



Fonte: a autora

Foi calculado o coeficiente de permeabilidade saturada ( $K_{sat}$ ) conforme a Equação 3.

$$K_{sat} = \frac{V \times L}{\Delta P \times t \times A_{cp}} \quad \text{Eq. 3}$$

**Legenda:**

**$K_{sat}$  = coeficiente de permeabilidade à água (m/s)**

**$V$  = Volume do líquido percolado ( $m^3$ )**

**$L$  = Altura do corpo de prova (m)**

**$\Delta P$  = Variação da Pressão (m)**

**$t$  = Tempo necessário para percolar o volume de 5 ml (s)**

**$A_{cp}$  = Área do corpo de prova ( $m^2$ )**

Em seguida a amostra foi levada para secar ao ar, verificada sua umidade e realizado o ensaio de permeabilidade ao ar. Os procedimentos do ensaio foram os mesmos do ensaio para permeabilidade saturada no preparo da amostra, mas, ao invés de água, o fluido interior foi o ar.

Foram verificadas 3 leituras de vazão num rotâmetro de capacidade máxima de 30 NL/h, pois o de 10 NL/h não permitiria a verificação da permeabilidade, pois a amostra estava com uma porosidade relevante, adotando-se a média das leituras no rotâmetro.

Segundo a lei de Darcy (Eq. 4), a permeabilidade intrínseca do fluido é:

$$K_{int} = \frac{v \times \mu \times L}{\Delta P} \quad \text{Eq. 4}$$

**Legenda:**

**$K_{int}$  = Permeabilidade intrínseca do fluido ( $m^2$ )**

**$v$  = Velocidade de Darcy (m/s)**

**$\mu$  = Viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s)**

**$L$  = Comprimento da altura da amostra de solo (m)**

**$\Delta P$  = Gradiente de pressão de entrada e de saída (Pa)**

**Figura 24 - (a) Encamisamento da amostra com membrana resistente, (b) alocando os canais de conexão do interior com a máquina, (c) Amostra pronta para o ensaio, com a conexão dos canais necessários, (d) Célula Tri-flex 2 fechada, (e) Amostra confinada com fluido exterior, água destilada, (f) Amostra confinada e rotâmetro, acima da célula, já conectada para ensaio de permeabilidade ao ar..**



Fonte: a autora

Mas na avaliação da permeabilidade de fluidos compressíveis, Ignatius (1999) desenvolveu uma equação (Eq. 5), formulada a partir da lei de Darcy, considerando o efeito da compressibilidade:

$$Ka = \frac{2 \times v \times \mu \times L \times Ps}{(Pe^2 - Ps^2)} \quad \text{Eq. 5}$$

*Legenda:*

*v = Velocidade de percolação do fluido - Darcy (m/s)*

*$\mu$  = Viscosidade dinâmica do ar =  $1,837 \times 10^{-5}$  Pa.s*

*L = Comprimento do corpo de prova (m)*

*Pe = Pressão de entrada (Pa)*

*Ps = Pressão de saída (Pa)*

Obteve-se, por tanto, a permeabilidade dividindo a Eq. 5 pela Eq. 4 com a aplicação da Eq. 6 diretamente. Nessa,  $Pm = (Pe + Ps)/2$ .

$$\frac{Ka}{Kint} = 1 - \frac{\Delta P}{2Pm} \quad \text{Eq. 6}$$

Dessa relação percebe-se que a compressibilidade do gás está associada não apenas ao gradiente de pressão, mas à pressão média aplicada ( $Pm$ ).

## **4. RESULTADO E DISCUSSÃO**

---

Serão apresentados os resultados obtidos no estudo da camada de cobertura oxidativa da célula experimental do aterro da Muribeca, Jaboatão dos Guararapes em Recife – PE e, dentre eles, serão apresentados a caracterização, a curva de retenção e a permeabilidade da camada de cobertura oxidativa do solo nas profundidades estudadas de 0.1 – 0.3 m e 0.4 – 0.6 m estudadas.

Também será descrito o clima característico da região no período de análise com temperatura mensal média e precipitação mensal.

### **4.1. EFEITOS DO CLIMA**

O clima da região foi analisado através de gráficos de temperatura e precipitação e gráfico de déficit hídrico para a relação das chuvas com a capacidade de retenção de água pelo solo da camada oxidativa.

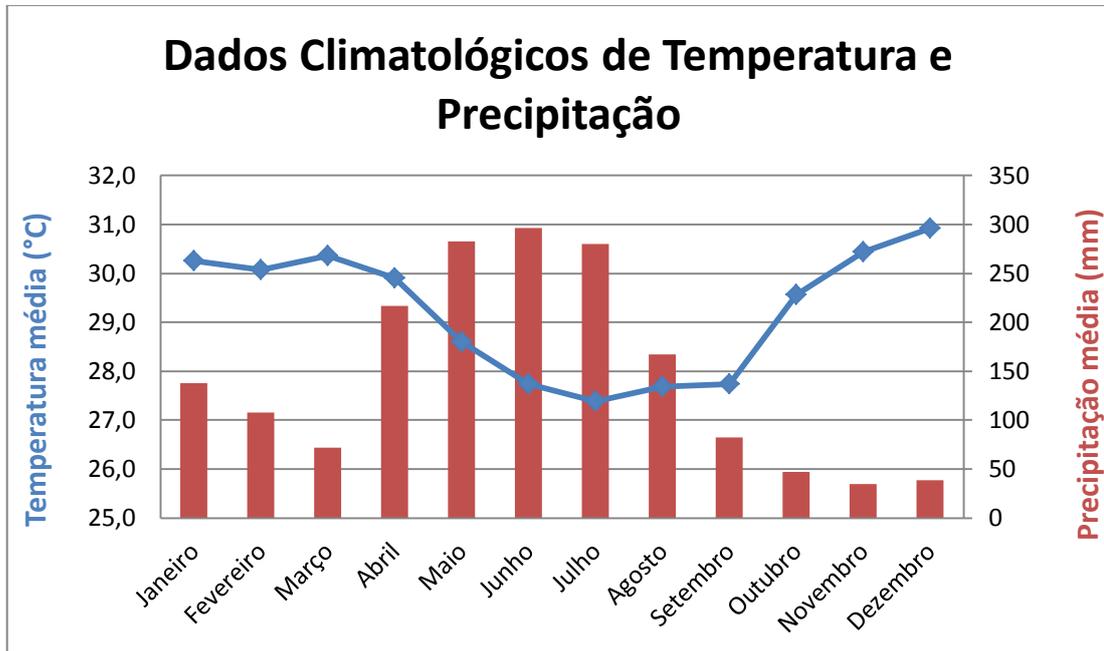
Na Figura 25 está ilustrado dados de precipitação e temperatura médios dos anos 2009 a 2014. Já na Figura 26 está ilustrado o déficit hídrico médio dos anos de 2009 a 2014. Esses dados foram coletados da estação meteorológica instalada na Muribeca – PE.

Percebe-se, na, que nos meses de Abril a Setembro, na qual se localiza a época de inverno, as chuvas são mais intensas, dados esses confirmados pela baixa da temperatura nesses meses, chegando a uma mínima média de 27,4°C no mês de junho. Coerentemente, a precipitação máxima média chega a 296 mm de chuva também no mês de junho.

Nos meses de Outubro a Março instala-se o verão, no qual encontra-se a maior temperatura média no mês de Dezembro, com 31°C e a precipitação mínima média se encontra no mês de Novembro, com 34,38 mm de chuva.

Não houve dados da velocidade dos ventos e da umidade relativa do ar disponíveis na estação da Muribeca.

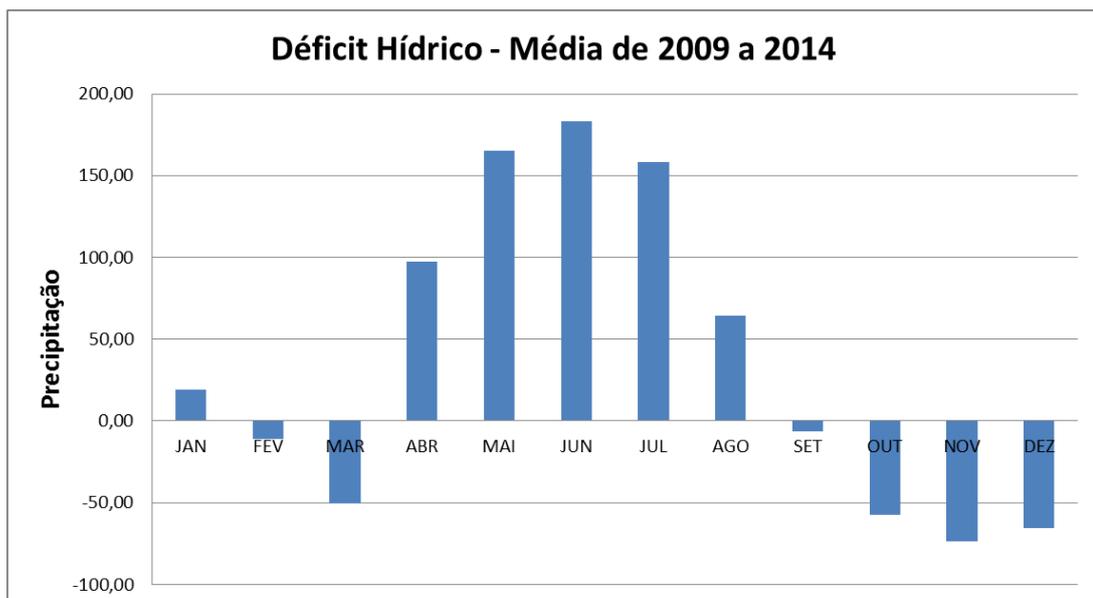
**Figura 25 - Dados climatológicos de Temperatura e Precipitação médios dos anos de 2009 a 2014.**



Fonte: a autora

Na Figura 26 observa-se que nesse mês de junho, o qual ocorre a maior taxa de precipitação, ocorre também o maior excedente hídrico, com 183,43 mm. O maior déficit hídrico se encontra -73,38 mm no mês de Novembro, o mês que possui a menor taxa de precipitação.

**Figura 26 - Déficit Hídrico médios dos anos de 2009 a 2014**

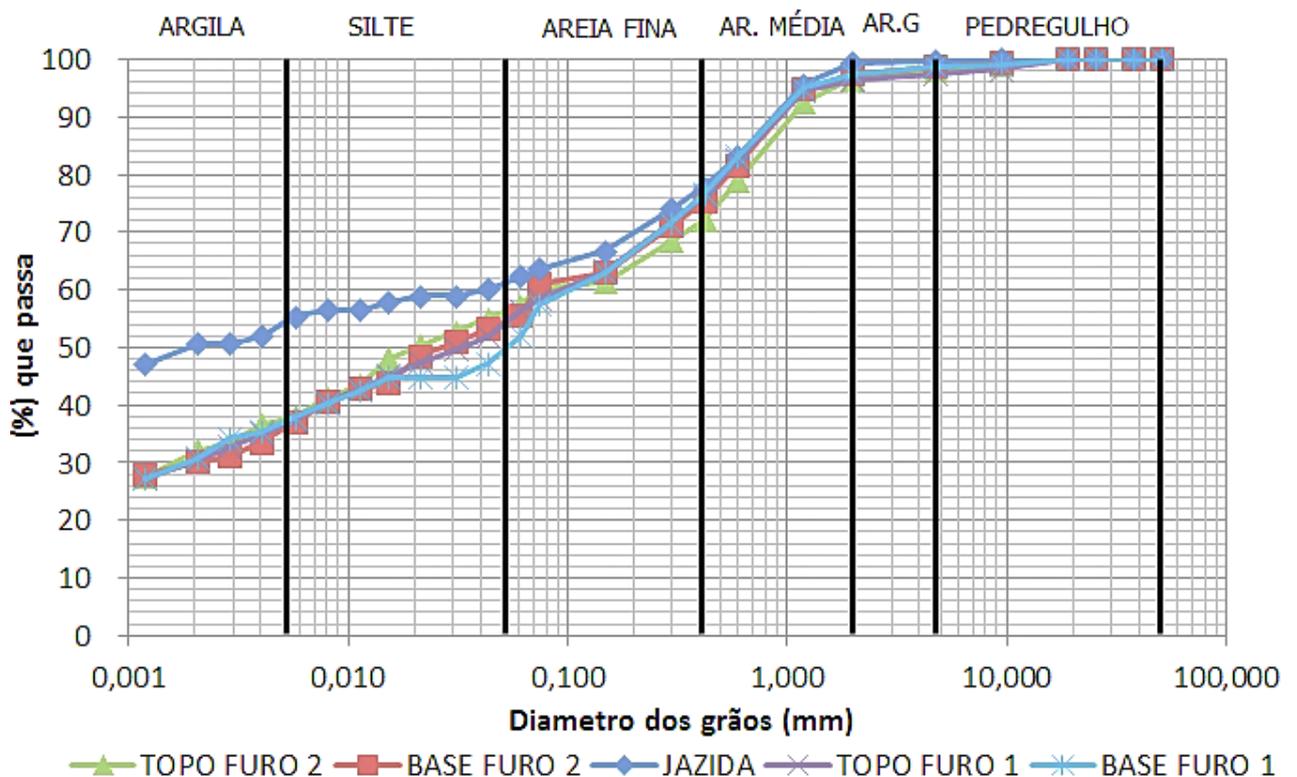


Fonte: a autora

## 4.2. CARACTERIZAÇÕES E PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS ESTUDADOS

A coleta do material foi realizada em 23/09/2014 na célula experimental da Muribeca na camada de cobertura oxidativa. Dessas amostras foram realizadas a caracterização dos materiais coletado como exibido na Figura 27 e nas Tabela 10 e Tabela 11, com resumo dos dados obtidos.

**Figura 27 - Ensaio de Granulometria Furo 1 e 2 e da jazida.**



Fonte: a autora

O solo dos Furos 1 e 2, na base, foi executado com solo puro da jazida, esperava-se, por tanto, o comportamento da curva de caracterização dos furos semelhantes ao da jazida. Nos resultados observou-se que o solo do topo e da base se comportaram de forma muito semelhante, porém, diferente do da jazida.

Nesse ensaio de caracterização do solo, verificou-se falta de sensibilidade desses procedimentos e dos resultados obtidos para verificações de variações

físicas em 5 anos, não tendo sido obtidos resultados conclusivos, já que a diferença da massa específica dos grãos entre a amostra superior (0.1 – 0.3 m) e a inferior (0.4 – 0.6 m) foi da ordem de 0,003 g/m<sup>3</sup>.

Na Tabela 10 está apresentada a porosidade (encontrada a partir do volume de vazios da Tabela 11) que uma camada de cobertura, com as características do solo dos furos avaliados, possui, variando entre 0,3 e 0,6 m.

Esses vazios das Tabela 10 e Tabela 11 podem ser analisadas em termos de capacidade de acumulação de água, nesse caso a capacidade máxima de acumulação de água seria ocupar todos os vazios do solo, logo, o solo do topo possui, em média, 8% a mais de porosidade/vazios do que a base, podendo, o solo misturado com composto, acumular mais água do que o solo puro.

**Tabela 10 – Porosidade e absorção do solo**

<b>Amostra</b>	<b>Porosidade</b>	<b>Vazios em 0,3 m (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Vazios em 0,6 m (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)</b>
<b>FURO 1 TOPO</b>	49%	0,15	0,29
<b>FURO 1 BASE</b>	48%	0,14	0,29
<b>FURO 2 TOPO</b>	56%	0,17	0,34
<b>FURO 2 BASE</b>	49%	0,15	0,29

Fonte: a autora

Dessa forma, em termo de acumulação de águas pluviais nos vazios do solo, uma camada de solo puro de 0,3 m de espessura poderia reter um excedente hídrico de aproximadamente 140 mm, enquanto que uma camada de mesma espessura de solo misturado com composto, numa proporção de 3:1, poderia reter 160mm. Já para uma camada de 0,6 m de espessura, a de solo puro poderia reter um excedente hídrico de 290 mm, enquanto a de solo mais composto poderia reter em torno de 315 mm, em média.

Pode-se afirmar, então, que em se tratando de capacidade de retenção de águas pluviais, para o clima do recife, no qual foi verificado um excedente hídrico de

184 mm, seria suficiente uma camada de 40 cm de solo com composto na proporção de 3:1, a qual obteria uma capacidade de retenção de 213 mm, proporcionalmente à avaliação feita anteriormente.

**Tabela 11 – Características do solo da Jazida e dos Furos 1 e 2, Topo e Base**

<b>Amostra</b>	<b>Jazida</b>	<b>Furo 1 Topo</b>	<b>Furo 1 Base</b>	<b>Furo 2 Topo</b>	<b>Furo 2 Base</b>
<b>% argila</b>	56	36	36	38	36
<b>% silte</b>	5	18	12	18	17
<b>% areia fina</b>	17	21	26	16	21
<b>% areia média</b>	22	21	22	25	24
<b>% areia grossa</b>	-	2	1	2	1
<b>% pedregulho</b>	-	2	2	2	1
<b>LL (%)</b>	46%	52%	47%	47%	42%
<b>LP (%)</b>	32%	33%	33%	29%	23%
<b>IP (%)</b>	14%	19%	14%	18%	19%
<b>Classificação Unificada</b>	CL	ML	ML	ML	ML
<b>Massa específica dos grãos (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,90	2,58	2,59	2,89	2,87
<b>Índice de vazios inicial (e)</b>	-	1,93	1,96	2,06	2,15
<b>Índice de vazios final (e)</b>	-	1,83	1,86	1,85	2,05
<b>Ksat (m/s)</b>	-	2,8E-07	1,7E-08	3,4E-07	5,6E-07
<b>Kar (m/s)</b>	-	7,6E-07	5,6E-07	4,1E-07	4,0E-07
<b>Umidade (%)</b>	23%	21%	21%	21%	21%
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-	1,65	1,77	1,29	1,17

Fonte: a autora

Diante dos resultados obtidos na granulometria, sedimentação, realização dos limites de Atterberg, realizou-se a classificação unificada do solo, na qual, de acordo com o SUCS, o solo analisado da jazida foi classificado como argila de baixa

compressibilidade (CL - e = 0,56) e o do solo no furo 1 e 2, topo e base, foi silte de baixa compressibilidade (ML - e = 0,63).

Comparando com Lopes (2011), na qual caracterizou o solo como siltoso de alta compressibilidade, observa-se que houve uma redução de silte na amostra e um aumento de argila, o que indicaria uma decomposição da matéria orgânica presente no solo e consequente redução da granulometria.

A porosidade no estudo de Lopes (2011) verificada foi de 43% na convencional e de 49% na oxidativa (metanotrófica 2 - 1:3). Já Santos *et. al.*, 2014 encontrou uma porosidade para a camada convencional de 39% e para a metanotrófica 2 de 48%.

Esse aumento de porosidade para uma média de 51%, em 2015, indica a ocorrência de lixiviação de materiais finos pela camada. Não há como afirmar uma lixiviação de finos do topo para a base, mas da camada inteira. Pode-se dizer que para a camada de 60 cm, não houve retenção de finos na base, e por isso uma lixiviação do topo e da base para o interior do aterro.

Na Tabela 11 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, a permeabilidade, o índice de vazios e a densidade dos solos dos furos 1 e 2 foi, em média, aproximadamente a mesma para o topo e a base, confirmando o resultado da granulometria.

Comparando com os resultados de Lopes, 2011, o LP diminuiu e o IP aumentou, indicando uma diminuição de finos em toda a espessura da camada. Corroborando essa análise, o percentual de silte diminuiu, enquanto que o percentual de argila, areia fina e média aumentou consideravelmente e o percentual de areia grossa e pedregulho diminuíram drasticamente.

Quanto a permeabilidade máxima, Lopes (2011) avaliou a camada convencional em  $1,5 \cdot 10^{-9}$  m/s para a permeabilidade à água e  $4,4 \cdot 10^{-8}$  m/s para a permeabilidade ao ar, e para a camada metanotrófica 2 em  $9,2 \cdot 10^{-8}$  m/s para a permeabilidade à água e  $3,2 \cdot 10^{-7}$  m/s para a permeabilidade ao ar.

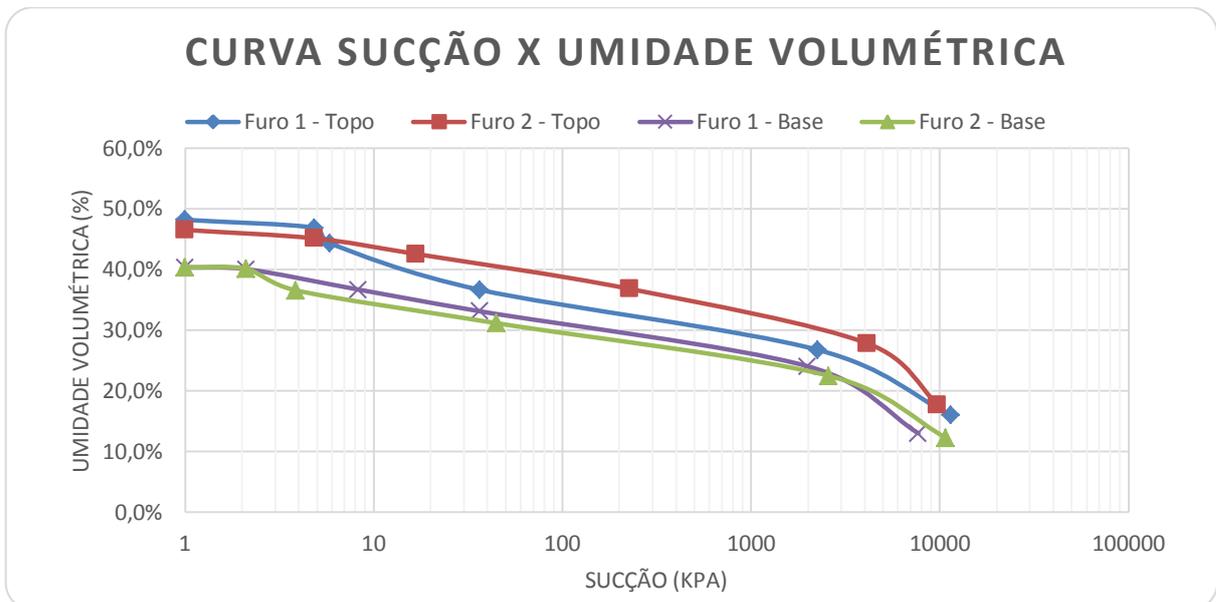
Pode-se avaliar que a permeabilidade da camada oxidativa estudada aumentou para uma ordem de grandeza na média de  $10^{-7}$  m/s, incorrendo num

aumento de duas ordens de grandeza em 5 anos, indicando uma perda na eficiência da impermeabilização da camada devido ao aumento da porosidade da camada.

### 4.3. CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

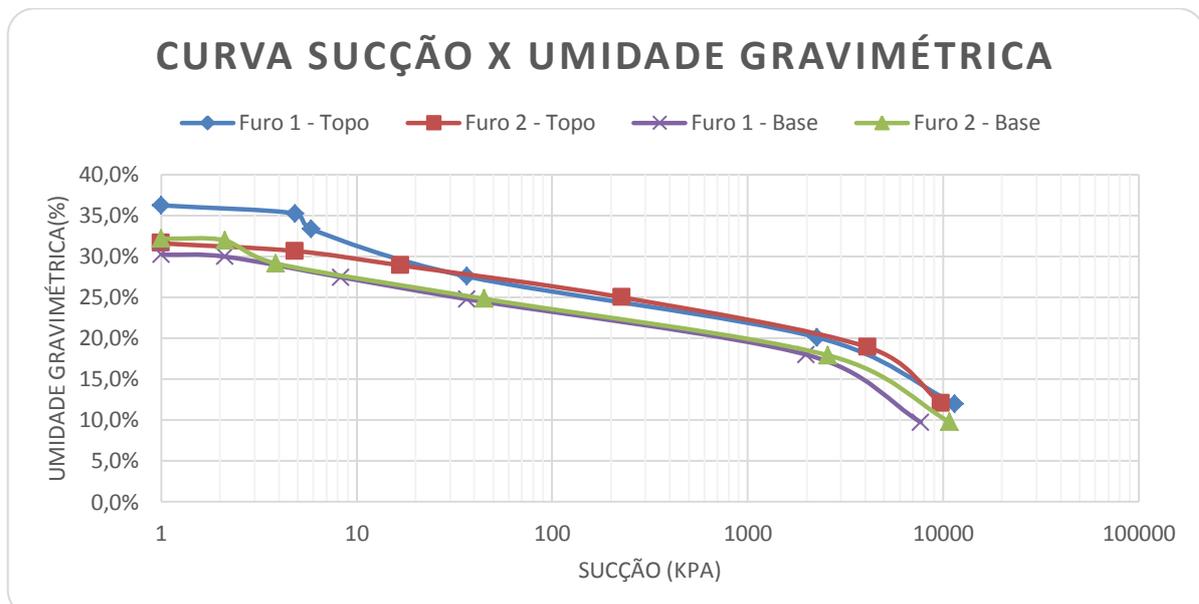
A curva de retenção foi realizada para o Furo 1 e Furo 2, para cada um com as amostras de Topo e Base, como apresentado nas Figura 28, Figura 29 e Figura 30.

**Figura 28 - Curva de retenção dos furos 1 e 2; Umidade Volumétrica**



Fonte: a autora

**Figura 29 - Curva de Retenção dos Furos 1 e 2 - Umidade Gravimétrica**



Fonte: a autora

A curva de sucção do material da camada de cobertura oxidativa estudada pode ter pontos de variação rápida de umidade devido à presença de poros de tamanhos variáveis, mas mantém uma regularidade na curva como um todo, apresentando um formato previsto para o comportamento de solos finos, conforme citado anteriormente por Marinho (2005).

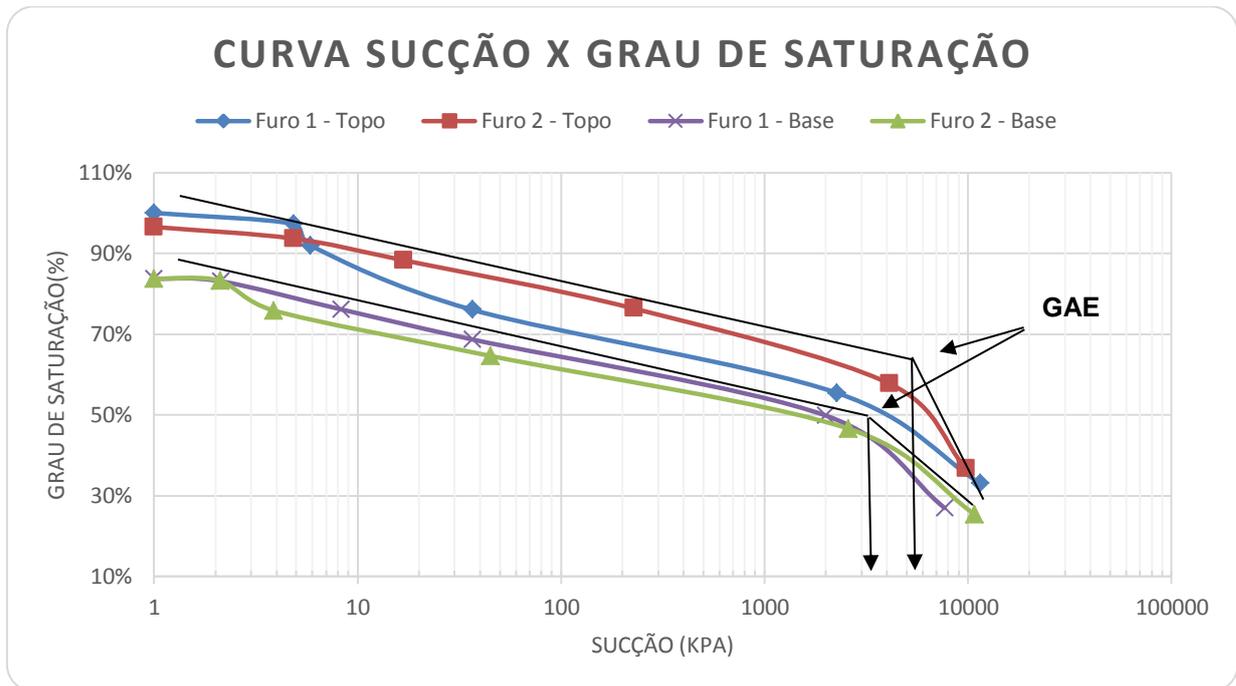
Avaliando a umidade, observou-se que, em média, o solo do topo (solo + composto) absorveu em torno de 8% a mais de água do que o da base (solo puro). Isso se dá pelo fato de haver matéria orgânica presente na parte superior da camada de cobertura.

A retenção máxima do solo foi avaliada em 48% para o topo e 40% para a base. Fazendo uma analogia dos solos do topo e da base com as camadas metanotrófica 2 e convencional, respectivamente, estudadas por Lopes (2011) e por Santos *et. al.* (2014), os resultados da retenção do solo mostram compatibilidade com os estudos desses autores, que verificaram no comportamento do solo com matéria orgânica uma maior retenção e porosidade em comparação com solo puro. Esses mesmos autores também verificaram uma retenção máxima em torno de 40%.

Na Figura 30 pode-se observar a sucção no ponto de entrada de ar (GAE), avaliado em 3.200 KPa para o solo puro (base) com grau de saturação de 49% e 5.500 KPa para o solo com composto (topo) com grau de saturação de 63%. Essa queda do grau de saturação comparado com Lopes (2011) está intimamente ligada à lixiviação e aumento da porosidade da camada.

E avaliando o comportamento de cada amostra de solo a partir da variação de umidade e sucção, obteve-se a retenção prevista do solo ( $C = \Delta w / \log \Delta S$ ; Tabela 12). Observa-se que, em média, o topo (mistura de solo e composto em 1:3) possui maior capacidade de retenção de água (5,8%) do que a base (5,1% - solo puro), coerente com a análise da umidade e com os estudos de Lopes (2011).

**Figura 30 - Curva Sucção x Grau de Saturação**



Fonte: a autora

**Tabela 12 - Retenção (C)**

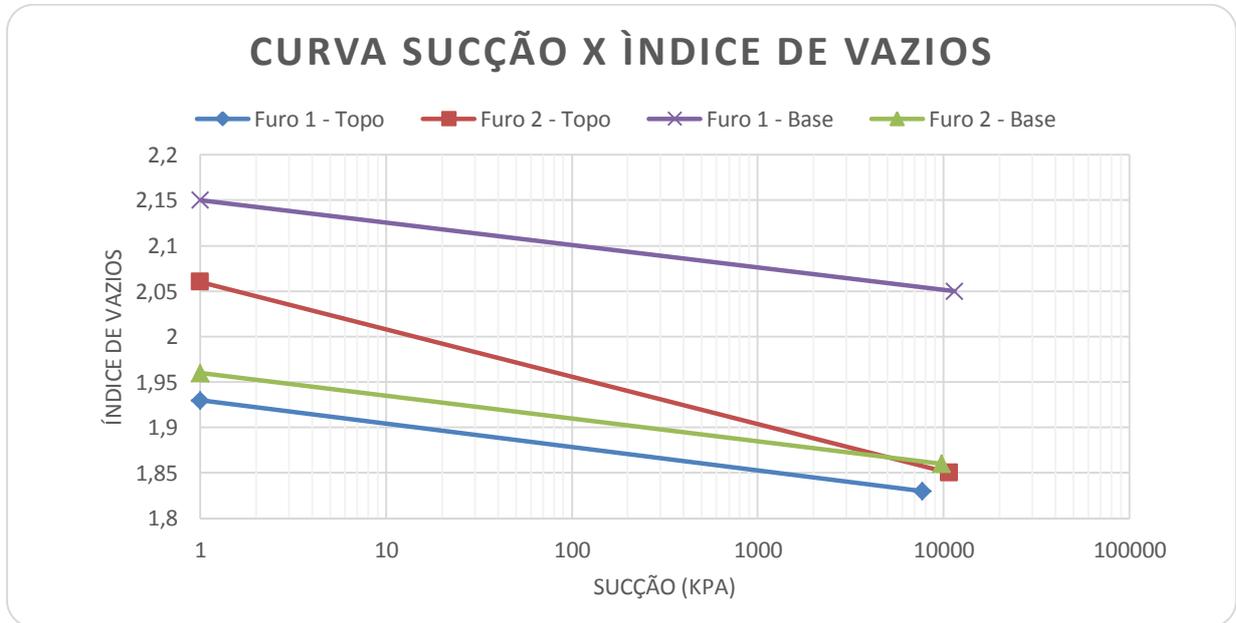
AMOSTRAS	C
Furo 1 - Topo	6,4%
Furo 1 - Base	5,0%
Furo 2 - Topo	5,2%
Furo 2 - Base	5,2%

Avaliando a variação de índice de vazios nas amostras estudadas, percebeu-se que as amostras sofreram pequenas mudanças e que o solo do topo, que possui composto, obteve uma maior variação de vazios comparado ao solo da base, Figura 31.

O solo puro, da base, obteve uma variação de índice de vazios média de 0,1, já o solo com composto, do topo, obteve uma variação média de 0,16. Esse comportamento, quanto à variação de vazios no solo com a redução de umidade, é comum para um solo de baixa compressibilidade, o que foi verificado na

granulometria, e assim deve ser o solo de um aterro para manter a impermeabilização da camada de cobertura.

**Figura 31 - Curva de Sucção x Índice de vazios**



Fonte: a autora

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

---

### 5.1 CONCLUSÕES

De acordo com as características esperadas em um aterro, o solo apresentou granulometria e permeabilidade compatíveis.

No ensaio de granulometria, observou-se que não há sensibilidade no ensaio para detectar, em uma camada final de cobertura de 0,6 m, a ocorrência de lixiviação da camada superior para a camada inferior após um período de 5 anos do fechamento da camada.

Na permeabilidade, ao ar e à água, foi observada que o solo com composto também se apresentou mais poroso, com maior permeabilidade, do que o solo puro, com a diferença de uma ordem de grandeza. Já com relação aos estudos anteriores, após 5 anos do fechamento do aterro, foi observado um aumento na permeabilidade do solo de duas ordens de grandeza, causando uma ineficiência da impermeabilização da camada de cobertura.

A porosidade e o índice de vazios aumentou em 5 anos. Verificou-se, a partir dos índices de vazios, que uma camada de cobertura oxidativa com solo com composto (ML) obteve em torno de 8% mais vazios do que o solo puro (ML). De forma semelhante, no solo com composto foi verificada porosidade 8% maior do que no solo puro.

No ensaio de sucção, intimamente ligado à porosidade e índice de vazios do solo, observou-se que o solo com composto (1:3), solo do topo, apresentou uma capacidade de retenção de água, em média, 5,8% e o solo puro, solo da base, de, em média, 5,1%.

O ponto de entrada de ar (GAE) do solo teve uma redução da saturação, após 5 anos, demonstrando uma correlação com o aumento da porosidade.

Sendo, a questão da escolha de material para a execução da camada de cobertura final de um aterro, na impossibilidade de captar o metano, ou mesmo que haja a captação do metano, parcelas desse gás são perdidas pela camada de cobertura, na qual a vazão desse fluxo depende da condição do estado de pressões

dentro e fora do aterro, sugere-se, a depender da produção de metano dos resíduos a serem tratados no aterro, uma camada de solo argiloso de baixa compressibilidade misturado com composto, numa proporção de 1:3, com camadas entre 0,3 e 0,6 m.

Avaliando o clima e o excedente hídrico de uma região a qual se deseja realizar uma camada de cobertura de um aterro, na existência de um déficit hídrico de cerca de 200 mm de chuva, uma camada de 0,6 m de solo argiloso de baixa compressibilidade misturado com composto, numa proporção de 1:3, seria eficiente, já para uma região com precipitação a cerca de 100 mm, uma camada de 0,3 m com os mesmos materiais da de 200 mm. Em Recife, com déficit hídrico avaliado de 184 mm, sugere-se uma camada de mesma composição com 0,4 m de espessura, a qual suportaria uma retenção de 213 mm de chuva.

## **5.2 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS**

Sugere-se, para a avaliação da lixiviação dos finos na camada de cobertura de um aterro sanitário, a análise das características de um aterro com uma idade maior do que 5 anos ou de um ambiente mais agressivo do que o estudado.

Ainda para esse tipo de análise, sugere-se uma verificação da estrutura do solo, dos seus vazios ao longo da profundidade, que pode ser indicada no ensaio de sucção, mas avaliada em um ensaio de raio x, ensaio de maior sensibilidade.

## 6. REFERÊNCIAS

---

ABICHOU, T.; LANGONI, G. TAWFIC, K.; (2003) Assessment of Alternative Earthen Final Covers for Florida Landfills. Report #03-05. 107 p.

ABNT (1984a) Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica dos grãos NBR – 6508 (1984) Rio de Janeiro - RJ

ABNT (1984b) Análise granulométrica para solos, com determinação de diâmetro correspondente a cada fração de material de acordo com a norma NBR - 7181/84

ABNT (1984c) Solo – Determinação do Limite de Liquidez NBR – 6459/84. Rio de Janeiro - RJ

ABNT (1984d) Solo – Determinação do Limite de Plasticidade NBR – 7180/84. Rio de Janeiro - RJ

ABNT, (1986b) Solo - Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal NBR – 7182/86. Rio de Janeiro - RJ

ABNT (1997) Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. NBR 13.896/97. Rio de Janeiro – RJ

ALCÂNTARA, P. B. (2007). Avaliação da influência da composição de Resíduos Sólidos Urbanos no comportamento de aterros simulados. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil / Grupo de Resíduos Sólidos. Universidade Federal de Pernambuco Recife-PE.

ATSDR – Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Landfill Gas Primer, An Overview for Environmental Health Professionals, November 2001.

ASTM (2010) 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.

ASTM (2010) 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.

BOECKX, P. e CLEEMPUT, O.V. (2000) Methane oxidation in landfill cover soils. Trace Gas Emissions and Plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 197-213.

CAMARGO, A.P.; MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; PICINI, A.G. (1999) Ajuste do método de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas árido e super úmidos, baseados na amplitude de temperatura diária. Revista Brasileira de Agrometeorologia. 7 (2), pp.251–257.

CAPUTO, H. P. – Mecânica dos Solos e suas Aplicações, Fundamentos. Rio de Janeiro, Dezembro de 1988

COELHO, C. A. A. (2005) Avaliação do desempenho de camadas de cobertura intermediária e finais em células experimentais de disposição de resíduos sólidos urbanos. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

EMLURB, 2014 – Site da Prefeitura do Recife - <http://www.recife.pe.gov.br/emlurb/aterrosanitario.php>

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

GUEDES, V. P. (2007) Estudo do fluxo de gases através do solo de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

HUBER-HUMER, M.; GEBERT, J.; HILGER, H. A. (2008) Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. Waste Management & Research, Vol. 26, No. 1, pp 33-46.

JANG, Y.-S.; KIM, Y. -W.; LEE, S. -I. (2002) Hydraulic properties and leachate level analysis of Kimpo metropolitan landfill, Korea. Waste Management. v. 22, pp 261-267.

JUCÁ, J.F.T. (1990) Comportamiento de suelos parcialmente saturados, Tese de Doutorado, Engenharia Civil - ETS Caminos, Canales y Puertos, Universidade Politécnica de Madrid, Espanha.

JUCÁ, J.F.T. (2014) Comunicação pessoal.

LOPES, R. L. (2011) Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos, 2011. Tese (doutor em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

MACIEL, F. J. (2003) Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca. 2003. Dissertação (mestre em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

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

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. (2002) Gases monitoring methodology applied in Muribeca Solid Waste Landfill, Proceedings of the Fourth International Congresso n Environmental Geotechnics, Balkema, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp.263-269.

MALDANER, L. S. (2011) Cobertura para oxidação biológica do metano em aterros de resíduos sólidos urbanos / L.S. Maldaner – São Paulo, 2011. 108 p.

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

MARINHO, F. A. M. (1994), Shrinkage behaviour of some plastic soils, PhD Thesis, Imperial College, London, UK. 216p.

MARINHO, F. A. M. (2005) – Apostila de livre docência – “Os Solos não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados”.

LEI Nº 11.107 - Art. 1º Esta Lei dispõe sobre normas gerais para a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios contratarem consórcios públicos para a realização de objetivos de interesse comum e dá outras providências.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D. D. (2004) Escoamento Superficial. 2Ed. – Viçosa: UFV. 87p.

QIAN, X.; KOERNER, R. M.; GRAY, D. H. (2002) Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. Prentice Hall. New Jersey.717p.

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 404 - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - No uso das atribuições que lhe são conferidas pelo art. 8º, inciso I, da Lei nº 6.938.

ROCCA, A.C.C. *et. al.*(1993) Resíduos sólidos industriais. 2 ed. rev. ampl. São Paulo, CETESB.

ROSE, J.L.; GOUVEIA, P.P.F.; MAHLER, C.F. (2007) Study of methane oxidation on a covering layer. In: Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

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

SANTOS, G. M. dos; FERREIRA, S. R. de M. (2014) Estudo do comportamento Mecânico de solos utilizados em três camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.