



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SOLO COMPACTADO UTILIZADO NA  
CAMADA DE COBERTURA DE UM ATERRO SANITÁRIO**

PABLO DA SILVA ARAUJO

CAMPINA GRANDE – PB

Março de 2017

PABLO DA SILVA ARAUJO

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SOLO COMPACTADO UTILIZADO NA  
CAMADA DE COBERTURA DE UM ATERRO SANITÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

**Área de concentração:** Geotecnia

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

**Coorientador:** Prof. Dr. William de Paiva

CAMPINA GRANDE – PB

Março de 2017

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

A663a

Araujo, Pablo da Silva.

Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário / Pablo da Silva Araujo. – Campina Grande, 2017.

138 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2017.

"Orientação: Profa. Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Prof. Dr. William de Paiva".

Referências.

1. Aterro Sanitário. 2. Camada de Cobertura Final. 3. Solo Compactado. 4. Solos Não Saturados. 5. Resíduos Sólidos Urbanos – Aterros Sanitários. I. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. II. Paiva, William de. III. Título.

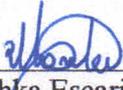
CDU 628.4(043)

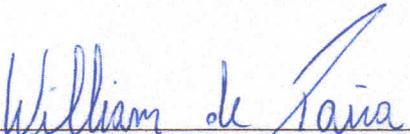
**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SOLO COMPACTADO UTILIZADO NA  
CAMADA DE COBERTURA DE UM ATERRO SANITÁRIO**

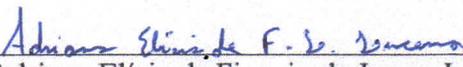
PABLO DA SILVA ARAUJO

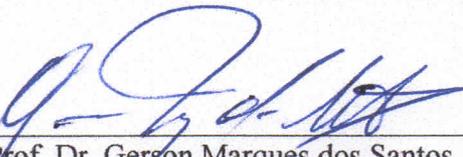
DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG, EM CUMPRIMENTO ÀS EXIGÊNCIAS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

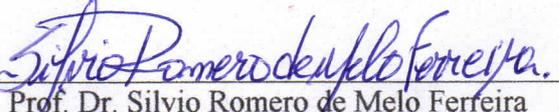
Examinada por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro  
(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. William de Paiva  
(Coorientador – Universidade Estadual da Paraíba - UEPB)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena  
(Examinador Interno – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Gerson Marques dos Santos  
(Examinador Externo – Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira  
(Examinador Externo – Universidade Federal de Pernambuco - UFPE)

CAMPINA GRANDE – PB  
29 de março de 2017

***Dedicatória***

À minha avó paterna, Maria Araújo Lucena dos Santos (*in memoriam*), e a meu tio, José Araújo dos Santos (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder o dom da vida e me dar coragem e determinação para concluir mais uma etapa da minha carreira estudantil. Por meio da sua infinita misericórdia, me amparou nos momentos de dúvida e aflição, me conduzindo até este dia tão significante da minha vida. Agradeço a minha fiel protetora, a Bem aventurada Virgem Maria, que me guia com sua luz em meio aos caminhos tortuosos da vida e me cobre de bênçãos todos os dias.

A família, em especial meus pais (Edileusa e Paulo) e minha irmã (Pâmella), que me educaram e incentivaram, além de, se esforçarem todos os dias para que eu chegasse até aqui. Aos demais familiares, como, meu avô paterno (Manoel Araujo), primas (os), tias (os) e demais membros da família, que estiveram comigo em todos os momentos da minha vida, e com quem divido essa conquista.

Aos amigos, Frank, Juliana, Suely e Kaio, do grupo da “Calçada do sucesso”; a Cícero, Wiviane, Messias e César, que conquistei durante minha vida de serviços na igreja Catedral de Patos; a Gleydson, Jefferson e Antônio, que são meus amigos de infância. E aos demais amigos, que são muitos graças a Deus, aos quais agradeço em nome de todos que citei anteriormente, por estarem comigo em todos os momentos da minha vida.

Aos amigos da graduação, Mauro, Priscila, Thiago Limeira e Rayan do grupo da “MPa Engenharia”, e a Pedro, que se tornaram membros da minha família e são verdadeiros irmãos.

Aos amigos de todos os dias, Felipe, Cláudio, Amanda, Breno, Raul, Raquel e Cristiane, que dividiram comigo momentos de alegria e pela compreensão nos momentos de aflição e tristeza.

Aos amigos do Grupo de Geotecnia Ambiental, em especial, Daniela, Libânia, Rômulo, Kellianny, Josicleide, Márbara e ao prof. Márcio, que me ajudaram e orientaram nos caminhos da vida acadêmica.

Aos amigos do mestrado, Paulo, Thays, Laiana, Nataliene e Thiago, por dividirem comigo, todas as etapas do curso de mestrado e por compartilharem suas experiências profissionais e acadêmicas.

Aos professores orientadores, Veruschka Monteiro e William de Paiva, que me acolheram durante a graduação e me tornaram a pessoa e o profissional que sou hoje.

Ao GGA, em especial aos integrantes do subgrupo de “Ensaio Geotécnicos”, que não mediram esforços em me ajudar com a realização dos ensaios e serem parceiros em publicações científicas.

A banca examinadora, nas pessoas dos professores, Adriano Lucena, Gerson dos Santos e Silvio Romero, por contribuírem cientificamente com esta pesquisa e por me mostrarem novos horizontes da vida acadêmica.

A UFCG, por me proporcionar mais uma formação profissional e por ser a casa ao qual devo inúmeras realizações e conquistas profissionais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental e seus funcionários, pela prestatividade e prontidão durante todo o período do curso de mestrado.

Aos técnicos de laboratório, Netinho e Ronildo, que contribuíram com a realização de ensaios, interpretação dos dados pertinentes desse trabalho e fornecerem material para o bom desenvolvimento das minhas atividades do mestrado.

Aos funcionários (Nildinho, Ladjane e Jadilson) e professores do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), por possibilitarem a realização de ensaios, fornecerem equipamentos e materiais, quando necessário, para o desenvolvimento dos trabalhos de campo.

A ECOSOLO, na pessoa do Eng. Civil João Azevedo, por disponibilizar seu tempo para o fornecimento de informações do aterro sanitário e funcionários para realização de atividades e coleta de dados em campo.

A CAPES, por conceder o auxílio financeiro, sem o qual não poderia ter concluído mais uma etapa da minha formação profissional, e me permitiu investir em cursos de línguas e especializações em áreas da engenharia civil.

A todos, que de forma de direta ou indireta, contribuíram e ajudaram, para que eu me tornasse um mestre em engenharia civil, o meu muito obrigado!!!

ARAÚJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2017.

## RESUMO

Uma das formas de tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) que mais se destaca são os aterros sanitários, que possui como vantagens, a facilidade de operação, menor custo quando comparado às outras técnicas (triagem, tratamento biológico, incineração, entre outras) e a existência de um plano de monitoramento contínuo. O aterro sanitário utiliza uma camada de cobertura final de solo compactado com a finalidade de isolar os resíduos do meio externo, minimizar a entrada de água para o interior do maciço sanitário, reduzir as emissões de gases para a atmosfera, evitar a proliferação de roedores e vetores de doença, entre outras. As Normas Brasileiras não regulamentam o tipo de solo a ser utilizado, nem técnicas de execução de camadas de coberturas de aterros, nem a forma de monitoramento, possuindo como única exigência o atendimento de um coeficiente mínimo de permeabilidade à água. Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho do solo compactado utilizado na camada de cobertura final de um aterro de resíduos sólidos, tendo como campo experimental o Aterro Sanitário de Campina Grande/PB. Para isso foi realizada a caracterização física do solo utilizado na camada, verificação de seus parâmetros quanto à viabilidade para uso em aterros sanitários, análise físico-química e mineralógica, obtenção da curva de retenção de água no solo e análise dos pontos experimentais da curva aos ajustes propostos na literatura. Foi verificado o comportamento do solo frente aos processos de umedecimento/secagem e expansão/contração, observação da relação entre a umidade ótima de compactação e o ponto de entrada generalizada de ar (GAE), além da verificação da variação da umidade do solo em um perfil experimental da camada de cobertura por meio de sensores capacitivos. Os resultados demonstraram que, o solo possui permeabilidade à água admissível para uso em aterros sanitários segundo as normas nacionais e internacionais. O ajuste da curva de Van Genuchten aos pontos experimentais da curva de retenção atendeu às condições de concordância a partir dos parâmetros estatísticos analisados. A umidade ótima de compactação do solo possui valor próximo ao GAE, onde se inicia a dessaturação do solo, no qual o ar começa a entrar nos maiores poros formados pela drenagem da água e perda de umidade. Deve-se realizar a compactação do solo na energia proctor normal obedecendo à adição de água suficiente para atingir a umidade ótima, em um intervalo aceitável de  $\pm 2\%$ . Pode-se concluir que, o tipo de camada de cobertura final (solo argiloso compactado) utilizado é inadequado para a região do aterro devido às características climatológicas a que o solo está submetido e a ausência de proteção vegetal superficial. A aplicação da energia proctor normal para compactação do solo da camada de cobertura do aterro sanitário proporciona condições favoráveis à redução da permeabilidade à água do solo. A curva de retenção de água no solo da camada de cobertura do aterro sanitário apresenta comportamento unimodal e possui características de um solo argiloso. A utilização de sensores capacitivos se mostrou como uma técnica eficaz para aquisição automática da umidade do solo e verificação da sua variação ao longo do tempo, bem como, o monitoramento da sucção pela espessura da camada de cobertura final de solo compactado.

**Palavras-chave:** Aterro sanitário, camada de cobertura final, solo compactado, desempenho, solos não saturados.

ARAÚJO, P. S. **Analysis of the performance of a compacted soil used in the cover layer of a landfill.** 2017. Dissertation (Master in Civil and Environmental Engineering) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2017.

### ABSTRACT

One of the forms of treatment of Municipal Solid Waste (MSW) is the landfill, which has the advantages of ease of operation, lower cost when compared to other techniques (sorting, biological treatment, incineration, among others) and the existence of a continuous monitoring plan. The landfill uses a final cover layer of compacted soil to isolate residues from the external environment, minimize the entry of water into the landfill, reduce the emission of gases into the atmosphere, prevent the proliferation of rodent and vectors of disease, among others. The Brazilian Regulations do not regulate the type of soil to be used, nor techniques for implementing layers of landfills, nor the form of monitoring, having as sole requirement the attendance of a minimum coefficient of water permeability. The objective of this work is to analyze the performance of the compacted soil used in the final cover layer of a landfill, with the Landfill Campina Grande/PB as an experimental field. The physical characterization of the soil used in the layer, verification of its parameters regarding the feasibility for use in landfills, physical-chemical and mineralogical analysis, obtaining the water retention curve in the soil and analysis of the experimental points of the curve were performed adjustments proposed in the literature. The behavior of the soil was verified in relation to the wetting/drying and swell/contraction processes, observation of the relation between the optimum compaction humidity and the Generalized Air Entry (GAE), besides the verification of soil moisture variation in one experimental profile of the cover layer by means of capacitive sensors. The results showed that the soil has permeability to water admissible for use in landfills according to national and international standards. The adjustment of the Van Genuchten curve to the experimental points of the retention curve met the conditions of agreement from the statistical parameters analyzed. The optimum soil compaction humidity has a value close to GAE, where soil desaturation begins, in which the air begins to enter the larger pores formed by water drainage and moisture loss. Soil compaction must be carried out in normal proctor energy by adding sufficient water to achieve optimum moisture, within an acceptable range of  $\pm 2\%$ . It can be concluded that the type of final cover layer (compacted clay soil) used is unsuitable for the landfill region due to the climatological characteristics to which the soil is subjected and the absence of surface vegetation protection. The application of normal proctor energy to soil compaction of the landfill cover layer provides favorable conditions for the reduction of soil water permeability. The water retention curve in the soil of the final cover layer of the landfill presents unimodal behavior and has characteristics of a clay soil. The use of capacitive sensors proved to be an effective technique for automatic acquisition of soil moisture and verification of its variation over time, as well as the monitoring of suction by the thickness of the final cover layer of compacted soil.

**Keywords:** Landfill, cover layer, compacted soil, performance, unsaturated soils.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camada de cobertura e elementos constituintes das células do aterro sanitário.....	21
Figura 2 - Tipo de sistema de cobertura convencional.....	23
Figura 3 - Esquema da camada evapotranspirativa e representação da umidade ao longo da profundidade.....	26
Figura 4 - Esquema de uma barreira capilar.....	28
Figura 5 - Esquema da camada de cobertura metanotrófica.....	30
Figura 6 - Permeabilidade in situ: a) permeâmetro de Guelph; b)Infiltrômetro de anel duplo.	34
Figura 7 - Membrana contrátil do solo.....	38
Figura 8 - Potencial Total de Água no Solo.....	43
Figura 9 - Atuação da sucção das partículas sólidas do solo.....	45
Figura 10 - Interação da água com os argilominerais.....	47
Figura 11 - Fatores intervenientes da sucção no solo.....	48
Figura 12 - Representação da curva de retenção de água no solo.....	49
Figura 13 - Curva de retenção por tipo de solo.....	50
Figura 14 - Secagem e umedecimento na curva característica do solo.....	51
Figura 15 - Zonas da curva de retenção de água no solo.....	52
Figura 16 - Parâmetros da curva característica.....	53
Figura 17 - Aferição da sucção osmótica e matricial.....	60
Figura 18 - Zonas de infiltração no solo.....	62
Figura 19 - Sensor capacitivo de verificação da umidade do solo.....	64
Figura 20 - Etapas da pesquisa.....	66
Figura 21 - Localização do município de Campina Grande-PB.....	67
Figura 22 - Localização do Aterro Sanitário de Campina Grande-PB.....	67
Figura 23 - Célula do aterro sanitário.....	68
Figura 24 - Jazida de solo.....	69
Figura 25 - Coleta do solo para ensaios de caracterização.....	69
Figura 26 - Preparação de amostras para ensaios de caracterização.....	70
Figura 27 - Caracterização física do solo em laboratório: a) massa específica dos grãos, b) compactação, c) granulometria por sedimentação, d) permeabilidade à água, e) limite de liquidez, f) granulometria por peneiramento, g) pesagem do material.....	71
Figura 28 - Ensaios de campo no aterro sanitário: a) Cilindro de cravação, b) Infiltração.....	72
Figura 29 - Equipamento de análise mineralógica por Fluorescência de Raios-X (EDX).....	73
Figura 30 - Equipamento de análise mineralógica por Difração de Raios-X (DRX).....	74
Figura 31 - Papel filtro Whatman n°. 42.....	75
Figura 32 - Moldagem de amostras para ensaio de sucção.....	76
Figura 33 - Amostras com lâmina d'água e pesagem após período de saturação.....	77
Figura 34 - Amostras envolvidas com filme plástico e acondicionadas.....	78
Figura 35 - Retirada do papel filtro das amostras.....	78
Figura 36 - Ensaio de índice de expansão do solo.....	81
Figura 37 - Unidade automatizada de medição das umidades do solo.....	83
Figura 38 - Esquema dos componentes da unidade automatizada de medição.....	83

Figura 39 - Solo para calibração dos sensores de umidade. ....	84
Figura 40 - Procedimento de aferição da umidade do solo. ....	85
Figura 41 - Verificação da umidade do solo pelo método da estufa. ....	86
Figura 42 - Croqui esquemático da célula experimental. ....	87
Figura 43 - Posicionamento dos sensores na célula experimental.....	88
Figura 44 - Complemento de tubo adicionado para inundação da célula experimental. ....	89
Figura 45 - Curva granulométrica do solo da camada de cobertura. ....	92
Figura 46 - Curva de compactação do solo. ....	94
Figura 47 - Composição química do solo da camada de cobertura. ....	97
Figura 48 - Difratograma de Raios-X do solo da camada de cobertura. ....	99
Figura 49 - Curva característica: Umidade volumétrica x Sucção Matricial. ....	100
Figura 50 - Curva característica: Umidade gravimétrica x Sucção Matricial. ....	101
Figura 51 - Curva característica: Grau de Saturação x Sucção Matricial.....	102
Figura 52 - Curva de retenção de água do solo da camada de cobertura (Van Genuchten, 1980). ....	105
Figura 53 - Relação gráfica do potencial de expansão do solo. ....	108
Figura 54 - Carreamento dos finos contidos no solo. ....	109
Figura 55 - Inexistência de vegetação para proteção superficial. ....	109
Figura 56 - Ressecamento do solo.....	110
Figura 57 - Erosão do solo.....	110
Figura 58 - Curva de calibração dos sensores de umidade do solo. ....	111
Figura 59 - Umidade do solo no período seco de observação. ....	113
Figura 60 - Variação da umidade do solo no período de saturação.....	113
Figura 61 - Verificação do aumento da umidade ao longo do tempo.....	114
Figura 62 - Dados de precipitação mensal e históricos. ....	115
Figura 63 - Variação da temperatura do município de Campina Grande-PB.....	116
Figura 64 - Análise dos dados de insolação e evaporação. ....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características geotécnicas do solo para utilização em aterros sanitários.....	34
Tabela 2 - Relação entre o GAE e a Umidade ótima do solo.....	54
Tabela 3 - Equações de calibração do papel filtro Whatman nº. 42.....	61
Tabela 4 - Composição granulométrica do solo (Escala ABNT). ....	91
Tabela 5 - Análise estatística dos ajustes de curva. ....	104
Tabela 6 - Parâmetros estimados e equação. ....	105
Tabela 7 - Permeabilidade à água do solo em diferentes umidades. ....	106

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Equações de ajuste para curva de retenção de água no solo. ....	55
Quadro 2 - Métodos de determinação da sucção no solo. ....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
- AIC – Critério de Informação de Akaike (*Akaike Information Criterion*)
- ASTM – Sociedade Americana para Testes e Materiais (*American Society for Testing and Materials*)
- CCL – Compacted Clay Liner
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- COT – Carbono Orgânico Total
- CTC – Capacidade de Troca Catiônica
- DEINFRA – Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
- DRX – Difração de Raios-X
- EDX – Fluorescência de Raios-X
- EI – Índice de Expansão (*Expansion Index*)
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EPAMIG – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
- ETA – Estação de Tratamento de Água
- ETE – Estação de Tratamento de Esgoto
- ET – Camadas Evapotranspirativas
- FDR – Reflectometria no Domínio da Frequência
- FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais
- GAE – Ponto de Entrada Generalizada de Ar
- GC – Grau de Compactação
- GCL – Geosynthetic Clay Liner
- GGA – Grupo de Geotecnia Ambiental
- GM – Geomembranas
- IN – Instrução Normativa
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- INSA – Instituto Nacional do Semiárido
- IP – Índice de Plasticidade
- k – Coeficiente de permeabilidade à água
- kPa - Quilopascal
- LGA – Laboratório de Geotecnia Ambiental

LL – Limite de Liquidez  
LP – Limite de Plasticidade  
Ltda – Limitada  
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo  
MPa – Megapascal  
MOS – Matéria Orgânica do Solo  
NBR – Norma Brasileira  
PaqTecPB – Fundação Parque Tecnológico da Paraíba  
PB – Paraíba  
PEAD – Polietileno de Alta Densidade  
PET – Politereftalato de Etileno  
pH – Potencial Hidrogeniônico  
PVC – Policloreto de Vinila  
RCC – Resíduo da Construção Civil  
RECESA – Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental  
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos  
S – Grau de saturação  
 $S_{Res}$  – Grau de saturação residual  
SQR – Soma dos Quadrados dos Resíduos  
SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos  
SV – Sólidos Voláteis  
TDR – Reflectometria no Domínio do Tempo  
UEPB – Universidade Estadual da Paraíba  
UFMG – Universidade Federal de Campina Grande  
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco  
USEPA – United States Environmental Protection Agency  
 $R^2$  - Coeficiente de determinação  
w – Umidade gravimétrica do solo  
 $w_{ótima}$  – Umidade ótima  
 $w_{pf}$  – Umidade do papel filtro  
 $\sigma$  – Tensão total  
 $\sigma'$  – Tensão efetiva  
 $\mu$  – Poropressão ou Tensão neutra  
 $\mu_a$  – Pressão de ar nos poros  
 $\mu_w$  – Pressão na água dos poros

$\Phi_{\text{Total}}$  – Potencial total

$\Phi_{\text{Osm}}$  – Potencia osmótico

$\Phi_{\text{Mat}}$  – Potencial matricial

$\Phi_{\text{Grav}}$  – Potencial gravitacional

$\Phi_{\text{Pres}}$  – Potencial de pressão

$\Psi_{\text{Total}}$  – Sucção total

$\Psi_{\text{Matricial}}$  – Sucção matricial

$\Psi_{\text{Osmótica}}$  – Sucção osmótica

$\Psi_{\text{Residual}}$  – Sucção residual

$\theta$  – Umidade volumétrica do solo

$\theta_{\text{Res}}$  – Umidade volumétrica residual

$\theta_{\text{Nor}}$  – Umidade volumétrica normalizada

$\theta_{\text{Sat}}$  – Umidade volumétrica de saturação

$\gamma_w$  – Peso específico da água

$\gamma_d$  – Peso específico seco do solo

$\rho_s$  – Massa específica dos grãos de solo

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	20
1.1.1 Objetivo Geral.....	20
1.1.2 Objetivos Específicos.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1 Sistema de cobertura de aterros sanitários.....	21
2.1.1 Camada Convencional ou Resistiva.....	23
2.1.2 Camada Evapotranspirativa ou Monolítica.....	25
2.1.3 Barreira capilar.....	27
2.1.4 Camada Metanotrófica ou Oxidativa .....	29
2.1.5 Camadas alternativas.....	31
2.2 Monitoramento e controle da camada de cobertura.....	33
2.3 Solos não saturados .....	37
2.3.1 Estado de tensões nos solos não saturados .....	40
2.3.2 Potenciais de água no solo .....	42
2.3.3 Sucção no solo .....	44
2.3.4 Fatores intervenientes na sucção do solo .....	46
2.3.5 Curva de retenção de água no solo.....	49
2.3.5.1 Partes da curva de retenção de água no solo .....	51
2.3.5.2 Ponto de Entrada Generalizada de Ar.....	53
2.3.5.3 Equações para ajuste de curvas de retenção do solo .....	54
2.3.6 Métodos de determinação da sucção.....	58
2.3.6.1 Método do Papel filtro .....	59
2.3.7 Condição não saturada da camada de cobertura de aterros de RSU .....	61
3 METODOLOGIA.....	65
3.1 Descrição do campo experimental.....	66
3.2 Coleta de solo .....	69
3.3 Caracterização do solo.....	70
3.3.1 Caracterização geotécnica.....	70
3.3.2 Caracterização físico-química.....	72
3.3.3 Caracterização mineralógica .....	73
3.4 Sucção no solo .....	74

3.4.1 Ensaio de sucção (Papel Filtro).....	75
3.4.2 Ajuste da curva experimental.....	79
3.4.3 Ensaio de permeabilidade à água com diferentes umidades de compactação .....	79
3.5 Ensaio de índice de expansão do solo .....	80
3.6 Perfil experimental de umidade da camada de cobertura .....	82
3.6.1 Unidade automatizada de medição da umidade do solo .....	82
3.6.2 Calibração dos sensores de umidade.....	84
3.6.3 Perfil de umidade da camada de cobertura experimental em laboratório .....	86
3.7 Dados meteorológicos .....	89
4 RESULTADOS .....	90
4.1 Caracterização do solo.....	90
4.1.1 Caracterização física .....	90
4.1.1.1 Umidade e Peso específico dos grãos de solo .....	90
4.1.1.2 Análise granulométrica.....	91
4.1.1.3 Limites de consistência e Classificação SUCS .....	92
4.1.1.4 Compactação.....	93
4.1.1.5 Permeabilidade a água .....	95
4.1.2 Caracterização físico-química.....	95
4.1.3 Caracterização química e mineralógica .....	97
4.2 Curva de retenção de água no solo .....	99
4.2.1 Análise da sucção no solo .....	100
4.2.2 Ajustes de curva característica .....	103
4.2.3 Intervalo de umidade para compactação da camada de cobertura .....	106
4.3 Índice de expansão do solo.....	107
4.4 Avaliação da variação da umidade do solo em lisímetro .....	111
4.4.1 Curva de calibração dos sensores.....	111
4.4.2 Perfil de umidade .....	112
4.5 Análise dos condicionantes climatológicos .....	115
5 CONCLUSÕES .....	118
5.1 Sugestões para pesquisas futuras .....	119
REFERÊNCIAS .....	121

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre as diversas técnicas utilizadas para o tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), o aterro sanitário figura como uma técnica largamente utilizada nos países em desenvolvimento, devido à facilidade de operação e ao custo relativamente baixo, quando comparados com outras formas de tratamento. Um dos princípios do aterro sanitário é controlar a migração de contaminantes, sejam líquidos ou gasosos, para o meio ambiente por meio de técnicas de impermeabilização de base e cobertura para contenção de resíduos, com a finalidade de evitar a poluição das águas de superfície e subterrâneas, do solo e do ar (ALCÂNTARA, 2007; PECORA et al. 2008; BOSCOV, 2008).

De acordo com Araujo et al. (2014), a impermeabilização de um aterro sanitário pode ser realizada com o uso do solo e materiais sintéticos (geossintéticos), de forma isolada ou conjunta. No entanto, a utilização do solo como material impermeabilizante torna-se economicamente viável, quando comparado aos materiais sintéticos, desde que haja disponibilidade de solo com características adequadas nas proximidades do aterro.

No Brasil, a impermeabilização da cobertura de aterros sanitários tem sido executada em camadas de solo compactado na umidade ótima, principalmente, solos argilosos, uma vez que a principal preocupação é promover uma cobertura com baixa permeabilidade ao fluxo descendente de água pela camada, evitando o acréscimo de umidade à massa de resíduos e; o fluxo ascendente de gases para a atmosfera (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015).

Segundo Catapreta (2008), a camada de cobertura de solo compactado tem a função de isolar os resíduos do meio externo; controlar a entrada de água e ar para dentro do aterro; minimizar a migração para a atmosfera dos gases gerados pela decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos; servir como elemento de redução de odor, vetores de doença e outros inconvenientes; ser componente do sistema de drenagem das águas pluviais e; facilitar a recomposição da paisagem.

Alguns trabalhos analisaram formas de execução da camada de cobertura de aterros sanitários, devido aos fatores climáticos a que estão submetidas, ao comportamento frente aos processos de umedecimento/secagem, quanto ao tipo de resíduo confinado e ao líquido infiltrado em seu interior, além dos tipos de camadas, sejam elas convencionais (SANTOS, 2015; LOPES, 2011), evapotranspirativas (ZHANG & SUN, 2014), com presença de geossintéticos (SUN et al., 2010), como barreira capilar (ZORNBERG, 2010), com a

utilização de lodos provenientes de estações de tratamento de lixiviado (BIZARRETA & DE CAMPOS, 2011) e com Resíduos da Construção Civil (RCC) em sua composição (CATAPRETA & SIMÕES, 2011).

As atuais normas brasileiras não estabelecem o tipo de solo a ser utilizado nem técnicas de execução de camadas de coberturas de aterros, possuindo como única exigência o atendimento de um coeficiente mínimo de permeabilidade à água da ordem de  $10^{-8}$  m/s. A NBR 13896 (ABNT, 1997), referente à apresentação de projeto de aterros sanitários, e a NBR 15849 (ABNT, 2010) que trata dos critérios de projeto, execução e implantação de aterros, deixa em aberto às orientações práticas para operação e cuidados com a camada de cobertura. No entanto, usam-se os manuais e guias fornecidos pela Agência de Proteção Ambiental Americana (*United States Environmental Protection Agency* – USEPA) e as legislações e diretrizes europeias para complementar alguns procedimentos práticos relacionados à camada de cobertura.

Diante disso, existe a necessidade de avaliar e propor outras características do solo a serem verificadas, além da permeabilidade à água preconizada nas normas, como entender o comportamento do solo frente aos processos de umedecimento/secagem e expansão/contração, a capacidade de retenção de água no solo e o fluxo de líquidos para o interior das células do aterro, de forma que melhore a eficiência da camada de cobertura de solo compactado e direcione a operação de aterros sanitários que estão em fase de projeto, implantação e execução. Assim como, deve-se realizar o monitoramento periódico da camada para verificação de pontos de erosão, trincas e fissuras, ocasionadas pelas intempéries, variações de temperaturas e deformações do maciço sanitário.

Sendo assim, essa pesquisa busca analisar as condições de desempenho do solo utilizado nos sistemas de cobertura de aterros sanitários no Brasil de forma que esse sistema de impermeabilização minimize a infiltração de água para o interior do aterro, não influencie nos processos biodegradativos dos resíduos, promova a diminuição da geração do lixiviado, reduza a poropressão de água no interior das células do aterro e, conseqüente, desestabilização do maciço.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Analisar o desempenho do solo compactado utilizado na camada de cobertura final executada em um aterro sanitário.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Realizar a caracterização geotécnica, físico-química e mineralógica do solo utilizado como camada de cobertura do Aterro Sanitário de Campina Grande/PB a fim de verificar a sua possibilidade de utilização.
- Mensurar a permeabilidade à água na camada de cobertura de solo compactado através de ensaios *in situ* e em laboratório.
- Verificar a umidade referente ao ponto de entrada generalizada de ar, encontrado na curva de retenção de água no solo, e compará-la com a umidade ótima da curva de compactação.
- Avaliar a utilização da técnica de aferição de umidade do solo por meio de sensores capacitivos instalados num perfil experimental de camada de cobertura.

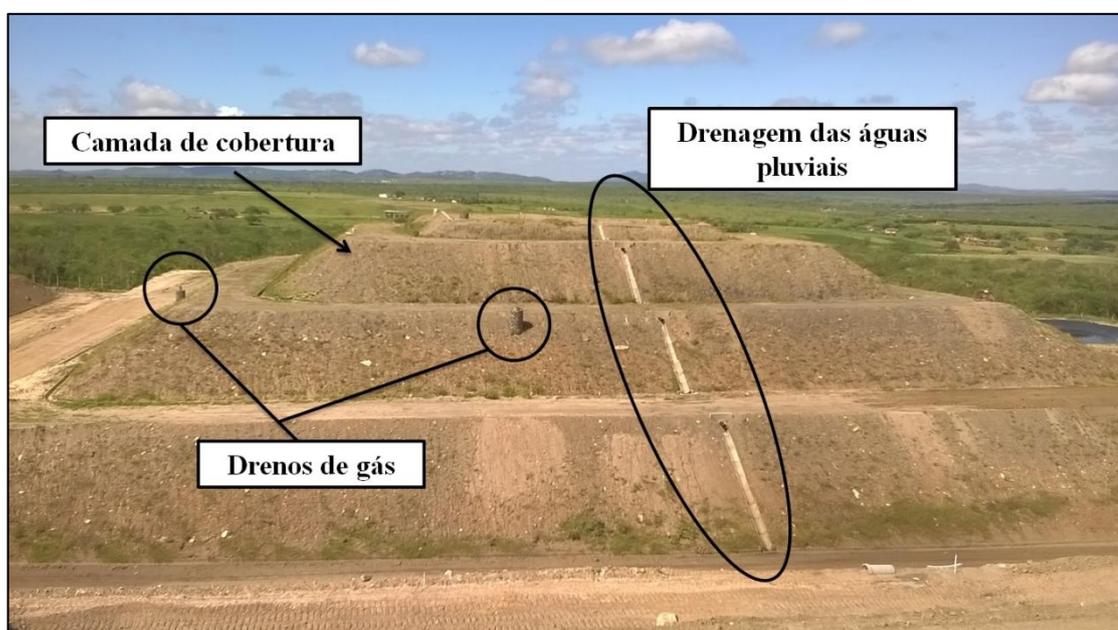
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguinte fundamentação teórica proporcionará a melhor compreensão dos temas estudados neste trabalho e que foi estruturada no decorrer da pesquisa. São apresentados tópicos de interesse à questão do desempenho das camadas de cobertura de solo compactado utilizadas em aterros sanitários, frente às análises de suas características geotécnicas, da sua condição não saturada, da variação de umidade ao longo da camada de solo compactado e da utilização de sistema automatizado de aquisição de dados com o uso de sensores capacitivos.

### 2.1 Sistema de cobertura de aterros sanitários

O sistema de cobertura final dos resíduos de aterros sanitários funciona como uma barreira física com a finalidade de confinar os RSU isolando-os do meio externo (Figura 1). Denominado de *liner*, esse sistema consiste numa barreira de baixa permeabilidade, constituída de elementos com baixa condutividade hidráulica para reduzir a taxa de infiltração para o interior do maciço sanitário (LODI et al., 2009).

Figura 1 - Camada de cobertura e elementos constituintes das células do aterro sanitário.



Para minimizar a entrada das águas precipitadas para o interior das células de resíduos, utiliza-se uma cobertura final que emprega uma barreira resistiva que pode consistir em uma camada de solo argiloso compactado sobre uma camada de granular ou materiais

geossintéticos (por exemplo, polietileno de alta densidade - PEAD), promovendo o escoamento das águas superficiais e o controle da entrada e saída de gases (BARNSWELL & DWYER, 2011; USEPA, 1993).

Segundo a USEPA (2011), há uma série de razões para executar a camada de cobertura final, seja para controlar a umidade e percolação dos resíduos, gerir o escoamento superficial das águas pluviais, minimizar a erosão, evitar a exposição direta dos resíduos, controlar as emissões de gases e odores para atmosfera, prevenir a ocorrência de vetores de doenças e outras perturbações à saúde pública, bem como fornecer uma estética para outros fins de utilização final.

Devido ao seu efeito impermeabilizante, a camada de cobertura minimiza a entrada de água da chuva e provoca a redução da produção de lixiviado, no interior do aterro. O lixiviado corresponde ao produto da decomposição dos resíduos orgânicos no interior das células do aterro sanitário com contribuições da infiltração da água da chuva e da umidade dos resíduos. Além da redução da entrada de água para o interior do maciço a camada de cobertura tem a função de minimizar as emissões dos gases gerados para a atmosfera. Pecora et al. (2008), afirmam que, os gases gerados, denominado biogás, é formado a partir da degradação anaeróbia de resíduos orgânicos e composto por uma mistura de gases e amins voláteis.

Dessa forma a camada de cobertura executada com um solo que apresente parâmetros geotécnicos em conformidade com as normas e regulamentações ambientais de impermeabilização de aterros impede que, os gases migrem para atmosfera e ocorra a entrada excessiva das águas pluviais para o interior do maciço sanitário. De acordo com Lopes et al. (2012), os gases e líquidos gerados precisam ser monitorados e tratados e/ou aproveitados, de forma a equacionar problemas de poluição ambiental.

Segundo Yang et al. (2012), o projeto de uma camada de cobertura de solo compactado de aterros sanitários, efetiva e econômica, permanece como um desafio devido a diversidade de variáveis envolvidas como, tipos de solos, espessura da camada, questões climáticas, espécies de plantas para proteção superficial e as características topográficas e de projeto do aterro, bem como, a inexistência de normas e regulamentações de execução.

As normas brasileiras ligadas aos procedimentos em aterros sanitários, NBR 13896 (ABNT, 1997) e NBR 15849 (ABNT, 2010), não especificam o tipo de solo (argiloso, siltoso, arenoso) para utilização como material de camada de cobertura de aterros sanitários, além de não determinar uma espessura mínima e metodologia de execução a ser seguida. Essas

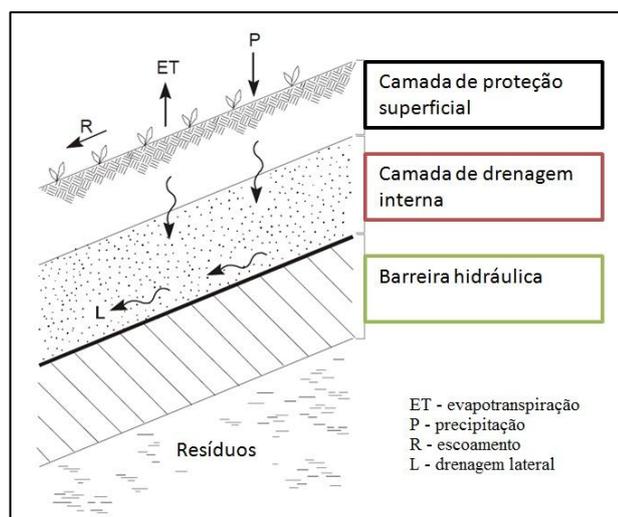
regulamentações preconizam apenas o coeficiente mínimo de permeabilidade a água não superior a  $10^{-8}$  m/s como parâmetro a ser obedecido para seleção do material de cobertura.

Diante disso, percebe-se a necessidade do monitoramento periódico da camada de cobertura, uma vez que não possuem regulamentações específicas a serem observadas e está sujeita a diversas solicitações externas, sejam provocadas pelas intempéries, variações da temperatura e tempo, além dos recalques (totais e diferenciais) da massa de resíduos.

### 2.1.1 Camada Convencional ou Resistiva

A camada de cobertura convencional ou resistiva, também conhecida por barreira hidráulica, consiste numa barreira física que pode ser executada com solo argiloso (*compacted clay liner – CCL*) compactado na umidade ótima e na massa específica aparente seca máxima, geocomposto argiloso (*geosynthetic clay liner – GCL*), geomembranas (GM), ou executada numa combinação desses materiais (Figura 2). Essa camada é confeccionada diretamente sobre os RSU com um solo de baixa permeabilidade a água podendo ser intercalada por geossintéticos (HUSE, 2007; COSTA, 2015).

Figura 2 - Tipo de sistema de cobertura convencional.



Fonte: Adaptado de USEPA (2004).

A camada de cobertura de argila compactada (CCL) é confeccionada a partir de solos com predominância de argilominerais em sua composição, embora também possa conter materiais processados, como a bentonita. O solo utilizado deve apresentar Índice de Plasticidade (IP) entre 7 a 15%, ou seja, possuam a capacidade de moldagem e acomodação

diferencial das partículas, além de resistentes ao craqueamento ocasionado pelas variações de umidade. Possui permeabilidade à água recomendada não superior a  $10^{-9}$  m/s e espessura superior quando comparada as camadas GCL e GM (USEPA, 2004).

Constituída por uma camada de bentonita sódica (Na) e suportada por uma ou duas camadas de geossintéticos, o sistema de cobertura GCL é um produto fino confeccionado em fábrica apresentando baixa condutividade hidráulica saturada (menor que  $10^{-11}$  m/s). Com capacidade de preservação da umidade quando expostas a variações de temperatura e fácil instalação, sua delgada espessura compromete a sua eficiência, visto que não podem ser instaladas sobre maciços sanitários que apresentem elevadas deformações e bruscas mudanças de topografia, bem como estejam sujeitas a tensões concentradas em sua superfície (USEPA, 2004).

As geomembranas (GM) são materiais poliméricos amplamente utilizados como barreiras hidráulicas em sistemas de cobertura de aterro sanitário devido à sua estrutura não porosa, flexibilidade (capacidade de esticar e deformar sem rasgar), facilidade de instalação e baixas permeabilidades à água e ao gás. No entanto, alguns tipos de geomembranas não possuem meios de aderência com outros materiais, como exemplo as camadas CCL, apresentando potencial risco de deslizamento por toda a superfície compartilhada dos materiais. Podem ser dos tipos polietileno de alta densidade (HDPE – *high-density polyethylene*), policloreto de vinila (PVC – *polyvinyl chloride*), polipropileno flexível (fPP – *flexible polypropylene*) e o polipropileno flexível reforçado (fPP-R – *flexible polypropylene reinforced*), (USEPA, 2004).

As argilas são materiais essenciais para redução da condutividade hidráulica dos revestimentos superiores de aterros sanitários, uma vez que, aquelas de média e alta plasticidade possuem a capacidade de reter uma quantidade de água, por vezes, maior que seu próprio peso (HAMDI & SRASRA, 2013). A capacidade de retenção de água pelas argilas está intimamente ligada à composição mineralógica, influenciando diretamente na permeabilidade à água da camada de cobertura. Isso pode ser observado em solos com predominância do argilomineral montmorilonita, que possuem a característica hidrofílica, ou seja, afinidade atrativa com as moléculas de água, que provoca expansão nesses materiais e redução dos espaços vazios para circulação da água livre.

Existem vários métodos e projetos de construção da camada de cobertura, sendo a utilização de solos argilosos compactados, com baixa condutividade hidráulica, o método mais empregado (HUSE, 2007). No entanto, a utilização de camadas resistivas para cobertura

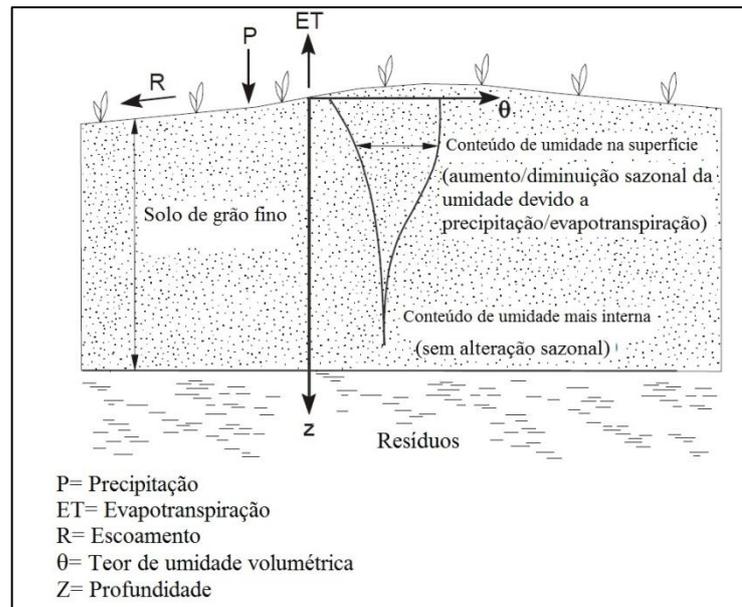
dos resíduos apresenta algumas limitações para aplicação, como exemplo a perda d'água do solo, decorrente do ressecamento da camada provocado pela evaporação da água presente na superfície do solo. Desse modo, a utilização de uma camada de cobertura apenas com argila compactada não é indicada em locais de climas áridos ou semiáridos, pois esse sistema sofre modificações físicas significativas que afetam a sua eficiência, devido estar exposto a consideráveis variações de temperatura (ZORNBERG et al., 2003; USEPA, 2004; SOARES, 2011).

Lu et al. (2015) afirmam que, sob os efeitos internos e externos do ambiente, ocorrem sempre a fissuração do sistema de cobertura de argila compactada, o que proporciona a formação de caminhos preferenciais (trincas e fissuras) de infiltração da água da chuva para o interior do maciço sanitário e saída do gás para a atmosfera. Deve-se, portanto, proporcionar condições para proteção dessa camada, como a utilização de uma vegetação rasteira ou compostos capazes de reter água, fazendo com que se reduza a perda d'água para o ambiente e promova a máxima eficiência da camada.

### **2.1.2 Camada Evapotranspirativa ou Monolítica**

As camadas evapotranspirativas (ET) ou monolíticas, normalmente consistem numa espessa camada de solo de textura fina (areias finas, siltes e siltes argilosos) com capacidade de armazenamento da água e que atua como suporte da vegetação (USEPA, 2004), Figura 3. Baseia-se no princípio do balanço hídrico de que a percolação para o interior do maciço sanitário pode ser minimizada armazenando água na cobertura durante os períodos chuvosos e removida por evapotranspiração através da vegetação ou evaporada da superfície do solo (SUN et al., 2010; ZHANG & SUN, 2014).

Figura 3 - Esquema da camada evapotranspirativa e representação da umidade ao longo da profundidade.



Fonte: Adaptado de USEPA (2004).

Para Zornberg et al. (2003), as coberturas evapotranspirativas funcionam como uma esponja ou reservatório que armazena umidade durante eventos de precipitação, e então libera de volta para a atmosfera como evapotranspiração, em momentos de estiagem. Os processos evaporativos acontecem, pois o potencial total da água na atmosfera, em geral, é muito menor do que no solo, gerando um gradiente de potencial que provoca o fluxo no sentido solo-atmosfera e obedece a Lei de Darcy nas camadas superficiais do solo (MATEUS & BARBOSA, 2007). Cada material constituinte das camadas evapotranspirativas, seja o solo ou a vegetação, possui funções específicas para promover a eficiência e a durabilidade do sistema.

Os solos mais usados nessa camada são os siltes e argilas de baixa plasticidade, pois são capazes de armazenar água ao mesmo tempo em que minimizam a ocorrência de potenciais rachaduras e trincas devido ao ressecamento do solo (ZORNBERG et al., 2003). A vegetação da cobertura possui a função de redução da água que chega ao solo, pela interceptação, e alteração da distribuição do tamanho das gotas da chuva afetando, portanto, a sua energia cinética (SILVA et al., 2005).

Segundo Costa (2015), nos projetos dessas camadas, quanto maior a capacidade de armazenamento do solo e suas propriedades evapotranspirativas, menor o potencial de percolação através do sistema de cobertura. A redução da entrada de água para o interior do maciço sanitário fará com que sejam minimizadas as interferências na degradação dos

resíduos, diminua a produção de lixiviado e dos efeitos da poropressão da água atuantes na estabilidade dos resíduos.

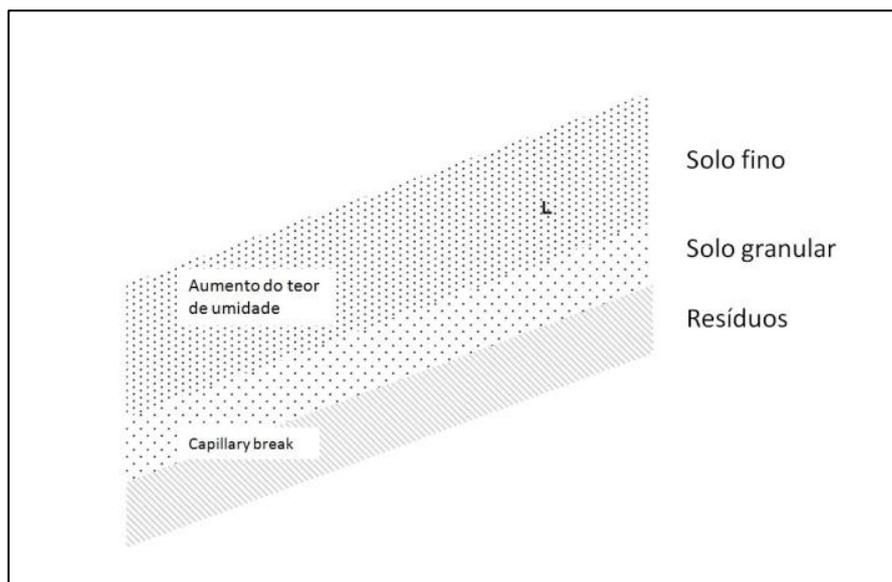
As avaliações para determinar a adequação do local e a espessura de projeto para uma cobertura de ET são tipicamente baseadas nas condições climáticas do local, nas características do solo e no tipo de vegetação de cobertura (McGUIRE et al., 2006). Seu dimensionamento correto impedirá que a capacidade de armazenamento do solo seja excedida e a evapotranspiração da vegetação seja insuficiente para a conservação do sistema.

A USEPA (2004) recomenda sua utilização em regiões áridas e semiáridas, pois são áreas com baixo volume de precipitação e elevados percentuais de evaporação, possuindo vegetação escassa com predominância de gramíneas. Sua espessura varia tipicamente entre cerca de 0,90 m e mais de 2 m. As barreiras têm frequentemente uma camada de superfície para suportar a vegetação, fornecer proteção contra a erosão e controle da infiltração.

### **2.1.3 Barreira capilar**

O sistema de cobertura do tipo barreira capilar consiste basicamente numa camada de solo fino (argila ou silte-argiloso) que se sobrepõe a uma camada de solo granular (areia ou cascalho) (KHIRE et al., 2000; COSTA, C., 2015), Figura 4. As barreiras capilares possuem como funções básicas a redução da entrada da água que atinge os resíduos confinados, reduzindo a lixiviação de material e o aumento da produção de lixiviado, além de reduzir a entrada do oxigênio da atmosfera, que pode reagir quando em contato com alguns resíduos, aumentando a produção de contaminantes (NICHOLSON et al., 1989; KAMPF & VON DER HUDE, 1995; BLIGHT, 1997; CABRAL et al., 1999; VIEIRA, 2005).

Figura 4 - Esquema de uma barreira capilar.



Fonte: Adaptado de USEPA (2004).

A camada de solo fino (camada capilar), chamada de camada de armazenamento e retenção por ação das forças capilares, possui alto grau de saturação e baixa permeabilidade a água, já a camada de solo granular funciona com uma descontinuidade hidráulica ou sistema de ruptura capilar (*capillary break*) na interface das camadas, o qual permite à camada de solo fino reter mais água que o sistema de cobertura monolítica de igual espessura (MORRIS & STORMONT, 1999; USEPA, 2004; ALMEIDA, 2011; COSTA, 2015; ARAÚJO, 2016). A ruptura capilar que ocorre na interface das camadas é ocasionada pela mudança brusca entre poros pequenos na camada capilar e mais largos na de ruptura, resultando no efeito final que é a não passagem de líquidos para as camadas subjacentes, situação que só pode ser vencida caso haja uma coluna de água suficiente para superar a força capilar (McCARTNEY & ZORNBERG, 2010; IZZO et al., 2013).

Segundo Araújo (2016) as camadas de cobertura do tipo barreira capilar devem ser projetadas de maneira a assegurar certo controle do fluxo de água e/ou ar para o interior do aterro. Dessa forma, executa-se esse tipo de sistema de cobertura com certa inclinação para que, a água ao infiltrar pela camada capilar seja drenada lateralmente em direção aos coletores de águas pluviais e não atinja os resíduos confinados.

O funcionamento da barreira capilar é garantido desde que as duas camadas estejam na condição não saturada, pois sob esta condição, o solo granular abaixo do solo fino apresenta baixa umidade volumétrica e, conseqüentemente, baixa condutividade hidráulica não saturada que limita o movimento de fluxo de água descendente da camada de solo fino (ALMEIDA,

2011; SOARES, 2011). A condição não saturada favorece sua utilização em regiões de clima árido ou semiárido, uma vez que, a camada sofre perdas constantes de água pelos mecanismos de evaporação e transpiração da vegetação devido à intensa radiação solar. Santos (2015), afirma que, a utilização desse sistema de cobertura em regiões com grande intensidade pluviométrica, não seria adequado, pois a camada capilar ao ser totalmente saturada pode elevar a taxa de infiltração da água para o interior da massa de resíduos.

A camada granular presente nesse sistema, além de atribuir a descontinuidade a barreira capilar, serve como uma barreira a biointrusão (crescimento de raízes e presença de animais) ou, possivelmente, como uma camada coletora de gases (USEPA, 2004). A característica de barreira a biointrusão está relacionada com a capacidade que a camada granular tem de não permitir que as raízes das plantas se desenvolvam pela camada, pois com sua função drenante e ao baixo conteúdo de água, essas estruturas não crescem em solos com teores de água abaixo do ponto de murcha. Com relação à função coletora de gases, a camada granular da barreira capilar pode potencialmente ser utilizada para coleta e a transmissão dos gases gerados no interior do maciço sanitário.

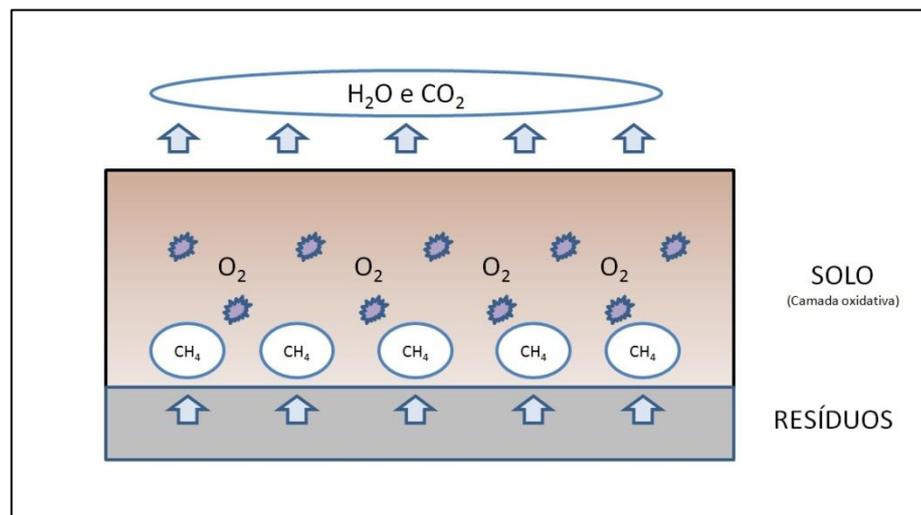
As barreiras capilares utilizadas na cobertura de aterros sanitários de RSU podem ser do tipo simples (solo fino e solo granular), ou pode ser estruturada em múltiplas camadas de solo. Na situação de múltiplas camadas executa-se o tipo simples e sobre este é colocada uma camada de solo granular e/ou fino. O sistema múltiplo apresenta alguns fatores a serem considerados em seu dimensionamento como, a proteção contra animais, a erosão, o gelo e o degelo, a diminuição do efeito de ressecamento da camada, entre outros (KHIRE, 2000; VIEIRA, 2005), além disso, a camada de material granular exerce função dupla de ruptura capilar. Na época de seca ela impede que a água armazenada na camada de material fino migre por capilaridade para a camada de material granular e, na época de chuva, funciona como um dreno, conduzindo lateralmente a água que infiltra na cobertura, prevenindo a saturação da camada de material fino (SOARES, 2011).

#### **2.1.4 Camada Metanotrófica ou Oxidativa**

A camada de cobertura metanotrófica tem como característica a utilização de materiais, geralmente produtos orgânicos, que criam condições ótimas para o desenvolvimento de microrganismos que oxidam o gás metano ( $\text{CH}_4$ ) (HUBER-HUMER et

al., 2009). O processo de oxidação ocorre na camada de cobertura do aterro sanitário, meio propício para ocorrência do processo, que apresenta uma permeabilidade ao gás gerado no interior do maciço sanitário. A oxidação biológica do metano é um processo natural mediado pela ação microbiana na presença de metano e oxigênio, onde ocorre o consumo pelas bactérias metanotróficas do metano, que se converte em água, dióxido de carbono, biomassa e calor (TEIXEIRA et al., 2007), Figura 5.

Figura 5 - Esquema da camada de cobertura metanotrófica.



A oxidação do metano em um perfil de solo concentra-se na maioria dos casos na região entre 10 e 30 cm de espessura, a partir da superfície, conhecida como horizonte de oxidação de metano. Nesse horizonte deve haver condições adequadas, de maneira que os organismos metanotróficos possam se desenvolver satisfatoriamente. O crescimento de bactérias metanotróficas é limitado pela disponibilidade de carbono (C), nitrogênio(N), fósforo(P) e enxofre(S) em alguns casos raros. Além disso, existe uma dependência clara da oxidação de metano quanto à relação C/N (BAHR et al., 2006). Essa camada, conhecida por biocobertura ou biorreativa, utiliza bactérias metanotróficas classificadas em dois tipos, o tipo I, pertence à classe *Alfaproteobacteria*, e o tipo II, *Gammaproteobacteria* (SCHEUTZ et al., 2009).

A aplicação de camadas de filtros de oxidação de metano representa uma alternativa de baixo custo para o tratamento difuso de emissões decorrentes de metano em aterros (BAHR et al., 2006). Conforme estudos de Santos (2015), alguns materiais vêm sendo testados tanto em laboratório quanto em campo, com a finalidade de reduzir as emissões de CH<sub>4</sub>, tais como, composto orgânico (produtos resultantes da compostagem), produtos similares proveniente de tratamento mecânico biológico de resíduos (MBT), apara de

madeira, palha ou casca de fruta e materiais inorgânicos, cinzas, areias e solos, como também misturas de materiais orgânicos e inertes.

Vários fatores podem influenciar o potencial de oxidação destas camadas, tais como pressão atmosférica, quantidade de oxigênio disponível, umidade, pH do solo (entre 4 e 9), porosidade, teor de matéria orgânica, espessura da camada, condições climáticas, temperatura (entre 10°C e 40°C), concentração de metano na camada, fluxo de metano, o grau de compactação na camada de cobertura e as concentrações de substâncias inibidoras (BERGER et al., 2005; ROSE, 2009).

O desenvolvimento de pesquisas utilizando as camadas metanotróficas está apoiado no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), ancorado no Protocolo de Kyoto de 1998, denominado de “Mecanismo de Flexibilização”. A ideia central é direcionar investigações de projetos que encontrem formas de redução de emissões de metano para a atmosfera, uma vez que, este gás contribui para o fenômeno do efeito estufa (BAHR et al., 2006).

### **2.1.5 Camadas alternativas**

Além dos tipos convencionais de camadas de cobertura de solo compactado exemplificados anteriormente, existem ainda aqueles que se utilizam da adição de materiais à sua composição como forma de melhorar alguns aspectos do seu comportamento (redução da formação de fissuras e trincas), bem como pelo desenvolvimento de estudos do reaproveitamento de materiais geralmente descartados na natureza. Pode-se dizer que, a introdução de materiais alternativos em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos está ligada a indisponibilidade de jazidas de solo que apresentem os requisitos mínimos listados nas legislações nacionais e internacionais, assim como, pelo elevado custo de transporte e aquisição de determinados materiais.

Como exemplo pode ser citado o trabalho de Castilhos Jr. et al. (2011), que utilizaram o lodo de ETA (Estação de Tratamento de Água) de ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) de Jurerê Internacional (Florianópolis-SC), como material alternativo para compor a camada de cobertura de aterros sanitários. Os lodos utilizados foram inicialmente caracterizados, para se conhecer suas propriedades físico-químicas e bacteriológicas. Posteriormente o lodo de ETA e ETE misturados numa proporção de 1:1 foram estabilizados com 15% de cal virgem (CaO). Numa segunda etapa foi misturado com solo argiloso também na mesma proporção e

as características geotécnicas desta mistura foram comparadas com as do solo natural e com valores recomendados na literatura. Os resultados indicaram que a nova composição de camada de cobertura possui potencial de utilização como sistema de proteção superficial de aterros.

Gomes et al. (2007) testaram areia usada de fundição (areia verde de processos de moldagem para fabricação de ferro fundido) e Resíduo da Construção Civil (RCC), com a intenção de analisar o desempenho destes como material de cobertura intermediária e final de aterros de resíduos sólidos no município de Portão-RS. Os resultados indicam que o RCC, é o mais adequado para o uso como camada intermediária, e o resíduo areia de fundição apresentou maior potencial de utilização como camada de cobertura final.

O uso do RCC misturado com solo em camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos foi estudado por Pascoal & Mesquita (2014) quanto a sua viabilidade técnica. Analisaram-se por meio de ensaios físicos e estruturais, amostras de solo e misturas de solo e RCC, nas proporções de 10%, 20% e 30% de RCC em massa. O objetivo dos ensaios foi determinar os parâmetros de misturas entre o solo do aterro sanitário e RCC com melhores propriedades físicas a ser implantado na confecção de *liners* de cobertura na região de Samambaia-DF. Chegou-se numa proporção ótima de 30% de RCC em massa de solo obtendo características de redução da retração do solo.

Huse (2007) apresenta análises realizadas no solo usado como camada de cobertura no aterro de Nova Iguaçu-RJ, considerando o uso de bentonita sódica adicionada ao solo. Para a realização dos ensaios neste trabalho, adicionou-se bentonita ao solo da Central de Tratamento de Nova Iguaçu, a fim de que o valor da condutividade hidráulica atendesse as recomendações mínimas de modo a poder ser utilizada como camada de cobertura. Este valor foi obtido a partir da adição de porcentagens de bentonita superiores a 4% em peso seco. Tal porcentagem conferiu ao solo valores de permeabilidade a água de acordo com as normas nacionais e internacionais. Além do ganho em relação à condutividade hidráulica, observou-se a melhora do comportamento plástico do solo em estudo, bem como não foram observadas trincas em qualquer corpo-de-prova moldado, mesmo variando-se a porcentagem de bentonita adicionada ao solo em 5% e 10%.

Costa et al. (2015), avaliaram o comportamento de misturas de solo com incorporação de fibras de Politereftalato de Etileno (PET), Samambaia-DF, produzidas a partir de garrafas de refrigerantes usadas, visando diminuir o efeito de retração e da formação de fissuras em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. Para avaliação do efeito da inclusão das

fibras, foram realizados ensaios hidráulicos e mecânicos para definição do percentual de adição de fibra a ser utilizado nos ensaios de ressecamento. Os resultados obtidos mostraram que o comportamento quanto ao ressecamento e à formação de fissuras foi significativamente afetado pelos ciclos de umedecimento e secagem e pela adição das fibras, alterando o padrão de fissuração, retardando a formação de fissuras e reduzindo o fator de intensidade de fissuração, quando comparado ao solo natural.

## **2.2 Monitoramento e controle da camada de cobertura**

Para avaliação da integridade e desempenho do sistema de cobertura final de aterros sanitários de RSU elabora-se um plano de monitoramento geotécnico da camada de cobertura que consiste em inspeções visuais regulares, para verificação de pontos de erosão, indícios de fissuras e rachaduras, vazamentos e afloramentos de lixiviado, ou qualquer sinal do movimento da massa de resíduos aterrados; além da realização de ensaios no solo para medição das emissões de gases pela camada de cobertura executada e da permeabilidade a água pela camada de cobertura de solo compactado. A avaliação visual dos atributos físicos da camada de cobertura permite identificar os pontos danificados e elaborar um plano de medidas corretivas e de recuperação, orientando os trabalhos de conservação e manutenção.

Para RECESA (2008), a camada final deve possuir alguns atributos de um sistema impermeabilizante como, estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica, resistência a intempéries e compatibilidade físico-química-biológica com os resíduos aterrados. Diante desses pontos, o monitoramento do sistema final de cobertura se faz necessário e o entendimento do comportamento geotécnico do solo, *in situ* e em laboratório, possibilitam a eficiência e a segurança desejada ao projeto de sistemas de cobertura.

Dentre os elementos monitorados na camada de cobertura estão, o controle tecnológico dos materiais geotécnicos com a realização de ensaios laboratoriais, a verificação *in situ* da permeabilidade a água e da compactação da camada de cobertura, identificação dos pontos danificados pela ação dos agentes da intempérie, desempenho do sistema de drenagem de águas pluviais, obtenção da curva de retenção de água no solo, a medição da espessura da camada de solo compactado executada e a aferição das emissões de gases pelo sistema de cobertura final.

O controle geotécnico do solo baseia-se na realização de ensaios de caracterização em laboratório, que contemplam os ensaios de umidade, limites de consistência, granulometria,

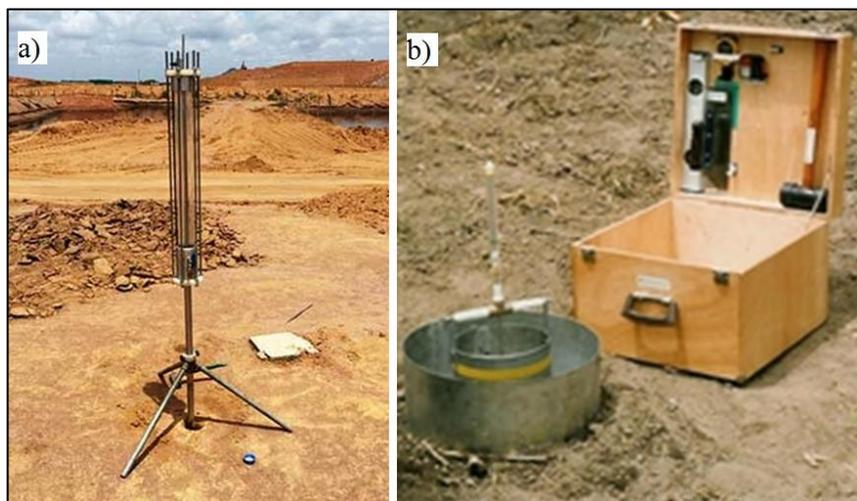
compactação, permeabilidade à água e ao ar, entre outros, que seguem as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para solos. Esses ensaios devem ser realizados antes da utilização na cobertura do solo escolhido para verificação de sua adequabilidade para uso em aterros sanitários segundo as regulamentações nacionais e internacionais, Tabela 1. No entanto, as normas brasileiras vigentes regulamentam apenas o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) mínimo a ser atendido,  $10^{-8}$  m/s, não fazendo menção à exigência de tipo de solo, características geotécnicas, espessura e manutenção ao longo do tempo (MARIANO, 2008).

Tabela 1 - Características geotécnicas do solo para utilização em aterros sanitários.

Norma reguladora	Permeabilidade a água (m/s)	Limites de consistência	Porcentagem de finos (%)	Espessura (m)	Classificação (SUCS)
CETESB (1993)	-	IP $\geq$ 15% LL $\geq$ 30%	>30%	-	CL,CH,SC e OH
Norma alemã (1993)	$5 \times 10^{-10}$	-	-	>0,50	-
ABNT (1997)	$10^{-8}$	-	-	-	-
USEPA (2004)	$10^{-9}$	IP: 7 – 15%	30 – 50%	0,30 – 0,60	-
FEAM (2006)	-	-	-	0,20 – 0,60	-

Para determinação da permeabilidade *in situ* em aterros sanitários utilizam-se os seguintes métodos: poços e furos de inspeção, Hvorslev, infiltrômetros de anel simples e duplo, câmara de fluxo, perfil instantâneo e o permeâmetro de Guelph (MAHLER & AGUIAR, 2001). Os métodos mais utilizados são o do permeâmetro de Guelph e o Infiltrômetro de anel duplo, Figura 6.

Figura 6 - Permeabilidade *in situ*: a) permeâmetro de Guelph; b) Infiltrômetro de anel duplo.



Fonte: Google imagens (2017).

O método do permeâmetro de Guelph utiliza um furo na camada de cobertura de solo com aplicação de uma carga hidráulica constante que mede a condutividade hidráulica saturada de campo acima do lençol freático (AGUIAR, 2001). Já o Infiltrômetro de anel duplo consiste de dois tubos cilíndricos de diâmetros diferentes que são cravados concentricamente no solo, onde para realização do ensaio, coloca-se água no cilindro interno e entre o cilindro interno e externo medindo-se em intervalos de tempo progressivamente maiores a vazão de equilíbrio da lâmina de água (LISBOA, 2005).

O controle da compactação do solo da camada de cobertura pode ser executado por meio da obtenção da massa específica aparente *in situ* através dos ensaios de Cilindro de cravação – NBR 9813 (ABNT, 2016) e Frasco de areia – NBR 7185 (ABNT, 2016). Com esse controle pode-se calcular o Grau de Compactação (GC) do solo, valor entre 0% e 100%, ou maior que 100%, que quanto maior, diminui a permeabilidade a água, aumenta a resistência do solo (capacidade de suporte), diminui a compressibilidade do solo e a absorção de água. A compactação permite que a camada se torne homogênea e aumente a intimidade de contato entre os grãos, reduzindo assim o índice de vazios, aumentando a massa específica, e com isso, melhorando várias propriedades do solo (FRANCESCHET, 2006).

Não existe um valor de GC que seja exigido para aterros sanitários, no entanto, quanto maior for o seu valor, menor será a infiltração de água para o interior do maciço e menor a emissão de gases para a atmosfera. Utilizando a norma ES-137 (DNIT, 2010), que especifica um  $GC > 100\%$  e  $W_{ótima} \pm 2\%$  para regularização do subleito de pavimentos, pode-se confirmar o atendimento as exigências de diminuição do fluxo de líquidos e gases pela camada de cobertura, uma vez que, o sistema de proteção final dos resíduos não estará sujeito a grandes esforços mecânicos. Mariano (2008) verificou que em camadas de cobertura executadas com  $GC > 90\%$  apresentaram retenção do gás metano ( $CH_4$ ) superiores a 90%, e as maiores emissões foram aferidas em camadas com GC entre 75% e 90%.

A medição das emissões fugitivas de gases pela camada de cobertura pode ser realizada, segundo Maciel (2009), pelas placas de fluxo (estática e dinâmica), medidas por gradientes subsuperficial (tubos de inspeção), métodos de avaliação da pluma de contaminação (dispersão de gases) e termografia em infravermelho. A avaliação das emissões permite determinar a eficiência da camada de cobertura e do sistema de coleta e drenagem dos gases, os quais são fatores fundamentais para otimização da coleta e recuperação energética do biogás. A emissão de gases pela cobertura é influenciada pelo tipo de solo, espessura da camada, umidade/grau de saturação, conteúdo volumétrico de ar, peso

específico/compactação, sucção, temperatura, coeficiente de permeabilidade ao ar, coeficiente de difusão, contração/expansão e fissuras e a mineralogia do solo (MACIEL, 2003).

A umidade do solo da camada de cobertura é outro parâmetro que deve ser verificado durante o período de monitoramento. A perda de água provoca a formação de fissuras e trincas que são caminhos preferenciais de fluxo de água e gás e elevação da permeabilidade ao ar do solo da camada de cobertura, podendo causar até mesmo o colapso do sistema de proteção superficial. Diante disso, torna-se necessário o monitoramento constante das variações de umidade do solo utilizado na cobertura de aterros sanitários.

Dentre os métodos diretos e indiretos de determinação da umidade pode-se destacar o método da Estufa, Álcool, Fogareiro, Speedy, Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), Sensores Capacitivos ou Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR), Sensores Dielétricos, Tensiômetro, Radar, Microondas e Ultrassom (TOPP et al., 1988; PACHECO & DIAS JÚNIOR, 1990; ROBINSON & DEAN, 1993; NADLER & LAPID, 1996; SEYFRIED & MURDOCK, 2004; ANDRADE et al., 2008; SHOCK & WANG, 2011).

A formação de fissuras por ressecamento na superfície do solo ocasionado pela perda de umidade é um fenômeno natural e pode afetar significativamente suas propriedades hidráulicas (COSTA, C., 2015). A água contida nos poros evapora, causando poropressão negativa. Essa pressão negativa aumenta a tensão efetiva ocorrendo conseqüente redução de volume (KLEPPE & OLSON, 1985). A verificação de indícios de fissuras e trincas na camada de cobertura é realizada por inspeção visual regular com medição *in situ* da dimensão e profundidade das aberturas, além da identificação dos pontos de erosão, afundamentos e inchamentos pelo sistema de cobertura.

O potencial de fissuração dos solos pode ser obtido em laboratório de forma simples pelo ensaio de ressecamento livre, resistência a tração do solo, ou por técnicas sofisticadas, com o uso de *software* e tecnologia 2-D e 3-D, como exemplo a técnica de fragmentação de malha (SÁNCHEZ et al., 2014), a realização de ensaios de sucção do solo, a utilização de imagens processadas (MILLER et al., 1998; VOGEL et al., 2005) e por meio de modelos e estudos teóricos. O solo danificado pela perda de água pode ser recuperado com adição de uma porcentagem de bentonita (HUSE, 2007), esse material proporciona a redução da permeabilidade à água do solo, a redução da formação de fissuras e a facilidade de recuperação do solo após o umedecimento, ou com adição de fibras, como exemplo, o PET (Politereftalato de etileno), (COSTA, C., 2015), responsável pela atribuir resistência e rigidez ao solo, além de controlar a abertura e o espaçamento entre as fissuras. Pode-se ainda, utilizar

a cobertura vegetal como forma de facilitar a retenção de água pelo solo, controlar a erosão da camada e possibilitar o escoamento superficial das águas das chuvas.

Além desses métodos, pode-se verificar o avanço da formação e abertura de fissuras e trincas pelo acompanhamento periódico dos deslocamentos verticais e horizontais da célula do aterro que dá indicativos da estabilidade da massa de resíduos aterrados, possibilitando a prevenção de desmoronamentos e elaboração de possíveis planos de reparos. Os deslocamentos podem ser analisados por meio da instrumentação das células com, placas de recalque superficial e em profundidade, marcos topográficos, inclinômetros, entre outros.

Uma forma tradicional de monitorar a camada de cobertura de aterros sanitários é através do balanço hídrico por meio da análise da presença de água no solo, que é a soma das parcelas de água que entram no aterro e a subtração das parcelas que deixam o aterro em um dado período de tempo (HUSE, 2007; SANTOS, 2009). Através do balanço hídrico pode-se inferir sobre quantidade de água retida no interior do solo (capacidade de retenção), o escoamento superficial provocado, a evaporação da água não percolada, bem como o volume de água infiltrado para o interior da célula do aterro sanitário.

### **2.3 Solos não saturados**

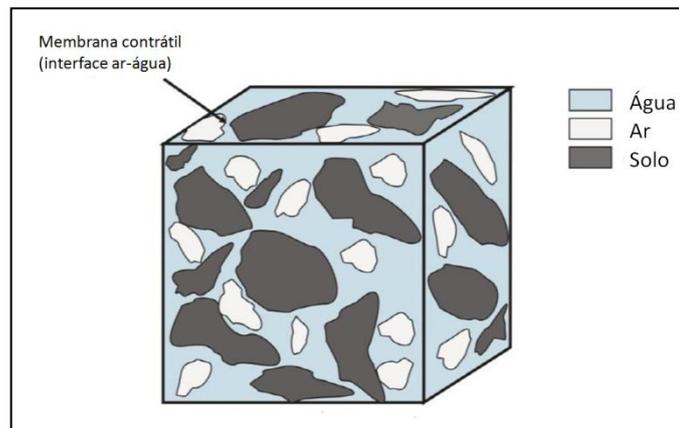
Para Ferreira (2015), os solos em superfície encontram-se na maioria dos casos na condição não saturada, ou seja,  $S < 100\%$ . Tal situação é provocada por alguns fatores como, a proximidade com a superfície do terreno, estando o solo submetido às radiações solares que propiciam a evaporação; os gradientes de carga hidráulica que determinam o regime de fluxo; e a posição do lençol freático, que se encontra em muitos casos, em grandes profundidades.

Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), o clima tem papel fundamental na formação dos solos não saturados. A água presente no solo é removida através de evaporação ou de evapotranspiração da cobertura vegetal. Qualquer solo próximo à superfície está sujeito a um ambiente seco e conseqüentemente sujeito à poropressão negativa de água e à possível dessaturação. De acordo com Almeida et al. (2015), em regiões de climas tropicais, como o Brasil, ocorrem constantemente solos na situação não saturada, principalmente na região denominada de zona ativa, que é um perfil de solo compreendido entre a superfície terrestre e a zona freática. O comportamento mecânico e hidráulico dos solos na condição não saturada depende do grau de saturação em que se encontra no campo. O grau de saturação do solo está

sujeito a uma gama de variações, ocasionadas, por exemplo, pelas condições climáticas, que produzem alterações nos valores de poropressão resultando em processos de colapso e de expansão no solo (CHAGAS, 2014).

Fredlund & Morgenstern (1977) afirmam que, mesmo o solo sendo tratado como um sistema trifásico existe a atuação de uma quarta fase independente, denominada membrana ou película contrátil, Figura 7. Esta fase corresponde à interface ar-água e exerce uma tensão de tração nos materiais, consequência da atuação das forças intermoleculares no interior da membrana, denominada tensão superficial, comportando-se de maneira elástica (SANTOS, 2009). Quando a fase gasosa encontrar-se na forma contínua, a membrana contrátil interage com as partículas sólidas e influencia no comportamento mecânico do solo.

Figura 7 - Membrana contrátil do solo.



Fonte: Adaptado de Fredlund & Morgenstern (1977).

Em virtude desta tensão, a superfície de contato entre a água contida nos vazios e o solo, apresenta uma curvatura, indicando que a pressão nos dois fluidos não é a mesma. Esta diferença de pressão é denominada de tensão de sucção (SANTOS, 2009). Para Marinho (1997), a sucção é uma pressão isotrópica da água intersticial, ou seja, atua em todas as direções, que faz com que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou reduzindo o grau de saturação. A sucção do solo é uma variável independente da tensão efetiva, representada pela pressão negativa em solos não saturados. A sucção do solo está relacionada com o grau de saturação, gravidade, tamanho e forma de poros, tensão superficial, características químicas, mineralógicas e elétricas das partículas do solo e da água (PAIVA, 2009).

Os solos não saturados possuem uma característica que é a tendência de sofrer variações de volumes quando a umidade é alterada (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015). Se a umidade aumenta pode ocorrer o aumento de volume, típico de solos expansivos,

ou a redução do volume em solos de baixa densidade, caracterizados como colapsíveis. Segundo Paiva (2009), a umidade do solo pode ser alterada devido à infiltração de água no solo pelas chuvas, a modificação do nível freático, a evaporação, a diferença de temperatura e de sucção entre áreas vizinhas e através da retirada de água do solo pelas raízes das plantas.

Solos expansivos são aqueles que apresentam considerável variação volumétrica quando umedecidos. Segundo Ferreira (2011), para que um solo apresente características expansivas devem existir, e entrarem em funcionamento, certos mecanismos que, em nível microscópico, produzam a instabilidade volumétrica do solo; e devem estar presentes, forças capazes de transferirem a umidade de um ponto a outro do solo. Esse tipo de solo possui vários fatores que proporcionam a expansão como, a predominância de argilominerais da família das esmectitas, a influência de fatores ambientais como o clima da região, a natureza do fluido e o grau de saturação do solo (SIMÕES DE OLIVEIRA et al., 2006).

A microestrutura dos solos expansivos é do tipo laminar 2:1, cuja mineralogia é composta por dois tetraedros de silício separados por um octaedro de alumínio, presente na montmorilonita e na vermiculita. De acordo com Ferreira (2011), quando a água entra em contato com estes minerais, existe uma expansão da dupla camada, causada pela repulsão das cargas elétricas de mesmo sinal, existentes nas superfícies das partículas e a molécula da água, fazendo com que o solo aumente de volume. O efeito da expansão se contrapõe quando o solo perde umidade, uma vez que, no processo de secagem ocorre a contração do solo com a formação de fissuras e trincas.

A aferição do grau de expansividade desses solos pode ser verificada por meio de métodos diretos e indiretos. Os métodos indiretos são aqueles que se utilizam dos índices físicos e limites de consistência ou parâmetros ligados à textura de simples obtenção em ensaios de laboratório e campo para indicar a potencialidade de expansão, como exemplo, a Difração de Raios-X (DRX). Os métodos diretos baseiam-se na medida do potencial de expansão do solo avaliado pelos ensaios edométricos, de placa ou com o expansocolapsômetro, como exemplo, a expansão livre (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015).

Segundo Clemence & Finbarr (1981), solos colapsíveis são aqueles que experimentam um rearranjo radial de partículas seguido de uma redução de volume quando inundado com acréscimo ou não de sobrecarga. O mecanismo do colapso explicado por Motta (2006), diz que, enquanto o solo encontra-se seco, os agentes cimentantes, que unem os grãos do solo, exercem forças microcislhantes locais na interface destes gerando uma resistência

que suporta as solicitações. No entanto, quando o solo é umedecido os vínculos não resistem às forças de deformação e a estrutura do solo entra em colapso.

A estrutura é entendida como um agregado de partículas primárias, que são separadas de agregados adjacentes por superfícies de fraca resistência (FERREIRA & SILVA, 2004). Esse tipo de solo possui uma estrutura porosa, conhecida por “colmeia de abelhas”, onde os grãos se mantêm unidos por uma fraca ligação pela ação de agentes cimentantes como, a água de capilaridade, partículas de silte e de argilas dispersas (coloides). Essa característica é encontrada em solos cuja origem está relacionada com sua formação geológica, com os condicionantes climáticos e o relevo, e os processos formadores são a ação do vento (eólica), da água (aluvionares), lixiviação dos sais solúveis, entre outros (SILVA, 2003).

A identificação dos solos colapsíveis pode ser realizada por meio do ensaio edométrico ou de adensamento, simples ou duplo, com inundação por estágios, metodologia de forma direta; ou pela análise obtida pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), método de forma indireta.

### **2.3.1 Estado de tensões nos solos não saturados**

A Mecânica dos Solos Clássica, proposta por Terzaghi, em 1923, e seus contemporâneos, analisa e explica o comportamento do solo pelo Princípio das Tensões Efetivas, aplicada para o estudo dos solos na situação saturada, ou seja, onde todos os vazios são preenchidos por água ( $S= 100\%$ ). O Princípio das Tensões Efetivas afirma que, uma tensão vertical aplicada sobre a superfície de um solo promove a indução de esforços que se propagam pelo esqueleto sólido, sendo transmitida de partícula a partícula, além de uma parcela ser suportada pela água presente nos vazios. As tensões no solo podem ocorrer devido ao peso próprio das massas, a aplicação de esforços externos na superfície do terreno e do alívio de tensões pela remoção de material superficial por meio de escavações (PINTO, 2006).

As tensões geostáticas, provocadas pelo peso próprio da massa de solo, podem ser as tensões efetivas ( $\sigma'$ ), que se referem às tensões atuantes e suportadas pelo esqueleto sólido do solo (grãos); a tensão neutra ou poropressão ( $\mu$ ), que consiste nos esforços desenvolvidos pela água presente nos vazios; e a tensão total ( $\sigma$ ), que consiste na soma algébrica entre as duas parcelas anteriores de tensões. Dessa forma, a tensão efetiva para solos saturados, segundo o

Princípio das Tensões Efetivas de Terzaghi, pode ser calculada conforme a Equação (1), (PINTO, 2006).

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$\sigma'$  = tensão efetiva

$\sigma$  = tensão total

$\mu$  = poropressão ou tensão neutra

No entanto, a partir da análise dos solos na condição não saturada surgiu-se a necessidade de propor equações que explicassem o seu comportamento devido à influência da membrana contrátil no estado de tensões no solo. Segundo Fredlund & Morgenstern (1977), o princípio de Terzaghi torna-se inadequado para os solos não saturados devido ao aparecimento de uma pressão negativa nos vazios do solo (poros), denominada sucção. Diante dessa problemática diversos pesquisadores incluíram na expressão de Terzaghi diferentes parâmetros, de forma que, representasse a influência da sucção no comportamento mecânico dos solos não saturados (DONALD, 1956; CRONEY et al., 1958; BISHOP, 1959; LAMBE, 1960; AITCHISON, 1961; JENNINGS, 1961; RICHARDS, 1966; AITCHISON, 1973). Na expressão mais conhecida, Bishop (1959), o parâmetro inserido está relacionado ao grau de saturação do solo, Equação (2).

$$\sigma' = (\sigma - \mu_a) + \chi(\mu_a - \mu_w) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$\sigma'$  = tensão efetiva

$\sigma$  = tensão total

$\mu_a$  = pressão de ar nos poros

$(\mu_a - \mu_w)$  = sucção matricial

$\chi$  = parâmetro relacionado ao grau de saturação do solo

Pela expressão,  $\sigma'$  corresponde à tensão efetiva do solo;  $\sigma$  refere-se à tensão total;  $\mu_a$  é a pressão do ar nos poros;  $\mu_w$  é a pressão na água dos poros;  $(\mu_a - \mu_w)$  é a sucção matricial, que se refere à parcela de sucção que relaciona a água e as partículas minerais (matriz) do solo; e  $\chi$  é o parâmetro que depende do grau de saturação, variando entre zero para o solo seco e 1 para solo saturado (PAIVA, 2009; MASCARENHAS, 2008).

As expressões para os solos não saturados se distinguem principalmente na forma de quantificação das variações da pressão de ar e da sucção. Além disso, todas tentam expressar o estado de tensão através de uma única variável, como na teoria clássica, ressaltando uma

grande complexidade para determinação dos parâmetros experimentais contidos nas equações (LOPES, 2006).

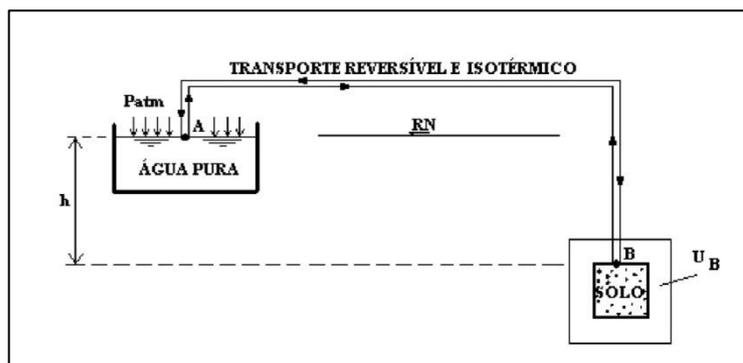
### 2.3.2 Potenciais de água no solo

Quando um meio poroso como o solo inicia um processo de secagem ou drenagem, partindo de um estado inicial de saturação, a água intersticial começa a sofrer processos de interação com a estrutura e com as partículas sólidas do solo que fazem com que a sua energia interna seja diminuída (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015). Esse processo permite a manifestação de tensões de sucção, que é encontrada no solo na condição não saturada, devido ao aparecimento de uma pressão na água do solo inferior a pressão atmosférica (negativa). Segundo Scott (2000), campos de força existem dentro das próprias fases e entre as interfaces delas (sólido-líquido, sólido-gasoso e líquido-gasoso), influenciando fortemente o comportamento da água no solo e também as propriedades físicas do próprio solo.

De acordo com Camapum de Carvalho et al. (2015), a simples separação entre o solo saturado e o não saturado já fornece uma pista sobre a importância que a água desempenha, seja do ponto de vista agrônomo, geotécnico ou mesmo de outras áreas afim. Dessa forma, esse estado de comportamento da água no solo apresenta-se sob várias formas, chamados de potenciais (LEPSCH, 2011), onde seu estado de energia é expresso pela soma da parcela da energia potencial e da energia cinética.

A energia cinética é proporcional ao quadrado da velocidade e geralmente desprezível para o caso da água dentro do solo que se move em velocidades muito pequenas. Já a energia potencial é uma função da condição e da posição da água, sendo de grande importância na caracterização de seu estado de energia. Logo, o potencial total da água ( $\Phi_{\text{Total}}$ ) é uma medida de sua energia potencial (LEPSCH, 2011). A energia disponível para realizar trabalho pode ser descrita em termos de potencial equivalente, chamado de potencial total. De acordo com Calle (2000), o potencial total de água no solo representa o trabalho útil que deve ser realizado em uma quantidade infinitesimal de água pura, para conduzi-la, reversível e isotermicamente, desde um reservatório sob condições padronizadas (Ponto A) até a água no solo, na cota de interesse (Ponto B), Figura 8.

Figura 8 - Potencial Total de Água no Solo.



Fonte: Adaptado de Calle (2000).

O nível de energia da água no solo é afetado por três importantes forças: pela adesão ou atração da água pelos sólidos do solo, que promovem uma força matricial (responsável pela adsorção e capilaridade); pela atração da água aos íons e outros solutos, resultando em forças osmóticas, que tendem a reduzir o estado de energia da água na solução do solo; e pela força da gravidade (SANTOS, 2009). Assim, o movimento da água nos solos ocorrerá a partir do surgimento de um gradiente que direciona o fluxo de água de uma região com maior estado de energia para outra com menor estado de energia (CHAVES, 2006; SANTOS, 2009).

O potencial total de água no solo é composto pelas componentes do potencial osmótico ou de soluto ( $\Phi_{Osm}$ ), o matricial ( $\Phi_{Mat}$ ), o de posição ou gravitacional ( $\Phi_{Grav}$ ) e a de pressão ( $\Phi_{Pres}$ ), Equação (3). Existem outras componentes como o elétrico, o térmico, o magnético, o de submergência, o pneumático, entre outros, porém são descartados por terem menor influência no comportamento geotécnico de solos não saturados. O potencial total pode ser medido em atm (pressão em atmosferas), bar, cmH<sub>2</sub>O e Pa (pascal) e seus múltiplos kPa (quilopascal).

$$\Phi_{Total} = \Phi_{Osm} + \Phi_{Mat} + \Phi_{Grav} + \Phi_{Pres} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$\Phi_{Total}$  = potencial total

$\Phi_{Osm}$  = potencial osmótico

$\Phi_{Mat}$  = potencial matricial

$\Phi_{Grav}$  = potencial gravitacional

$\Phi_{Pres}$  = potencial de pressão

O potencial osmótico reflete a influência da presença de solutos na água do solo. É função da diferença da composição entre a água do solo (presença de sais minerais e substância orgânicas) e a água pura (MENEZES, 2010). O matricial é um potencial de pressão

e resulta do efeito combinado da ação de forças capilares e de adsorção, que surgem devido à interação entre a água e as partículas sólidas que compõem o solo (BARROSO, 2008). Segundo Menezes (2010), o potencial gravitacional traduz a componente de posição, isto é, o fato de que a água no solo esteja em cota diferente da água do reservatório padrão. Existe independente da condição do solo, estando relacionado apenas com o campo gravitacional terrestre, não exercendo nenhuma influência sobre a sucção.

Já o potencial de pressão é medido em relação à condição padrão, tomado como sendo a da água submetida à pressão atmosférica local e, nestas condições, admite-se que o potencial de pressão seja igual a zero. Portanto, este componente só existirá se houver a presença de água livre exercendo carga hidráulica sobre o solo saturado, ou seja, na condição não saturada, o potencial matricial passará a atuar no lugar do potencial de pressão (BARROSO, 2008).

Diante disso, algumas considerações podem ser feitas a fim de simplificar a Equação (3), restando apenas o potencial matricial e o osmótico para representar uma massa de solo na condição não saturado. Segundo Menezes (2010), a interação solo-água pode também ser quantificada a partir da avidéz que um solo não saturado tem por água. Por exemplo, se colocado em contato com um reservatório de água pura livre, o solo absorve água, pelo fato de exercer uma pressão de sucção sobre a água. Assim, pode-se representar a sucção total pela ação de suas componentes de sucção matricial e osmótica.

### 2.3.3 Sucção no solo

Edil & Motan (1979), definem como sucção a energia necessária para remover uma quantidade infinitesimal de água do solo. A sucção pode ser definida, ainda, como uma tensão usada para avaliar a capacidade do solo de reter água, e apresenta-se como sucção total, tendo como componentes a sucção matricial e a sucção osmótica, Equação (4).

$$\Psi_{\text{Total}} = \Psi_{\text{Matricial}} + \Psi_{\text{Osmótica}} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$$\Psi_{\text{Total}} = \text{sucção total}$$

$$\Psi_{\text{Matricial}} = \text{sucção matricial}$$

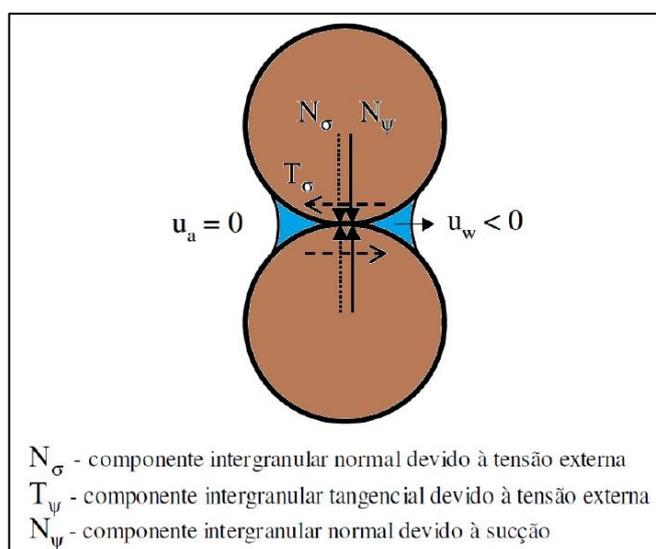
$$\Psi_{\text{Osmótica}} = \text{sucção osmótica}$$

Entende-se por sucção matricial ( $\Psi_{\text{Matricial}}$ ) como a tensão referente às forças de capilaridade e de adsorção que surgem da interação entre a água e as partículas minerais que

constituem o solo, denominada de matriz do solo (HILLEL, 1971). As forças de capilaridade estão relacionadas com as fracas ligações de atração (forças de Van der Waals) que ocorrem pela interação entre as moléculas da água e a superfície sólida do solo. Já a adsorção corresponde ao balanço químico de cargas superficiais existentes no esqueleto sólido, onde sua forma de atração são ligações de hidrogênio, hidratação de íons adsorvidos, atração por osmose e atração dipolar.

A sucção matricial está relacionada com combinação do tipo de partículas e do arranjo estrutural do solo. Segundo Martínez (2003), as propriedades matriciais do solo podem ser explicadas pelo tamanho e forma dos vazios, tamanho das partículas, a quantidade de água retida, entre outras. Considerada por Fredlund (1979) e Edil & Motan (1984), como o parâmetro adequado para estudo do comportamento mecânico do solo, a sucção aumenta a rigidez e consiste na diferença entre os valores de pressão de ar e pressão de água. Dessa forma, à medida que o solo perde umidade o valor da sucção aumenta conferindo um acréscimo de tensão efetiva as partículas do solo, Figura 9.

Figura 9 - Atuação da sucção das partículas sólidas do solo.



Fonte: Adaptado de Guzmán (2014).

A sucção osmótica ( $\Psi_{\text{Osmótica}}$ ) é a pressão equivalente relacionada à pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com a água livre, função da quantidade de sais dissolvidos no interior do solo (HUSE, 2007), ou seja, é resultante da interação da água com os sais dissolvidos nesta. Segundo Camapum de Carvalho et al. (2015), a adição de solutos à água, que podem ser sais inorgânicos ou componentes orgânicos, tendem a tornar as suas moléculas mais próximas de forma que a magnitude das forças de coesão entre as moléculas de uma água pura será menor do que aquelas desenvolvidas para o caso de soluções aquosas. Essa

aproximação entre as moléculas de água faz com que estas se agrupem em torno de cada íon soluto ou molécula, reduzindo a energia potencial da água e a liberdade de movimentação de suas moléculas. Nesta situação a água migra de uma região de menor salinidade para uma com maior concentração de sais, promovendo o espalhamento dos solutos pelo solo.

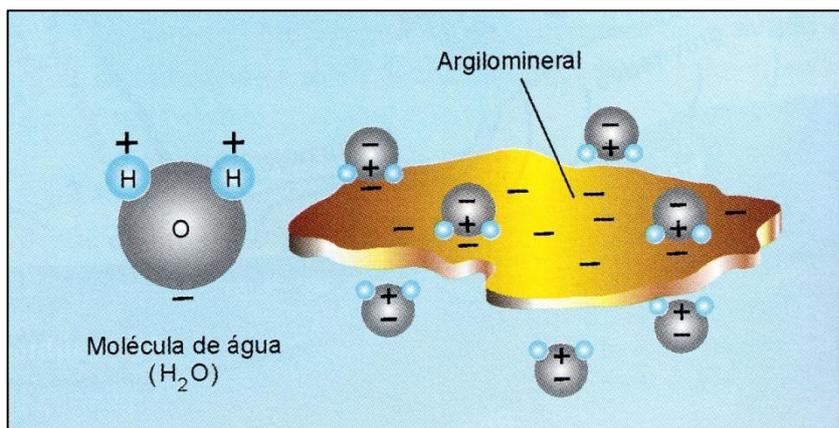
A magnitude da sucção osmótica varia com as mudanças das condições químicas e térmicas, além do fato de sua importância estar relacionada à presença de uma concentração salina significativa ou que apresentem valores de umidade baixos; para solos com alto valor de umidade este componente se torna desprezível (SILVA, 2015). Esta sucção é obtida pela diferença entre a sucção total e matricial, e sua influência tem maior significância quando analisada em solos contaminados. Para valores mais elevados de sucção, acima de 1.500 kPa, a contribuição da sucção osmótica é absolutamente insignificante (LEME, 2015).

### **2.3.4 Fatores intervenientes na sucção do solo**

Por ser um fator dependente da condição não saturada dos solos, alguns elementos podem interferir na magnitude da sucção total como, a granulometria do solo, a mineralogia, a estrutura do solo, a trajetória de umedecimento/secagem do solo, o grau de saturação, a proximidade com o nível do lençol freático, a presença de raízes de plantas, entre outros.

A granulometria e a mineralogia são parâmetros que refletem na magnitude da sucção dos solos. O primeiro determina a porcentagem do tamanho das partículas presentes em um solo, possibilitando inferir sobre o seu comportamento mecânico e hidráulico pela presença da fração fina (argila e silte). Sua influência na sucção está relacionada com a capacidade de armazenamento de água, uma vez que, solos argilosos armazenam maior quantidade de água quando comparados com os solos de maior granulometria (areias e pedregulhos). A mineralogia do solo indica que, solos com predominância de argilominerais alcançam valores de sucção superiores àqueles de composição química com característica hidrofóbica, ou seja, não adsorvem água. A propriedade mineralógica é intrínseca do solo, ou seja, oriunda de sua origem e formação, e pode dar indicativos dos processos de expansão/contração devido à propriedade de atração das moléculas de água a sua estrutura, Figura 10.

Figura 10 - Interação da água com os argilominerais.



Fonte: Adaptado de Lepsch (2002).

A estrutura do solo diz respeito ao tamanho dos seus vazios, ou seja, os vazios nos solos não saturados têm sido assemelhados a tubos capilares e a manifestação da capilaridade introduz um aumento circunstancial da tensão normal entre as partículas (CALLE, 2000), o que influencia no valor da sucção. Isso reflete na capacidade de retenção de água devido ao volume de poros, sejam macro ou mesoporos, existentes no solo.

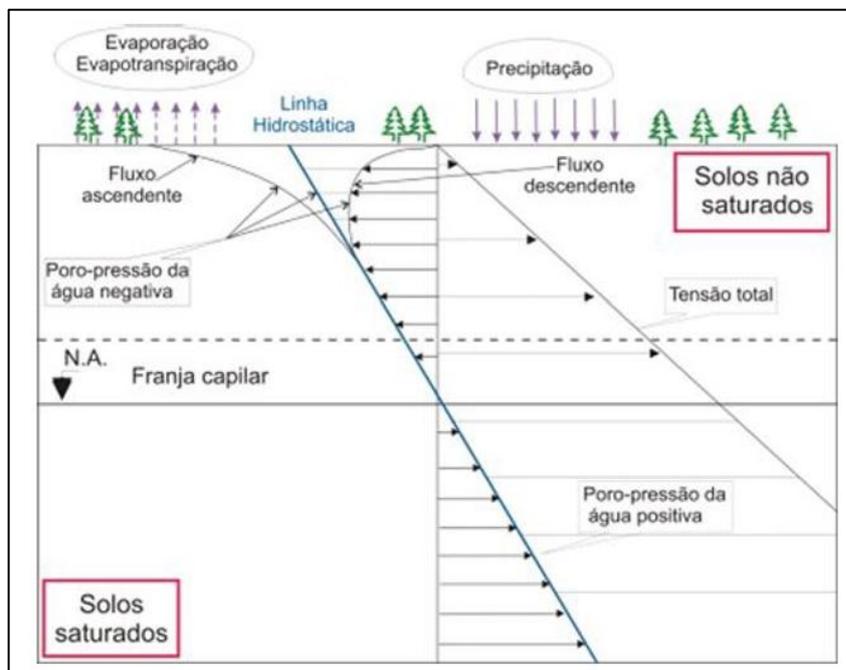
Os processos de umedecimento/secagem fazem surgir às condições de maior estresse no solo, que são os períodos de expansão, quando o solo é umedecido, e de contração, com a perda d'água. Em alguns solos pode ocorrer expansão de elevada expressão, uma vez que, sua composição mineralógica apresenta características atrativas à adesão das moléculas de água a sua estrutura. Além disso, esses processos originam o fenômeno da histerese, que segundo Santos (2015), deriva-se da variação de umidade, fazendo com que os parâmetros relacionados com a quantidade de água no solo tenham valores diferentes no processo de umedecimento e no de secagem.

A condição não saturada ganha destaque quando o solo, antes saturado, perde água para o ambiente, tendo como consequência a redução do seu grau de saturação. Dessa forma, esse parâmetro influencia o surgimento da membrana contrátil no solo, pois à medida que o solo seca as forças capilares, de adsorção e osmóticas proporcionam o surgimento da sucção no solo.

A umidade de solo varia conforme se percorre uma determinada espessura de uma camada de solo, pois solos próximos à superfície estão sujeitos aos agentes do intemperismo sofrendo variações de umidade ao longo do tempo. Dessa forma, à medida que se aproxima do nível freático, nas camadas mais internas do solo, observa-se o aumento do grau de saturação do solo e a redução do valor da sucção, Figura 11. Assim, as regiões mais próximas

à superfície, distantes do nível de água, apresentam valores de sucção superiores, devido ao surgimento da poropressão negativa e influência da membrana contrátil.

Figura 11 - Fatores intervenientes da sucção no solo.



Fonte: Adaptado de Ferreira (2015).

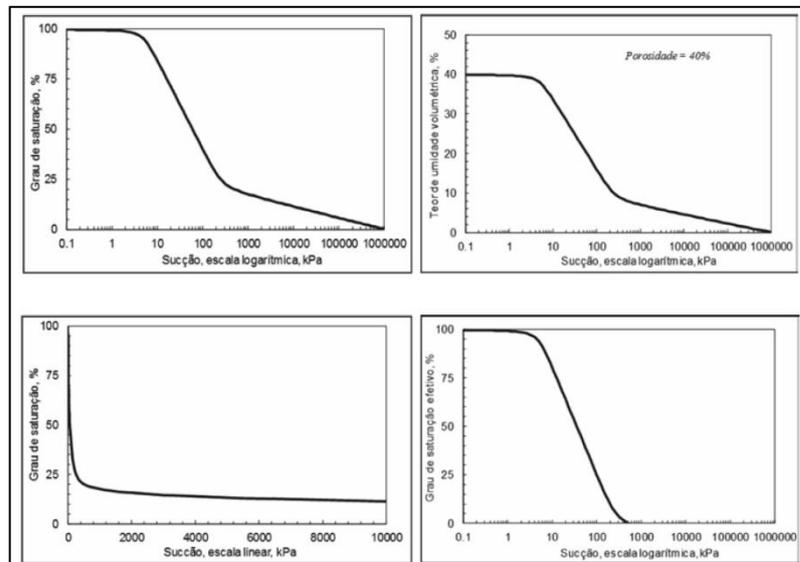
A sucção também sofre alterações devido à retirada de água do solo pelas raízes das plantas, o que ocasiona a variação da umidade do solo. A água que infiltra pelo solo fica armazenada em seus poros, estando disponível para que as raízes das plantas absorvam a água para manutenção de sua integridade fisiológica. A remoção da água do solo pela transpiração das plantas, absorção da água transformando-a posteriormente em vapor, tem como consequência a redução da poropressão positiva e elevação da sucção, proporcionando o aumento da resistência ao cisalhamento do solo e a coesão do sistema raiz-solo da planta.

De acordo com Menezes (2013), nas camadas de solo que estão abaixo do nível freático, ou seja, onde o solo está totalmente saturado, a pressão da água no solo é positiva (tomando como referência pressão atmosférica) e calculada multiplicando o peso específico da água,  $\gamma_w$ , pela carga de pressão (altura de coluna d'água). Na região das partes do solo acima do nível freático, também chamado de zona vadosa, a pressão da água no solo é negativa e calculada da mesma forma. Neste caso, utilizando o conceito de sucção, pode-se dizer que acima do nível freático a sucção aumentaria em direção à superfície.

### 2.3.5 Curva de retenção de água no solo

De acordo com Presa (1982), uma forma de avaliar as variações de sucção matricial de um solo é por meio da curva de retenção, que representa uma relação gráfica entre a sucção matricial ou total e a umidade (gravimétrico ou volumétrico) ou grau de saturação do solo. Essa curva permite obter a capacidade de retenção de água no solo, Figura 12. Ela pode ser utilizada para estimativa de parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado, tais como a permeabilidade, resistência ao cisalhamento e variação de volume (FREDLUND et al., 1997).

Figura 12 - Representação da curva de retenção de água no solo.



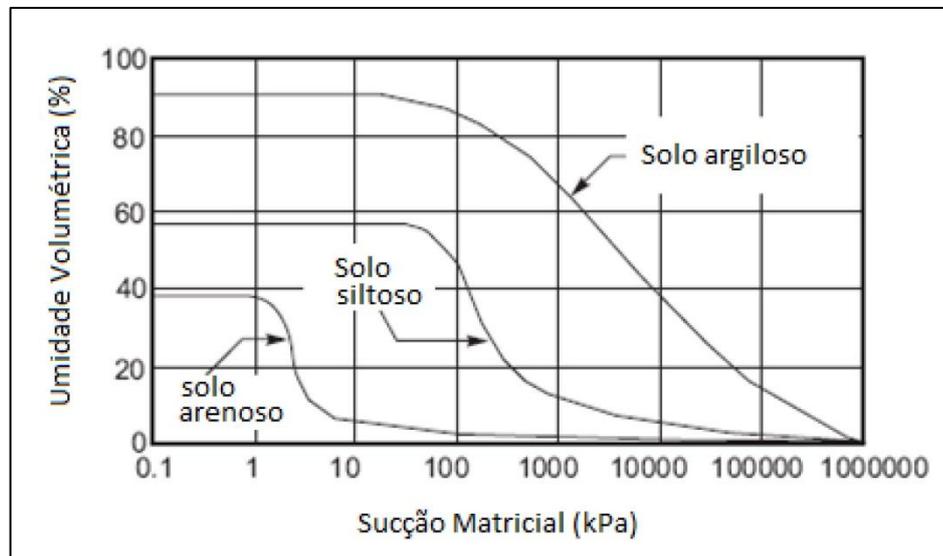
Fonte: Adaptado de Camapum de Carvalho et al. (2015).

A curva de retenção de água no solo, também conhecida como curva característica de água no solo apresenta diversas aplicações práticas, técnicas e científicas, tais como, a determinação da capacidade de campo do solo, do ponto de murcha permanente e da disponibilidade total de água no solo, variáveis indispensáveis para um adequado manejo de irrigação e balanço hídrico de água no solo (EMBRAPA, 2007).

A representação gráfica consiste na relação entre a quantidade de água presente no material poroso (solo) e a energia necessária para remover essa água, sucção (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015). O formato da curva de retenção de água do solo é influenciado principalmente pelo tipo de solo, estrutura do solo (e sua agregação), umidade inicial ou de moldagem, índice de vazios, textura, mineralogia, histórico de tensões e os métodos de compactação. A curva característica expressa graficamente a relação entre a sucção e o teor de

água ou grau de saturação, expresso em termos de peso ou volume (COSTA, C., 2015). Essas características podem ser verificadas a partir das curvas de retenção de cada tipo de solo, Figura 13, uma vez que, solos granulares possuem macroporos que não permitem a retenção de água e por consequência perdem umidade rapidamente.

Figura 13 - Curva de retenção por tipo de solo.

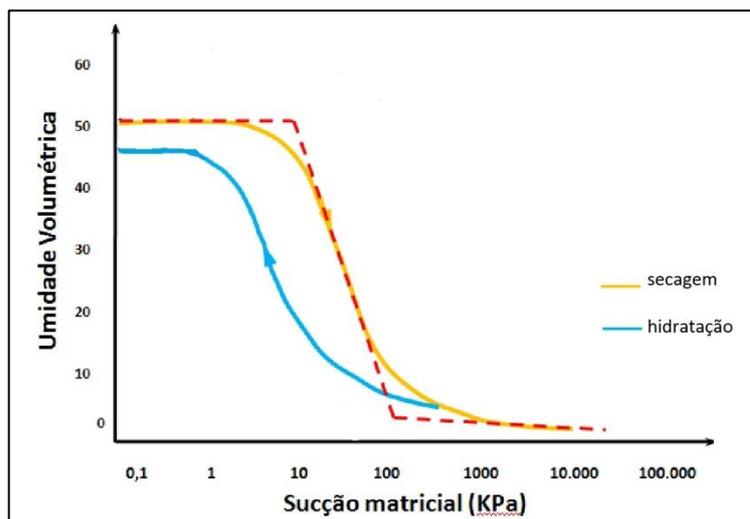


Fonte: FREDLUND & XING (1994).

A matéria orgânica, quando coloidal, apresenta boas propriedades de retenção de água e afeta uma das principais características físicas do solo, a agregação do solo, afetando assim, indiretamente, outras características como a massa específica, porosidade, aeração e infiltração de água. Sendo que a capilaridade e a adsorção são os fenômenos responsáveis por esta retenção (MENEZES, 2010).

Segundo Barroso (2008), existe duas formas de obtenção da curva característica do solo, o método de secagem (ou desidratação) e o de umedecimento (hidratação), Figura 14. Na secagem, a amostra previamente saturada é exposta a potenciais matriciais crescentes, o que implica ir diminuindo a umidade do solo. A perda de água do solo pode ser obtida mediante a aplicação de pressões na amostra ou deixando evaporar ao tempo. A segunda forma é por meio do umedecimento, onde a amostra seca tem o potencial matricial reduzido gradualmente, aumentando-se a umidade.

Figura 14 - Secagem e umedecimento na curva característica do solo.



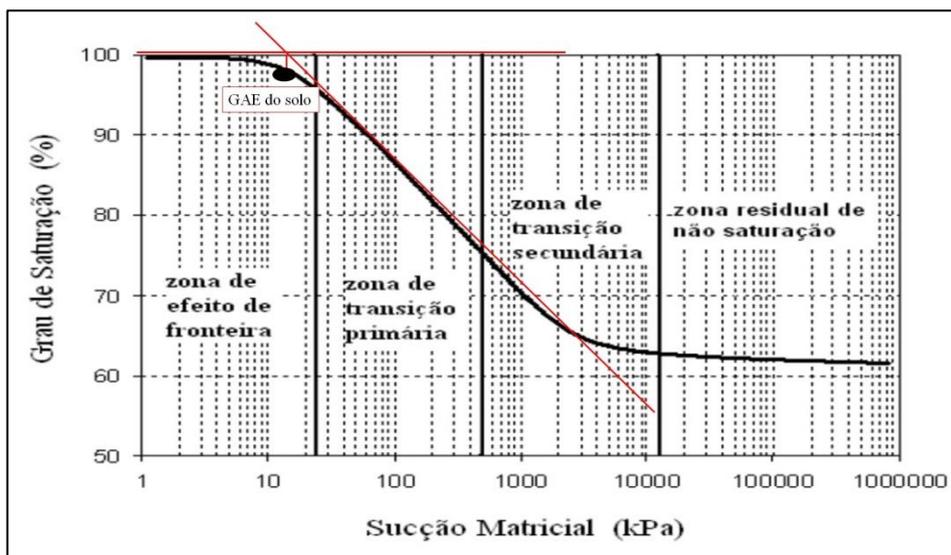
Fonte: *Google imagens* (2017).

As curvas obtidas pelos processos de secagem e de umedecimento não coincidem, dando origem ao fenômeno denominado de histerese da curva característica de sucção, sendo atribuída a diversas causas: não uniformidade geométrica dos poros, efeito do ângulo de contato (maior, quando ocorre umedecimento do solo, e menor, na fase de secagem), bolhas de ar capturadas nos vazios do solo durante a fase de umedecimento e alterações na estrutura do solo decorrentes da expansão ou contração, associadas aos ciclos de umedecimento ou secagem (CHAGAS, 2014).

### ***2.3.5.1 Partes da curva de retenção de água no solo***

Segundo Paiva (2009), através da curva de retenção de água no solo, pode-se obter algumas características importantes do solo como, o ponto de entrada de ar, o grau de pré-adensamento do solo, a faixa de variação da zona capilar, o ponto generalizado de entrada de ar, a capacidade de sucção e a umidade residual. O ponto de entrada generalizada de ar (GAE) do solo é obtido pela extensão da região reta da curva característica até interceptar a linha correspondente à saturação do solo (100%). De acordo com Fredlund et al. (1996), a curva de retenção está dividida em quatro partes, Figura 15.

Figura 15 - Zonas da curva de retenção de água no solo.



Fonte: Adaptado de Fredlund et al. (1996).

Na zona de efeito de fronteira ou saturada, o solo encontra-se na condição saturada ( $S=100\%$ ), onde a água ocupa todos os vazios do solo sem a presença da fase gasosa (ar) de forma contínua. Esta região se estende até o ponto de entrada generalizada de ar ou ponto de dessaturação ( $\Psi_{Ar}$ ), que identifica o valor de sucção no qual o ar começa a entrar pelas maiores aberturas superficiais (poros) do solo.

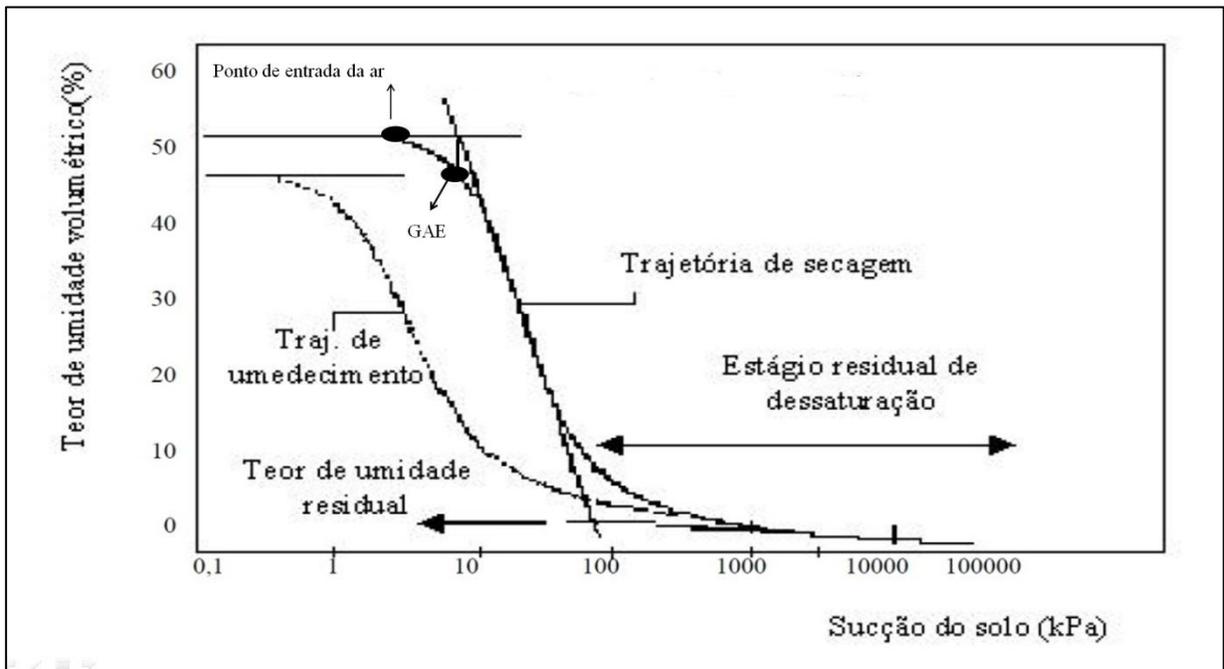
A segunda região, denominada zona de transição primária, após a dessaturação, a fase líquida começa a perder sua continuidade, dando espaço à entrada de ar e ao surgimento de regiões contínuas de ar. A dessaturação é bastante rápida predominando os efeitos capilares no aumento da sucção. A zona de transição secundária apresenta o mesmo comportamento da região anterior, porém com o predomínio de forças de adsorção sobre forças capilares. Nessa região a entrada de ar se intensifica fazendo com que as moléculas de água sejam adsorvidas pelas partículas sólidas do solo. Essas duas regiões podem ser chamadas de zona de dessaturação, onde seu limite inferior corresponde à sucção residual ( $\Psi_{Res}$ ), tendo como característica o aumento da sucção e a drenagem da água livre presente no solo.

A quarta zona refere-se à região residual, onde o grau de saturação se torna muito pequeno e o solo apresenta apenas uma umidade residual. A fase líquida torna-se descontínua e a fase gasosa ocupa a maior parte dos poros. Nessa fase, para se retirar uma quantidade mínima de água se faz necessário uma sucção elevada.

### 2.3.5.2 Ponto de Entrada Generalizada de Ar

Por meio das regiões da curva pode-se obter o ponto de entrada de ar que, é de fundamental importância, quando se deseja utilizar modelos de previsões de comportamento de resistência ao cisalhamento em função da curva característica do solo (MARTÍNEZ, 2003), e o valor da umidade residual, que consiste num parâmetro de entrada em vários modelos de comportamento (Figura 16). O ponto de entrada de ar representa a sucção matricial na qual se inicia a dessaturação dos poros maiores do solo e consequente formação de fissuras, ou seja, o ponto de mudança brusca na curva de retenção de água no solo. Esse parâmetro pode ser confundido com o ponto de entrada generalizada de ar (GAE). Segundo Santos (2015), no caso de solos compactados, com grau de saturação menor que 100%, observa-se que existe um ponto ao longo da curva de secagem em que o gradiente de redução da saturação é significativamente alterado, denominado GAE, que pode ser encontrado por relação gráfica.

Figura 16 - Parâmetros da curva característica.



Fonte: Adaptado de Martínez (2003).

O GAE é obtido pelo ajuste gráfico proposto por Fredlund & Xing (1994). O procedimento de ajuste consiste no traçado de duas linhas, uma horizontal na parte inicial da curva, e outra tangente à parte da curva referente à trajetória de secagem. No ponto de interseção das linhas, prolonga-se uma reta vertical até tocar a curva característica do solo, onde neste ponto é considerado como a sucção matricial e a umidade volumétrica que

representam o GAE do solo em questão. Santos (2015) trabalhando com três tipos de solos compactados para camada de cobertura de aterro de RSU, observou que a umidade ótima de compactação do solo convencional apresentou semelhança com a umidade gravimétrica do ponto de entrada generalizada de ar de sua curva de retenção de água. Pode-se observar na Tabela 2 que, o GAE encontrado na curva de retenção de água no solo é próximo ao valor da umidade ótima de compactação. De acordo com Guzmán (2014), a obtenção do ponto de entrada de ar é determinante, já que define a transição do estado ocluso e aberto do ar no solo e seu respectivo efeito no comportamento mecânico.

Tabela 2 - Relação entre o GAE e a Umidade ótima do solo.

Referência	$\Psi_{Ar}$ (kPa)	$W_{GAE}$ (%)	$W_{Ótima}$ (%)
Maciel (2003)	2000	19	23
Vieira (2005)	200	22,5	23,4
Guizelini (2011)	2000	26	31
Lopes (2011)	500	15	19,9
Santos (2015)	1500	17,5	18

Fonte: Adaptado de Santos (2015).

Esse parâmetro indica a umidade do solo no qual a fase líquida torna-se descontínua e a fase gasosa forma canais contínuos de ar. A água é atraída pelas partículas sólidas do solo pelas forças de adsorção, onde suas moléculas ficam aderidas na superfície dos grãos de solo. Nessa situação, a permeabilidade a água sofre considerável redução, permitindo que o ar atmosférico penetre pelas fissuras formadas e se movimente pelo interior da camada de solo executada.

### 2.3.5.3 Equações para ajuste de curvas de retenção do solo

A elaboração das curvas de retenção de água no solo é realizada através de equações que fornecem as representações matemáticas relativas à representação dessas curvas baseadas em parâmetros empíricos. As equações utilizam-se de parâmetros para ajuste da curva de retenção como umidade volumétrica residual ( $\theta_{Res}$ ), umidade volumétrica de saturação ( $\theta_{Sat}$ ), sucção matricial ( $\Psi_{Mat}$ ), além de parâmetros estimados que dependam do tipo de solo analisado. A representação da curva de retenção, utilizando uma função contínua, é necessária para análises numéricas envolvendo o fluxo de água e na previsão de diversas propriedades de solos não saturados (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015).

Segundo Santos (2015), a maioria das equações de ajustes de curvas utiliza a umidade volumétrica, os demais são relacionados com o grau de saturação. Observa-se ainda que grande parte dos equações tratam de ajustar a curva de secagem. A curva de umedecimento possui o mesmo formato e pode ser também ajustada pelas equações existentes. Para melhor entendimento das equações procurou-se ajustar a curva característica até o valor de umidade volumétrica residual, sendo necessário definir a umidade volumétrica normal ( $\theta_{Nor}$ ) e a umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) pela Equação (5).

$$\theta_{Nor} = \frac{\theta - \theta_{Res}}{\theta_{Sat} - \theta_{Res}} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

$\theta_{Nor}$  = umidade volumétrica normalizada

$\theta$  = umidade volumétrica do solo

$\theta_{Res}$  = umidade volumétrica residual

$\theta_{Sat}$  = umidade volumétrica de saturação

Dentre as equações de ajustes de curvas podem-se verificar as expressões mais antigas, como a de Gardner (1956), bem como a mais utilizada, Van Genuchten (1980), Quadro 1.

Quadro 1 - Equações de ajuste para curva de retenção de água no solo.

Autor	Equação	Parâmetros
Gardner (1956)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{(1 + \alpha\psi^n)}$	$\alpha, n$
Brutsaert (1967)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]}$	$\alpha, n$
Van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{(1 + \alpha\psi^n)^m}$	$\alpha, m, n$
McKee & Bumb (1987)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{\left(1 + \text{Exp}\left(\frac{\alpha - \psi}{n}\right)\right)}$	$\alpha, n$
Fredlund & Xing (1994)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{\left\{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]\right\}^m}$	$\alpha, n, m$
Gitirana Jr. & Fredlund (2004)	$\theta = \theta_{Res} + \frac{\theta_{Sat} - \theta_{Res}}{\left(\frac{\psi}{\sqrt{\psi_b \psi_{Res}}}\right)^d}$	$d$

Onde: os parâmetros,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  e  $d$ , são específicos para cada tipo de solo e encontrados por processos numéricos iterativos.

Cada equação de ajuste possui suas especificações, como exemplo, a curva de Van Genuchten (1980) destaca-se em relação as equações propostas, pois, ao incluir um parâmetro adicional, tem-se um aumento significativo na flexibilidade do seu formato. A partir das equações disponibilizados na literatura, com base em alguns parâmetros do solo e em parâmetros de ajuste, torna-se possível fazer uma estimativa da curva de retenção que melhor se relacione com o solo analisado. De acordo com Leme (2015), a determinação da curva de retenção por meios de ensaios de laboratório é uma pratica que requer tempo.

Devido aos diversos formatos das curvas de retenção para vários tipos de solo, é essencial encontrar uma equação matemática geral para uso prático. Para isso, faz-se uso de ferramentas utilizadas para comparar, analisar, avaliar e indicar o melhor modelo de curva de retenção para o solo estudado. Segundo Araújo Neto (2016), quanto maior o número de avaliadores mais adequado e precisa será a escolha do melhor modelo. Nessa pesquisa utilizou-se o coeficiente de determinação do modelo ( $R^2$ ), a Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR), e o Critério de Informação de Akaike (AKAIKE, 1973).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mede o quanto a variável dependente pode ser explicada pela equação de regressão, podendo-se inferir se o modelo é adequado ou não para explicar a variação de determinada variável em estudo. Pode assumir valores de 0 a 1, ou seja, de 0 a 100%. Quanto mais próximo da unidade tem-se o indicativo de que os valores estimados estão próximos dos observados, confirmando um bom ajuste para explicação do comportamento da variável dependente em relação a variável independente. Valores próximos a zero não explicam a relação entre as variáveis (FARIAS, 2014; ARAÚJO NETO, 2016).

Pode ser obtido pela expressão que relaciona o número de variáveis analisadas, além das variáveis estimadas e observadas, Equação (6). Vale salientar que, o aumento do  $R^2$  não está associado somente ao efeito das variáveis, mas também ao número de dados que estão sendo analisado no modelo, dessa forma, este parâmetro é sensível ao aumento do número de variáveis independentes no modelo o que pode não corresponder à realidade.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_E - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n (X_O - \bar{X})} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

$R^2$  = Coeficiente de determinação

n= Número de variáveis

$X_E$ = Variáveis estimadas

$X_O$ = Variáveis observadas

$\bar{X}$ = Média das variáveis

A soma dos quadrados dos resíduos (SQR) é o critério para ajuste de modelos que se baseia na observação dos erros de aproximação associados a cada elemento da amostra (ARAÚJO NETO, 2016). Utiliza o critério de que quanto menor a SQR, melhor o modelo descreve a relação entre as variáveis estimadas e a variável resposta, Equação (7). Farias (2014), afirma que o uso da SQR apresenta uma limitação, onde seu valor depende do tamanho da amostra, ou seja, para amostras pequenas, a variação do resíduo diminuirá muito, afetando os graus de liberdade do resíduo e, conseqüentemente, afetando a relação existente entre a variação do acaso e o efeito de tratamento. Esse problema pode ser minimizado usando o quadrado médio dos resíduos como critério de escolha.

$$SQR = \sum_{i=1}^n (X_E - X_O)^2 \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

SQR= Soma dos quadrados dos resíduos

n= Número de variáveis

$X_E$ = Variáveis estimadas

$X_O$ = Variáveis observadas

O Critério de Informação de Akaike (AIC) constitui-se como um critério para a seleção do melhor modelo que se adapta a descrição em estudo. Essa medida leva em consideração a qualidade da ligação entre as variáveis e a quantidade que são utilizadas no modelo (FARIAS, 2014). Segundo Akaike (1973) a seleção do melhor modelo de ajuste da curva de retenção de água no solo é calculada pela Equação (8), onde quanto menor o valor encontrado para o AIC, melhor será o modelo.

$$AIC = n \times \ln \left( \frac{SQR}{n} \right) + 2k \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

AIC= Critério de Informação de Akaike

SQR= Soma dos Quadrados dos Resíduos

n= Número de observações (quantidade de pontos sucção/umidade utilizados pelo programa)

k= Número de parâmetros de ajustes utilizado na equação do modelo ( $\alpha$ , m e n)

Os parâmetros para ajuste e escolha da equação da curva de retenção de água no solo são obtidos pela utilização de softwares estatísticos, entre eles o programa STATISTICA, que permite o uso do método iterativo de Gauss-Newton, possibilitando a adoção de um número de iterações máximas e um critério de convergência à escolha do operador.

### 2.3.6 Métodos de determinação da sucção

A sucção do solo pode ser obtida a partir da análise das curvas de retenção de água no solo por meios de métodos experimentais *in situ* ou em laboratório, focando na determinação da sucção total e matricial. Dessa forma os métodos podem ser classificados como diretos, àqueles que medem a energia da água dos poros, e indiretos, quando se obtém um parâmetro a ser correlacionado com a sucção do solo através de uma calibração, por exemplo, a umidade relativa, a resistividade ou a condutividade.

Como exemplo de métodos diretos, temos o tensiômetro, que permite a medição direta da poropressão negativa da água do solo, a partir da qual se tem o valor da sucção matricial. Dentre os métodos indiretos, destaca-se o método do papel filtro, como um método simples e de baixo custo, que pode ser empregado em um espectro grande de solos com diferentes distribuições granulométricas.

Segundo Camapum de Carvalho et al. (2015), a medição das propriedades dos solos não saturados exige o emprego de técnicas para medição e controle da sucção do solo, sempre com o objetivo de determinar parâmetros para análise e/ou previsão do comportamento do material. As técnicas para determinação da sucção no solo podem ser observadas no Quadro 2, onde o método a ser escolhido depende do tipo de sucção a ser medida, bem como, está associado a uma umidade (gravimétrico ou volumétrico), um grau de saturação e/ou índice de vazios para cada valor de sucção medido.

Quadro 2 - Métodos de determinação da sucção no solo.

Método	Sucção medida	Faixa de medida (kPa)
Papel filtro	Total e Matricial	0 - 29000
Tensiômetro	Matricial	0 - 90
Psicrômetro	Total e Osmótica	100 - 80000
Translação de eixos	Matricial	0 - 1500
Placa de sucção (Funil de Haines)	Matricial	20 - 1500
Câmara de pressão (Câmara de Richards)	Matricial	0 - 1500
Sensor de condutividade térmica	Matricial	0 - 400
Sensor de condutividade elétrica	Matricial e Osmótica	20 - 1500
Equilíbrio de vapor	Total	> 400
Sensor de matriz granular (GMS)	Matricial	0 - 200

Como resultado do emprego das técnicas de medição de sucção matricial e total, tem-se a curva de retenção, ou seja, uma função que correlaciona a quantidade de água dentro dos poros do solo com a energia necessária para sua retirada (sucção). A quantidade de água no solo pode ser representada pela umidade gravimétrica, umidade volumétrica ou grau de saturação, já a sucção expressa na curva característica pode ser a total ou matricial (CUPERTINO, 2013).

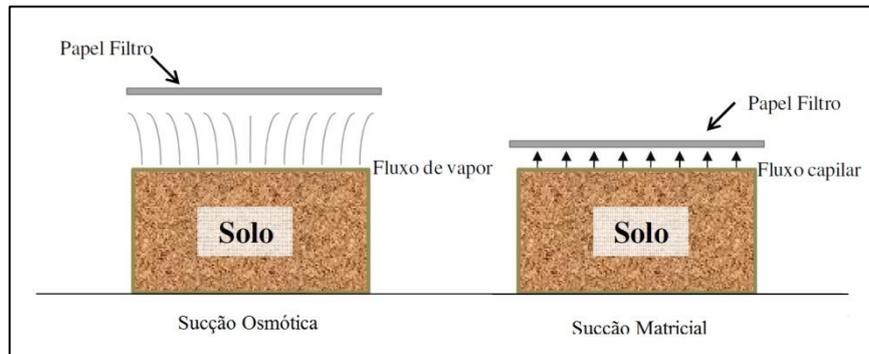
Diversos autores descreveram os métodos e aplicações das técnicas de medição da sucção do solo. No entanto, a seguir, será detalhado o método do papel filtro, em razão de ter sido o método escolhido para a medição de sucção na presente pesquisa. A facilidade de execução permite a obtenção das sucções matricial e total, não envolvendo equipamentos ou materiais mais onerosos.

#### ***2.3.6.1 Método do Papel filtro***

O método do papel filtro consiste num método indireto de determinação da sucção e elaboração da curva de retenção de água no solo. A utilização desse método para obtenção do potencial total (matricial e osmótica) de sucção da água no solo baseia-se no princípio da absorção e equilíbrio, quando um solo úmido é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de adsorver água (papel), esta umidade será transferida do solo para esse material até que o equilíbrio de sucção seja alcançado (LUCAS et al. 2011).

A sucção matricial é medida quando o fluxo ocorre por capilaridade com contato direto através das partículas do solo e o papel filtro, pois apenas tensões capilares são vencidas nesse processo. Por outro lado, a sucção total é medida se o fluxo ocorre em forma de vapor sem contato entre o solo e o material poroso, já que são vencidas as forças osmóticas e capilares, que retêm a molécula de água (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015), Figura 17.

Figura 17 - Aferição da sucção osmótica e matricial.



Fonte: Adaptado de Silva (2009).

O papel filtro, colocado em contato com a amostra de solo, dentro de um recipiente hermeticamente fechado (para impedir qualquer troca com o meio externo), atingirá o equilíbrio de sucção, em relação ao fluxo de água, com a amostra de solo após determinado período de tempo (LEME, 2015). Para que seja atingido o equilíbrio entre o papel e o solo, é importante que o tempo de equalização do conjunto seja suficiente, a fim de obter uma resposta correta. De acordo com Marinho & Oliveira (2006), para a determinação da sucção matricial, o tempo de equilíbrio mínimo de 7 (sete) dias é suficiente, para qualquer faixa de sucção.

Segundo Stuermer (1998), alguns cuidados devem ser tomados no uso do papel filtro, especialmente no seu manuseio, que deve ser rápido, para que este não tenha sua umidade alterada no contato prolongado com o ar. A precisão do método depende da precisão com a qual a umidade do papel filtro é determinada.

Normalmente o papel filtro quantitativo, tipo 2 é utilizado, sendo que os mais usados são o Whatman n°. 42 (capacidade de absorção de umidade entre 6% e 175%) e Schleicher & Schuell n°. 589. Dependendo do tipo de contato entre o papel e o solo, pode-se medir tanto a sucção matricial quanto a total (MENEZES, 2010). O papel filtro Whatman n°. 42 é recomendado por ser mais espesso e possuir poros menores (CHANDLER & GUTIERREZ, 1986). A ASTM (2010) aconselha que o papel filtro seja seco em estufa por no mínimo 16 horas antes do uso, no entanto, Marinho (1994), menciona que este procedimento pode afetar as características de absorção do papel, portanto, deve-se usá-lo sem secagem prévia. A sucção é determinada através de uma curva de calibração, que relaciona a umidade gravimétrica do papel filtro com valores de sucção correspondentes, Tabela 3.

Tabela 3 - Equações de calibração do papel filtro Whatman n°. 42.

Referência	Tipo de sucção	Equações	Requisitos
Hamblin (1981)	Não definida	$\Psi = 10^{(8,022 - 3,683 \times \text{LogWpf})}$	-
Chandler et al. (1992)	Não definida	$\Psi = 10^{(4,84 - 0,0622 \times \text{Wpf})}$	$W_{\text{pf}} \leq 47\%$
		$\Psi = 10^{(6,05 - 2,48 \times \text{LogWpf})}$	$W_{\text{pf}} > 47\%$
Leong et al. (2002)	Matricial	$\Psi = 10^{(4,945 - 0,0673 \times \text{Wpf})}$	$W_{\text{pf}} \leq 47\%$
		$\Psi = 10^{(2,909 - 0,0229 \times \text{Wpf})}$	$W_{\text{pf}} > 47\%$
Leong et al. (2002)	Total	$\Psi = 10^{(5,31 - 0,0879 \times \text{Wpf})}$	$W_{\text{pf}} < 26\%$
		$\Psi = 10^{(8,779 - 0,222 \times \text{Wpf})}$	$W_{\text{pf}} > 26\%$
D5298 (ASTM, 2010)	Não definida	$\Psi = 10^{(5,327 - 0,0779 \times \text{Wpf})}$	$W_{\text{pf}} < 45,3$
		$\Psi = 10^{(2,413 - 0,0135 \times \text{Wpf})}$	$W_{\text{pf}} > 45,3$

Fonte: Adaptado de Cupertino (2013).

O papel filtro pode ser calibrado a partir de alguns procedimentos elencados por Marinho (1997), entre eles têm-se, a placa de sucção, a utilização de amostras de campo, amostras edométricas, placas de pressão e o dessecador. Para o papel filtro Whatman n°. 42 a umidade inicial no estado seco ao ar é aproximadamente 6%, isto permite medições de sucção de zero até 29 MPa.

Menezes (2010) apresenta algumas vantagens para realização desse ensaio que são: para cada faixa de equilíbrio, o tempo de resposta do papel é rápido não ultrapassando mais que 7 (sete) dias; oferece economia e uma precisão similar aos métodos convencionais; possibilita a medição da sucção osmótica pela diferença entre as medidas de sucção total e matricial; e consiste num método simples.

Dentre as desvantagens, o fato de ele ser altamente dependente da habilidade e rapidez de manuseio do operador, em especial no momento de medição de umidade do papel filtro, pois este procedimento deve ser realizado em poucos segundos com a utilização de balanças de alta resolução (0,0001 g); e o período de realização do ensaio é bastante longo, podendo se estender por semanas, dependendo da curva de calibração (LEME, 2015).

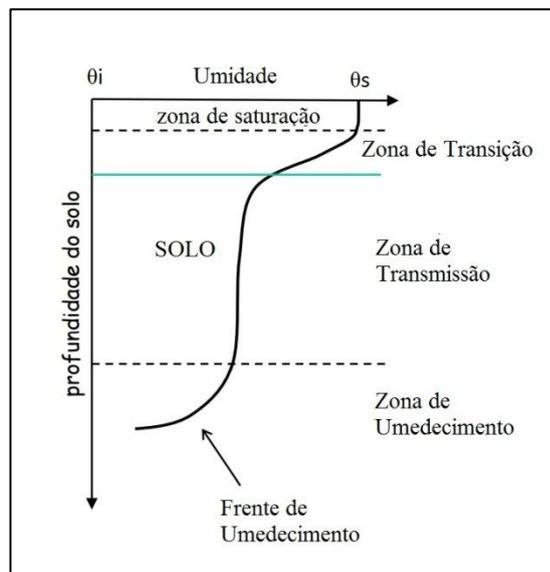
### 2.3.7 Condição não saturada da camada de cobertura de aterros de RSU

Na camada de cobertura de aterros de RSU, a água procura se movimentar por caminhos preferenciais deixados por fissuras superficiais oriundas do ressecamento da camada, imperfeições provocadas pelas deformações verticais e horizontais do maciço

sanitário (recalques), enraizamento profundo de vegetação, ação de animais e insetos, entre outros.

No processo de movimento da água, ocorrem fenômenos simultâneos de umedecimento do solo e movimento da água, que provoca a elevação da umidade ao longo da profundidade do solo (CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2012). Esse movimento deve-se ao fenômeno da infiltração, que consiste na entrada de água pela superfície do solo devido à precipitação, neve derretida ou irrigação. A entrada de água ocasiona o aumento de umidade e o aparecimento de um diferencial de umidade que cria uma frente de umedecimento. Diante disso, o solo possui zonas de umedecimento divididas em zona de saturação, transição, transmissão e umedecimento, Figura 18.

Figura 18 - Zonas de infiltração no solo.



Na zona de saturação, o solo encontra-se completamente saturado e abrange a parte imediatamente abaixo do solo com uma espessura de 0,015 m. Na zona de transição ocorre uma diminuição da umidade até atingir umidade abaixo da saturação (umidade efetiva), que fica praticamente constante ao longo da zona de transmissão. A zona de transição tem uma espessura de aproximadamente 0,05 m, ao passo que, o tamanho da zona de transmissão ou de transporte é variável, aumentando ao longo do tempo enquanto houver umidade na superfície. A frente de umedecimento ou molhamento é composta por uma camada estreita onde há um grande diferencial de umidade do solo (BRANDÃO et al., 2003).

De acordo com Pinto (2006), a permeabilidade depende de alguns fatores, são eles o estado do solo, o grau de saturação, a estrutura e anisotropia do solo e a temperatura da água escoada. Outros fatores podem contribuir para a caracterização do movimento da água no solo

Santos (2015), são eles, o conteúdo e a energia da água presente no solo, cujo entendimento depende da obtenção da curva de retenção, a qual é capaz de fornecer informações a respeito da energia ou potencial da água no solo. Dessa forma, percebe-se que cada solo possui um coeficiente onde todos os parâmetros geotécnicos interferem na sua obtenção em ensaio, e na camada de cobertura o *design* da sua execução é outro fator a ser considerado.

Para Maciel (2003), a camada de cobertura de aterros de resíduos sólidos é o elo existente entre o ambiente interno dos resíduos e a atmosfera. Dessa forma, pela maneira de execução da camada a partir da compactação, pela influência direta dos agentes climáticos, das intempéries e pela variação de volume provocado pelos efeitos do umedecimento/ressecamento da camada, pode-se dizer que, seu comportamento pode ser descrito pela Mecânica dos Solos Não Saturados. Um dos principais fatores que impõem solicitações em solos não saturados são as variações do volume de água dos poros do solo ocasionadas, no caso das camadas de cobertura, pela interação entre o solo superficial não saturado e a atmosfera. Essa interação depende de diversos mecanismos de fluxo e retenção de água, ar e calor (COSTA, C., 2015).

De acordo com Fredlund & Rahardjo (1993) a Lei de Darcy também se aplica aos solos não saturados. No entanto, o coeficiente de permeabilidade não pode ser considerado uma constante, pois varia com a quantidade de água existente nos poros. Nessa condição a área disponível para o fluxo de água varia com a sucção existente na matriz do solo. A equação de Darcy sofre alterações para se adequar a condição não saturada do solo conforme a Equação (9).

$$v = -k(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

$k(\theta)$ = condutividade hidráulica não saturada

$v$ = velocidade (ou densidade) de descarga

$\theta$ = umidade volumétrica do solo

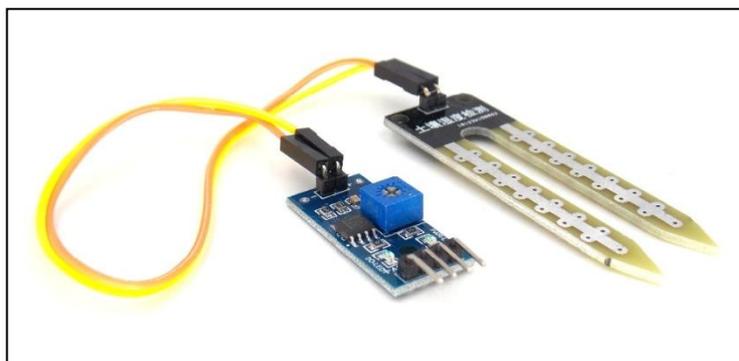
$z$ = coordenada de posição

$\Psi$ = potencial total do solo não saturado

Assim, a utilização de sensores capacitivos para verificação da umidade gravimétrica e da sucção matricial do solo utilizado na camada de cobertura é uma técnica que pode

contribuir para o entendimento do comportamento desse sistema de proteção superficial de aterros de resíduos sólidos. Os sensores do tipo capacitivos têm seu princípio de funcionamento baseado na capacitância elétrica, Figura 19. Sua aplicação tem-se difundido bastante em pesquisas relacionadas à irrigação por seu um método não destrutivo (CRUZ et al., 2010).

Figura 19 - Sensor capacitivo de verificação da umidade do solo.



Fonte: Homepage Filipeflop (2017).

O princípio de funcionamento do equipamento consiste em monitorar a umidade do solo com base na variação do dielétrico, já que a mudança deste vai resultar na variação do campo elétrico gerado entre os eletrodos do sensor. Um campo elétrico é formado e ocorre uma perturbação quando qualquer material entra nesse campo, causando uma variação na oscilação, que se mantém enquanto esse material permanecer dentro do campo. Qualquer material isolante que preencher o espaço entre as placas de um capacitor é denominado de dielétrico, e terá atribuído a si um valor específico, que varia de acordo com sua composição. (LEME, 2015).

Em virtude de os sensores determinarem o conteúdo de água do solo de forma indireta é imprescindível a realização de calibrações para os solos a serem monitorados, em razão das diferenças físicas que estes apresentam. Essas calibrações podem ser realizadas em condições de laboratório e são bastante representativas, pois são utilizadas em amostras de solo que preservam suas características (CRUZ et al., 2010). A utilização desses sensores permite a previsão de fissuras e a elaboração de técnicas de reparação da camada. Quando instalados em perfis experimentais, é possível observar as condições de infiltração de água ao longo da espessura do solo da camada de cobertura de aterros de resíduos sólidos e as variações de umidade e sucção que podem contribuir para o escape de gás para a atmosfera e a entrada de água para o interior do maciço sanitário.

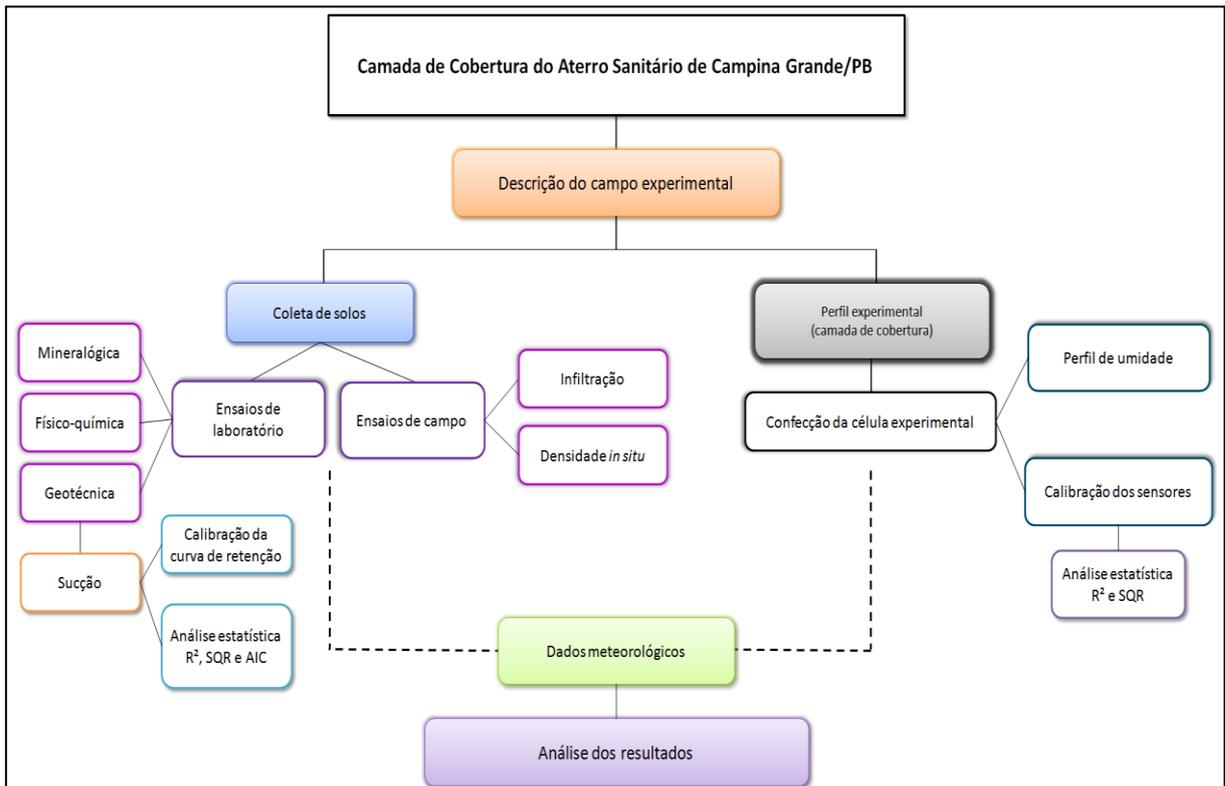
### 3 METODOLOGIA

Esta pesquisa está vinculada ao Monitoramento do Aterro Sanitário realizado pelo Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA), a partir do convênio de Nº. 001/2015, celebrado entre a ECOSOLO – Gestão Ambiental de Resíduos Ltda (responsável pela operação do aterro sanitário) e a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), tendo como interveniente a Fundação Parque Tecnológico da Paraíba (PaqTcPB). O convênio assinado em fevereiro de 2016 permite o monitoramento dos líquidos (água e lixiviado), sólidos (RSU e solos) e gases (drenos e fluxo pela camada de cobertura) do aterro por meio de visitas semanais, coleta de material para análises, realização de ensaios em laboratório e campo.

A equipe do monitoramento constituída pelo GGA é um grupo de pesquisa multidisciplinar composto por alunos de graduação em engenharia civil, química, ambiental e biologia, bem como mestrandos, doutorandos e professores de diversas áreas do conhecimento. Possui parcerias com a Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), além de parcerias nos laboratórios de Engenharia Agrícola, Engenharia Elétrica, Engenharia de Materiais e Engenharia Química, pertencentes à UFCG.

Este convênio permitiu analisar o solo utilizado na camada de cobertura do aterro a partir da realização de ensaios de campo e laboratório, para avaliação das condições de execução e desempenho do sistema de cobertura implantado no aterro sanitário frente às normas reguladoras brasileiras. As etapas realizadas na pesquisa estão elencadas na Figura 20. Além disso, realizou-se a verificação de parâmetros do solo como sendo necessário para promover a eficiência da camada de cobertura do aterro, como a umidade adequada para compactação da camada, o comportamento do solo diante dos processos de secagem/umedecimento e expansão/contração, a análise do solo no contexto da mecânica dos solos não saturados, a capacidade de retenção de água no solo e a percolação de água pela camada.

Figura 20 - Etapas da pesquisa.



Essas análises do solo, realizadas pela equipe do GGA, podem permitir o direcionamento da operação de aterros sanitários que estão em fase de projeto, implantação e execução, contribuindo assim, para uma melhor eficiência da camada de cobertura de aterros.

### 3.1 Descrição do campo experimental

A presente pesquisa foi desenvolvida no município de Campina Grande-PB, distante 134 km da capital paraibana, João Pessoa, Figura 21, sob as coordenadas geográficas: Latitude de 7°13'50" S, Longitude de 35°52'52" W e Altitude de 551 m. Localizado na região do Agreste Paraibano e inserido no Semiárido Brasileiro possui temperatura média de 22,7°C, evaporação anual de 1417,4 mm e pluviosidade média anual de 802,7 mm/ano (AESA, 2017), o que representa condições próprias das zonas semiáridas e latitudes tropicais. Situado na parte Oriental do Planalto da Borborema, com população estimada de 407.754 habitantes (IBGE, 2017), abrange uma área territorial de 594,2 km contendo ainda 4 (quatro) distritos, Catolé de Boa Vista, Catolé de Zé Ferreira, São José da Mata e Galante.

Figura 21 - Localização do município de Campina Grande-PB.



Fonte: Adaptado do Google imagens (2017).

O campo experimental desta pesquisa é o aterro sanitário situado na Fazenda Logradouro II no município de Campina Grande-PB (Figura 22), sob as coordenadas geográficas: Latitude de  $7^{\circ}16'46''$  S e Longitude de  $36^{\circ}00'45''$  W, localizado no quilômetro 10 da PB-138 que liga a cidade de Campina Grande ao distrito de Catolé de Boa Vista.

Figura 22 - Localização do Aterro Sanitário de Campina Grande-PB.

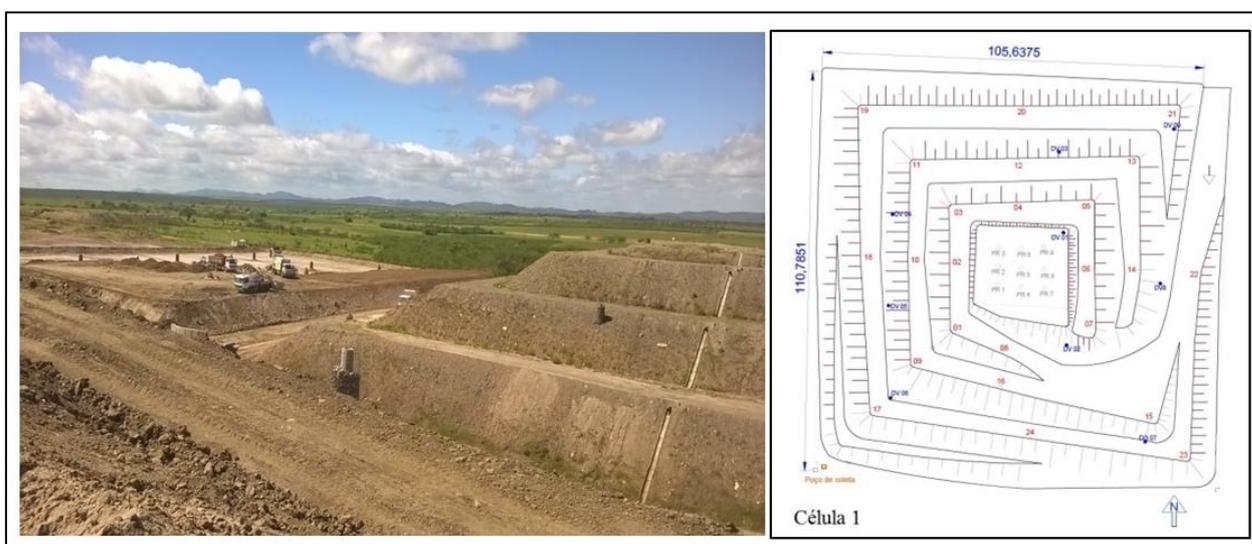


Fonte: Google Earth (2017).

O aterro se encontra em fase de operação desde o mês de julho de 2015 ocupando uma área total de 80 ha, sendo 39,384 ha destinados para construção das células de RSU. Projetado para receber inicialmente 350 toneladas de resíduos por dia, para uma vida útil de 25 anos, recebe hoje 500 toneladas de resíduos/dia do município de Campina Grande bem como contribuições dos municípios de Boa Vista, Barra de Santana, Puxinanã, Montadas e Lagoa Seca, próximos a sede do aterro.

Está prevista a execução de 20 (vinte) células de RSU com uma área de 1 ha (10000 m<sup>2</sup>) e altura de 20 m (Figura 23). A geometria definida em projeto estabelece a execução de platôs de resíduos com 5 m de altura e bermas intermediárias com 6 m de largura com inclinação máxima de taludes externos de 1:2 (vertical:horizontal) até atingir a altura de projeto.

Figura 23 - Célula do aterro sanitário.



Como material para cobertura dos resíduos, utiliza-se um solo argiloso proveniente do leito de um reservatório vazio (barragem de terra) da região do aterro sanitário, localizado a uma distância média de 1,5km do aterro sanitário, sob as coordenadas geográficas: Latitude de 7°16'49'' S e Longitude de 35°59'58'' W. A camada tem uma espessura variável de 0,60 m a 1,00 m, valor superior ao recomendado de 0,60 m (FEAM, 2006). A execução da camada é realizada com trator de esteira, para espalhamento do material, não havendo o controle da densidade *in situ* e da quantidade de água adicionada ao solo (umidade ótima) durante a sua confecção. Observou-se nessa pesquisa o comportamento da camada de cobertura de solo compactado da Célula 1 do aterro sanitário, já finalizada.

### 3.2 Coleta de solo

O solo utilizado na camada de cobertura da Célula 1 do aterro sanitário é proveniente do leito de um reservatório vazio (barragem de terra) próximo a região do aterro (Figura 24). O material a ser retirado da jazida era disposto ao ar livre no estoque de solos do aterro onde os caminhões têm acesso para sua coleta e transporte até as células do aterro.

Figura 24 - Jazida de solo.



A coleta do solo para realização dos ensaios procedeu-se obedecendo à norma NBR 9604 (ABNT, 2016), onde as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos (Figura 25) e levadas para o Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) como amostras deformadas.

Figura 25 - Coleta do solo para ensaios de caracterização.



No laboratório o solo foi espalhado ao ar livre para secagem prévia até próximo da umidade higroscópica, obedecendo aos procedimentos descritos na NBR 6457 (ABNT, 2016). Após a secagem, desmancharam-se os torrões de solo, com o cuidado para não quebrar os grãos de solo (Figura 26). Em seguida, o solo foi homogeneizado e quarteado para obtenção de uma amostra representativa em quantidade suficiente para realização dos ensaios de caracterização.

Figura 26 - Preparação de amostras para ensaios de caracterização.



A amostra para ensaio foi armazenada no laboratório para em seguida passar pelos procedimentos de peneiramento, pesagem e separação para os ensaios de caracterização conforme descrito em suas normas.

### 3.3 Caracterização do solo

A caracterização do solo da camada de cobertura compreendeu a realização de análises geotécnicas através da realização de ensaios *in situ* e em laboratório, físico-químicas e mineralógicas.

#### 3.3.1 Caracterização geotécnica

Na caracterização geotécnica de laboratório, Figura 27, realizaram-se análises que permitiram o conhecimento das propriedades do solo utilizado como camada de cobertura do aterro sanitário e avaliar a sua condição de aplicação prática especificada para o uso em

aterros sanitários segundo as NBR 13896 (ABNT, 1997), NBR 15849 (ABNT, 2010), o manual da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 1993) e as regulamentações da Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA).

Figura 27 - Caracterização física do solo em laboratório: a) massa específica dos grãos, b) compactação, c) granulometria por sedimentação, d) permeabilidade à água, e) limite de liquidez, f) granulometria por peneiramento, g) pesagem do material.



A partir dessas análises foi possível conhecer as características de condutividade hidráulica do solo na situação saturada através do ensaio de permeabilidade a carga variável vertical – NBR 14545 (ABNT, 2000), a distribuição percentual da sua granulometria – NBR 7181 (ABNT, 2016), a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima que garante uma menor compressibilidade da camada – NBR 7182 (ABNT, 2016), os Limites de Atterberg pelos ensaios de limite de liquidez – NBR 6459 (ABNT, 2016) e limite de plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 2016) com o posterior cálculo do Índice de Plasticidade (IP), e a massa específica dos grãos de solo pela NBR 6458 (ABNT, 2016). Dessa forma, classificou-se o solo de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) segundo a norma D2487 (ASTM, 2011).

Em campo, foram realizados os ensaios de peso específico aparente *in situ*, pelo método de cilindro de cravação - NBR 9813 (ABNT, 2016), que permitiu conhecer o grau de compactação e o desvio da umidade de compactação em relação à umidade ótima, a partir da cravação de um cilindro metálico no solo que possuía volume e massa conhecida, além de

arestas biseladas, para penetração na camada de cobertura e retirada de uma amostra indeformada de solo do furo executado (Figura 28-a).

Realizou-se ainda, o ensaio de infiltração da camada de cobertura, a partir de metodologia baseada na IN-09 (DEINFRA, 1994), para verificação da permeabilidade a água do solo após a execução da camada de cobertura final do aterro (Figura 28-b). Vale salientar que, os ensaios de infiltração foram executados nos mesmos furos onde se realizaram os ensaios pelo método do cilindro de cravação. Obedeceu-se uma profundidade do furo de 0,15 m, para instalação de um tubo de PVC de 150 mm, e posterior preenchimento com água e realização das leituras de altura do nível no decorrer do tempo.

Figura 28 - Ensaios de campo no aterro sanitário: a) Cilindro de cravação, b) Infiltração.



Por meio dos ensaios de campo e laboratório foi possível observar o comportamento dos parâmetros de permeabilidade e de umidade ótima do solo da camada de cobertura e propor técnicas de execução para evitar a formação de trincas e fissuras pela camada.

### 3.3.2 Caracterização físico-química

Para a caracterização físico-química avaliou-se o Potencial Hidrogeniônico (pH) e Carbono Orgânico Total (COT), EMBRAPA (2011), que expressa a intensidade da condição ácida ou básica de um determinado meio e estimar quantitativamente a fração orgânica do

solo, respectivamente. As análises de pH e COT foram realizadas no Laboratório de Irrigação e Salinidade do Departamento de Engenharia Agrícola da UFCG. A análise de Sólidos Voláteis (SV), que mede indiretamente a quantidade de matéria orgânica da amostra de solo, foi realizada no LGA seguindo a NBR 16434 (ABNT, 2015).

Os resultados dessas análises são influenciados pela composição mineralógica do solo e pelo teor e composição química da água presentes no material utilizado na camada de cobertura, sendo necessários para o entendimento da retenção e perda d'água da camada.

### 3.3.3 Caracterização mineralógica

A caracterização mineralógica para determinação da composição qualitativa e quantitativa dos componentes minerais do solo utilizado na camada de cobertura do aterro sanitário foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG. Para isso realizaram-se análises por Fluorescência de Raios-X (EDX) e Difração de Raios-X (DRX). O solo para os ensaios foi preparado no LGA, passando a amostra na peneira de abertura 0,075 mm, condição obrigatória para realização dos ensaios.

A análise de EDX que consiste numa técnica não destrutiva de caracterização permitiu identificar os elementos presentes na amostra de solo, de forma quantitativa, assim como estabelecer a proporção (concentração) em que cada elemento se encontra presente na amostra. Diante disso esta análise permitiu quantificar os percentuais de óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SrO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) presentes na amostra de solo analisada. Foi utilizado o equipamento modelo *Shimadzu EDX-720* pertencente ao laboratório de Engenharia de Materiais para realização do ensaio, Figura 29.

Figura 29 - Equipamento de análise mineralógica por Fluorescência de Raios-X (EDX).



Fonte: Catálogo de produtos Shimadzu (2016).

Já a análise por DRX consiste numa técnica de caracterização microestrutural de materiais cristalinos que permitiu determinar qualitativamente a composição mineralógica dos sólidos cristalinos presentes no solo (quartzo, feldspato, mica, caulinita, esmectita, entre outros). O resultado dessa análise consiste na obtenção de um gráfico com picos caracterizados pelas suas posições, intensidades e larguras. A difração ocorre segundo a Lei de Bragg que estabelece a relação entre a posição do ângulo de difração e a distância interplanar entre os planos cristalográficos que a originaram, que são característicos para cada fase cristalina do material. O equipamento de DRX modelo *Shimadzu XRD-6000* foi utilizado para realização desta análise sob as características de radiação de  $\text{CuK}\alpha$ , tensão de 40kV, corrente de 30mA, varredura de  $2^\circ < 2\theta < 30^\circ$  e  $\lambda = 1,54\text{\AA}$ , Figura 30.

Figura 30 - Equipamento de análise mineralógica por Difração de Raios-X (DRX).



Fonte: Catálogo de produtos Shimadzu (2016).

Tais análises possibilitaram inferir, através dos resultados obtidos de mineralogia, sobre o comportamento do solo baseado na sua composição, frente aos processos de expansão/contração e secagem/umedecimento do solo da camada de cobertura do aterro sanitário.

### 3.4 Sucção no solo

A análise do comportamento do solo não saturado compreendeu a realização do ensaio de sucção pelo método do papel filtro e o ajuste da curva experimental obtida no ensaio às curvas de ajuste encontradas na literatura. Com a realização deste ensaio foi possível observar o crescimento da sucção matricial ao longo do processo de secagem das amostras de solo e

analisar sua influência no comportamento da camada de cobertura frente à permeabilidade a água.

Procurou-se definir um intervalo de umidade adequado para realização da compactação da camada de cobertura de solo do aterro sanitário, por meio de análises laboratoriais, de modo que, houvesse a minimização da formação de trincas e fissuras, que são caminhos preferenciais de entrada de água e ar e saída do biogás para a atmosfera, bem como, promovesse a redução dos processos de contração/expansão desta camada.

### 3.4.1 Ensaio de sucção (Papel Filtro)

A construção da curva de retenção de água no solo procedeu-se a partir da realização do ensaio de sucção pelo método do papel filtro, que permitiu a observação da relação gráfica entre a sucção matricial e a umidade volumétrica ou grau de saturação. A metodologia para elaboração da curva de retenção baseou-se nos procedimentos descritos por Marinho & Oliveira (2006), Santos (2015) e pela norma D5298 (ASTM, 2010), seguindo o princípio da absorção e equilíbrio no contato entre o material poroso com deficiência de umidade (solo) e o papel filtro com umidade menor.

Para o ensaio, utilizou-se o papel filtro Whatman n.º 42 (Figura 31), que possui um diâmetro de 90 mm e uma umidade inicial de 6%, permitindo a obtenção de valores de sucção em um intervalo de zero a 29 MPa, bem como, o solo utilizado como material de camada de cobertura das células do aterro sanitário.

Figura 31 - Papel filtro Whatman n.º 42.



Na calibração do papel filtro utilizaram-se as equações propostas por Chandler et al. (1992), conforme as Equações (10) e (11):

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

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84 - 0,0622 \times W_{pf})} \quad \text{Equação (10)}$$

Umidades do papel filtro  $> 47\%$ :

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05 - 2,48 \times \text{Log}W_{pf})} \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

$W_{pf}$ : umidade do papel filtro

Para a realização do ensaio moldou-se um corpo-de-prova de solo compactado na umidade ótima, com diâmetro de 101 mm e altura de 125 mm, de onde foram retiradas três amostras em anéis metálicos com 70 mm de diâmetro e 20 mm de altura, Figura 32.

Figura 32 - Moldagem de amostras para ensaio de sucção.



Em seguida, os anéis metálicos com solo foram pesados e colocados sobre pedras porosas em uma bandeja com lâmina d'água equivalente à espessura da pedra, Figura 33. As amostras permaneceram nessa condição por um período de 7 (sete) dias até a observação de umidade na face superior do anel. Após esse período, pesaram-se novamente os corpos-de-prova para obtenção do peso úmido do material e a verificação do grau de saturação (S).

Figura 33 - Amostras com lâmina d'água e pesagem após período de saturação.



Com o peso úmido das amostras pode-se calcular a umidade gravimétrica do material por meio da razão massa de água e massa do solo seco. Durante todo o ensaio teve-se o cuidado de pesar as amostras para acompanhamento de seu ganho e perda de umidade. Através do cálculo da umidade de saturação do material estabeleceu-se para cada ponto da curva de retenção um passo de 3% de perda natural de umidade, ou seja, era observada essa perda de umidade para colocar o papel filtro Whatman nº. 42 ao longo do ensaio.

Após a pesagem e cálculo da umidade de saturação, colocaram-se dois papéis filtro, um em cada face da amostra. O primeiro papel foi colocado em contato direto com o solo, para aferição da sucção matricial, pressionado por uma esponja para garantir o contato solo+papel. O segundo papel colocado estava disposto sobre uma tela de pequena espessura, de forma que impedisse o contato do papel com o solo e fosse possível obter a sucção total da amostra.

Ao final desse procedimento, envolveram-se as amostras com filme plástico (PVC) e papel alumínio, e posteriormente acondicionou as amostras numa caixa de isopor para preservar suas condições e não ocorrer danos, Figura 34. Obedeceu-se a um período de 7 (sete) dias de equilíbrio mínimo entre o papel e o solo, para obtenção de cada ponto da curva e retirada do papel filtro, conforme descrito por Marinho & Oliveira (2006).

Figura 34 - Amostras envolvidas com filme plástico e acondicionadas.



Após o período de equilíbrio, retirou-se o papel filtro e o pesou numa balança com precisão de 0,0001 g levando-o posteriormente para estufa, por um período de 24h, para verificação da sua umidade, Figura 35.

Figura 35 - Retirada do papel filtro das amostras.



Com a umidade do papel filtro utilizaram-se as equações de Chandler et al. (1992) para obtenção das respectivas sucções matricial e total. A sucção osmótica pode ser obtida a partir da diferença entre a sucção total e a sucção matricial. Em seguida, iniciou-se o processo de secagem ao ar das amostras até a observação, por meio da pesagem do conjunto solo+anel, de 3% de perda natural de umidade. Observada essa perda de umidade colocou-se novamente o papel filtro em cada face da amostra e prosseguiu-se o ensaio com o acondicionamento das

amostras e obediência ao período mínimo de equilíbrio (7 dias). Repetiu-se esse procedimento em todos os pontos de ensaio, obtendo, dessa forma, 10 (dez) pontos na curva de retenção de água do solo da camada de cobertura do aterro sanitário.

### 3.4.2 Ajuste da curva experimental

As curvas de retenção de água no solo obtidas da equação de calibração do papel filtro, Chandler et al. (1992), foram analisadas seguindo as curvas de ajuste de Gardner (1956), Brutsaert (1967), Van Genuchten (1980), Mckee & Bumb (1987), Fredlund & Xing (1994) e Gitirana Jr. & Fredlund (2004).

Como ferramenta de tratamento dos dados experimentais para ajustar os pontos das curvas utilizou-se o *software* STATISTICA 8.0. Entendendo as curvas de ajuste propostas pelos autores como não lineares, e utilizando-se o processo iterativo de Gauss-Newton estabeleceu-se um número de interações máximas de 100 e critério de convergência de  $10^{-6}$ , onde se obteve os valores das variáveis das curvas de ajuste analisadas.

Para determinação da melhor curva verificaram-se os parâmetros de  $R^2$  (Coeficiente de Determinação), SQR (Soma dos Quadrados dos Resíduos) e o critério de escolha de melhor ajuste AIC (Critério de Informação de Akaike).

Com a verificação da melhor curva de ajuste determinou-se na curva de retenção o par ordenado formado pela sucção matricial e pela umidade gravimétrica que corresponde ao Ponto de Entrada Generalizada de Ar (GAE). Sua identificação seguiu o método gráfico proposto por Fredlund & Xing (1994), com a utilização de retas tangentes à curva de retenção de água do solo da camada de cobertura do aterro sanitário. Com o valor da umidade gravimétrica correspondente ao GAE pode-se compará-la com o valor da umidade ótima de compactação do solo e assim observar a proximidade entre esses valores.

### 3.4.3 Ensaio de permeabilidade à água com diferentes umidades de compactação

Buscou-se a definição de um intervalo de umidade de compactação do solo da camada de cobertura do aterro sanitário. Para isso, moldaram-se corpos-de-prova de solo em diferentes umidades de compactação utilizando a energia proctor normal, NBR 7182 (ABNT,

2016), para posterior realização de ensaios de permeabilidade a carga variável vertical, NBR 14545 (ABNT, 2000), na condição saturada.

As umidades de compactação para moldagem dos corpos-de-prova (9%, 15% e 24%) foram retiradas da zona de dessaturação da curva de retenção de água do solo, localizada na sua parte reta. A zona de dessaturação corresponde à região da curva entre o GAE, valor da sucção matricial na qual o solo permite a entrada de ar pelos seus maiores vazios, e a umidade residual, correspondente à umidade onde se necessita de uma grande variação de sucção para que ocorra a perda de água pelo solo. Utilizou-se a curva de retenção que relacionava os valores de sucção matricial com a umidade gravimétrica do solo para obtenção das umidades de compactação.

Após a realização dos ensaios de permeabilidade calculou-se o coeficiente de permeabilidade (k) correspondente a cada corpo-de-prova moldado. Em seguida pode-se inferir o intervalo de umidade adequado para redução da permeabilidade à água e ao ar da camada de cobertura de solo compactado de aterros sanitários a partir da curva de retenção de água via ponto de entrada de ar.

### 3.5 Ensaio de índice de expansão do solo

O ensaio de índice de expansão do solo foi realizado seguindo os procedimentos descritos na norma D4829 (ASTM, 2011). Por meio da realização desse ensaio é possível calcular o potencial de expansão do solo a partir do seu Índice de Expansão (*Expansion Index* – EI), que possui uma classificação de potencial de expansão variando de muito baixo (*very low*) a muito alto (*very high*).

Para realização do ensaio moldou-se um corpo-de-prova de solo com uma umidade equivalente a  $50 \pm 2\%$  de grau de saturação, D4829 (ASTM, 2011). O valor da umidade correspondente a este grau de saturação (S) foi calculado a partir da Equação (12):

$$S = \frac{w \times \rho_s \times \gamma_d}{\rho_s \times \gamma_w - \gamma_d} \quad \text{Equação (12)}$$

Onde:

S= grau de saturação (%)

w= umidade (%)

$\rho_s$ = massa específica dos grãos de solo, usar  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , a menos que a massa específica seja conhecida como inferior a 2,6 ou superior a 2,8.

$\gamma_w$ = peso específico da água.

$\gamma_d$ = peso específico seco da unidade de amostra de solo compactado.

Após a moldagem do corpo-de-prova retirou-se uma amostra de solo esculpindo-a em um anel metálico, utilizado no ensaio de adensamento do solo, com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura, altura inicial (H1). Em seguida o conjunto anel + solo foi confinado na caixa edométrica tendo papéis filtro e pedras porosas colocadas em cada face da amostra ensaiada.

Com a amostra no aparelho de adensamento, colocou-se uma carga vertical de confinamento de 7 kPa, D4829 (ASTM, 2011), Figura 36. A aplicação dessa carga obedeceu a um tempo de 10 min antes da amostra ser inundada com água destilada. Após esse período de tempo inicial de aplicação da carga anotou-se a leitura inicial (D1), observando o deslocamento do ponteiro do extensômetro para posterior inundação da caixa edométrica.

Figura 36 - Ensaio de índice de expansão do solo.



A segunda etapa do ensaio consistiu na inundação da amostra e observação de leituras nos tempos de 10s, 15s, 30s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1h, 2h, 4h, 6h, 8h, 24h e 48h. O critério de parada do ensaio estipula um tempo mínimo de leituras de 24h ou até que a taxa de expansão se torne inferior a  $0,005 \text{ mm/h}$ . No entanto, em nenhum caso a amostra deve ser inundada e as leituras efetuadas durante menos de 3h.

Observado o critério de parada, obteve-se a leitura final (D2) e a diferença de altura ( $\Delta H$ ), entre a leitura final e inicial, onde foi possível calcular o EI por meio da razão entre o  $\Delta H$  e a altura inicial da amostra (H1) da Equação (13).

$$EI = \frac{\Delta H}{H_1} \times 1000 \quad \text{Equação (13)}$$

Onde:

EI= índice de expansão

$\Delta H$ = diferença de altura (D2 – D1)

H1= altura inicial da amostra

Caracteriza-se o solo com potencial de expansão muito baixo (*very low*) quando possui EI de 0 a 20, baixo (*low*) de 21 a 50, médio (*medium*) de 51 a 90, alto (*high*) de 91 a 130 e muito alto (*very high*) com valores de EI superiores a 130.

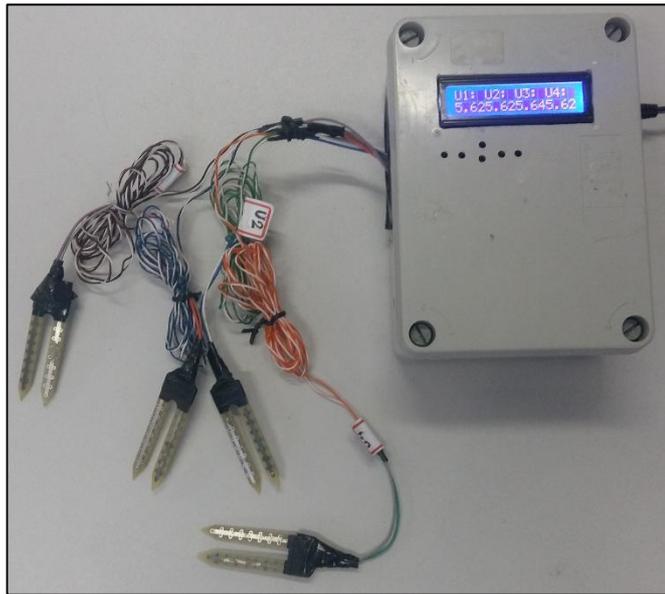
### **3.6 Perfil experimental de umidade da camada de cobertura**

Por meio do perfil experimental de umidade da camada de cobertura, foi possível entender o comportamento da umidade gravimétrica e da sucção matricial do solo utilizado no aterro sanitário a partir do desenvolvimento de uma instrumentação com possibilidade de registro automático das variações de umidade ao longo do tempo.

#### **3.6.1 Unidade automatizada de medição da umidade do solo**

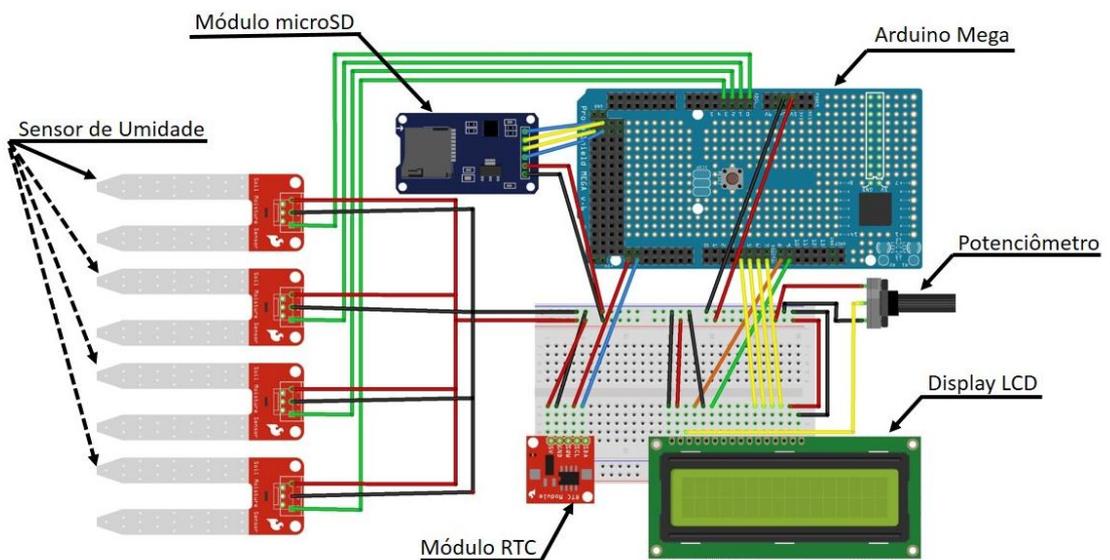
Utilizando-se uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source*, Arduino, ou seja, que possui *hardware* e *software* livre para *design* ou esquematização de um produto desenvolveu-se o sistema ilustrado na Figura 37, com a finalidade de detectar variações de umidade no perfil experimental da camada de cobertura de solo de um aterro sanitário.

Figura 37 - Unidade automatizada de medição das umidades do solo.



A unidade automatizada é constituída pelos componentes esquematizados na Figura 38, sendo composta por: Arduino Mega 2560, potenciômetro, módulo cartão microSD card (cartão com memória de 2GB), módulo Real Time Clock (RTC), display LCD 16x2, e 4 (quatro) sensores de umidade dos solos YL-69, contendo ainda uma fonte de alimentação de 9V-1A.

Figura 38 - Esquema dos componentes da unidade automatizada de medição.



Fonte: Fritzing versão 0.9.3b (2016).

Os sensores de umidade consistem basicamente em duas sondas condutoras, as quais analisam a condutividade do solo relacionando-a com a umidade do solo em contato com

estas sondas. Quando o solo apresenta-se seco, a sua resistência aumenta, dificultando a passagem de corrente. Com a absorção da água, a resistência do solo diminui permitindo a passagem de corrente entre os eletrodos.

O *software* desenvolvido para este sistema armazena os dados de leituras das umidades a cada 1 (um) minuto em um cartão microSD, além de indicação das leituras no *display* LCD da unidade apresentada.

### 3.6.2 Calibração dos sensores de umidade

Para aferição da umidade do solo foram calibrados 4 (quatro) sensores a partir de uma metodologia própria desenvolvida pelo grupo de pesquisa no qual esse trabalho está inserido, (GGA/UFCG, 2016). Por meio do método desenvolvido, originou-se uma equação geral de calibração dos sensores, obtida por regressão linear simples, tendo como resposta imediata a umidade do solo.

Inicialmente, separou-se uma determinada massa de solo passado na peneira de abertura 4,8mm (nº. 4), Figura 39, e retiraram-se três amostras em cápsulas cerâmicas (cadinhos), com massa mínima de 100 g cada, para verificação da umidade inicial do solo pelo método da estufa, permanecendo na estufa por 24 horas conforme a NBR 6457 (ABNT, 2016).

Figura 39 - Solo para calibração dos sensores de umidade.



O método consistia na adição de 10 mL de água destilada à massa de solo, de maneira progressiva, para verificação do aumento de umidade, contrapondo as leituras por meio dos sensores e do método da estufa. Ao adicionar a quantidade de água estabelecida na amostra,

realizou-se a homogeneização do material. Após misturá-la, adicionaram-se porções da amostra em 4 (quatro) béqueres de vidro de 50 mL e em seguida, inseriu-se o sensor em cada amostra para verificação da umidade do solo, Figura 40.

Figura 40 - Procedimento de aferição da umidade do solo.



Com os sensores inseridos na mistura de solo+água aguardou-se um tempo de 5min para estabilização da leitura no *display* do equipamento para registrar a umidade indicada. Realizada a leitura, retiraram-se as amostras dos béqueres colocando-as em cápsulas cerâmicas para aferição da umidade pelo método da estufa, Figura 41, e assim obtenção dos dados para efeito comparativo. Terminado esse procedimento, adicionou-se a mesma quantidade de água destilada à amostra remanescente e repetiram-se os procedimentos já descritos para obter o aumento progressivo da umidade da amostra.

Figura 41 - Verificação da umidade do solo pelo método da estufa.



O critério de parada da calibração foi a observação da completa saturação da amostra de solo remanescente para homogeneização e a constância nas leituras de umidade indicadas pelo equipamento. Ressalta-se que, obteve-se a leitura inicial com a amostra seca ao ar, na sua umidade higroscópica.

Ao final da calibração foi possível a elaboração de um gráfico que relacionava as leituras dos sensores pelos valores de umidade do solo obtidos na estufa. O gráfico foi analisado estatisticamente utilizando-se regressão linear simples, através da verificação do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e da Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR), onde foi possível obter uma função geral de calibração dos sensores para o solo utilizado na camada de cobertura do aterro sanitário.

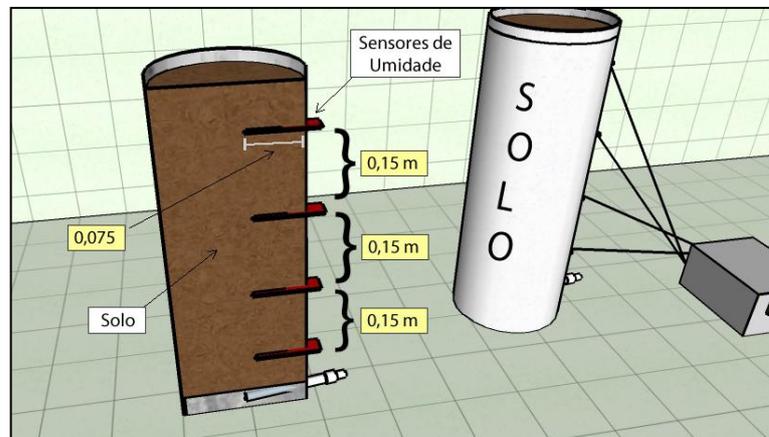
### **3.6.3 Perfil de umidade da camada de cobertura experimental em laboratório**

A camada de cobertura experimental confeccionada com o solo do aterro sanitário foi utilizada para observação do avanço da frente de umedecimento ao longo da sua espessura. O avanço da umidade possibilitou o cálculo da permeabilidade à água do solo em sua condição saturada, a perda de umidade com o tempo e o comportamento da sucção matricial na profundidade da camada experimental ao longo do tempo. Vale ressaltar que, a célula experimental (lisímetro) foi mantida em condições controladas de laboratório.

Para o estudo da frente de umidade da camada de cobertura experimental, confeccionou-se uma célula em tubo PVC com formato cilíndrico, diâmetro de 150 mm, altura de 700 mm e vedada com o CAP de 150 mm de diâmetro. Essa célula possui na sua

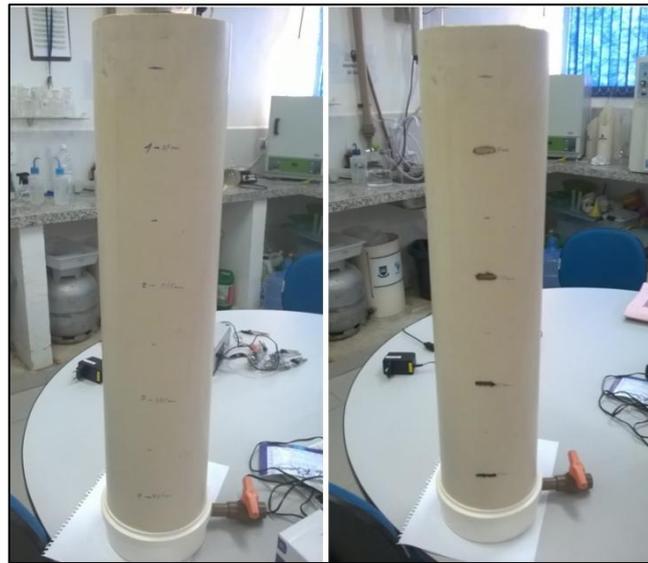
base um sistema simples de drenagem com 0,05 m de altura, composto por um dreno perfurado em tubo PVC de 20 mm, registro de esfera soldável (20 mm), brita 0 (dimensões de 2,36 mm a 12,5 mm) e uma tela de PVC para evitar o carreamento do material e obstrução do dreno, (Figura 42).

Figura 42 - Croqui esquemático da célula experimental.



Após a confecção da célula, procedeu-se a locação e perfuração lateral para a inserção dos sensores ao longo da altura da célula, Figura 43. Estabeleceu-se uma altura da camada experimental de 0,60 m, por ser a máxima recomendada (FEAM, 2006), onde os sensores foram distribuídos de maneira equidistante, deixando uma folga de 0,05 m sem material para instalação do sensor mais próximo da superfície. O primeiro sensor, denominado S1, foi posicionado a uma distância 0,075 m da superfície do solo, estando distantes 0,15 m do S2, 0,30 m do S3 e 0,45 m do S4. Os sensores de umidade do tipo capacitivos instalados ao longo da altura do perfil permitiram verificar a umidade do solo durante um horizonte temporal que compreenderam os dias de 14 de dezembro de 2016 a 21 de janeiro de 2017, devido ao tempo remanescente da pesquisa.

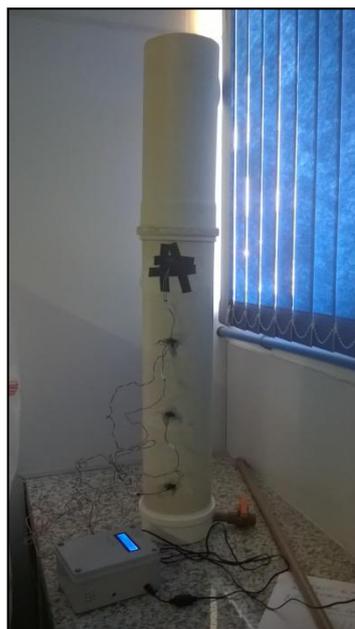
Figura 43 - Posicionamento dos sensores na célula experimental.



A célula foi preenchida com o solo da camada de cobertura na sua condição natural, ou seja, na sua umidade higroscópica (entre 3% e 6%), tendo o cuidado de passá-lo na peneira de abertura 4,8mm e sem a realização de compactação. Tal procedimento foi adotado como forma de simulação das condições reais de execução da camada no aterro.

Com o preenchimento da célula e o devido posicionamento dos sensores, observou-se durante um período de 7 (sete) dias, em laboratório, o comportamento da umidade da camada experimental ao longo da sua profundidade. Após esse período, anexou-se à célula um tubo de PVC de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura para realização de inundação (Figura 44). A célula foi inundada de uma só vez com um volume de água de aproximadamente 6 (seis) litros, que corresponde ao volume do tubo de PVC adicionado no topo da célula, utilizando um chuveiro plástico de igual diâmetro do tubo, de forma que garantisse a uniformidade na queda da água sobre o solo e evitasse a formação de um vórtice na parte superficial da camada. Após a inundação foi possível acompanhar o avanço da frente de umidade, ao longo de um mês de dados coletados, e armazenados no módulo cartão microSD card (cartão de memória), componente da unidade automatizada desenvolvida.

Figura 44 - Complemento de tubo adicionado para inundação da célula experimental.



A partir desses dados coletados observou-se a velocidade de percolação da água pela camada de solo, o comportamento da sucção matricial à medida que ocorria a drenagem da camada e a perda d'água da camada experimental durante o período de monitoramento. A célula experimental foi mantida em condições controladas de laboratório para observação da umidade do solo verificada pelos sensores, sem a influência de agentes externos, como a variação da temperatura ambiente.

### **3.7 Dados meteorológicos**

Os dados meteorológicos foram coletados nos portais eletrônicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), registrados pela estação situada na EMBRAPA/Algodão que fica na cidade de Campina Grande-PB, distante 13,8km do aterro sanitário, sob as coordenadas geográficas: Latitude de 7°13'S, Longitude de 35°53'W e Altitude de 546m, e da AESA. Analisou-se o clima do município de Campina Grande-PB, onde está localizado o aterro sanitário, a partir dos dados meteorológicos de precipitação mensal acumulada (Jan/16 – Fev/17), os dados históricos de precipitação (1961-1990), a insolação mensal acumulada, as temperaturas médias mensais (máxima e mínima) e a evapotranspiração mensal. O horizonte temporal de monitoramento compreendeu o período de janeiro de 2016 a fevereiro de 2017. A partir desses dados foi possível inferir sobre sua interferência nas propriedades físicas e físico-químicas da camada de cobertura de solo compactado do aterro sanitário.

## **4 RESULTADOS**

A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio da realização de ensaios em campo e laboratório do solo da camada de cobertura. Os resultados permitiram avaliar as suas características físicas, físico-químicas e mineralógicas, bem como sua adequabilidade para uso em aterros sanitários segundo as normas nacionais, os manuais das companhias ambientais, as regulamentações e as diretivas internacionais. Pode-se realizar também a análise das curvas de retenção de água no solo, via ponto de entrada generalizada de ar (GAE), para definição do intervalo de umidade de compactação adequado para camada de cobertura do Aterro Sanitário de Campina Grande.

### **4.1 Caracterização do solo**

#### **4.1.1 Caracterização física**

A partir da observação de campo, pode-se dizer que o tipo de camada de cobertura do aterro sanitário é classificado como CCL (camada de argila compactada), denominado convencional ou resistivo. Esse tipo de camada não é adequado para regiões de climas áridos ou semiáridos, como Campina Grande-PB, pois esse sistema sofre modificações físicas significativas, como a formação de fissuras e trincas, que são caminhos preferenciais de entrada de água da chuva e saída do biogás para a atmosfera (ZORNBERG et al., 2003; USEPA, 2004; SOARES, 2011). De acordo com a USEPA (2011), a camada de cobertura do tipo evapotranspirativa é a mais indicada para regiões de clima seco e semiárido.

##### ***4.1.1.1 Umidade e Peso específico dos grãos de solo***

O solo utilizado como material de cobertura dos resíduos do aterro sanitário apresenta umidade variando entre 3,0% a 6,0%, caracterizado como um solo seco. Segundo Menezes et al. (2013) na região semiárida do Nordeste brasileiro predominam os solos rasos, que tendem a se saturar na chuva e ressecar facilmente nos períodos de estiagem, com vegetação típica de

caatinga, clima tropical quente, elevados índices de evapotranspiração durante todo o ano e grandes variações pluviométricas.

A partir da análise do ensaio de peso específico dos grãos encontrou-se um valor de 24,97 kN/m<sup>3</sup>, que de acordo com Carvalho (2004) e Chiossi (2013), representa a presença do mineral feldspato (25 kN/m<sup>3</sup> - 27,1 kN/m<sup>3</sup>) existente no solo da camada de cobertura do aterro. O feldspato é um mineral primário da família dos aluminossilicatos, podendo ser encontrado em quase todas as rochas ígneas e metamórficas, assim como em algumas rochas sedimentares (LIRA & NEVES, 2013).

#### 4.1.1.2 Análise granulométrica

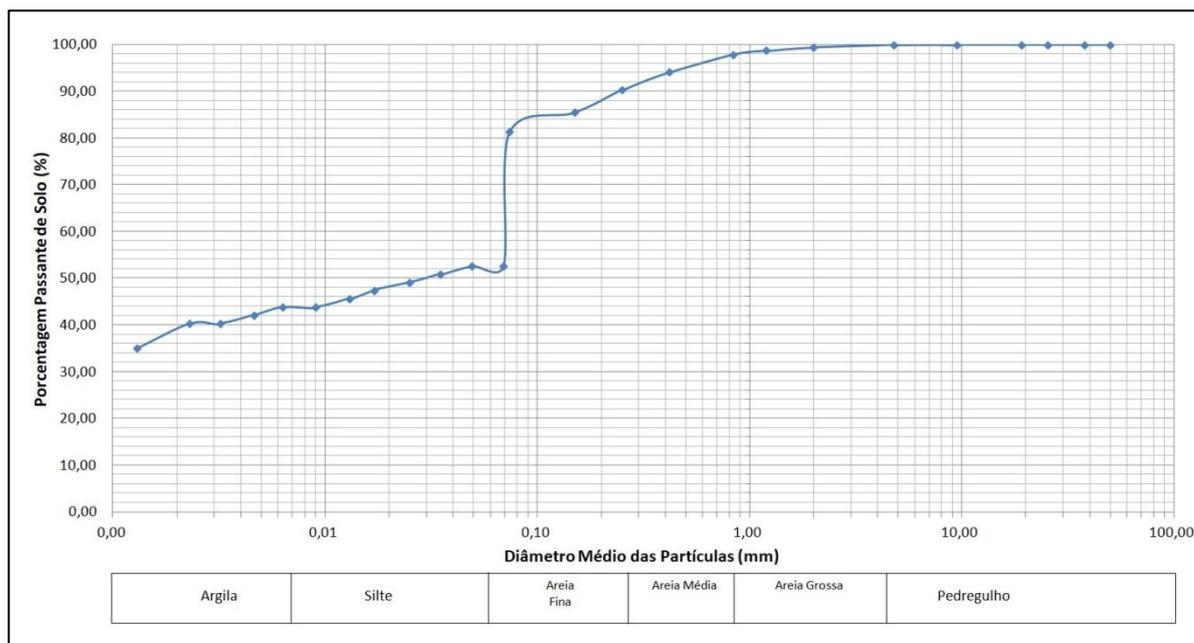
A distribuição granulométrica do solo utilizado na camada de cobertura apresenta 42% de argila, particularidade de um solo fino, e predominância de 47,19% de areia na composição do solo, que conforme Chaves (2006) corrobora com a predominância de 95% do mineral silicato (SiO<sub>4</sub>) na crosta terrestre, Tabela 4. Conforme Araujo et al. (2014), a alta porcentagem de argila na composição do solo indica a característica de um solo argiloso.

Tabela 4 - Composição granulométrica do solo (Escala ABNT).

Solo	Porcentagem retida (%)
Pedregulho (acima de 4,8 mm)	0,12
Areia Grossa (0,84 – 4,8 mm)	1,99
Areia Média (0,25 – 0,84 mm)	7,60
Areia Fina (0,05 – 0,25 mm)	37,60
Silte (0,005 – 0,05 mm)	10,54
Argila (<0,005 mm)	42,15
<b>Total</b>	<b>100,0</b>

De acordo com a USEPA (2004), o solo para utilização em aterros deve possuir porcentagem de finos entre 30% a 50%. Para a CETESB (1993), o solo deve conter mais de 30% de granulometria fina em sua composição. Diante disso, pode-se afirmar que o solo possui as características granulométricas adequadas para uso em aterro sanitário e apresenta percentuais de partículas que variam de pedregulho a argila, conforme as regulações citadas anteriormente, e apresenta curva granulométrica apresentada na Figura 45.

Figura 45 - Curva granulométrica do solo da camada de cobertura.



Observa-se na curva, a formação de um patamar (ou degrau), localizado abaixo da dimensão de 0,075 mm (peneira de nº 200), que representa o último ponto da parte do ensaio de peneiramento e início da fase de sedimentação do solo. Essa característica da curva, segundo Pinto (2006), é de um solo com distribuição granulométrica descontínua, ou seja, apresenta predominância de solos granulares com finos preenchendo os vazios. Problemas durante o procedimento de lavagem do material podem ocasionar esse degrau na curva granulométrica. O ensaio de granulometria por sedimentação foi realizado com a utilização de uma solução diluída em água destilada dos compostos defloculantes, hexametáfosfato de sódio (( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>) e carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

#### 4.1.1.3 Limites de consistência e Classificação SUCS

Encontrou-se Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), da ordem de 32% e 24%, respectivamente, e Índice de Plasticidade (IP) do solo de 8%. Por esses índices pode-se observar que o solo atende aos requisitos propostos pela USEPA (2004), que determina um IP entre 7% a 15%, e pela CETESB (1993), que estabelece um LL maior ou igual a 30%.

O IP do solo identifica-o com a característica de medianamente plástico, pois o seu valor encontra-se entre 7% e 15% segundo a classificação de Jenkins, que determina o caráter

de plasticidade do solo (CAPUTO, 1988). A mesma classificação foi encontrada por Silva et al. (2016) ao estudarem o solo de cobertura utilizado numa célula experimental que simulava um aterro sanitário. Os Limites de Atterberg permitem ainda a análise de outras relações como o Índice de Atividade (IA) e o Índice de Consistência (IC), bem como a classificação do solo segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), D2487 (ASTM, 2011).

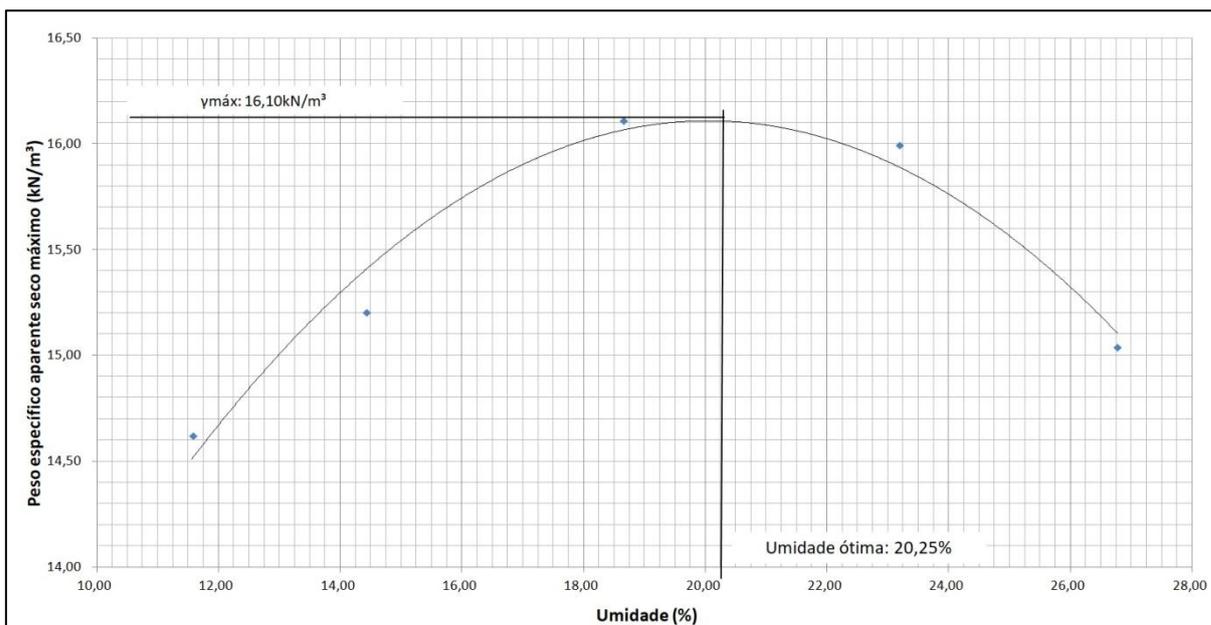
O índice IA, ou de Skempton (1953), com valor de 0,22, menor que 0,75, aponta a inatividade da argila, conforme sua classificação. Este índice indica que o potencial de variação de umidade e volume por ação da argila é considerado baixo, ou seja, o solo não apresenta índice de expansão alto quando úmido, e grande incidência de fissuras ou trincas quando seco. Já o índice IC de 3,36, maior que 1,0, indica uma argila de consistência dura, ou seja, conforme Pinto (2006), situa a umidade do solo no intervalo de interesse para a utilização na prática (intervalo de umidade até a plasticidade), bem como dá indicativos de sua resistência a compressão simples.

Classificado como CL, ou seja, argila inorgânica de mediana plasticidade, de acordo com a classificação SUCS, o solo se encontra dentro da classificação proposta pela CETESB (1993), que enquadra os tipos de solos para aterros em CL, CH, SC ou OH, assim como, dá indícios da baixa permeabilidade a água do material.

#### ***4.1.1.4 Compactação***

Na realização do ensaio de compactação Proctor Normal do solo utilizado na cobertura do aterro, obteve-se umidade ótima de 20,25% e peso específico aparente seco máximo de 16,10 kN/m<sup>3</sup>, Figura 46. O valor de umidade ótima encontrado é próximo aos valores de Santos & Ferreira (2015) e de Costa (2015), que analisaram camadas de cobertura de solo compactado de aterros sanitários. A umidade ótima encontrada está situada acima de 80% de grau de saturação, confirmando a afirmação de PINTO (2006). Segundo Araujo et al. (2016), os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima não constituem índices físicos do solo e dependem da energia de compactação empregada.

Figura 46 - Curva de compactação do solo.



A partir da razão entre os pesos específicos aparentes de laboratório ( $16,10 \text{ kN/m}^3$ ) e a verificação de campo pelo método de cilindro de cravação ( $15,70 \text{ kN/m}^3$ ), obteve-se um Grau de Compactação (GC) superior a 95%, demonstrando que o solo está na sua máxima resistência, menor índice de vazios e menor permeabilidade a água. Possui porosidade ( $n$ ) de 35,5% e índice de vazios ( $e$ ) de 0,55. De acordo com Kabir & Taha (2004), o solo possui característica adequada para uso em aterro sanitário, pois apresenta peso específico máximo superior a  $14,50 \text{ kN/m}^3$ . No trabalho de Amadi et al. (2015), todas as amostras de solo analisadas atenderam à exigências de peso específico máximo no ensaios de compactação, para utilização como barreira de aterro sanitário.

Vale salientar que não existe regulamentação nacional uniforme ou internacional que especifique a execução da camada de cobertura de aterros sanitários usando os parâmetros de compactação. No entanto, segundo Mahler & Huse (2015), o solo compactado, próximo da umidade ótima, não apresenta permeabilidade suficiente para controlar a entrada de água no aterro, a produção de lixiviado e a saída de gases para atmosfera. Isso pode ser comprovado ao se analisar a curva de retenção de água no solo, onde esta umidade representa o início da dessaturação do solo e a formação de canais contínuos da fase gasosa (ar) no solo.

#### 4.1.1.5 Permeabilidade a água

A permeabilidade saturada do solo a água encontrada em laboratório,  $2,77 \times 10^{-8}$  m/s, está coerente com a NBR 13896 (ABNT, 1997), o coeficiente de  $10^{-8}$  m/s, e próximo ao valor da USEPA (2004), com valor de  $10^{-9}$  m/s, no entanto está 100 vezes maior que o referencial da Norma Alemã (1993),  $5 \times 10^{-10}$  m/s. Essas regulações estabelecem como parâmetro para o uso do solo em aterros sanitários apenas a permeabilidade a água. Esse valor foi encontrado em um corpo-de-prova moldado na umidade ótima e na energia proctor normal, fato que pode ser modificado com a aplicação de uma energia maior de compactação. O valor encontrado é equivalente ao encontrado por Santos (2015),  $2 \times 10^{-8}$  m/s, e próximo ao de Lopes (2011),  $1,5 \times 10^{-9}$  m/s, ao analisarem a camada de cobertura de solo compactado do Aterro da Muribeca (Recife-PE).

A verificação da permeabilidade *in situ* ( $3,87 \times 10^{-8}$  m/s), através do ensaio de infiltração, também apresenta características semelhantes à permeabilidade em laboratório, corroborando a viabilidade do uso do solo em camada de cobertura de aterro sanitário. Vale salientar que a permeabilidade *in situ* está na condição não saturada do solo, que pode ter sido influenciada por fatores como a umidade de campo (6,6%). A diminuição da quantidade de água no solo dificulta a passagem desse fluido por entre as partículas. Os fatores que interferem na permeabilidade saturada influenciam também o fluxo na condição não saturada, são eles: o estado do solo (índice de vazios e porosidade), o grau de saturação, a estrutura e anisotropia do perfil e a temperatura do fluido.

#### 4.1.2 Caracterização físico-química

A partir da caracterização físico-química do solo da camada de cobertura pode-se verificar o teor de matéria orgânica do solo (MOS) presente em sua composição, aferir sua intensidade ácida ou básica e inferir sobre seu comportamento frente aos agentes do intemperismo.

O valor encontrado para sólidos voláteis (SV), que indica de forma indireta a presença de matéria orgânica no solo da camada de cobertura, foi da ordem de 2,95%. Esse valor, segundo Pariente & Lavee (2000), é considerado baixo, uma vez que se encontra entre 2% e

6%. Esse parâmetro é próximo ao encontrado por Santos et al.(2015), próximo a 3%, quando analisaram as relações entre os parâmetros físico-químicos (sólidos voláteis e pH) e o solo da camada de cobertura de uma célula experimental de aterro sanitário. De acordo com seus resultados, a maior quantidade de matéria orgânica está ligada ao alto valor da umidade do solo. Isso corrobora com a situação de que os SV variam ao longo do tempo e dependem das condições a que o solo está submetido. Segundo Santos et. al (2015), o valor de SV e a umidade do solo aumentam à medida que a camada de cobertura se aproxima da região de interface com os resíduos aterrados.

O Carbono Orgânico Total (COT) do solo foi de 0,90%, que segundo a EPAMIG (2012), também é considerado baixo, pois seu valor está entre 0,71% e 2%, confirmando a classificação do solo como inorgânico, conforme mencionado anteriormente. De acordo com Meurer (2004) o teor de matéria orgânica nos solos varia de 0,5% a 5% nos horizontes minerais superficiais, podendo apresentar valores mais elevados em solos orgânicos. Esse índice aponta a capacidade de retenção de água no solo, a influência no efeito de agregação e consistência das partículas, a capacidade de tamponamento (estabilização do pH), agente da capacidade de troca catiônica (CTC), controle da variação de umidade e temperatura e contribui para o desenvolvimento de vegetação superficial para proteção da camada de cobertura.

Diante desses pontos, verifica-se que, mesmo com a alta porcentagem de argila (42%), o solo não possui alta capacidade de armazenamento de água, que pode estar relacionado às demais porcentagens de materiais presentes na composição mineralógica do solo. Além disso, o baixo valor do COT inibe o crescimento de vegetação e pode indicar a alta dispersão dos grãos do solo com seu possível arraste, ocasionado pelas águas das chuvas que infiltram pela superfície da camada e provocam erosão superficial. A baixa concentração de MOS na sua composição, o efeito do arraste das partículas pela erosão, a inatividade da argila comprovada pelos limites de consistência, indicam a facilidade de desagregação das partículas que podem provocar um aumento da permeabilidade do solo ao longo tempo e a sua desestabilização caso não ocorra reparos nesse sistema.

A medida da acidez ou alcalinidade do solo observada pelo pH em água é da ordem de 6,45, considerado de acidez fraca, pois está inserido na faixa de 6,1 a 6,9 para classificação química, e alto pela classificação agrônômica, 6,1 a 7, EPAMIG (2012), encontrando-se perto da neutralidade. Segundo Souza (2017) os solos possuem pH variando de 3 a 9, sendo que, aqueles provenientes de regiões úmidas (lagos, pântanos, rios) apresentam pH menor que 6,5

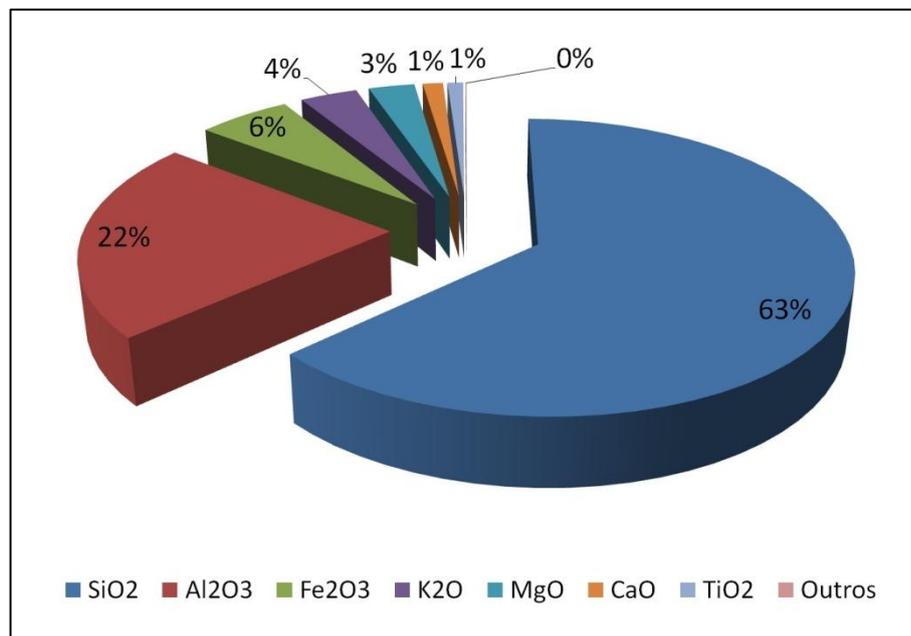
e são caracterizados como argilosos, dessa forma, o solo utilizado na camada de cobertura do aterro se enquadra nas características mencionados pelo autor.

Por ser um material utilizado na cobertura de aterros, o pH do solo pode variar ao longo do tempo tornando-se ácido, o que impossibilita o desenvolvimento de vegetação para proteção superficial do sistema. O pH ideal para desenvolvimento de plantas varia de 6 a 6,8, chamado ponto de equilíbrio no qual a maioria dos nutrientes permanecem disponíveis às raízes (SOUZA, 2017). A capacidade de tamponamento, resistência às modificações do pH do solo provocada pela presença da MOS, pode ser inibida, pois sua concentração é baixa e permite variações no pH ao longo do tempo. Vale salientar que, o pH é um parâmetro que está ligado à presença de MOS e ao teor de umidade do solo (SANTOS et al., 2015).

#### 4.1.3 Caracterização química e mineralógica

Por meio da análise química por Fluorescência de Raios-X do solo da camada de cobertura do aterro sanitário, pode-se observar a composição do solo de forma quantitativa, Figura 47, onde se verifica a predominância dos óxidos de silício ( $\text{SiO}_2$ ) da ordem de 63%, do óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 22%, e do óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de 6%. A composição química encontrada por Silva (2016) foi 55% de sílica e 23% de óxido de alumínio no solo utilizado em camada de base e cobertura de uma célula experimental de aterro sanitário.

Figura 47 - Composição química do solo da camada de cobertura.



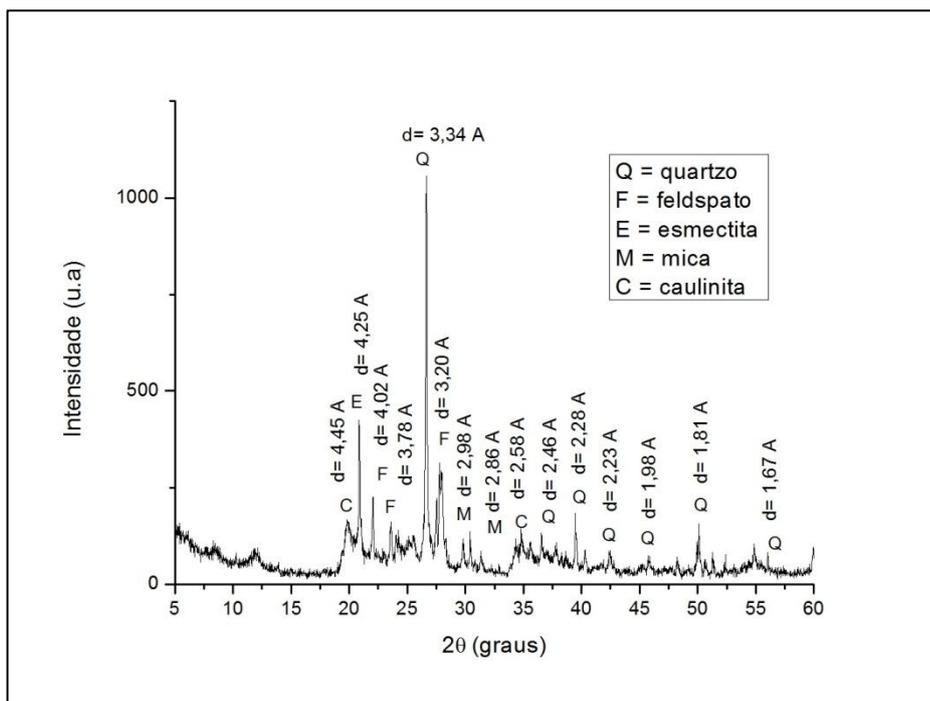
Os óxidos de silício e de alumínio estão presentes na constituição dos argilominerais, em suas camadas tetraédricas e octaédricas, respectivamente. Segundo Carvalho (2004), do ponto de vista químico, os argilominerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro/magnésio. No entanto, os grupos de argilominerais, as espécies mineralógicas e as respectivas composições químicas apresentam variações que provocam mudanças em suas propriedades químicas, físicas, mecânicas e tecnológicas (SANTOS, 1975).

A alta porcentagem de sílica na composição do solo confirma a presença de areia, como demonstrado na granulometria do material (47%), o que contribui para uma redução na capacidade de retenção de água e da plasticidade do material. Os óxidos de ferro mais abundantes no solo são a hematita e a goethita, ocorrem em solos sujeitos a elevada incidência solar, pH baixo e capacidade de modificar a coloração de solos.

A partir da análise mineralógica por Difração de Raios-X (DRX), Figura 48, observam-se picos característicos de quartzo, caulinita, esmectita, mica e feldspato. A presença do quartzo corrobora com o percentual elevado de material granular (areia) na composição do solo. O quartzo é um mineral primário, ou seja, proveniente do material que deu origem, altamente resistente ao intemperismo e que não adsorve água a sua estrutura sólida (ERNANI, 2008).

Verifica-se o indicativo da presença de caulinita na mineralogia do solo, onde segundo Silva (2015), influencia nas características de plasticidade do material, e que confirma a classificação do solo estudado como argila inorgânica de mediana plasticidade. A caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) é um argilomineral do tipo 1:1 não expansivo que possui uma estrutura que resiste à penetração da água entre suas camadas (MEURER, 2004). A caulinita é típica de solos ácidos e com baixa disponibilidade de nutrientes (ERNANI, 2008), confirmando a característica de baixa concentração de MOS.

Figura 48 - Difratoograma de Raios-X do solo da camada de cobertura.



Verifica-se também, a possível existência de mica à mineralogia do solo. As micas são filossilicatos, não expansivas que ocorrem principalmente em solos jovens e predominam na fração granulométrica mais grossa (areia). Possui também um pico característico de esmectita, que consiste num argilomineral do tipo, 2:1, e expansivos. As esmectitas são originadas de processos de intemperização da mica e do feldspato presentes na mineralogia do solo. Atribuem a característica de expansiva ao solo quando úmidos e contrátil quando secos. Diante disso, a incidência de fissuras e trincas em pontos da camada de cobertura pode ser comprovada.

#### 4.2 Curva de retenção de água no solo

Obteve-se a curva de retenção de água no solo por meio da determinação indireta da sucção pelo método do papel filtro. Durante o ensaio pode-se verificar os valores de sucção matricial através da análise de 10 (dez) pontos na curva de calibração, obtidos pelo procedimento de secagem (curva de drenagem), e calibrados conforme a equação proposta por Chandler et al. (1992), por ser a mais usual.

### 4.2.1 Análise da sucção no solo

As curvas obtidas apresentam as relações da sucção matricial ( $\psi$ ) com a umidade volumétrica ( $\theta$ ), Figura 49, e a umidade gravimétrica do solo ( $w$ ), Figura 50. Segundo Almeida (2011), a determinação da curva característica é de fundamental importância para entender o comportamento do solo no que diz respeito à sua capacidade de armazenar água quando submetido a diferentes valores de sucção. O formato das curvas se assemelha com as de Santos (2015), que apresentaram características de curvas de solos finos.

Figura 49 - Curva característica: Umidade volumétrica x Sucção Matricial.

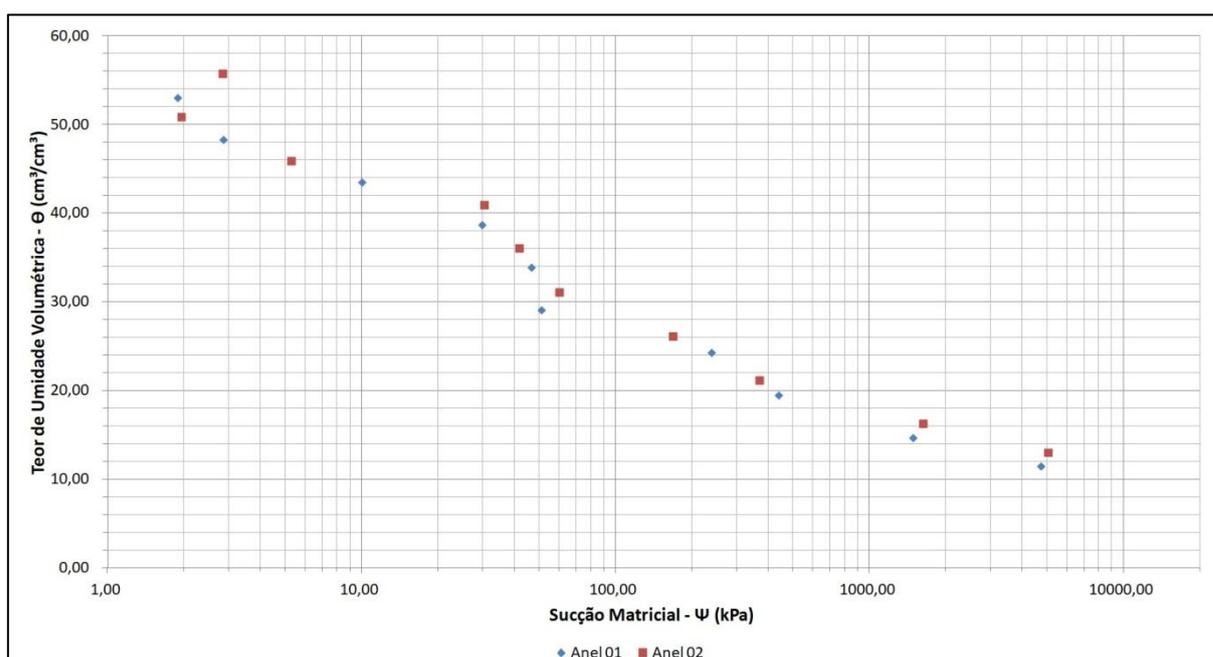
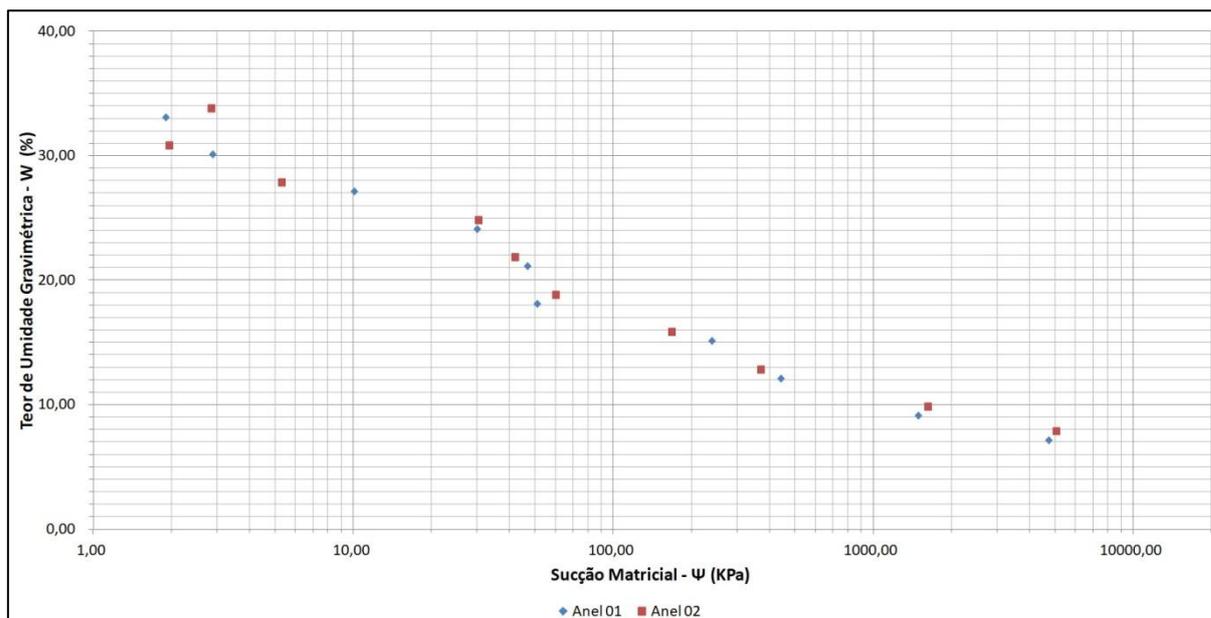


Figura 50 - Curva característica: Umidade gravimétrica x Sucção Matricial.



Os valores de sucção matricial variaram de cerca de 2 kPa a 5000 kPa para os anéis 01 e 02 e apresentaram valores de sucção e umidades próximas nas duas amostras. A variação de sucção se assemelha com a encontrada por Menezes & Pejon (2010) ao estudarem a influência da umidade na absorção e na sucção em solos argilosos. Observa-se a convergência das curvas para o ponto de umidade gravimétrica de 22% (volumétrica de,  $\theta=35\%$ ), que corresponde à completa saturação das amostras de solo. O valor da sucção nesse ponto é referente a 30 kPa.

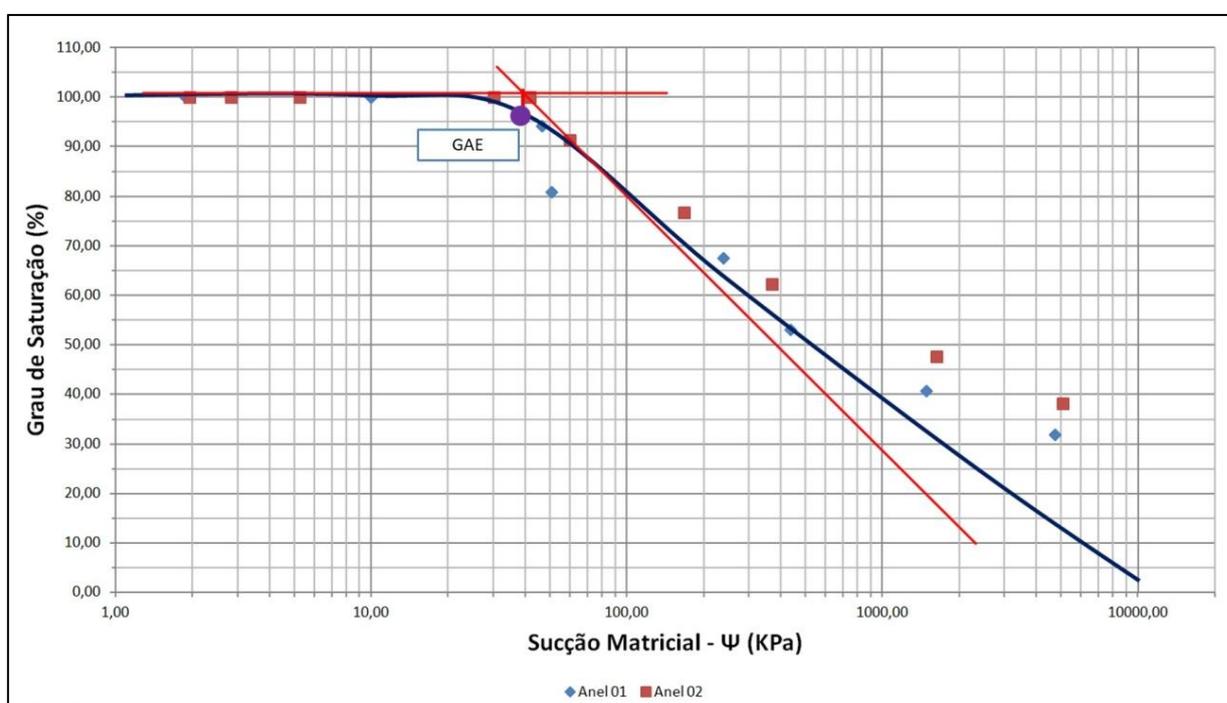
A porosidade das amostras foi igual a 55% após a saturação, valor referente a umidade volumétrica inicial do gráfico, e índice de vazios de 0,84. Ao término do ensaio a porosidade foi reduzida para 35% e o índice de vazios para 0,54. Essa variação corresponde aos períodos de saturação, com adsorção de água pelo solo; e a secagem, com a drenagem da água contida no solo. Ao final dos ensaios verificaram-se as dimensões das amostras de solo e observou-se uma redução de 13% do seu volume total. Essa redução volumétrica deve-se a perda de água pelas amostras, bem como dá indicativos do aumento da permeabilidade ao ar e gases pela camada de cobertura.

O solo possui umidade gravimétrica residual de 7% ( $\theta_{Res}= 11\%$ ) próxima a umidade natural mencionada anteriormente, e sucção residual ( $\psi_{Res}$ ) de 5000 kPa. Seu grau de saturação residual do solo ( $S_{Res}$ ) é equivalente a 35%. Segundo Camapum de Carvalho et al. (2015), esse ponto corresponde àquela quantidade de água armazenada nos poros do material em condição relativamente menos livre do que a água drenada na forma de fluxo líquido.

Considerando os pontos até 1000 kPa pode-se analisar a relação entre a umidade gravimétrica e a sucção matricial ( $C=\Delta w/\log\Delta\psi$ ). Segundo Barbour (1998), a faixa entre 0 e 1000 kPa de sucção nas curvas características refere-se à atuação da fase líquida, de energia mecânica e de forças de capilaridade no solo, enquanto a faixa a partir de 1000 kPa compreende a fase de vapor, energia química e forças de adsorção. Essa relação expressa à capacidade de retenção de água pelo solo, ou seja, a capacidade de perda ou ganho de umidade pelo solo, que depende de parâmetros físicos como, consistência do solo, variação da umidade, histerese, entre outros. Verificou-se para o anel 01 e 02 valores de 6,4% e 6,5%, respectivamente. Os valores de capacidade diferencial de umidade foram superiores aos encontrados por Lopes (2011) e Santos (2015), que estudaram tipos de camadas de cobertura para aterros de RSU (metanotróficas, convencional e barreira capilar) e a adição de compostos orgânicos à camada de cobertura, respectivamente.

Observa-se pela Figura 51, a formação de duas regiões na curva característica do solo pela análise do grau de saturação com a sucção matricial. Verifica-se a primeira região, denominada zona saturada, onde os poros estão preenchidos por água e o ar encontra-se ocluso ou dissolvido na fase líquida, apresentando sucções variando de 2 kPa a 30 kPa. E a segunda região, denominada zona de dessaturação, que possui sucções variando de 30 kPa a 5000 kPa.

Figura 51 - Curva característica: Grau de Saturação x Sucção Matricial.



A partir da curva característica que relaciona o grau de saturação com a sucção matricial, pode-se determinar por relações gráficas, Fredlund & Xing (1994), o ponto de entrada generalizada de ar (GAE) do solo da camada de cobertura. De acordo com Lopes (2011), o GAE refere-se ao ponto de mudança acentuada na curva de dessaturação do solo. O valor encontrado na curva está entre 90% e 100% de saturação do solo, cujo valor da sucção ( $\psi_b$ ) é de 40 kPa e equivale a uma umidade volumétrica de 33% e umidade gravimétrica de 21%. Verifica-se que o valor do GAE é próximo ao valor da umidade ótima do solo (20,25%).

Essa observação foi feita por Santos (2015) a partir da análise de trabalhos de alguns pesquisadores (MACIEL, 2003; VIEIRA, 2005; GUIZELINI, 2011; LOPES, 2011) que estudaram solos para camada de cobertura de aterro sanitário de RSU. Para estabelecer uma correlação entre a umidade ótima e o GAE, Santos (2015) utilizou os dados experimentais de umidade gravimétrica e sucção desses trabalhos analisados e chegou a uma expressão ( $W_{Gae}=0,731W_{Ótima}+3,4263$ ) com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,86. Concluindo que, a umidade gravimétrica do GAE de um solo compactado está relacionada com a umidade ótima.

Em sua pesquisa, Santos (2015) encontrou o valor de 17,5% de umidade gravimétrica de entrada de ar para a camada do tipo convencional do aterro sanitário da Muribeca (Recife-PE) e sucção de 1500 kPa, quando sua umidade ótima era de 18%, e observou que, Lopes (2011) apresentou GAE de 15% ( $W_{Ótima}= 19,9\%$ ) e sucção de 500 kPa ao estudar barreiras metanotróficas, também no aterro da Muribeca. Percebe-se que, o valor da sucção GAE do solo estudado nessa pesquisa é inferior quando comparada aos demais autores. Essa diferença pode estar relacionada aos parâmetros físicos dos tipos de solos e às condições geográficas que estão submetidos.

#### **4.2.2 Ajustes de curva característica**

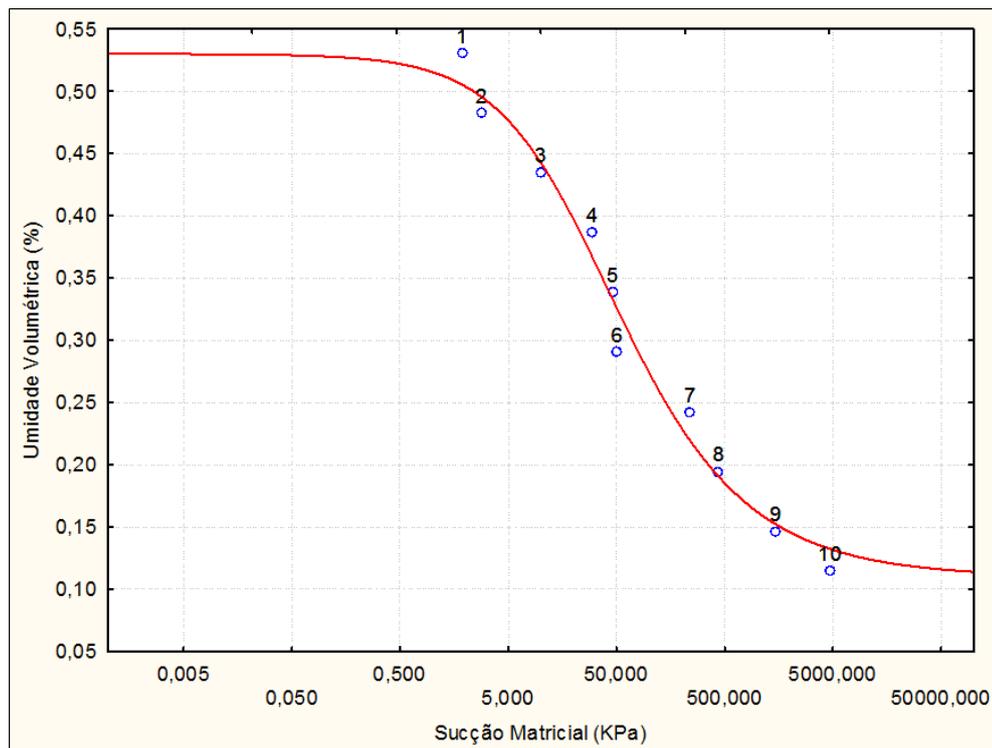
A Tabela 5 apresenta os parâmetros estatísticos encontrados para cada um dos ajustes de curvas propostos. Verificou-se no tratamento dos dados que para o ajuste de curva proposto por Gitirana Jr. & Fredlund (2004) não foi possível obter os parâmetros. Isso foi ocasionado, pois, o comportamento da curva característica do solo não é bimodal, onde seria possível encontrar dois valores de GAE e dois pontos residuais, além da não observação da má graduação granulométrica que provocaria esse tipo de curva.

Tabela 5 - Análise estatística dos ajustes de curva.

Modelo de ajuste	R <sup>2</sup>	SQR	Akaike
Gardner (1956)	0,9901	0,003607	-75,274640
Brutsaert (1967)	0,9901	0,003607	-75,274640
Van Genuchten (1980)	0,9907	0,003377	-73,933526
McKee & Bumb (1987)	0,9080	0,032207	-53,381565
Fredlund & Xing (1994)	0,9897	0,003750	-72,885845
Gitirana Jr. & Fredlund (2004)	-	-	-

Observa-se pela Tabela 5, que o ajuste de curva proposto por Van Genuchten (1980) é o mais adequado, pois apresenta o coeficiente de determinação mais próximo da unidade e a menor SQR dentre os analisados. O que corrobora com a observação de Gerscovich & Sayão (2002), segundo a qual o melhor ajuste da curva de retenção para os solos brasileiros são obtidos por meio de: Gardner (1956), Van Genuchten (1980) e Fredlund & Xing (1994). O critério de determinação do melhor ajuste de curva obedeceu a seguinte ordem de análise: AIC, SQR e R<sup>2</sup>. O AIC do ajuste de Van Genuchten (1980) não foi o mais negativo, característica encontrada em Gardner (1956) e Brutsaert (1967) que apresentaram valores equivalentes de -75,274640. O maior AIC foi verificado no ajuste de McKee & Bumb (1987), assim como o menor valor de R<sup>2</sup> e a maior SQR dos dados. A Figura 52 apresenta a curva característica a partir do ajuste de curva proposto por Van Genuchten (1980). Santos et al. (2012) encontrou o mesmo ajuste de curva de para a camada de cobertura de aterro sanitário com solo adicionado de composto.

Figura 52 - Curva de retenção de água do solo da camada de cobertura (Van Genuchten, 1980).



A coerência do ajuste de curva com os dados experimentais permitiu a obtenção dos parâmetros da equação, que estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros estimados e equação.

Parâmetros	Valor estimado	Equação
$\alpha$ (kPa)	0,041033	
$n$	0,890031	$\theta = 0,11 + \frac{0,42}{(1 + 0,041033\psi^{0,890031})^{0,623222}}$
$m$	0,623222	

Na equação observa-se o valor de 0,42 ou 42% referente à diferença entre a umidade volumétrica de saturação ( $\theta_{\text{Sat}}$ ) e a umidade volumétrica residual ( $\theta_{\text{Res}}$ ). O parâmetro de entrada da equação são os valores de sucção matricial, tendo como resposta a umidade volumétrica.

### 4.2.3 Intervalo de umidade para compactação da camada de cobertura

A partir da curva de retenção de água no solo, retiraram-se três valores de umidade gravimétrica da região de dessaturação para realização do ensaio de permeabilidade saturada a água. Os valores compreenderam pontos próximos à umidade volumétrica residual do solo, ao ponto médio dessa região e acima da umidade de saturação do solo. Compactaram-se corpos-de-prova nas umidades de 9%, 15% e 24% utilizando a energia proctor normal, conforme a NBR 7182 (ABNT, 2016) e posterior realização do ensaio de permeabilidade a carga variável vertical. A Tabela 7 apresenta os valores da permeabilidade das amostras após a realização dos ensaios.

Tabela 7 - Permeabilidade à água do solo em diferentes umidades.

Umidade de compactação (%)	Permeabilidade a água (m/s)
9,0	$1,82 \times 10^{-6}$
15,0	$1,42 \times 10^{-7}$
20,25	$2,77 \times 10^{-8}$
24,0	-

Pode-se observar na Tabela 7 que, os valores de permeabilidade apresentam variação de 100 vezes, quando se compara o menor valor, encontrado para a umidade de 20,25% ( $W_{\text{Ótima}}$ ) e o maior, para a umidade gravimétrica de 9%. Vale salientar que não foi possível a realização do ensaio de permeabilidade do corpo-de-prova na umidade de 24%, pois se tornou inviável executar a compactação, uma vez que, o solo encontrava-se saturado, e com umidade equivalente ao limite de plasticidade (LP).

Os valores de permeabilidade à água encontrados não estão dentro das regulamentações nacionais e internacionais sobre as características do solo para uso em camada de cobertura de aterros sanitários. A realização da compactação da camada de cobertura, em campo, no intervalo de umidades de 9% a 15%, confere à camada um aumento no seu índice de vazios (aumento da permeabilidade à água), a redução da resistência mecânica (tendência de variação volumétrica), aumento da porosidade, formação de canais contínuos de ar, e a necessidade de uma maior aplicação de energia de compactação para elevar a sua densidade seca. Esses pontos proporcionam características inadequadas ao solo

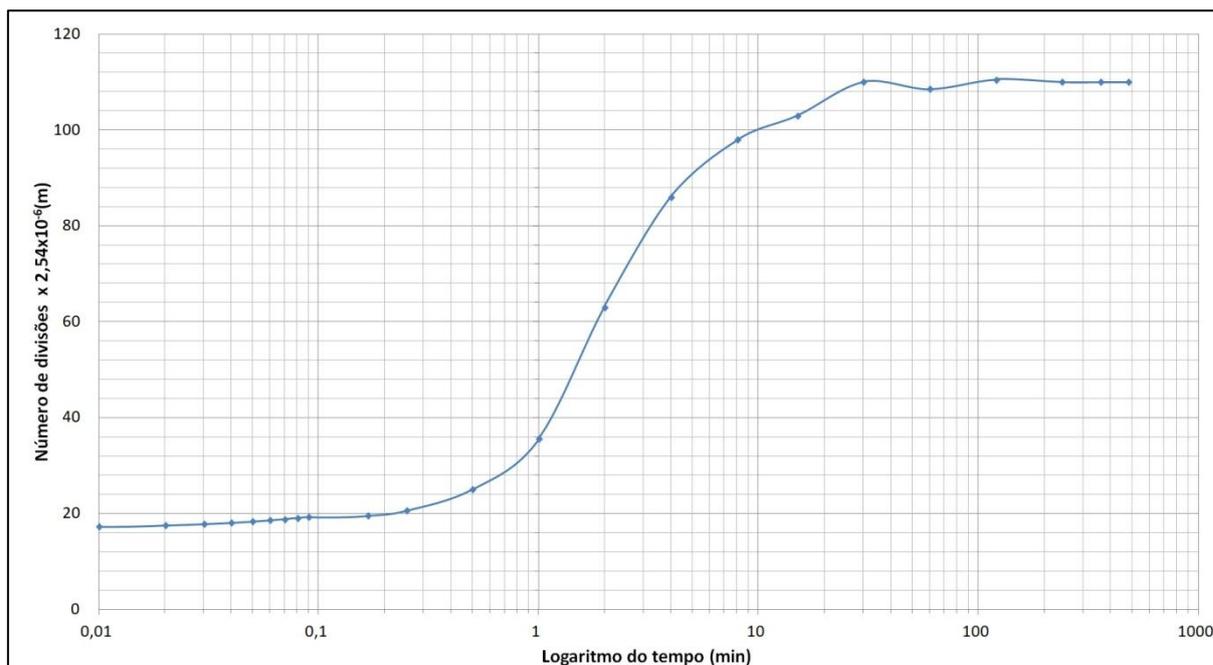
para uso aterro sanitário, pois permitem a entrada descontrolada do ar para o interior do maciço e o escape de gases para a atmosfera. À medida que decresce a quantidade de água no solo aumenta-se a dificuldade para a passagem de água pelos vazios, ou seja, a permeabilidade a água dos solos não saturados é menor que a dos solos saturados.

A compactação de camadas de cobertura de solo na umidade ótima, em um intervalo de  $\pm 2\%$ , ou seja, entre 18,25% e 22,25%, proporciona a maior aproximação e entrosamento das partículas, um aumento da coesão e da resistência ao cisalhamento, maior capacidade de suporte, redução do índice de vazios, capacidade de absorção de água, diminuição substancial da permeabilidade e estabilidade do solo. Porém, a compactação pode ser influenciada por dois fatores fundamentais que são a energia empregada (energia de compactação) e a umidade do solo. Recomenda-se a manutenção desse intervalo na camada de cobertura de aterros de RSU, que permitirá a redução na formação de fissuras e trincas, bem como, garantir o confinamento dos resíduos, minimizar a produção de lixiviado e a emissão de gases para a atmosfera.

### **4.3 Índice de expansão do solo**

Após a realização do ensaio de índice de expansão, obteve-se o EI do solo de 12,03. Segundo a classificação proposta pela D4829 (ASTM, 2011), o solo da camada de cobertura apresenta potencial de expansão muito baixo (*very low*), pois o índice encontrado está entre 0 e 20. O corpo-de-prova foi compactado na umidade de 10,8% ( $S = 50\%$ ) conforme indicava a norma do ensaio, com índice de vazios de 0,4, porosidade de 28,6% e umidade final após o ensaio de 25,7%. O gráfico da expansão do solo que relaciona o logaritmo do tempo (min) e o número de divisões, dado pelo produto de  $2,54 \times 10^{-6}$  (m), está apresentado na Figura 53.

Figura 53 - Relação gráfica do potencial de expansão do solo.



O parâmetro EI com característica de expansão muito baixa corrobora com a porcentagem elevada de areia na composição granulométrica do solo (47%), o alto percentual de sílica a sua composição química (63%) e a presença dos minerais quartzo, mica e caulinita, que são minerais não expansivos com baixa capacidade de adsorção e retenção de água. A presença da esmectita e feldspato não conferem a característica expansiva ao solo. A porcentagem de argila no solo (42%), pelo parâmetro de Skempton, é caracterizada como inativa, o que não influencia na variação volumétrica do material. A expansão total da amostra correspondeu a um valor inferior a 0,5% da altura do corpo-de-prova.

Segundo Simões de Oliveira et al. (2006), pode-se identificar os solos expansivos por meio dos seus índices de consistência e da fração de argila presente no material. Alguns dos métodos elucidados são a carta de Van Der Merwe modificada por Williams & Donaldson (1980), a de Seed et al. (1962) e a de Skempton (1953) já utilizada pelos valores de atividade da argila. Aplicando os resultados do solo da camada de cobertura em cada uma das cartas explicitada no trabalho de Simões de Oliveira et al. (2006) pode-se observar o baixo potencial de expansão do solo.

No entanto, observam-se fissuras e trincas na parte superficial da camada de cobertura do aterro que podem ter sido provocadas por eventos naturais, como, o carreamento do material fino do solo pela água da chuva (Figura 54), ineficiência de desenvolvimento da

vegetação de proteção (Figura 55), a perda de água do solo (Figura 56), a erosão (Figura 57), movimentação da massa de resíduos, entre outros.

Figura 54 - Carreamento dos finos contidos no solo.



Figura 55 - Inexistência de vegetação para proteção superficial.



Figura 56 - Ressecamento do solo.



Figura 57 - Erosão do solo.



A formação desses pontos de estresse na camada de cobertura possibilita a entrada das águas de chuvas e do ar atmosférico para o interior do maciço sanitário, além da saída de gases poluentes para a atmosfera, como o metano ( $\text{CH}_4$ ). Segundo o relatório quadrimestral do aterro sanitário (GGA, 2016), não foi detectado fluxo de gases pela camada, pois o sistema de drenagem de gases (drenos verticais) encontra-se aberto, o que não permite a formação de um gradiente de pressão suficiente para que ocorra o fluxo de gases pela camada, bem como, a elevada espessura da camada de cobertura executada no aterro que, dificulta a percolação do gás. Essas condições podem ser influenciadas pela espessura da camada executada, pelo grau

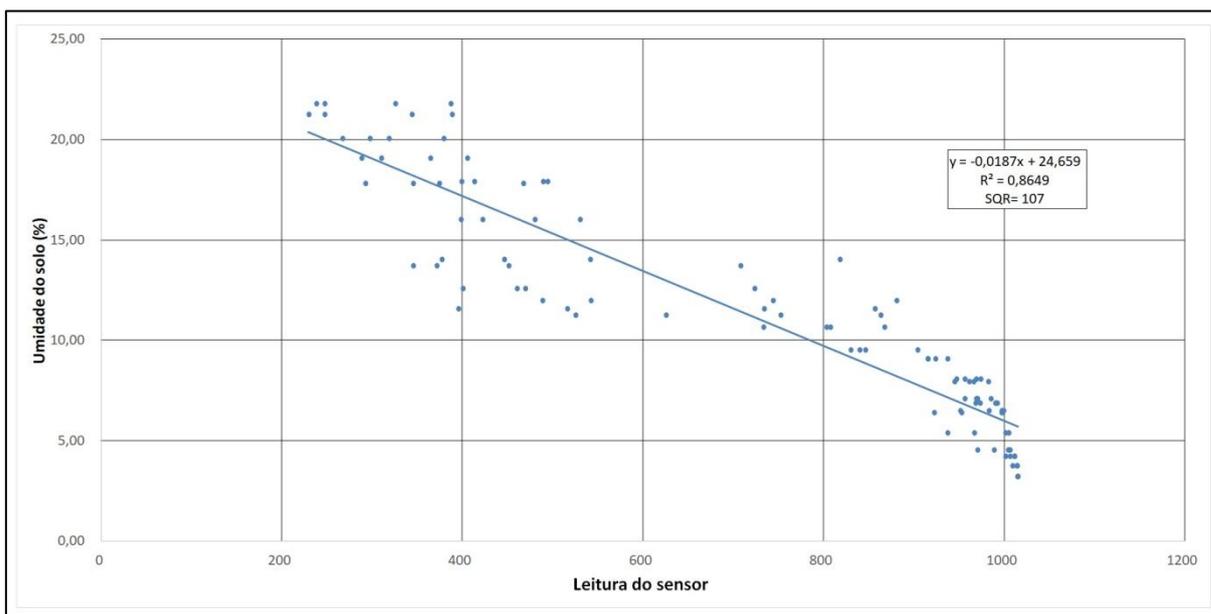
de saturação do solo, a umidade, o tipo de camada projetada, as condições meteorológicas e geográficas da região do aterro, entre outros.

#### 4.4 Avaliação da variação da umidade do solo em lisímetro

##### 4.4.1 Curva de calibração dos sensores

A partir da calibração dos 4 (quatro) sensores capacitivos pode-se obter a curva representada na Figura 58 que explicita a relação entre as leituras de cada sensor com as respectivas umidades do solo verificadas em estufa. Os dados foram analisados em modelos gráficos de ajuste propostos pelo *Microsoft Excel 2007* e verificados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a soma dos quadrados dos resíduos (SQR), para obtenção da equação do gráfico.

Figura 58 - Curva de calibração dos sensores de umidade do solo.



O modelo de melhor ajuste foi a equação linear (1º Grau), cujo  $R^2$  mais próximo da unidade apresentou valor de 0,86 e o menor SQR de 107, além disso, obteve-se a equação reta, como apresentada na Figura 58. Os dados utilizados para construção do gráfico abrangem um intervalo da umidade higroscópica até a umidade de saturação do solo, pois após a saturação as leituras registradas pelos sensores se estabilizavam, assim como, o critério de parada escolhido para finalização da calibração dos sensores.

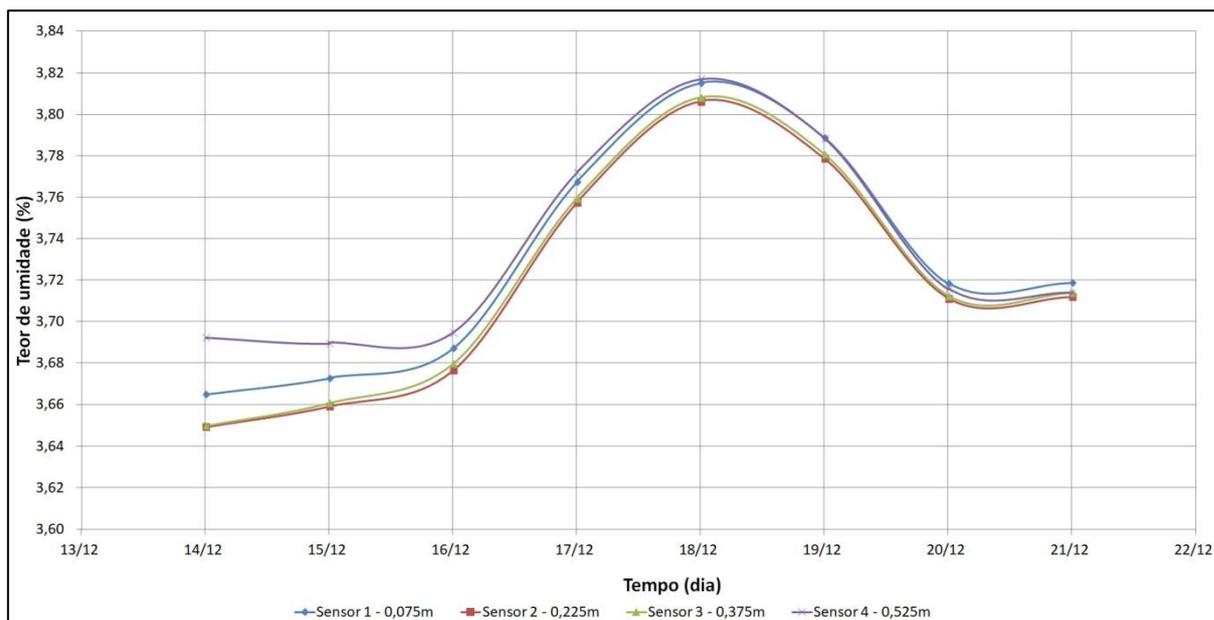
A equação da curva foi inserida no programa para o cálculo da umidade do solo, a partir da leitura do sensor, conforme a variação da presença de água no solo. Devido ao desgaste por oxidação das paletas de leituras dos sensores, verificou-se uma variação de  $\pm 2\%$  na umidade do solo lida pelo sensor e a registrada pelos sensores, sendo necessário efetuar esse ajuste para análise do perfil de umidade da camada de cobertura experimental.

#### 4.4.2 Perfil de umidade

O experimento passou por dois períodos de observação de umidade do solo: o seco e o saturado. A Figura 59 apresenta os dados obtidos durante o período seco, 7 (sete) dias, que compreendeu os dias de 14 a 21 de dezembro de 2016. E a Figura 60 apresenta os dados dos dois períodos, sendo o mais longo o período saturado de observação entre os dias 21 de dezembro de 2016 a 21 de janeiro de 2017, equivalente a um mês. Os gráficos apresentam as médias diárias das umidades verificadas pelos sensores, pois a visualização das modificações da umidade do solo, utilizando a variável tempo em minutos, se tornava inviável devido a grande quantidade de dados coletados.

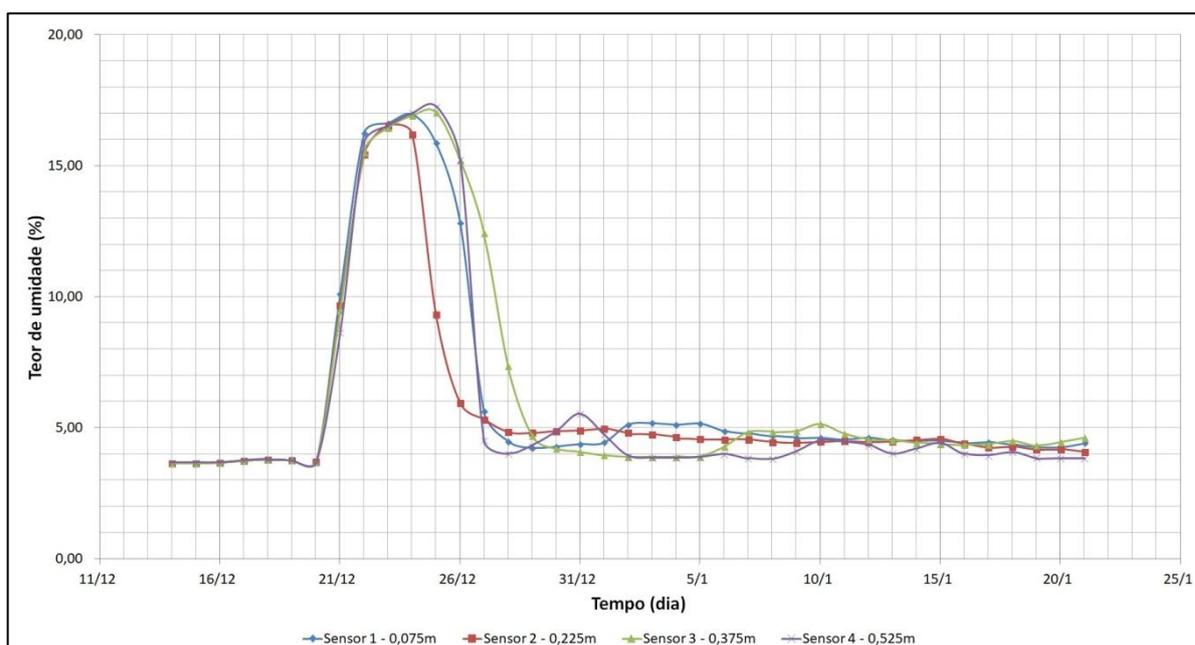
Na Figura 59 verifica-se a inexistência de variação da umidade entre os sensores, onde estes apresentam a mesma alteração na umidade ao longo de uma semana de coleta de dados. Verifica-se a existência de um pico que pode ser explicado pela conformação das partículas de solo dispostas na célula experimental, que fazem com que ocorra uma maior interação entre os grãos e os sensores, bem como, a possível formação do vapor de água que proporciona um umedecimento das partes mais internas da camada e consequente alteração da umidade do solo. Quando o solo da camada de cobertura apresentar as umidades gravimétricas dispostas na Figura 59, pode-se inferir que, a sucção matricial apresenta valores próximos a sucção residual do solo ( $\psi_{Res}$ ), da ordem de 5000 kPa.

Figura 59 - Umidade do solo no período seco de observação.



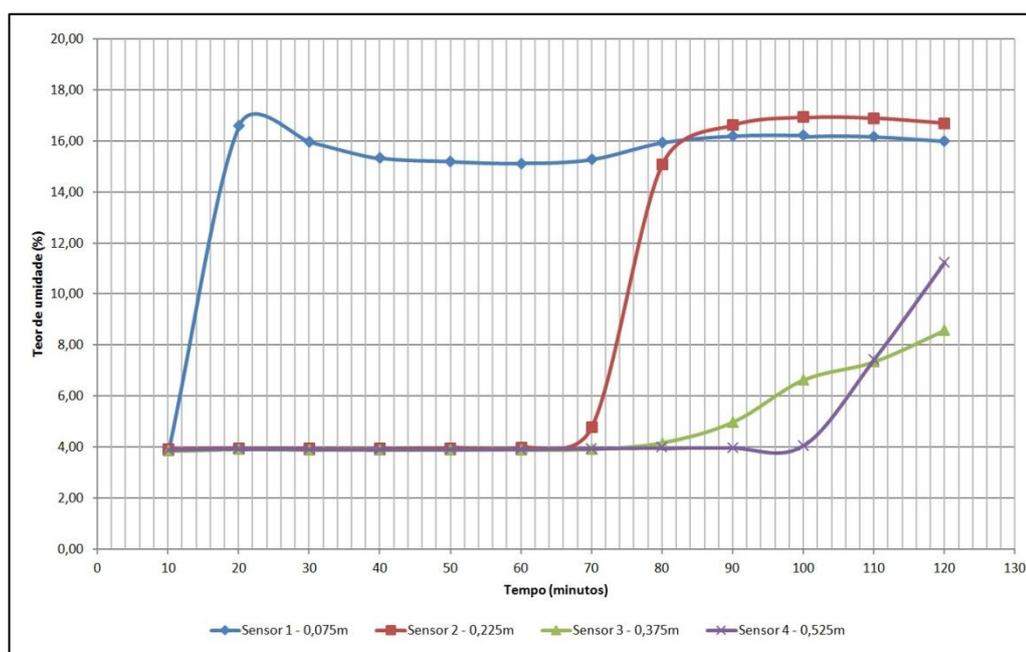
No segundo período de observação da variação da umidade, Figura 60, verificam-se as modificações no valor da umidade do solo durante o período de saturação do perfil experimental. A partir do dia 21/12, como mostra o pico da Figura 60, foi iniciado o umedecimento do solo verificando uma elevação da umidade, até atingir valores próximos a 18%. Nessa situação a sucção matricial cai bruscamente a valores próximos a 2 kPa até se anular devido a completa saturação do solo.

Figura 60 - Variação da umidade do solo no período de saturação.



A análise minuciosa dos dados, durante o período inicial de 2 horas, permitiu verificar o tempo de 10min para que o primeiro sensor (S1), posicionado a 75 mm da superfície da camada de solo, registrasse os primeiros sinais de aumento de umidade, Figura 61. O S2 verificou em 70 min (1 hora e 10 minutos), o S3 em 80 min (1 hora e 20 minutos) e o S4 em 100 min (1 hora e 40 min). Diante disso, vê-se a possibilidade de acompanhar a infiltração de água pela camada de cobertura do solo, bem como, monitorar a umidade, a sucção e prever o fluxo de gases pelo solo.

Figura 61 - Verificação do aumento da umidade ao longo do tempo.



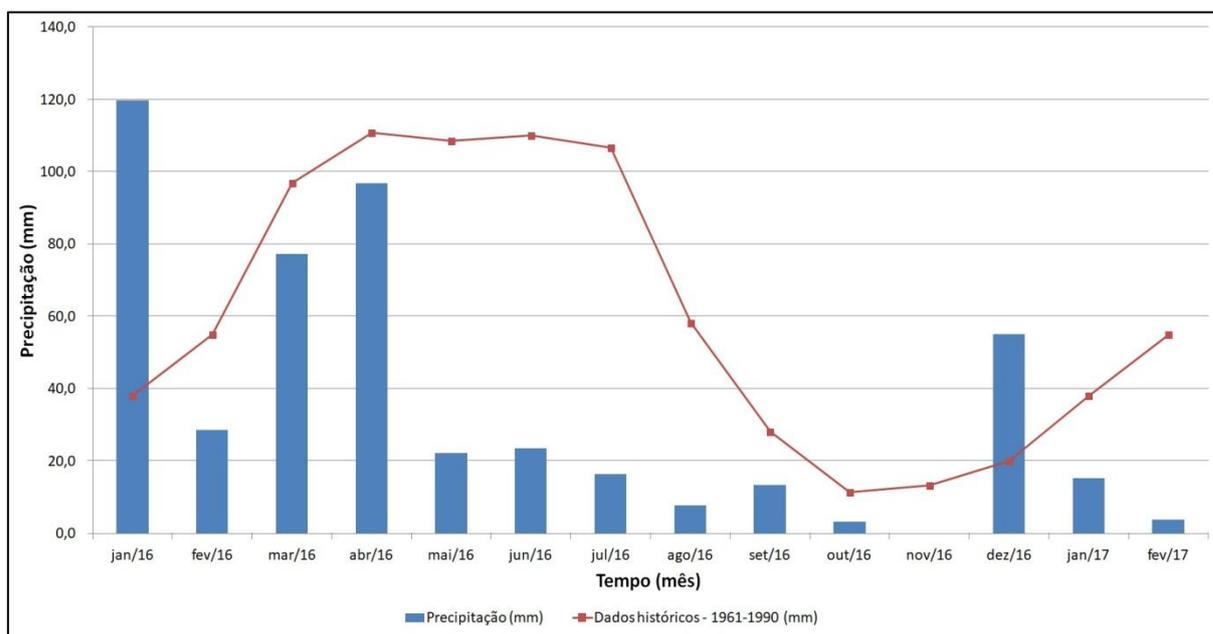
Leme et al. (2015) fizeram uso de sensores capacitivos para o monitoramento da sucção numa barragem de terra no município de Quixada-CE. Por meio do uso dos sensores, determinou-se a relação da leitura de cada sensor instalado no maciço da barragem e a sucção presente no corpo do barramento, possibilitando o desenvolvimento de uma ferramenta prática para o desenvolvimento científico da área de segurança de barragens.

A utilização dos sensores pela camada de cobertura pode viabilizar a determinação indireta da permeabilidade a partir do avanço da pluma de infiltração ao longo do tempo, a criação de um banco de dados (umidade e infiltração do solo ao longo do tempo e verificação da variação da sucção), o que contribuirá para o aprimoramento de projetos de construção, manutenção, operação e monitoramento de camadas de cobertura de solo compactado de aterros sanitários. Os sistemas automatizados apresentam fatores como redução de custos, praticidade, expansibilidade do sistema e rapidez na aquisição e obtenção dos dados.

#### 4.5 Análise dos condicionantes climatológicos

A Figura 62 apresenta os dados de precipitação mensal acumulada durante o horizonte temporal de análise e os dados históricos do período de 1961 a 1990, fornecidos pela AESA (2017). Observa-se a predominância de índices pluviométricos inferiores aos registrados historicamente, especificamente, durante o período chuvoso do município, que compreende os meses de março a julho. Durante o período chuvoso, o acúmulo de chuvas chega a atingir 533,6 mm, no entanto, verificou-se um valor de 306,8 mm, o que corresponde a um déficit hídrico de 206,8 mm. O acumulado durante o período de análise de dados abriga um montante de 563,3 mm, que se encontra abaixo do volume anual de 764,3 mm, AESA (2017), de precipitação acumulada. Pode-se verificar também, a discrepância no bimestre (janeiro e fevereiro) dos anos de 2016 e 2017, que indica o início de um ano com precipitações reduzidas.

Figura 62 - Dados de precipitação mensal e históricos.



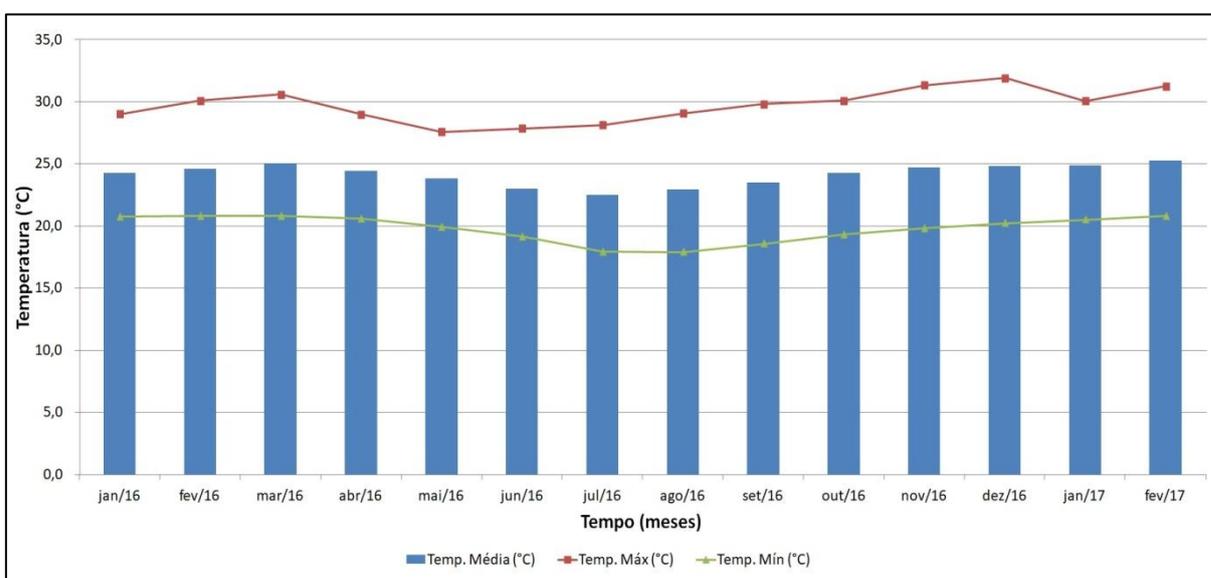
Fonte: AESA/INMET (2017).

A escassez hídrica apresentada provoca o ressecamento da camada de cobertura do aterro com a formação de trincas e fissuras, que são caminhos preferenciais de escape de gases para a atmosfera e a entrada de ar. O plantio de gramíneas no solo sem a utilização de técnicas que facilitem seu desenvolvimento torna-se inviável, uma vez que, a capacidade de retenção de água é reduzida na parte superficial da camada (0,20 m), devido a sua composição química e mineralógica, ao potencial de aumento do pH e ao carreamento da fração fina do

solo. A região do Nordeste Brasileiro, principalmente na porção semiárida, periodicamente é afetada pela ocorrência de estiagens que comprometem o abastecimento de água, e consequentemente a recarga hídrica, devido principalmente à irregularidade da estação chuvosa na região, com predominância de chuvas intensas e de curta duração (RODRIGUES et al. 2016).

A Figura 63 apresenta a variação das temperaturas máximas e mínimas, bem como, a média mensal durante o período de análises. Verificou-se que a temperatura sofreu uma variação de 17,9°C a 31,9°C e amplitude de 14°C, com média mensal de 24,1°C. A temperatura média foi superior à registrada na região do Agreste Paraibano, 22,7°C. Vale salientar que esses são dados de temperatura ambiente, pois estas não foram verificadas no perfil *in situ* da camada de cobertura do aterro sanitário.

Figura 63 - Variação da temperatura do município de Campina Grande-PB.

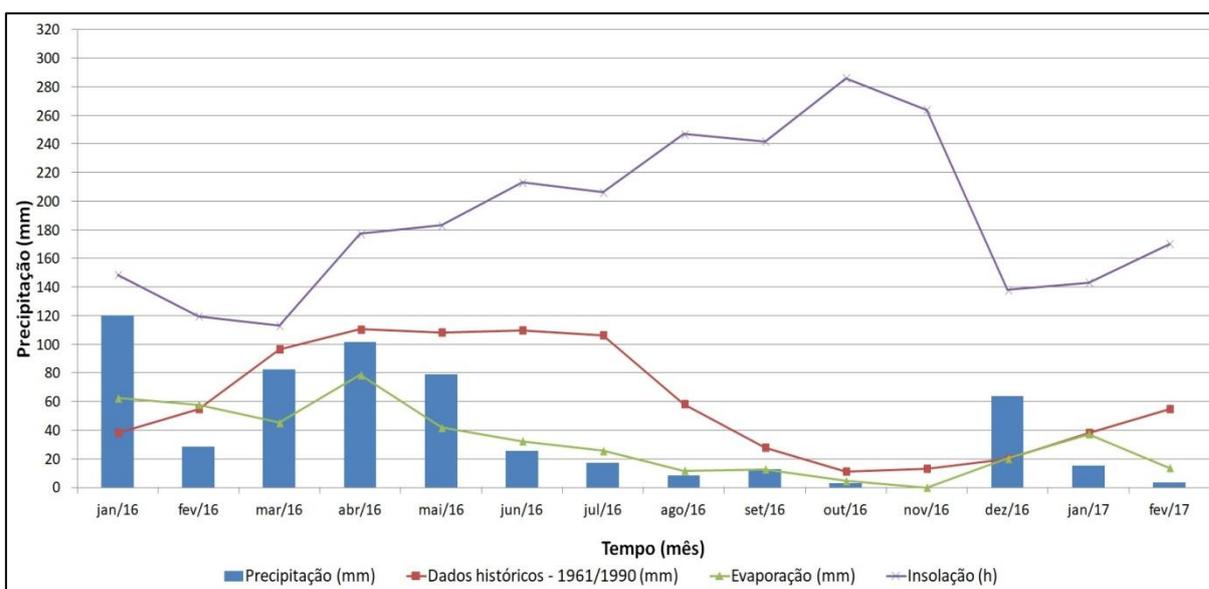


Fonte: AESA/INMET (2017).

O aumento da temperatura influencia diretamente no pH do solo, uma vez que, a matéria orgânica (MOS) presente no solo decompõe-se mais rapidamente quando as temperaturas são elevadas, corroborando com a reduzida quantidade de matéria orgânica nos solos situados em regiões de clima quente, quando comparados aos de clima mais frio. O teor de MOS obtido pelo ensaio de carbono orgânico total (0,90%), de nível baixo, corrobora com a situação a que o solo da cobertura está exposto. Além disso, as elevadas temperaturas influenciam no ponto de murcha da vegetação de proteção superficial. Segundo Chaves (2006), o ponto de murcha corresponde ao valor de umidade do solo, do qual a planta não consegue retirar água e consequentemente murcha definitivamente.

A Figura 64 apresenta os dados de insolação (horas) e evaporação (mm). A insolação acumulada durante o período de coleta de dados atingiu o valor de 2657,1 horas. De acordo com Belúcio et al. (2014), insolação na meteorologia, corresponde a duração do brilho solar, ou seja, o período do dia com luz solar, em horas. Percebe-se que a evaporação superou a precipitação, bem como, valores elevados de insolação em todos os meses de análises. Verificou-se que a evaporação acumulada apresentou valor de 448,70 mm, que corresponde a um índice inferior a média da região semiárida nordestina, 1417,4 mm. Segundo Collischonn & Tucci (2014), a evaporação é uma componente do ciclo hidrológico que corresponde à transferência de água da superfície terrestre para a atmosfera, pela mudança de estado da água, do líquido para o gasoso.

Figura 64 - Análise dos dados de insolação e evaporação.



Fonte: AESA/INMET (2017).

O solo da camada de cobertura sujeito a essas condições, sem uma proteção superficial (vegetação rasteira) e utilização de um tipo inadequado de *layout* de camada, proporcionam a perda da eficiência do sistema. Os parâmetros físicos e físico-químicos são alterados, fazendo com que se agravem os processos erosivos e a abertura de caminhos de entrada de água e saída de gases. A escassez hídrica influencia no comportamento do solo, pois, a região de Campina Grande, localizada no semiárido paraibano, apresenta índices de evaporação maiores quase todo o ano, quando comparado ao índice de precipitação (ALVES, 2012).

## 5 CONCLUSÕES

A partir de análises do solo da camada de cobertura do aterro sanitário, foi possível verificar suas características geotécnicas, físico-químicas, mineralógicas e de análise da condição não saturada pela interpretação da curva de retenção de água no solo, que possibilitaram verificar o desempenho do tipo de camada e do solo utilizado na cobertura dos resíduos do aterro sanitário de Campina Grande/PB. Dessa forma, pode-se concluir que:

- A utilização da camada de cobertura do tipo CCL (*Compacted Clay Liner*) no aterro sanitário não é adequada, indicando-se a evapotranspirativa, pois o aterro está situado numa região de clima semiárido.
- A permeabilidade à água verificada *in situ* apresenta valor equivalente à permeabilidade à água obtida em laboratório e encontra-se dentro dos valores de referência propostos pelas normas nacionais e internacionais.
- O solo utilizado na camada de cobertura do aterro sanitário apresenta às condições mínimas (classificação SUCS, composição granulométrica e limites de consistência) exigidas pelas regulações ambientais que orientam o monitoramento de aterros de resíduos sólidos urbanos.
- A aplicação da energia proctor normal para compactação do solo da camada de cobertura do aterro sanitário proporciona condições favoráveis à redução da permeabilidade à água da camada.
- A partir dos parâmetros físico-químicos (pH, sólidos voláteis e COT), percebe-se a deficiência na capacidade de armazenamento de água no solo, devido a baixa concentração de matéria orgânica no solo e pela inexistência de vegetação nativa.
- Os parâmetros químicos e mineralógicos (DRX e EDX) confirmam o baixo potencial de expansão do solo, analisado pelo ensaio de Índice de Expansão (EI), quando este sofre alteração na sua umidade.
- O ajuste da curva de retenção de água no solo de Van Genuchten apresenta-se como o mais adequado para explicar o comportamento dos pontos experimentais do ensaio de papel filtro, bem como, para determinação do ponto de entrada generalizada de ar (GAE).
- O ponto de entrada generalizada de ar apresenta valor próximo à umidade ótima de compactação.

- A compactação do solo da camada de cobertura pode ser realizada na energia proctor normal com intervalo de umidade aceitável de  $\pm 2\%$  da ótima.
- O aparecimento de regiões ressecadas no solo (gretas de contração), carreamento da fração fina do solo, surgimento de fissuras e trincas e pontos de erosão pela camada de cobertura, devem-se a inexistência da compactação do solo da camada de cobertura (realização do espalhamento do material), de técnicas ou mecanismos que permitam o desenvolvimento de vegetação nativa sobre a camada, assim como, pelas condições meteorológicas e a situação físico-química do solo que, não permitem a conservação de meios para o desenvolvimento de vegetação sobre a camada de cobertura.
- O desenvolvimento da unidade de medição da umidade do solo mostra-se como uma metodologia eficaz para verificação automática de estimativa da umidade do solo, bem como, pode proporcionar o monitoramento da sucção pelo perfil e o acompanhamento da infiltração de água pela camada de cobertura em campo.
- O uso dos sensores de umidade *in situ*, exige o tratamento químico das suas paletas de medição como forma de evitar a oxidação e conseqüente danificação dos sensores, prejuízo à determinação adequada de umidade, a aquisição e armazenamento dos dados. A utilização dos sensores capacitivos em outros tipos de solo necessita de uma calibração prévia para sua aplicação.
- Os dados meteorológicos, verificados durante o período de monitoramento, exerceram influência sobre os parâmetros físico-químicos do solo utilizado na camada de cobertura do aterro sanitário.

### 5.1 Sugestões para pesquisas futuras

- Elaborar um perfil de permeabilidade a água da camada de cobertura de solo compactado das células do aterro sanitário a partir de um delineamento experimental para quantificação do número de ensaios, de forma que, permita um intervalo de confiança de 95% e nível de significância de 5%.
- Realizar o balanço hídrico da camada de cobertura do aterro sanitário a fim de verificar o comportamento desse sistema de proteção superficial durante os períodos de elevada intensidade pluviométrica e de estiagem.

- Verificar a relação entre a quantidade de água infiltrada pela camada de cobertura para o interior do maciço sanitário e a produção, vazão e nível de líquidos produzidos nas células do aterro sanitário.
- Aperfeiçoar as técnicas de execução da camada de cobertura a partir de um planejamento fatorial de ensaios laboratoriais que relacionem a umidade de compactação, a energia de compactação e a espessura da camada, de forma que, aperfeiçoem a melhor condição de confecção da camada.
- Analisar a adição de compostos químicos (polímero, RCC, bentonita, lodo, entre outros) ou orgânicos ao solo da camada de cobertura para proporcionar o aumento da capacidade de armazenamento e retenção de água, o desenvolvimento de vegetação nativa superficial e a redução da formação de trincas e fissuras.
- Instalar sensores de umidade do solo *in situ* ao longo da espessura da camada de cobertura para monitoramento da umidade e verificação do avanço da infiltração de água pela camada, a fim de observar o comportamento da sucção e da sua relação com o fluxo de gases pela camada.
- Desenvolver metodologias para verificação da temperatura e presença de gases tóxicos no solo da camada de cobertura com a utilização de sensores e sistemas que permitam a aquisição de dados de forma automatizada com a manutenção de um banco de dados.
- Avaliar o fluxo de gás pela camada de cobertura com o uso de ensaios e técnicas de medições dispostas na literatura nacional e internacional como forma de verificação da eficiência do sistema de proteção à minimização do escape de gases para a atmosfera.
- Estudar a condição biológica do solo quanto a existência e a predisposição ao desenvolvimento de microrganismos capazes de oxidar o metano produzido no interior do maciço sanitário, bem como, fornecer condições de agregação das partículas para armazenamento e retenção de água na camada.
- Manter um banco de dados das condições meteorológicas da região do aterro (precipitação, evaporação, insolação, temperatura, umidade relativa do ar, entre outros) e da umidade da camada de cobertura, de forma que permitam a elaboração de planos de manutenção da camada de cobertura nos períodos críticos, como, épocas de estiagem e de elevada pluviosidade.

## REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016. 10p

\_\_\_\_\_. **NBR 6459**: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016. 12p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Compactação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2016. 9p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7185**: Determinação da massa específica aparente, *in situ*, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9604**: abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – procedimento. Rio de Janeiro, 2016. 9p.

\_\_\_\_\_. **NBR 9813**: Determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego de cilindro de cravação. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

\_\_\_\_\_. **NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997. 12p.

\_\_\_\_\_. **NBR 14545**: Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000. 12p.

\_\_\_\_\_. **NBR 15849**: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. Rio de Janeiro, 2010. 24p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16434**: Amostragem de resíduos sólidos, solos e sedimentos - Análise de compostos orgânicos voláteis (COV) – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015. 21p.

AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. Meteorologia. Monitoramento. AESA, Fev. 2017. Disponível em <<http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/medicaoPluviometrica.do?metodo=listarClimatologiasMensais>>. Acesso em: 03 fev. 2017.

AGUIAR, A. B. **O emprego do permeâmetro de Guelph na determinação da permeabilidade do solo, de camadas de lixo e sua cobertura**. 2001. 67f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2001.

AITCHISON, G. D. Relationship of moisture stress and affective stress functions in unsaturated soils. In: CONFERENCE ON PORE PRESSURE AND SUCTION IN SOILS, 1961, London-UK. **Proceedings...** London: p.47-52,1961.

AITCHISON, G. D. Structurally unstable soils. State of the arts. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 8., 1973, Moscow. **Proceedings...**General Report Section 4, v.3, p.161-190, 1973.

AKAIKE, H. Maximum likelihood identification of Gaussian autoregressive moving average models. **Biometrika**, v.60, n.2, p.255-265, 1973.

ALCÂNTARA, P.B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. 2007. 364f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2007.

ALMEIDA, J. G. R.; ROMÃO, P. A.; MASCARENHA, M. M. A.; SALES, M. M. Erodibilidade de solos tropicais não saturados nos municípios de Senador Canedo e Bonfinópolis (GO). **Geociências**, v.34, n.3, p.441-451, 2015.

ALMEIDA, J. R. **Estudo do comportamento de barreira capilar em aterros de resíduos**. 2011. 152f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2011.

ALVES, F. S. **Influência das condições meteorológicas na biodegradação dos resíduos sólidos urbanos em Campina Grande-PB**. 2012. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2012.

AMADI, A. N.; OKUNLOLA, I. A.; EZE, C. J.; UNUEVHO, C. I., ABUBAKAR, F. Geotechnical assessment of Clay deposits in Minna, North-Central Nigeria for use as liners in sanitary landfill design and construction. **American Journal of Environmental Protection**, v.3, n.3, p.67-75, 2015.

ANDRADE, C.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; COUTO, L. **Características físico-hídricas e dinâmicas da água no solo**. Uso e manejo de irrigação. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008.

ARAÚJO NETO, C. L. **Análise do comportamento dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento de modelos estatísticos para previsão das deformações de aterros sanitários**. 2016. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2016.

ARAÚJO, P. S.; SANTOS, J. J. N.; ARAÚJO NETO, C. L.; SOUSA, R. B. A.; PAIVA, W. Análise da viabilidade do uso de solo como material impermeabilizante em aterros sanitários.

In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 1., 2016, Campina Grande-PB. **Anais...** Campina Grande: Editora Realize, 2016.

ARAÚJO, P. S.; SILVA, D. L. M.; CARIBÉ, R. M.; BATISTA, P. I. B.; MONTEIRO, V. E. D. Estudo geotécnico para impermeabilização de aterro sanitário em escala experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2014, Goiânia-GO. **Anais...** Goiânia: ABMS, 2014.

ARAÚJO, T. T. **Estudo experimental de emissões fugitivas de biogás em camadas de cobertura de uma célula de aterro sanitário.** 2016. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2016.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2487**: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011. 12p.

\_\_\_\_\_. **D4829**: Standard test method for expansion index of soils. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011. 10p.

\_\_\_\_\_. **D5298**: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010. 6p.

BAHR, T.; FRICKE, K.; HILLEBRECHT, K.; KÖLSCH, F.; REINHARD, B. Clean development mechanism – Tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS E TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 1., 2006, Rio de Janeiro-RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: SITTRS, 2006.

BARBOUR, S. L. Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective. **Canadian Geotechnical Journal**, v.35, n.5, p.873-894, 1998.

BARNSWELL, K. D.; DWYER, D. F. Assessing the performance of evapotranspiration covers for municipal solid waste landfills in northwestern Ohio. **Journal of Environmental Engineering**, v.137, n.4, p.301-305, 2011.

BARROSO, I. M. **Camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos: estudo preliminar de casos.** 2008. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2008.

BELÚCIO, L. P.; SILVA, A. P. N.; SOUZA, L. R.; MOURA, G. B. A. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.4, p.494-504, 2014.

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

BISHOP, A. W. The principles of effective stress. **Technik Ukebland**, v.106, n.39, p.859-863, 1959.

BIZARRETA, J. C. O.; DE CAMPOS, T. M. P. Caracterização do lodo de uma estação de tratamento de chorume visando seu emprego em coberturas finais de aterros sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 7., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS, 6., 2011, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: REGEO/Geossintéticos, 2011.

BLIGHT, G. E. Interactions between the Atmosphere and Earth. **Géotechnique**, v.47, n.4, p.715-767, 1997.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. 1. reimp. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248p.

BRANDÃO, V. S.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo**. 2. ed. Viçosa-MG: Editora UFV, 2003. 98p.

BRUTSAERT, W. Some methods of calculating unsaturated permeability. **Transactions of ASABE**, v.10, n.3, p.400-404, 1967.

CABRAL, A. R.; BURNOTTE, F.; LEFEBVRE, G. Application of TDR technology to water content monitoring of capillary barriers made of pulp and paper residues. **Geotechnical Testing Journal**, v.22, n.1, 1999.

CALLE, J. A. C. **Análise de ruptura de talude em solo não saturado**. 2000. 177f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2000.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G. F. N.; CARVALHO, E. T. L. (Org.). **Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais**. v.4. Brasília-DF: Faculdade de Tecnologia, 2012, 644p.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR., G. F. N.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; SILVA FILHO, F. C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. 759p.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações** – Fundamentos. v.1. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 244p.

CARTILHOS JR., A. B.; PRIM, E. C. C.; PIMENTEL, F. J. G. Utilização de lodo de ETA e ETE como material alternativo de cobertura de aterro sanitário. **Estudos Tecnológicos**, v.7, n. 2, p.86-97, 2011.

CARVALHO, J. B. Q. **Fundamentos da mecânica dos solos**. 2. ed. Campina Grande: Editora Marcone, 2004. 310p.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. Utilização de resíduos de construção e demolição para cobertura intermediária de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26., 2011, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABES-RS, 2011.

CATAPRETA, C. A. C. **Comportamento de um aterro sanitário experimental**: avaliação da influência do projeto, construção e operação. 2008. 316f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resíduos Sólidos Industriais**. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.

CHAGAS, G. S. **Estudo experimental do comportamento mecânico de estrato silto-argiloso (massapé) para fundações superficiais**. 2014. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2014.

CHANDLER, R. J.; CRILLEY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. In: **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering**. Thomas Telford-ICE Virtual Library, p.82-89, 1992.

CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C. I. The filter-paper method of suction measurement. **Géotechnique**, v.36, n.2, p.265-268, 1986.

CHAVES, L. H. G. **Solos Agrícolas**. 1. ed. Campina Grande: EDUFPG, 2006. 178p.

CHIOSSI, N. J. **Geologia de engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 424p.

CLEMENCE, S. P.; FINBARR, A. O. Design considerations for collapsible soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASCE, v.107, n.GT3, p.305-317, 1981.

COLLISCHONN, B.; TUCCI, C. E. M. Relações regionais entre precipitação e evapotranspiração mensais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n.3, p. 205-214, 2014.

COSTA, C. M. C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. 2015. 163f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2015.

COSTA, C. M. C.; SILVA, T. J. L.; SANTOS, J. R.; RIBEIRO, L. F. M.; GURJÃO, C. M. Avaliação do ressecamento da camada de cobertura utilizando solo com adição de fibras de PET através de imagens. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 2., 2015, Bento Gonçalves-RS. **Anais...** Bento Gonçalves: ABGE, 2015.

COSTA, M. D. **Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos**. 2015. 144f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2015.

CRONEY, D.; COLEMAN, J. D.; BLACK, W. P. M. Studies of the movements and distribution of water in soil in relation to highway design and performance. **Highway Research Board**, Special Report, v.40, p.226-252, 1958.

CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS, C. C.; OLIVEIRA, A. D. S.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.1, p.33-45, 2010.

CUPERTINO, K. F. **Análise de curvas de calibração utilizadas no método do papel filtro para estimar a sucção matricial em solos não saturados**. 2013. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2013.

DEINFRA – DEPARTAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA DE SANTA CATARINA. **IN-09**: Instrução normativa para execução de ensaio de permeabilidade - ensaio de permeabilidade em furos de sondagem à percussão ou ensaio de infiltração. Santa Catarina, 1994. 8p.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES-137**: Pavimentação – Regularização do subleito – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010. 7p.

DONALD, I. B. Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressures. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION

ENGINEERING, 2., 1956, Australia/New Zealand. **Proceedings...** Technical Publications Ltd.: Wellington, New Zealand, p.200-204, 1956.

EDIL, T. B.; MOTAN, S. E. **Laboratory evaluation of soil suction components.** 1984.

EDIL, T. B.; MOTAN, S. E. Soil-water potential and resilient behavior of subgrade soils. **Transportation Research Record**, n.705, 1979.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório.** ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; MASCHIO, R.; SILVA, E. M. (Org.). Teresina: EMBRAPA Meio Norte, 2007. 2p.

\_\_\_\_\_. **Manual de métodos de análise de solo.** DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; VIANA, J. H. M.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G. (Org.). 2011. 2 ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2011. 230p.

EPAMIG – EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. **Análise do solo** – determinações, cálculos e interpretação. PEDROSO NETO, J. C.; COSTA, J. O. (Org.). 2011. Lavras: EPAMIG Sul de Minas, 2012. 16p.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes.** Lages: O Autor, 2008. 230p.

FARIAS, R. M. S. **Estudo dos recalques em aterros de resíduos sólidos urbanos:** uma abordagem experimental e estatística. 2014. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2014.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS. **Orientações básicas para a operação de aterro sanitário.** Belo Horizonte: FEAM, 2006. 36p.

FERREIRA, S. R. M. **Influência da mudança de umidade no Comportamento de variação de volume dos solos colapsíveis e expansivos.** In: Arminda Sacconi Messias. (Org.). Tratamento de Água: qualidade economia e sustentabilidade. 1ed. RECIFE: Fasa, 2015, v.1, p.619-627.

FERREIRA, S. R. M. Variação da camada ativa de solos expansivos associada a mudança de umidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 7., 2011, Pirenópolis-GO. **Anais...**Pirenópolis: ABMS, v.1, p.371-375, 2011.

FERREIRA, S. R. M.; SILVA, M. J. R. Microestrutura de solos colapsíveis do semiárido Pernambucano antes e após o colapso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 5., 2004, São Carlos-SP. **Anais...**São Carlos: ABMS, v.1, p.423-429, 2004.

FRANCESCHET, M. **Estudo dos solos utilizados em camadas de base e cobertura em aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos de Santa Catarina**. 2006. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2006.

FREDLUND, D. G. Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v.16, n.1, p.121-139, 1979.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of The Geotechnical Engineering Division**, v.103, n.5, p.447-465, 1977.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. 1.ed. Danvers/Massachusetts/USA: John Willey & Sons, 1993. 576p.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v.31, n.4, p.521-532, 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; FREDLUND, M. D.; BARBOUR, S. L. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n.3, p.440-448, 1996.

FREDLUND, M. D.; FREDLUND, D. G.; WILSON, G.W. Prediction of the soil-water characteristic curve from grain size distribution and volume-mass properties. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3., 1997, Rio de Janeiro-RJ. **Anais...**Rio de Janeiro: ABMS, v.1, p.13-23, 1997.

GARDNER, W.R. Representation of soil aggregate size distribution by a logarithmicnormal distribution. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.20, n.2, p.151-153, 1956.

GERSCOVICH, D. M. S.; SAYÃO, A. S. F. J. Evaluation of the soil-water characteristic curves equations for soils from Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3., 2002, Recife-PE. **Proceedings...**Recife: v.1, p.293-300, 2002.

GGA/UFCG – GRUPO DE GEOTECNIA AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE. **Calibração de sensores para aferição do teor de umidade do solo**. 2016.

\_\_\_\_\_. **Relatório quadrimestral do monitoramento do Aterro Sanitário de Campina Grande-PB: células 1 e 2.** MONTEIRO, V. E. D. (Coord.). Campina Grande: GGA, 2016. 58p.

GITIRANA JR., G. F. N.; FREDLUND, D. G. Soil-water characteristic curve equation with independent parameters. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, v.130, n.2, p.209-212, 2004.

GOMES, L. P.; MORAES, C. A. M.; BOFF, R. D. Emprego de areia usada de fundição em coberturas intermediária e final de aterros sanitários de RSU. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v.3, n.4, p.71-76, 2007.

GUIZELINI, A. P. **Estudo de comportamento hidromecânico de solos visando a construção de sistemas de cobertura alternativos para aterro sanitários.** 2011. 166f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2011.

GUZMÁN, G. G. C. **Contribuições ao estudo do comportamento de um solo residual compactado quasi-saturado.** 2014. 229f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2014.

HAMBLIN, A. P. Filter paper method for routine measurement of field water potential. **Journal of Hydrology**, v.53, n.3-4, p.355-360, 1981.

HAMDI, N.; SRASRA, E. Hydraulic conductivity study of compacted clay soil used as landfill liners for an acidic waste. **Waste Management**, v.33, n.1, p.60-66, 2013.

HUBER-HUMER, M.; RODER, S.; LECHNER, P. Approaches to assess biocover performance on landfills. **Waste Management**, v.29, n.7, p.2092-2104, 2009.

HUSE, K. **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros.** 2007. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE Cidades. População estimada do município de Campina Grande – Paraíba. **IBGE**, Fev. 2017. Disponível em <<http://cidades.ibge.gov.br/v3/cidades/municipio/2504009>>. Acesso em: 03 fev. 2017.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Estações automáticas. Dados meteorológicos – Campina Grande-PB. **INMET**, Fev. 2017. Disponível em <

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 03 de fev. 2017.

IZZO, R. L. S.; MAHLER, C. F.; ROSE, J. L. Barreira capilar construída com resíduo pré-tratado mecânica e biologicamente. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.18, n.4, p.303-312, 2013.

JENNINGS, J. E. B. A revised effective stress law for use in the prediction of the behavior of unsaturated soils. **Pore Pressure and Suction in Soils**. London: Butterworths, p.26-30, 1961.

KABIR, M. H.; TAHA, M. R. Assessment of physical properties of a granite residual soil as a isolation barrier. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v.92c, 13pp, 2004.

KÄMPF, M.; VON DER HUDE, N. Transport phenomena in capillary barriers: influence of temperature on flow processes. In: INTERNATIONAL LANDFILL SYMPOSIUM, 5., 1995, Sardinia/Italy. **Proceedings Sardinia...1995**. v. 95, p.565-576.

KHIRE, M. V.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. Capillary barriers: Design variables and water balance. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.126, n.8, p.695-708, 2000.

KLEPPE, J. H.; OLSON, R. E. Desiccation Cracking of Soil Barriers. **American Society for Testing and Materials**, p.263-275, 1985.

LAMBE, T. W. A mechanistic picture of shear strength in clay. In: RESEARCH CONFERENCE ON SHEAR STRENGTH OF COHESIVE SOILS, 1960, Colorado/USA. **Proceedings...ASCE**: p.555-580, 1960.

LEME, R. F. **Avaliação de uma metodologia para projeto de pequenas barragens de terra no semiárido**: construção, ensaios e modelagem numérica. 2015. 223f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2015.

LEME, R. F.; LIMA, F. C.; SILVA FILHO, F. C. Implementação de sensor capacitivo para o monitoramento da sucção numa barragem de terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 8., 2015, Fortaleza-CE. **Anais...** Fortaleza: Gráfica Fotolaser, v.1, p.78-85, 2015.

LEONG, E.; HE, L.; RAHARDJO, H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM Internacional, v.25, n.3, p.322-332, 2002.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de pedologia**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456p.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. 2. reimp. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.

LIRA, H. L.; NEVES, G. A. Feldspato: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.8, n.3, p.110-117, 2013.

LISBOA, R. L. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório**. 2005. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

LODI, P. C.; ZORNBERG, J. G.; BUENO, B. S. Uma breve visão sobre geossintéticos aplicados a aterros sanitários. **Revista Tecnologia Fortaleza**, v.30, n.2, p.188-197, 2009.

LOPES, M. B. L. **Influência da sucção na resistência ao cisalhamento de um solo residual de filito de Belo Horizonte, MG**. 2006. 175f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2006.

LOPES, R. L. **Infiltração de água e fluxo de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos**. 2011. 250f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 2011.

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

LU, H.; LIU, J.; LI, Y.; DONG, Y. Heat transport and water permeability during cracking of the landfill compacted clay cover. **Journal of Chemistry**, v. 2015, 2015.

LUCAS, J. F. R.; TAVARES, M. H. F.; CARDOSO, D. L. C.; CÁSSARO, F. A. M. Curva de retenção de água no solo pelo método do papel filtro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1957-1973, 2011.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases pela camada de cobertura do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE**. 2003. 173f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2003.

MACIEL, F. J. **Geração de biogás e energia em aterro experimental de resíduos sólidos urbanos**. 2009. 354f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2009.

MAHLER, C. F.; AGUIAR, A. B. Determinação da permeabilidade in situ em aterros de resíduos sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa-PB. Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental. **Anais...** João Pessoa: ABES, 2001. CD-ROM.

MAHLER, C. F.; HUSE, K. Estudo da adição de bentonita ao solo de cobertura de aterros sanitários. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 8., 2015, Fortaleza-CE. **Anais...** Fortaleza: Gráfica Fotolaser, v.1, p.339-344, 2015.

MARIANO, M. O. H. **Avaliação da retenção de gases em camadas de cobertura de aterro de resíduos sólidos**. 2008. 225f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2008.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção com o método do papel filtro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 10., 1994, Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABMS, v.2, p.515-522, 1994.

MARINHO, F. A. M. Medição de sucção em solos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3., 1997, Rio de Janeiro-RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, v.2, p.373-397, 1997.

MARINHO, F. A. M.; OLIVEIRA, O. M. The filter paper method revisited. 2006. **Geotechnical Testing Journal**, USA, v. 29, n. 3, p. 250-258, 2006.

MARTÍNEZ, G. S. S. **Estudo do comportamento mecânico de solos lateríticos da formação barreiras**. 2003. 291f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2003.

MASCARENHAS, M. M. A. **Influência da microestrutura no comportamento hidromecânico de uma argila siltosa não saturada incluindo pequenas deformações**. 2008. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2008.

MATEUS, M. S. C. S.; BARBOSA, M. C. Estudo da influência das propriedades hidráulicas do solo no processo de evaporação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6., 2007, Salvador-BA. **Anais...** Salvador: UFBA, v.1, p.475-482, 2007.

McCARTNEY, J. S.; ZORNBERG, G. J. Effects of infiltration and evaporation on geosynthetic capillary barrier performance. **Canadian Geotechnical Journal**, v.47, n.11, p.1201-1213, 2010.

McGUIRE, P.; GUMTOW, J.; DOYLE, E. Evapotranspiration landfill cover design: characterization and soil environment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 4., 2006, Carefree/Arizona/USA. **Anais...** Carefree: ASCE, 2006. p.706-717.

MCKEE, C. R.; BUMB, A. C. Flow-testing coalbed methane production wells in the presence of water and gas. **Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation**, v.2, n.4, p.599-608, 1987.

MENEZES, J. A. L.; SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, J. R. L. Comportamento temporal da umidade do solo sob Caatinga e solo descoberto da Bacia Experimental do Jatobá, Pernambuco. **Water Resources and Irrigation Management**. v.2, n.1, p.45-51, 2013.

MENEZES, L. P. **Determinação da curva de retenção de água em solo utilizando bomba de fluxo**. 2013. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto-MG, 2013

MENEZES, M. B. M. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade**. 2010. 139f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2010.

MENEZES, M. B. M.; PEJON, O. J. Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade. **Geociências**, v.29, n.2, p.211-228, 2010.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. 290p.

MILLER, C. J.; MI, H.; YESILLER, N. Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. **Journal of the American Water Resources Association**. v.34, n.3, p. 677–686, 1998.

MORRIS, C. E.; STORMONT, J. C. Parametric study of unsaturated drainage layers in a capillary barrier. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.125, n.12, p.1057-1065, 1999.

MOTTA, E. Q. **Análise do colapso de um solo compactado devido à inundação e à interação solo-líquido contaminante**. 2006. 114f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2006.

NADLER, A.; LAPID, Y. An improved capacitance sensor for in situ monitoring of soil moisture. **Soil Research**, v.34, n.3, p.361-368, 1996.

NICHOLSON, R. V.; GILLHAM, R. W.; CHERRY, J. A.; REARDON, E. J. (1989)-Reduction of acid generation in mine through the use of moisture-retaining cover layers as oxygen barriers. **Canadian Geotechnical Journal**, v.26, n.1, p. 1-8, 1989.

NORMA ALEMÃ - **TA Siedlungsabfall**: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz): BAnz. Nr. 99a vom 29.05.1993. 65 seiten.

PACHECO, A. A. R. C.; DIAS JUNIOR, M. D. S. Estudo comparativo de métodos de campo e laboratório aplicados à confecção de blocos em adobe. **Ciência e Prática**, v.14, n.2, p.176-190, 1990.

PAIVA, W. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. 2009. 193f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2009.

PARIENTE, S.; LAVEE, H. Soil Organic Matter and degradation. **Soil conservation and Protection for Europe**, 2000.

PASCOAL, P. P. R.; MESQUITA, R. R. S. **Estudo de viabilidade do uso do RCC em camadas de cobertura de aterros sanitários**. 2014. 86f. Trabalho de Projeto Final (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2014.

PECORA, V; FIGUEIREDO, N. J. V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. Aproveitamento do biogás proveniente de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, 8., 2008, Poços de Caldas. **Anais...Itajubá**: UNIFEI / IEEE. p. 1-5, 2011.

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

PRESA, E. P. **Indeformabilidad de las arcillas expansivas bajo succion controlada**. 1982. Tesis (Doctoral) – Universidad Politécnica de Madrid, 1982.

RECESA – REDE DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL. **Resíduos sólidos**: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários: guia do profissional em treinamento: nível 2. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). Belo Horizonte: RECESA, 2008. 112p.

RICHARDS, B. G. The Significance of Moisture Flow and Equilibria in Unsaturated Soils in Relation to the Design of Engineering Structure Built on Shallow Foundations in Australia. In: ASTM SYMPOSIUM ON PERMEABILITY AND CAPILLARITY, Atlantic City, USA. **Proceedings...**Atlantic City: 1966.

ROBINSON, M.; DEAN, T. J. Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. **Hydrological Processes**, v.7, n.1, p.77-86, 1993.

RODRIGUES, E. M.; PEREIRA, T. M. S.; MOURA, D. C. Variabilidade climática no município de Serra Branca-PB, Semiárido Brasileiro. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO, 1., 2016, Campina Grande-PB. **Anais...**Campina Grande: Realize Editora, 2016.

ROSE, J. L. **Análise comparativa entre as reduções da emissão de metano em camadas oxidativas experimentais**. 2009. 148f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ,

SÁNCHEZ, M.; MANZOLI, O. L.; GUIMARÃES, L. J. N. Modeling 3-D desiccation soil crack network using a mesh fragmentation technique. **Computers and Geotechnics**, v.62, p.27-39, 2014.

SANTOS, G. M. **Comportamento hidromecânico de solo e das misturas solo-composto utilizados em camadas de cobertura no aterro experimental da Muribeca, Pernambuco**. 2015. 196f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2015.

SANTOS, G. M.; LOPES, R. L.; JUCÁ, J. F. T.; MARIANO, M. O. H.; PAIVA, W. Uso de critério de escolha de modelos empíricos para ajuste de curva de retenção de água de solo adicionado com composto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 16., 2012, Porto de Galinha/Ipojuca-PE. **Anais...** Camaragibe: CCS, v.1, p.01-414, 2012.

SANTOS, G. M.; FERREIRA, S. R. M. Análise de três solos compactados utilizados em camada de cobertura de aterro de resíduos sólidos urbanos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 8., 2015, Fortaleza-CE. **Anais...**Fortaleza: CT/UFC, v.1, p.365-372, 2015.

SANTOS, J. J. N.; ARAÚJO NETO, C. L.; CARIBÉ, R. M.; MONTEIRO, V. E. D.; MELO, M. C. Interrelações entre matéria orgânica, pH, teor de água em solo de cobertura de aterro experimental. In: SEMANA OFICIAL DE ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 72., 2015, Fortaleza-CE. **Anais CONTECC...** Fortaleza: CREA, 2015.

SANTOS, P. S. **Tecnologia das argilas**. 1. v. São Paulo: Editora Blucher, 1975. 340p.

SANTOS, T. F. L. **Estudo experimental da camada de cobertura do aterro Morro do Céu, Niterói-RJ**. 2009. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2009.

SCHEUTZ, C.; KJELDSSEN, P.; BOGNER, J. E.; DE VISSCHER, A.; GEBERT, J.; HILGER, H. A.; HUBER-HUMER, M.; SPOKAS, K. Microbial methane oxidation processes and Technologies for mitigation of landfill gas emissions. **Waste Management & Research**, v.27, n.5, p.409-455, 2009.

SCOTT, D. H. **Soil physics: agricultural and environmental applications**. Ames: Iowa State University Press, 2000. 421p.

SEED, H. B.; WOODWARD, R. J.; LUNDGREN, R. Prediction of swelling potential for compacted clays. **Journal of the Soils Mechanics and Foundations Division**, v.88, n.3, p.53-87, 1962.

SEYFRIED, M. S.; MURDOCK, M. D. Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, n.2, p.394-403, 2004.

SHOCK, C. C.; WANG, F. X. Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. **HortScience**, v.46, n.2, p.178-185, 2011.

SILVA, A. M. **Estudo de parâmetros de compactação proctor no comportamento mecânico do solo**. 2015. 183f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2015.

SILVA, A. S. **Análise de componentes tóxicos em resíduos sólidos urbanos**. 2016. 158f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2016.

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E.; AMORIM, R. S.; PAIVA, K. W. Efeito da cobertura nas perdas de solo em um argissolo vermelho-amarelo utilizando simulador de chuva. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.2, p.409-419, 2005.

SILVA, D. L. M.; SANTOS, J. J. N.; ARAÚJO NETO, C. L.; ARAUJO, P. S.; MONTEIRO, V. E. D. Influência da plasticidade e mineralogia do solo no desempenho de liners em aterros sanitários. In: SEMANA OFICIAL DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 73., 2016, Foz do Iguaçu-PR. **Anais CONTECC...Foz do Iguaçu: CREA**, 2016.

SILVA, M. J. R. **Comportamento geomecânico de solos colapsíveis e expansivos em Petrolina: cartas de suscetibilidade**. 2003. 110f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2003.

SILVA, M. T. M. G. **Metodologia para determinação de parâmetros para solos não saturados utilizando ensaios com umidade conhecida**. 2009. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2009.

SIMÕES DE OLIVEIRA, A. G.; JESUS, A. C.; MIRANDA, S. B. Estudo geológico-geotécnico dos solos expansivos da região do Recôncavo Baiano. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS, 2., 2006, Nova Friburgo-RJ. **Anais...** Nova Friburgo: ABMS, 2006.

SKEMPTON, A. W. The colloidal activity of clays. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1953, Zurich/Germany. **Proceedings...** Zurich: ISSMGE, v.1, p.57-61, 1953.

SOARES, A. F. **Cobertura final de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos avaliada sob o enfoque da oxidação microbiológica de metano**. 2011. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo-RS, 2011.

SOUZA, L. A. Solo fértil: influência do pH. **Mundo Educação**, Mar. 2017. Disponível em <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/solo-fertil-influencia-ph.htm>>. Acesso em: 13 de mar. 2017.

STUERMER, M. M. **Estudo da capacidade de retenção de água em um solo residual compactado**. 1998. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 1998.

SUN, J.; YUEN, S. T. S.; FOURIE, A. B. The effect of using a geotextile in a monolithic (evapotranspiration) alternative landfill cover on the resulting water balance. **Waste Management**. Journal Homepage. v. 30, p. 2074-2083, 2010.

TEIXEIRA, P. F.; LIOTTI, R. G.; TORVES, J. C.; FINOTTI, A. F.; CABRAL, A.; VAZOLLER, R. F.; TEIXEIRA, C. E.; MARINHO, F. A. M. Processo de oxidação do metano através das bactérias metanotróficas em coberturas de aterros sanitários. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 6., 2007, Salvador-BA. **Anais...** Salvador: ABMS, v.1,p.541-549, 2007.

TOPP, G. C.; YANUKA, M.; ZEBCHUK, W. D.; ZEGELIN, S. Determination of electrical conductivity using time domain reflectometry: Soil and water experiments in coaxial lines. **Water Resources Research**, v.24, n.7, p.945-952, 1988.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Solid waste disposal facility criteria technical manual**. Office of solid waste and emergency response. EPA-530-R-93-017. Washington DC.: USEPA, 1993. 11p.

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

\_\_\_\_\_. **Fact sheet on evapotranspiration cover systems for waste containment.** Office of solid waste and emergency response. EPA-542-F-11-001. Cincinnati: USEPA, 2011. 26p.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, n.5, p.892-898, 1980.

VIEIRA, A. M. **Estudo de barreiras capilares como cobertura final de aterro de resíduos.** 2005. 287f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2005.

VOGEL, H. J.; HOFFMANN, H.; ROTH, K. Studies of crack dynamics in clay soil. Experimental methods, results, and morphological quantification. **Geoderma**, v.125, p.203–211, 2005.

WILLIAMS, A. A. B.; DONALDSON, G. W. Building on expansive soils in South Africa. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 4., 1980, Denver/Colorado/USA. **Proceedings...**Denver: v.2, p.834-844, 1980.

YANG, C.; SHENG, D.; CARTER, J. P. Effect of hydraulic hysteresis on seepage analysis for unsaturated soils. **Computers and Geotechnics**. Journal Homepage. v.41, p.36-56, 2012.

ZHANG, W.; SUN, C. Parametric analyses of evapotranspiration landfill covers in humid region. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**. Journal Homepage. v. 6, p. 356-365, 2014.

ZORNBERG, J. G. Geosynthetic capillary barriers. In: International GSI-Asia Geosynthetics Conference, 1st, 2010, **Anais Taichung**, Taiwan, 2010. p.16.

ZORNBERG, J. G.; LaFOUNTAIN, L.; CALDWELL, J. A. Analysis and design of evapotranspirative cover for hazardous waste landfill. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v.129, n.6, p.427-438, 2003.