



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

**ESTUDO DA PERMEABILIDADE EM SOLOS UTILIZADOS EM CAMADA DE
BASE DE ATERRO SANITÁRIO NO SEMIÁRIDO PARAIBANO**

WLYSSES WAGNER MEDEIROS LINS COSTA

CAMPINA GRANDE – PB

Agosto de 2019

WLYSSES WAGNER MEDEIROS LINS COSTA

**ESTUDO DA PERMEABILIDADE EM SOLOS UTILIZADOS EM CAMADA DE
BASE DE ATERRO SANITÁRIO NO SEMIÁRIDO PARAIBANO**

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^a. Dr^a. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Coorientador: Prof. Dr. William de Paiva

CAMPINA GRANDE – PB

23 de Agosto de 2019

C837e

Costa, Wlysses Wagner Medeiros Lins.

Estudo da permeabilidade em solos utilizados em camada de base de aterro sanitário no semiárido paraibano / Wlysses Wagner Medeiros Lins Costa. – Campina Grande, 2019.

93 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

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

Referências.

1. Aterro Sanitário. 2. Geotecnia. 3. Lixiviado. 4. Camada de Base. 5. Solos não Saturados. 6. Permeabilidade. I. Monteiro, Veruschka Escarião Dessoles. II. Paiva, William de. III. Título.

CDU 628.472.3(043)

**ESTUDO DA PERMEABILIDADE EM SOLOS UTILIZADOS EM CAMADA DE
BASE DE ATERRO SANITÁRIO NO SEMIÁRIDO PARAIBANO**

WLYSSES WAGNER MEDEIROS LINS COSTA

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.ª Dr.ª Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)



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



Prof. Dr. Márcio Camargo de Melo
(Examinador Interno – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)



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

CAMPINA GRANDE – PB

Agosto de 2019

Dedicatória

Aos meus pais que sempre acreditaram e
incentivaram nas minhas escolhas profissionais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me ajudar nos momentos mais difíceis da minha vida que com a Virgem Maria, foram pilares importantes para fazer com que eu chegasse até aqui, sem me deixar cair e nem desistir no meio do caminho.

A minha família que sempre se faz presente na minha vida, dando apoio e incentivo em todas as minhas decisões. Em especial, aos meus pais que sempre estiveram comigo em todos os momentos da minha vida e que me ensinaram muito além do que se possa imaginar, me ensinaram a ser humano e companheiro, eles são meu exemplo de dignidade e humildade.

Aos meus irmãos, Érika, Renato, Jesyka e Karol, por sempre se fazerem presente na minha vida, e tornar a minha vida um pouco menos individual. A Dante e Princesa que foram uma injeção de felicidade e ânimo na minha vida.

Aos meus orientadores, Veruschka Escarião e William de Paiva, que nunca mediram esforços para engrandecer o meu trabalho e que me ensinaram muito além do que se pode aprender na academia.

Agradeço ao Grupo de Geotecnia Ambiental, pela parceria na realização dos meus experimentos, aprendi muitas coisas com o convívio diário com todos vocês, considero-os como uma grande família. A amiga do coração, Daniela Machado, que sempre esteve presente comigo ao longo desses anos e que contribuiu bastante para o meu engrandecimento profissional e principalmente humano. A amiga Diva Guedes e Vitória Régia que se fizeram parceiras sempre, desde a graduação, e que contribuíram muito nos momentos mais difíceis nesse ano de pesquisa. Aos amigos Cláudio e Pablllo por todo o ensinamento passado que não ficava apenas nas conversas de grupo de pesquisa, mas se estendia por tudo, vocês são muito sábios.

Ao grupo “Engenheiros” que sempre incentivou e acreditou no meu potencial.

Agradeço aos membros da banca examinadora que gastaram um pouco do seu tempo para poder participar do engrandecimento do meu trabalho, todas as contribuições são de fundamental importância.

Aos técnicos dos laboratórios, Netinho, Ronildo, Jadilson e Joseildo, que nunca mediram esforços para ajudar na execução de ensaios e na transmissão de conhecimentos.

Ao Laboratório de Engenharia Eletroquímica (LEEq), em nome do professor Eudésio, que não mediu esforços e que, apesar do pouco tempo de contato, foi capaz de transmitir muitos ensinamentos. Muito obrigado.

Aos amigos do LEP Thamires, Jisla, Jefferson, Priscilla, Tássila, Ladjane, Paulo Marinho, Marco Aurélio e Daniel pela amizade e incentivo de vocês.

Aos professores Adriano, Lêda, Kennedy, Márcio e Rui pela amizade e por todo o conhecimento compartilhado.

A empresa ECOSOLO, na pessoa do Engenheiro João Azevedo, pela parceria no desenvolvimento da pesquisa e por disponibilizar seu tempo para o fornecimento de informações sobre o gerenciamento do aterro sanitário de Campina Grande-PB

A Universidade Federal de Campina Grande por todo o conhecimento adquirido ao longo desses anos.

A CAPES pela bolsa concedida ao longo desses anos de pesquisa e desenvolvimento de conhecimento para a sociedade, que me permitiu adquirir conhecimentos em congressos nacionais e internacionais e em especializações na área da engenharia civil.

A todos que de forma direta ou indireta puderam contribuir para a realização desse trabalho.

RESUMO

As camadas de base dos aterros sanitários são constituintes cuja função é impedir o fluxo de contaminantes para o subsolo e águas subterrâneas. Uma das formas de se executar essa camada de base é utilizando-se solo compactado por ser uma alternativa viável e de baixo custo quando há jazidas disponíveis no local ou em áreas circunvizinhas. A composição de solos com outros materiais, a exemplo da bentonita, para uso em camadas de base de aterros sanitários torna-se viável quando o solo natural não é capaz de atender às normas e legislações nacionais e internacionais, devido as suas propriedades impermeabilizantes. O objetivo desse trabalho é analisar a permeabilidade em misturas de solo utilizadas em camadas de base em aterros sanitários. O campo experimental para o desenvolvimento desse trabalho foi o aterro sanitário em Campina Grande – PB, a qual executa a camada de impermeabilização de base do aterro utilizando dois tipos de solos: solo granular local e bentonita. A elevada capacidade de retenção de água da bentonita e sua alta capacidade de expansão são características que conferem ao material resistência à passagem de água, características do argilomineral montmorilonita. Neste estudo, foram considerados diversos fatores que interferem no comportamento da permeabilidade dos solos, dentre eles, o teor de bentonita, a energia de compactação, umidade de compactação, grau de saturação e fluido percolante. Com o uso da estatística foi possível realizar interações com os diversos parâmetros, a exemplo do teor de bentonita, energia de compactação e umidade de compactação da mistura por meio de um planejamento fatorial e utilizando-se um delineamento composto central. Os experimentos para a determinação da permeabilidade do solo foram realizados utilizando-se o permeâmetro Tri-flex 2 tendo como fluido percolante a água e o lixiviado. Já os ensaios de sucção foram realizados na câmara de Richards, com energia de compactação do Proctor normal utilizando-se cinco tipos de solos. Com os estudos realizados observou-se que o solo da barreira impermeabilizante de base na sua condição de campo, isto é, na condição não saturada, atende aos valores de coeficiente de permeabilidade recomendados pela NBR 13896 (1997) e EPA (1993) para compor barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários. Os resultados dos ensaios de permeabilidade mostram que o teor de bentonita é a variável que exerce maior influência sobre a permeabilidade do solo. O solo com a adição de bentonita funcionou como um filtro eficiente para reter os sólidos dissolvidos do lixiviado. A utilização do lixiviado como fluido percolante acarretou uma redução na permeabilidade do solo em relação ao fluxo com água, que possibilitou uma redução na adição de bentonita para o dimensionamento da *liner*.

Palavras-chave: Camada de base, Aterro sanitário, lixiviado, permeabilidade, solos não saturados.

ABSTRACT

The liners of landfills are constituents which function is to prevent the flow of contaminants to subsoil and groundwater. One way of building liners is by using compacted soil as it is a viable and low-cost alternative when deposits are available on-site or in surrounding areas. The composition of soils with other materials, such as bentonite, for use in landfill liners becomes feasible when natural soil is unable to meet national and international standards and legislation due to its waterproofing properties. The aim of this work is to analyze the permeability in soil mixtures used in landfill base layers. The experimental field for the development of this work was the landfill in Campina Grande – PB, which performs the waterproofing base layer using two types of soils: local granular soil and bentonite. The great water retention capacity of bentonite and its high expansion capacity are characteristics that give the material resistance to water flow, which are characteristics of montmorillonite clay. In this study, several factors that influence the behavior of soil permeability were considered, among them, the bentonite content, compaction energy, compaction moisture, saturation degree and percolating fluid. With statistics, interactions with the various parameters were performed, such as bentonite content, compaction energy and compaction moisture of the mixture through a factorial design and using a central composite design. The experiments to determine the soil permeability were performed using the Tri-flex 2 permeameter with water and leachate as percolating fluid. The suction tests were performed in the Richards chamber, with normal Proctor compaction energy, using five soil types. With the studies performed it was observed that the soil of the waterproofing barrier base in its field condition, that is, in the unsaturated condition, meets the permeability coefficient values recommended by NBR 13896 (1997) and EPA (1993) to compose waterproofing barriers of landfill bases. The permeability test results show that the bentonite content is the variable that displays the greatest influence on soil permeability. The soil with the bentonite addition functioned as an efficient filter to retain the solids dissolved in the leachate. The leachate use as a percolating fluid led to a reduction in soil permeability when compared to water, which allowed a reduction in the addition of bentonite for the liner design.

Keywords: liners, landfill, leachate, permeability, non-saturated soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Efeito da compactação na estrutura interna do solo.....	27
Figura 2: Determinação da zona admissível.....	28
Figura 3: Variação da condutividade ao longo da saturação da amostra de solo	30
Figura 4: Curvas de retenção típicas de solos com ênfase na granulometria	32
Figura 5: Esquema da câmara de Richards.....	33
Figura 6: Localização do Aterro Sanitário de Campina Grande.	40
Figura 7 - Construção do sistema de drenagem de lixiviado do ASCG.....	41
Figura 8: Analisador de partículas por difração a laser	44
Figura 9: Permeâmetro de parede flexível TRI-Flex 2.....	47
Figura 10: Câmara de permeabilidade com corpo de prova evidenciando a frente de umidade na saturação	48
Figura 11: Reservatório em aço inox para armazenamento de lixiviado	49
Figura 12: Ensaio de permeabilidade ao lixiviado	49
Figura 13: Corpo de prova após ensaio de permeabilidade ao lixiviado.....	50
Figura 14: Célula de disposição entre as células 1 e 2 (C1+C2).....	51
Figura 15: Viscosímetro Ostwald com tubo capilar	51
Figura 16: Tubo Capilar com lixiviado	52
Figura 17: Curva granulométrica do solo natural.....	54
Figura 18: Curva granulométrica da bentonita abrangendo todas as faixas do solo	55
Figura 19: Curvas de Compactação dos solos analisados	57
Figura 20: Curva de retenção de umidade	61
Figura 21: Curva de retenção de umidade	62
Figura 22: Teor de umidade gravimétrica <i>versus</i> sucção matricial do solo natural	64
Figura 23: Teor de umidade gravimétrica <i>versus</i> sucção matricial da composição de solos com 10 % de Bentonita	64
Figura 24: Teor de umidade gravimétrica <i>versus</i> sucção matricial da composição de solos com 20 % de Bentonita	65
Figura 25: Teor de umidade gravimétrica <i>versus</i> sucção matricial da composição de solos com 30 % de Bentonita	66
Figura 26: Teor de umidade gravimétrica <i>versus</i> sucção matricial da Bentonita.....	66

Figura 27: Teor de umidade gravimétrica <i>versus</i> permeabilidade não saturada do solo.....	67
Figura 28: Teor de umidade gravimétrica <i>versus</i> permeabilidade não saturada da Bentonita .	67
Figura 29: Líquidos afluente (a) e efluente (b) do corpo de prova com solo natural	72
Figura 30: Corpo de prova com 20% de adição de bentonita.....	73
Figura 31: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o DCC - permeabilidade à água	75
Figura 32: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o DCC - permeabilidade ao lixiviado	75
Figura 33:Superfície resposta do DCC para Energia de compactação x Teor de umidade Permeabilidade à água x 10 ⁻⁹	77
Figura 34: Superfície resposta do DCC para Energia de compactação x Teor de umidade – Permeabilidade ao lixiviado x 10 ⁻⁹	78
Figura 35:Superfície resposta do DCC para Energia de compactação x Teor de bentonita – permeabilidade à água	79
Figura 36: Superfície resposta do DCC para Energia de compactação x Teor de bentonita – permeabilidade ao lixiviado	80
Figura 37: Superfície resposta do DCC para teor de bentonita x teor de umidade – permeabilidade à água.	81
Figura 38: Superfície resposta do DCC para teor de bentonita x teor de umidade – permeabilidade ao lixiviado.	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características geotécnicas do solo para utilização em aterros sanitários.....	22
Quadro 2: Características de solos finos com composições mineralógicas distintas	27
Quadro 3: Equações para ajustes de curvas de retenção	34
Quadro 4: Equações empíricas para a determinação da permeabilidade não saturada.	37
Quadro 5: Caracterização do solo.....	43
Quadro 6: Faixa de valores adotados para o planejamento experimental	45
Quadro 7: Delineamento dos experimentos	46
Quadro 8: Valores do peso específico dos grãos de solo	53
Quadro 9: Complexo sortivo dos solos analisados.....	58
Quadro 10: Classificação do solo de acordo com o pH.....	58
Quadro 11: Valores de pH e condutividade elétrica do solo	59
Quadro 12: Valores de COT e MO observados nos solos.....	61
Quadro 13: Parâmetros estimados pela equação de Van Genuchten.....	63
Quadro 14: Resposta do planejamento com Delineamento Composto Central (DCC).....	69
Quadro 15: Dados de caracterização Físico-química do Lixiviado da Célula C1+C2.....	70
Quadro 16: Dados de viscosidade da água realizados em laboratório	71
Quadro 17: p valor para o modelo DCC - Permeabilidade à água	76
Quadro 18:P valor para o modelo DCC - Permeabilidade ao lixiviado	77

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)

API – American Petroleum Institute

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
SRes – 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
UFCEG – Universidade Federal de Campina Grande
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
USEPA – United States Environmental Protection Agency
R² - Coeficiente de determinação
w – Umidade gravimétrica do solo
w_{ótima} – Umidade ótima
w_{pf} – Umidade do papel filtro
 σ – Tensão total
 σ' – Tensão efetiva
 μ – Poropressão ou Tensão neutra
 μ_a – Pressão de ar nos poros

μ_w – Pressão na água dos poros
 Φ_{Total} – Potencial total
 Φ_{Osm} – Potencia osmótico
 Φ_{Mat} – Potencial matricial
 Φ_{Grav} – Potencial gravitacional
 Φ_{Pres} – Potencial de pressão
 Ψ_{Total} – Sucção total
 $\Psi_{\text{Matricial}}$ – Sucção matricial
 $\Psi_{\text{Osmótica}}$ – Sucção osmótica
 Ψ_{Residual} – Sucção residual
 θ – Umidade volumétrica do solo
 θ_{Res} – Umidade volumétrica residual
 θ_{Nor} – Umidade volumétrica normalizada
 θ_{Sat} – Umidade volumétrica de saturação
 γ_w – Peso específico da água
 γ_d – Peso específico seco do solo
 ρ_s – Massa específica dos grãos de solo
 k_s : permeabilidade saturada

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	18
1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	19
1.1.1 Objetivo Geral.....	19
1.1.2 Objetivos Específicos.....	19
CAPÍTULO 2	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Camadas de impermeabilização de base em aterros sanitários	20
2.2 A permeabilidade em camadas de impermeabilização de base	23
2.2.1 Características do fluido percolante.....	25
2.2.2 Características do solo	26
2.2.2.1 Tamanho das partículas.....	26
2.2.2.2 Composição mineralógica.....	27
2.2.2.3 Estrutura	27
2.2.2.4 Grau de saturação.....	29
2.3 Solos não saturados	30
2.3.1 Curva de retenção de água no solo	32
2.3.2 Permeabilidade não saturada.....	35
2.3.2.1 Métodos experimentais	35
2.3.2.2 Modelos para a função permeabilidade.....	36
CAPÍTULO 3	40
3. METODOLOGIA.....	40
3.1 CENÁRIO DE ESTUDO	40
3.2 EXPERIMENTOS.....	42

3.2.1 Ensaio de caracterização do solo	42
3.2.2 Determinação da permeabilidade não saturada do solo.....	44
3.2.3 Ensaio de permeabilidade saturada à água e ao lixiviado	44
3.2.3.1 Ensaio de permeabilidade à água	44
3.2.3.2 Ensaio de permeabilidade ao lixiviado.....	49
3.2.3.2.1 Fluido percolante utilizado no ensaio de permeabilidade ao lixiviado	50
3.2.3.3 Ensaio de permeabilidade à água in situ (cilindro de anel simples).....	52
CAPÍTULO 4	53
4. RESULTADOS	53
4.1 Ensaio de caracterização do solo	53
4.1.1 Umidade higroscópica	53
4.1.2 Peso específico dos grãos de solo	53
4.1.3 Distribuição granulométrica.....	54
4.1.4 Índices de consistência.....	55
4.1.5 Curva de compactação	56
4.1.6 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	57
4.1.7 pH e condutividade elétrica	58
4.1.8 Carbono Orgânico Total e Matéria Orgânica.....	60
4.2 Determinação da permeabilidade não saturada do solo.....	61
4.3 Ensaio de permeabilidade à água e ao lixiviado	69
4.3.1 Análise geral dos experimentos	69
4.3.2 Análise estatística dos experimentos	74
CAPÍTULO 5	83
5. CONCLUSÕES	83
CAPÍTULO 6	85
6. REFERÊNCIAS	85

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários possuem elementos estruturais como as barreiras de impermeabilização de base e cobertura. As barreiras de base têm a função de impedir o fluxo do líquido percolado para o meio hidrogeológico subjacente. Já as camadas de cobertura funcionam como vedação dos resíduos aterrados, além de reduzir a infiltração de água superficiais, e por sua vez, reduzir a geração de líquido percolado (ALONSO, 2005).

As camadas de base, foco deste trabalho, são de fundamental importância nessas obras de engenharia, porém nem sempre o solo natural da localidade do aterro fornece uma impermeabilização eficiente. Os geossintéticos são soluções de impermeabilização muito eficientes e de resposta eficaz, porém apresentam elevado custo. Soluções de impermeabilização com misturas de solos, como a bentonita, são largamente utilizadas e já foram objetos de estudo por outros autores (HOEKS *et al.*, 1987; KENNEY *et al.*, 1992; MOLLINS *et al.*, 1996; STEWART *et al.*, 2003; MAHLER *et al.*, 2015; SILVA, 2017).

O emprego de solo como material impermeabilizante sobre os resíduos depositados em aterros sanitários torna-se economicamente viável quando há disponibilidade de matéria-prima que atenda às exigências das normas, apresentando menor custo em relação ao uso de materiais sintéticos (ARAUJO *et al.*, 2014). Essa tecnologia pode ser utilizada quando o nível do lençol freático é profundo, com camadas de solos espessas não-saturados e de alta capacidade de retenção de poluentes (BOSCOV, 2008).

Como critérios de execução de camadas de base de solo compactado, as normas vigentes no Brasil, exigem apenas satisfazer a condição de permeabilidade à água, sendo que em campo essa situação não condiz com a realidade pois o lixiviado, líquido percolante nessas camadas de base, possui características diferentes. Sua composição é bastante variável, complexa e sempre difere de um aterro para outro, apresentando, na maioria das vezes, compostos tóxicos como: ácidos graxos voláteis, nitrogênio amoniacal e metais pesados dissolvidos em elevadas concentrações (OLLER, MALATO e SÁNCHEZ-PÉREZ, 2011).

Os estudos que envolvem permeabilidade nos solos devem levar em consideração a influência dos diversos fatores que interferem no seu comportamento, tais como mineralogia do solo, energia de compactação, umidade, grau de saturação e fluido percolante. Além disso, o uso de ferramentas estatísticas, proporcionam levar em consideração diversos fatores para o

dimensionamento do número mínimo de ensaios e com um grau de confiança satisfatório para chegar a conclusão mais precisa de projetos de execução de camadas de base de solo compactado para aterros sanitários.

Diante disso, a interação dos fatores que interferem na permeabilidade dos solos tem o objetivo de analisar o comportamento da permeabilidade em misturas de solos para utilização em camadas de base de aterros sanitários.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a permeabilidade em misturas de solo utilizadas em camadas de base em aterros sanitários.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência das caracterizações física, química e mineralógica dos solos e do lixiviado no comportamento hidráulico de misturas de solo para compor camadas de base de aterros sanitários;
- Avaliar o comportamento não saturado dos solos estudados e sua relação com a permeabilidade do solo à água;

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Camadas de impermeabilização de base em aterros sanitários

As camadas de impermeabilização de base em aterros sanitários são utilizadas com o intuito de impedir o fluxo do líquido percolado, lixiviado, para o meio hidrogeológico subjacente. Esse elemento deve apresentar características compatíveis com a função que ele deve desempenhar, tais como estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica e as intempéries e compatibilidade com os resíduos aterrados (ALONSO, 2005). Segundo Piedade Junior (2003), a escolha adequada do tipo de impermeabilização de base depende da agressividade química do lixiviado, do coeficiente de permeabilidade do local, da economia com relação ao empréstimo de material natural, entre outros.

As camadas de base são de fundamental importância nessas obras de engenharia quando o solo natural da localidade do aterro não fornece uma impermeabilização eficiente. Para o dimensionamento dessas camadas devem ser levados em conta o tipo de resíduo e as condições climáticas e geológicas do local (PIEADADE JÚNIOR, 2003).

As camadas de impermeabilização mais antigas utilizavam apenas solos compactados em suas estruturas (LENGEN & SIEBKEN, 1996). Atualmente, os sistemas de impermeabilização evoluíram e se passou a fazer uso de diversos materiais como solo compactado; concreto; emulsões asfálticas; solo-cimento; membranas de bentonita; misturas de areia e bentonita; polietileno clorosulfurado (Hypalon); cloreto polivinílico (PVC); polietileno (PE); polietileno clorado, borracha butílica, além de outras composições (BOFF, 1998).

De acordo com Rowe (1995) e Boscov (2008), para a impermeabilização de aterros sanitários podem ser utilizadas camadas de solo compactado (compacted clay liner ou CCL); geossintéticos (geomembrana – GM, ou geocomposto argiloso para barreira impermeável – GCL) ou, mais usualmente, uma combinação destas.

Os solos são utilizados com muita frequência em camadas de impermeabilização de base em aterros sanitários com a finalidade de inibir o fluxo de contaminantes para o meio ambiente, fazendo com que seja classificado como uma área contaminada. Segundo Boscov (2008), o contato de uma solução no solo pode alterar suas características e propriedades, aumentando ou diminuindo a sua plasticidade, permeabilidade, compressibilidade ou resistência.

O emprego de solo como material impermeabilizante sobre os resíduos depositados em aterros sanitários torna-se economicamente viável quando há disponibilidade de matéria-prima que atenda às exigências das legislações ambientais, apresentando menor custo em relação ao uso de materiais sintéticos (ARAÚJO *et al.*, 2014). Essa tecnologia pode ser utilizada quando o nível do lençol freático é profundo, com camadas de solos espessos não-saturados e de alta capacidade de retenção de poluentes (BOSCOV, 2008).

Segundo Leme e Miguel (2014), dentre os vários tipos de camadas de impermeabilização, aqueles compostos por solos argilosos compactados comprovam ser vantajosos em questão de custo-benefício, no entanto, cada solo apresenta características e propriedades diferentes, sendo necessário, em cada caso, estudá-las previamente. Dessa forma, a fração de finos do material (inferior a 0,074 mm) possui as funções de impermeabilização e atenuação dos contaminantes, enquanto a fração granulométrica mais grossa funciona como barreira física aos rejeitos dispostos (SOUZA, 2009).

Determinadas as características do solo, pode-se melhorar seu desempenho como barreira elevando a espessura da camada ou aprimorando a sua compactação, reduzindo assim, o número de vazios (ALMEIDA *et al.*, 2010). Segundo Locastro e De Angelis (2016), a camada de solo compactado apresenta ainda como vantagem a redução de custos, visto que se podem fazer o uso de solos presentes nas proximidades do próprio aterro.

Mistura de solo com a adição de bentonita vem sendo muito usada em camadas de solo compactada em bases de aterros. A elevada capacidade de retenção de água da bentonita e sua alta capacidade de expansão são características que conferem ao material resistência à passagem de água, características do argilomineral montmorilonita.

Em condições confinadas as partículas expandidas são forçadas entre si de maneira que ocorra o preenchimento dos vazios entre as partículas do solo formando uma barreira contra a passagem de fluxo (LUKIANCHUKI, 2007). Essa propriedade denominada de cicatrização é o que garante a eficiência da camada ativa e que faz com que a mistura solo-bentonita trabalhe continuamente evitando que fluidos ultrapassem a camada tratada.

Segundo Brasil (2016), o Estado da Paraíba é o maior produtor bruto de bentonita no país, tanto na forma bruta como na forma beneficiada, ou seja, que passou por algum processo de redução de impurezas, respondendo por 60,8% e 47,7% da produção nacional, respectivamente. Verificou-se ainda que a bentonita é uma alternativa recente ainda não explorada em nenhum município do nordeste e, no caso de Campina Grande - PB, apresentou

potencial de exploração pela constatação de disponibilidade do material dentro do próprio município (LIMA *et al.*, 2011).

No Brasil, a NBR 13.896 (ABNT, 1997) faz exigências vacantes de coeficiente de permeabilidade, não exigindo outras características do solo. Considera desejável que depósitos naturais de solo do terreno apresentem coeficiente de permeabilidade mínimo de 10^{-8} m/s, porém, sem nenhuma imposição adicional, sobretudo, no tocante a configuração das camadas de solo compactado, energia de compactação, umidade e outros fatores. Ainda estabelece que a zona não saturada seja de, no mínimo, 3 m de profundidade (SILVA, 2017).

Algumas normas internacionais e estaduais preconizam alguns parâmetros mais específicos para as características geotécnicas, observadas no Quadro 1.

Quadro 1: Características geotécnicas do solo para utilização em aterros sanitários

Norma regulamentadora	Coeficiente de 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)	5×10^{-10}	-	-	>0,50m	-
ABNT (1997)	5×10^{-8}	-	-		-
USEPA (2004)	5×10^{-9}	IP: 7 - 15%	30 - 50%	0,30-0,60	-
FEAM (2006)	-	-	-	0,20-0,60	-

Fonte: Araújo (2017)

O monitoramento das atividades nos aterros sanitários é imprescindível para evitar possíveis danos ao meio ambiente. O monitoramento leva em consideração os aspectos geotécnicos e ambientais para traçar medidas preventivas e corretivas por meio dos resultados das observações de campo, da análise da instrumentação instalada e das análises físico-químicas e microbiológicas em amostras de águas superficiais e subterrâneas, e em amostras de lixiviado. (CATAPRETA *et al.*, 2016).

O monitoramento nas camadas de impermeabilização de base é bem difícil quando a disposição de resíduos já foi iniciada, qualquer erro cometido na execução dessa camada ou no sistema de drenagem de lixiviado, pode ocasionar danos irreversíveis ao meio ambiente. Dessa forma, deve ser tomado muito cuidado na execução dessa camada, com o controle de

compactação e verificação da permeabilidade do solo *in situ*, assim que possível, para garantir a sua estanqueidade.

O estudo de viabilidade de materiais alternativos para camadas de solos compactadas geralmente compreende o estudo de permeabilidade, resistência e/ou deformabilidade do solo, sendo esperado que futuramente os estudos com transporte de poluentes façam também parte dessa avaliação (SOARES, 2012). Segundo Boscov (2008), o conhecimento dos processos potencialmente causadores de impacto ambiental, como o transporte de poluentes e a compatibilidade entre lixiviado e solo, poderão permitir maior flexibilidade na elaboração de projetos.

2.2 A permeabilidade em camadas de impermeabilização de base.

Em camadas de impermeabilização de base, a condutividade hidráulica, é um parâmetro que ganha muita visibilidade por ser um critério estabelecido para execução dessas camadas. A permeabilidade é uma propriedade essencial do solo e que é necessária a todo estudo que envolva o fluxo de fluidos no meio.

Experimentalmente, em 1850, Darcy verificou como os diversos fatores geométricos influenciavam na vazão da água, que escoava em um filtro de areia, onde se estabeleceu uma relação empírica que é até hoje conhecida como Lei de Darcy, Equação 1. A Lei de Darcy relaciona a velocidade de descarga de um fluido através de um meio poroso, com um gradiente hidráulico. A razão observada por essas grandezas seguia uma constante de proporcionalidade (k) que foi chamada de condutividade hidráulica, Equação 1.

$$v = k \cdot i \tag{1}$$

Sendo:

v: velocidade de descarga de um fluido

k: condutividade hidráulica

i: Gradiente hidráulico

O coeficiente de permeabilidade de 10^{-9} m/s, adotado como critério de dimensionamento em diversos países ao redor do mundo, resulta da aplicação da Lei de Darcy para percolação sob gradiente hidráulico unitário através de uma camada de impermeabilização de 1 m de espessura, para garantir que o percolado demore no mínimo 30 anos para atravessar a camada, tempo após o qual o lixiviado, por hipótese, não mais seria poluente (BOSCOV, 2008).

A determinação do coeficiente de permeabilidade do solo pode ser definida por meio de ensaios de campo e de laboratório. Os ensaios de laboratório apresentam as vantagens de poder controlar a saturação, as tensões efetivas, a carga hidráulica e a direção do fluxo, além disso, são ensaios curtos e de baixo custo. Já os ensaios de campo sofrem menos o efeito escala, devido ao fato de que a quantidade do solo ensaiado em campo é maior que o ensaiado em laboratório (DANIEL *et al.*, 1984).

Os ensaios para a determinação da permeabilidade em laboratório podem ser realizados utilizando permeômetros de parede rígida ou de parede flexível. A escolha pelo equipamento mais adequado está ligada com as condições de contorno a serem utilizadas, o tipo de material a ser ensaiado e as características do fluido percolante.

O permeômetro de parede rígida é composto por um cilindro contido em uma caixa ou tubo rígido, o corpo de prova é centralizado dentro do cilindro e suas laterais são preenchidas com material selante. O fluido percola ao longo do corpo de prova a partir do topo em amostras com menor expansividade que as utilizadas em permeômetros de parede flexível. (LUKIANCHUKI, 2007).

Devido a sua facilidade de uso e montagem, os permeômetros de parede rígida são muito utilizados, porém a inexistência de controle sobre as pressões atuantes na amostra, a falta de controle na saturação e, principalmente, a possibilidade de ocorrência de fluxo pelas laterais do tubo do permeômetro, faz com que esse experimento não retrate as reais condições que o solo oferece em campo.

A norma que regulamenta o ensaio é a ASTM D 5084/90, que traz recomendações para a execução dos ensaios, desde o controle de saturação a aplicação de gradiente hidráulico, entre outras. A norma recomenda que quando as condutividades hidráulicas forem inferiores a 10^{-5} m/s, a determinação deve ser feita no permeômetro de parede flexível.

A utilização do permeômetro de parede flexível retrata melhor as condições de campo, por permitir um melhor selamento da amostra na interface solo/parede (membrana de látex), permite um melhor controle na saturação das amostras e um controle das tensões verticais e

horizontais. Apesar de todas as vantagens, na execução do ensaio pode ocorrer um adensamento da amostra, devido a tensão lateral aplicada, e introdução de ar na amostra saturada.

A condutividade hidráulica de solos é dada pela velocidade de descarga através de uma seção, sob um gradiente hidráulico. Pode-se afirmar então, que o valor da condutividade hidráulica de um solo vai depender de características do fluido e do solo.

2.2.1 Características do fluido percolante

A massa específica e a viscosidade do fluido são propriedades que afetam diretamente a condutividade hidráulica do solo, e essas variam de acordo com alterações de temperatura. A viscosidade interfere mais intensamente, tendo em vista que, quanto mais viscoso o fluido, maior será a dificuldade dele percolar pelas partículas do meio poroso e menor a condutividade hidráulica. Esse movimento é possível pela ação da força gravitacional, que age no fluido, sendo a massa específica o fator para que haja a mudança no coeficiente de permeabilidade.

A equação de Darcy pode ser representada, levando em consideração o peso específico (γ) e a viscosidade (μ) do percolante, conforme a Equação 2.

$$v = k \cdot \frac{\gamma}{\mu} i \quad (2)$$

Sendo:

v: velocidade de descarga de um fluido

k: condutividade hidráulica

γ : peso específico do fluido

μ : viscosidade do fluido

i: gradiente hidráulico

O lixiviado possui características físicas, químicas, e biológicas bem diferentes da água. Um dos fatores para que haja a mudança no comportamento hidráulico seria as interações do lixiviado com o solo, devido a forças moleculares de atração e repulsão. A elevada concentração de sais e metais no lixiviado faz com que as moléculas realizem ligações com as moléculas do solo. Essa adesão entre as superfícies de lixiviado e do solo é devido a forças osmóticas

causadas por diferenças de concentração de íons ou sais através de uma membrana (SCOTT, 2000).

Diversos estudos observaram a mudança de comportamento hidráulico do solo com lixiviado, devido ao lixiviado ter características muito variáveis. Podendo esse comportamento ser alterado de acordo com a composição do lixiviado. Hamada *et al.* (2004) e Zanon (2014) perceberam, em seus estudos de solo compactado, uma redução na permeabilidade do solo, inclusive com atenuação de carga contaminante do lixiviado.

Por outro lado, diversos autores que estudaram as variações de permeabilidade em camadas de argila compactada, concluíram que a permeabilidade do solo pode aumentar quando em contato com lixiviados de aterros sanitários (NASCENTES, 2009). Segundo Soares (2011), esta conclusão não pode ser generalizada, visto que as interações solo-lixiviado dependem de muitos mecanismos, devendo realizar estudos de transportes de contaminantes mais avançados.

2.2.2 Características do solo

A condutividade hidráulica do solo é afetada por diversos fatores inerentes ao solo, pode-se destacar o tamanho das partículas, estrutura, grau de saturação e composição mineralógica.

2.2.2.1 Tamanho das partículas

Os solos podem ser, resumidamente, divididos em três grupos: finos, grossos e orgânicos (CASAGRANDE, 1948). Os solos orgânicos são aqueles que apresentam elevado teor de matéria orgânica, muito compressíveis, permeáveis e de baixa resistência. Os solos grossos apresentam partículas relativamente maiores, levando a uma alta condutividade hidráulica e, geralmente, estão associados a baixa capacidade de retenção de água. Lambe e Whitman (1969), demonstraram por meio de dados experimentais que a maior influência sobre a diminuição da condutividade hidráulica se deve à fração mais fina do solo.

Pinto (2006) diz que, quanto menor o diâmetro dos grãos de solo, menor será seu coeficiente de permeabilidade do solo, isso acontece devido à tendência de melhor acomodação entre as partículas de grãos finos e que gera uma redução na dimensão dos tubos capilares do solo.

2.2.2.2 Composição mineralógica

A composição mineralógica do solo está diretamente ligada a permeabilidade do solo, sendo fortemente explicado para solos finos. Solos constituídos por argilominerais do grupo das montmorilonitas possuem valores de condutividade hidráulica bem inferiores aos solos constituídos por minerais do grupo das caulinitas. As montmorilonitas apresentam partículas com maior superfície específica e maior capacidade de troca catiônica, que faz com que, apresentem valores de condutividade bem inferiores aos observados para as caulinitas. Mesri e Olson (1971), estudaram a condutividade hidráulica para solos finos com composições mineralógicas diferentes e concluíram que, quanto maior o índice de plasticidade, menor o valor da permeabilidade à água encontrada, conforme o Quadro 2.

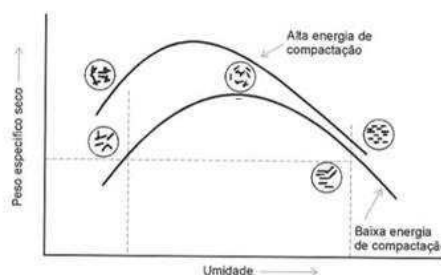
Quadro 2: Características de solos finos com composições mineralógicas distintas

Argilomineral	Índice de Plasticidade (%)	Condutividade Hidráulica(m/s)
Caulinita	20	$1,5 \times 10^{-8}$
Ilita	60	$2,0 \times 10^{-11}$
Montmorilonita	500	$1,0 \times 10^{-13}$

2.2.2.3 Estrutura

O solo, quando compactado, apresenta uma estrutura que depende da energia e da umidade. Quando um solo é compactado com uma energia baixa, a atração face-aresta das partículas não é vencida pela aplicação da energia e o solo fica com uma estrutura denominada floculada. Por outro lado, quando a umidade aumenta, a repulsão entre as partículas aumenta, fazendo com que elas se posicionem paralelamente umas às outras, resultando em uma estrutura dispersa, conforme representado na Figura 1 (LAMBE, 1951).

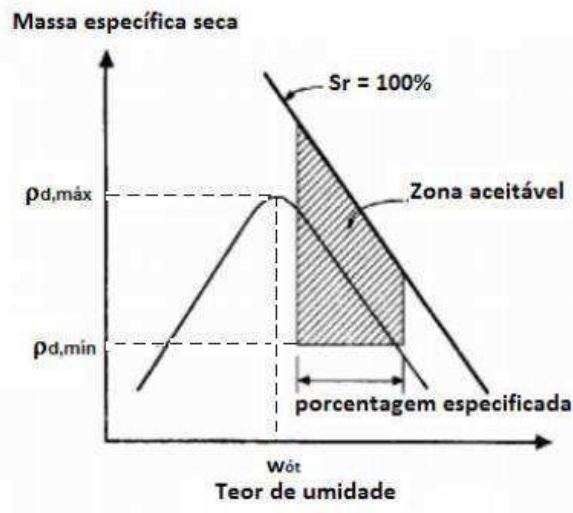
Figura 1: Efeito da compactação na estrutura interna do solo.



Fonte: Lambe (1951)

Benson e Daniel (1990) estudaram técnicas para a obtenção de valores de condutividade hidráulica para utilização em camadas impermeáveis. O método baseou-se na determinação de uma zona admissível na curva de compactação do solo, onde as características proporcionassem condições ideais para a impermeabilização, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Determinação da zona admissível



Fonte: Benson e Daniel (1990)

A zona admissível, mostrada na Figura 2, engloba conhecimentos empíricos da prática de construção de base de estradas, barragens de terra, e outros tipos de aterro. As especificações estabelecidas visam estabelecer valores de massa específica seca e umidade, os quais garantam valores desejados de condutividade hidráulica do solo, resistência ao cisalhamento e compressibilidade para a execução de barreiras impermeáveis (ALONSO, 2005).

O uso da estatística proporciona a diminuição do número de experimentos para a determinação dessa zona admissível. Silva (2017) fez o uso do planejamento fatorial estatístico para a determinação de uma composição de solos que satisfizesse o critério de permeabilidade máximo estabelecido pela NBR 13896 (1997) e EPA (1993). O uso desse artifício só pode ser utilizado se as variáveis de entrada puderem ser controladas, ou seja, os valores que ela pode assumir possam ser determinados antes da etapa experimental (MONTGOMERY, 2009).

2.2.2.3.1 Planejamento experimental

O uso do planejamento fatorial permite executar interações entre diversos fatores e determinar a existência ou não da linearidade da resposta, que significa que a variação da resposta do sistema ao mudar de um nível até o outro é diretamente proporcional. No caso de não haver linearidade, a resposta do sistema não será diretamente proporcional quando houver mudança de nível do fator. Para a determinação da linearidade da resposta é necessário a determinação dos experimentos nos níveis inferiores, superiores e centrais. Nos pontos centrais a realização de três réplicas é importante por permitir a determinação do erro experimental global, considerando que o erro é uniforme em todo o plano experimental. Nessas condições, o planejamento fatorial é definido como delineamento composto central (DCC) (MONTGOMERY, 2009; RODRIGUES *et al.*, 2009; SILVA, 2017).

Ao realizar planejamentos fatoriais com dois níveis, é importante saber que quanto maior o número de fatores analisados, maior será a quantidade de experimentos a realizar, sendo esse número igual a 2^k , onde k é o número de fatores. Para uma variação de fatores superior a cinco, o número de experimentos supera as expectativas de recursos da maioria dos pesquisadores (MONTGOMERY, 2009; RODRIGUES *et al.*, 2009).

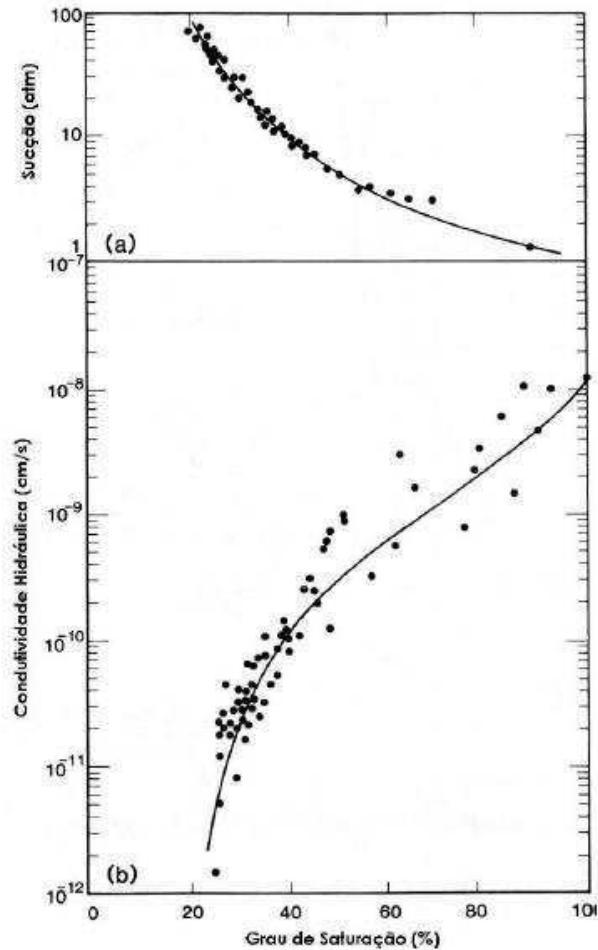
Alguns problemas científicos envolvem a determinação de uma variável resposta em função de uma função empírica de um ou mais fatores quantitativos, para isso, uma forma de representar essa situação é por meio de uma superfície resposta (SR). A utilização da SR permite espacializar os dados obtidos no planejamento experimental bem como determinar a resposta para os diversos valores dos fatores estabelecidos, sendo assim, a função é caracterizada como uma região de interesse do pesquisador. Após ajuste do modelo aos dados, é possível estimar a sensibilidade da resposta aos fatores, além de determinar os níveis dos fatores nos quais a resposta é ótima (SILVA, 2008). Em um gráfico de SR, os valores dos dois fatores são representados nos eixos x e y , enquanto os valores das respostas estão no eixo z , fornecendo uma visão tridimensional do problema (SILVA, 2017).

2.2.2.4 Grau de saturação

O grau de saturação do solo tem influência direta na determinação da sua permeabilidade. Quanto maior o grau de saturação maior será a facilidade do fluido (água) percolar e maior será o coeficiente de permeabilidade. A condutividade hidráulica do solo

atinge o seu valor máximo quando o solo se encontra saturado, esse comportamento pode ser observado na Figura 3 (LAMBE E WHITMAN, 1969).

Figura 3: Variação da condutividade ao longo da saturação da amostra de solo



Fonte: (OLSON; DANIEL, 1981)

2.3 Solos não saturados

Os solos não saturados estão presentes na maioria das obras geotécnicas e nas regiões semiáridas essa condição é predominante. 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 (ARAÚJO, 2017).

O comportamento de solos não saturados é de grande importância em muitas das aplicações geoambientais, como na determinação de fluxo de contaminantes pela superfície do solo e na infiltração de água por meio de camadas de contenção de resíduos (MALAYA e SREEDEEP, 2010). Segundo Scott (2000), a água no solo influencia em muitos aspectos do comportamento físico do solo, como a permeabilidade e o transporte de solutos. Devido às baixas velocidades de infiltração e aos processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem na zona não saturada, os aquíferos são naturalmente mais protegidos da poluição, havendo a possibilidade de ocorrer decomposição dos contaminantes degradáveis (SILVA, 2017).

Para Catana *et al* (2006), a razão pela dificuldade em implementar os avanços técnicos sobre solos não saturados na prática, dá-se pelo custo excessivo associado às medições das propriedades de solo não saturados, tanto em campo, quanto em laboratório. Estudos que visem entender melhor o comportamento não saturado do solo, devem ser incentivados, para que seja possível garantir a segurança nos diferentes tipos de obra que possam levar em consideração essa condição.

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 (ARAÚJO, 2017).

A sucção do solo é descrita como a energia com que o solo (elemento poroso) absorve água quando está livre para se mover. O comportamento da sucção do solo é função basicamente da mineralogia, densidade, umidade inicial ou de moldagem, índice de vazios, textura, histórico de tensões e os métodos de compactação. A sucção é normalmente expressa como pressão, em unidades de kPa, atm ou bar (MARINHO, 2005). A sucção em solos é composta por duas partes, considerada a soma da sucção osmótica e a sucção matricial, Equação 3.

$$\Psi_{\text{Total}} = \Psi_{\text{Matricial}} + \Psi_{\text{Osmótica}} \quad (3)$$

Sendo:

Ψ_{Total} = sucção total

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

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

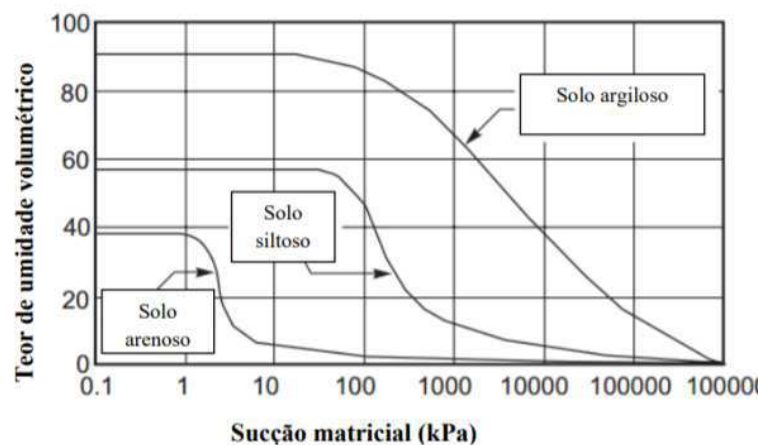
A sucção osmótica depende em toda a faixa de umidades da concentração de sais, ou seja, depende do grau de saturação do solo (MONCADA, 2008). À medida que a umidade cai, a concentração de sais aumenta e a sucção osmótica aumenta. Já a sucção matricial está ligada aos fenômenos de adsorção e capilaridade e é definida como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água.

2.3.1 Curva de retenção de água no solo

A capacidade de retenção de água no solo é representada por meio da curva de retenção de água no solo, ou curva característica e é representada pela relação entre a umidade em função da sucção. O comportamento do solo durante a infiltração e a evaporação de água será controlado, principalmente, pela permeabilidade não saturada do solo (VIEIRA, 2005).

No momento em que a água entra no solo uma porção dela é estocada nos menores poros, enquanto a parcela contida nos macroporos é drenada mais facilmente para o perfil por ação da gravidade (MANNING, 1992). O formato da curva de retenção depende da mineralogia e granulometria do solo, os quais são parâmetros intrínsecos em relação à distribuição dos tamanhos dos poros (GERSCOVICH e SAYÃO, 2002). A Figura 4 representa as diferenças e os formatos de curvas de retenção de diferentes tipos de solo.

Figura 4: Curvas de retenção típicas de solos com ênfase na granulometria



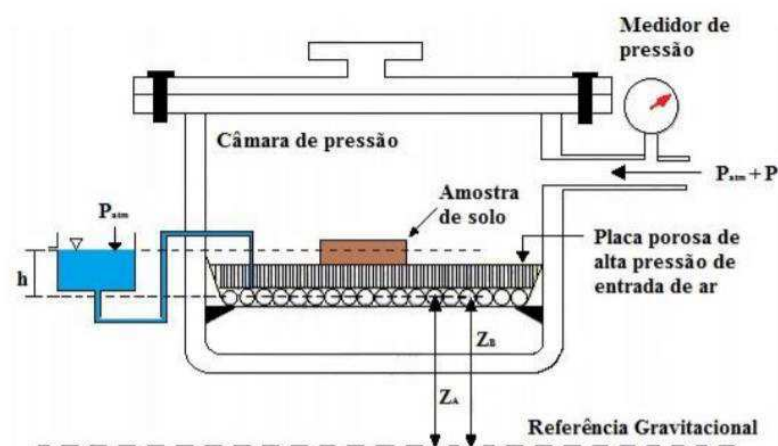
Fonte: Fredlung e Xing (1994)

A curva de retenção tem sido utilizada para a previsão e quantificação de diversos parâmetros de grande interesse na solução dos problemas geotécnicos, como a determinação do coeficiente de permeabilidade e parâmetros de resistência ao cisalhamento (SILVA, 2005). Para Catana, Vanapalli e Carga (2006), a prática da engenharia interessa-se particularmente pela avaliação da sucção matricial em campo referente à faixa de 100 a 1000 kPa.

A análise das curvas de retenção de água no solo fornece a sucção do solo e pode ser por meio de métodos experimentais *in situ* ou em laboratório, visando a determinação da sucção total e matricial. 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 por meio de uma calibração, por exemplo, a umidade relativa, a resistividade ou a condutividade (SILVA, 2017).

Uma das maneiras de se determinar a curva de retenção de água no solo é utilizando-se a câmara de Richards que consiste na extração da água por diferença de potencial entre a placa porosa e a amostra de solo (Figura 5). Isso acontece devido a câmara de pressão ser hermeticamente fechada e a placa porosa interna só permitir o fluxo de água e não de ar. O fluxo de água é exponencialmente reduzido quando o potencial matricial se torna mais negativo, gerando um período muito longo para atingir o equilíbrio da umidade na amostra (NASCIMENTO, 2009).

Figura 5: Esquema da câmara de Richards



Fonte: Silva (2005)

A determinação da curva de retenção pode ser realizada por outros métodos de laboratório como o método do papel filtro que é um método indireto e que se baseia no princípio da absorção e equilíbrio. Quando um solo úmido é colocado em contato com um material poroso que possui 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 modelagem das curvas de retenção é realizada por meio de equações que fornecem as representações matemáticas relativas à representação dessas curvas, baseadas em parâmetros empíricos (MERAYYAN e HOPE, 2009).

Devido ao formato diferente das curvas de retenção para vários tipos de solo, é essencial encontrar uma equação matemática geral para uso prático. Muitos pesquisadores têm buscado desenvolver equações apropriadas (YANG, ZHANG e WANG, 2011). No Quadro 3 pode-se observar as diversas equações propostas por autores ao longo do tempo.

Quadro 3: Equações para ajustes de curvas de retenção

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

Sendo: os parâmetros, α , m , n e d , são específicos para cada tipo de solo e encontrados por processos numéricos iterativos. θ : Umidade volumétrica do solo, θ_{Sat} : Umidade volumétrica saturada, θ_{Res} : umidade volumétrica residual e ψ : Sucção total

Fonte: Araújo (2017)

Para a verificação da escolha do modelo que melhor representa o comportamento das curvas de retenção, o uso de ferramentas para comparar, analisar, avaliar e indicar são indispensáveis.

Quanto maior o número de avaliadores mais adequada e precisa será a escolha do melhor modelo, sendo os avaliadores mais utilizados o coeficiente de determinação (R^2), a Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e o Critério de Informação de Akaike (ARAÚJO NETO, 2016).

2.3.2 Permeabilidade não saturada

Dentre os principais problemas práticos da engenharia geotécnica, que precisam de conhecimento do fluxo em solos não saturados, destacam-se os projetos para camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos, transporte de contaminantes e remediação na zona vadosa.

À medida que a quantidade de água cresce no solo, menor a dificuldade para que a água permeie. Em solos não saturados a determinação de uma função permeabilidade é necessária para a determinação do fluxo em meios não saturados, que pode ser determinada por métodos experimentais ou a partir de formulações matemáticas.

2.3.2.1 Métodos experimentais

Os métodos experimentais são de maior precisão na aquisição de dados, porém, são métodos onerosos e demorados. Um dos métodos mais antigos para a determinação da condutividade hidráulica não saturada em laboratório é a técnica de carga constante. Ela é executada mantendo-se uma carga hidráulica constante através do corpo de prova e medindo a vazão que passa pela amostra para essa carga na condição e regime permanente. A sucção matricial é mantida constante ao longo do ensaio por meio da técnica de translação de eixo (MONCADA, 2008).

Já o método da vazão constante consiste na aplicação de vazões conhecidas e a medição de gradiente hidráulico gerado nas extremidades da amostra. Esse método só é possível devido a existência de uma bomba de fluxo que garante a condição de regime permanente. O método da centrífuga consiste em utilizar os giros de uma centrífuga para estabelecer o fluxo permanente no corpo de prova não saturado. A permeabilidade é calculada medindo a vazão (no estado permanente) sob gradientes gravitacionais elevados (MONCADA, 2008).

Outros métodos baseados em regimes transientes também podem ser utilizados para a determinação da permeabilidade não saturada, porém são métodos, que apesar de serem rápidos, não permitem controlar o estado de tensões e nem a variação de volume do corpo de prova, além de não existir dados consistentes comparando os valores obtidos com estes ensaios com os obtidos por ensaios em regime permanente (FUJIMAKI E INOUE, 2003).

2.3.2.2 Modelos para a função permeabilidade

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos com a finalidade de obter a função permeabilidade com a finalidade de relacionar essa função com a sucção matricial. Em geral essas formulações são baseadas na curva de retenção de água no solo.

A maioria das formulações para determinar a condutividade hidráulica não saturada partem da hipótese de que o solo é incompressível e, no caso, ficando em função apenas da quantidade de água. Existem modelos que levam em consideração a compressibilidade, como o proposto por Parent *et al.* (2004), porém não abrange o escopo deste trabalho.

A função permeabilidade pode ser definida utilizando três possibilidades: as equações empíricas, os modelos macroscópicos e os modelos probabilísticos.

Nos modelos empíricos é necessário a obtenção de dados experimentais para a obtenção da permeabilidade não saturada em função da sucção matricial, em função da umidade gravimétrica ou volumétrica. No Quadro 4 estão apresentados alguns modelos que representam essa situação. Estudos desenvolvidos por Gerscovish e Guedes (2004), avaliando a permeabilidade não saturada de solos brasileiros, observaram que os modelos empíricos de Brooks & Corey (1964) e Arbhabhima & Kridakorn (1968) apresentaram os melhores ajustes.

Quadro 4: Equações empíricas para a determinação da permeabilidade não saturada.

Tipo	Função de permeabilidade	Autor
$k_w = f(\theta_w)$	$k_w = a\theta_w^b$	Gardner (1958)
	$k_w = k_s \left(\frac{\theta_w}{\theta_s}\right)^{2b+3}$, $b = \frac{\Delta \log \psi}{\Delta \log \theta_w}$	Campbell (1973) Ahuja (1973, 1974) Gillham et al. (1976) Zachmann et al. (1981)
	$k_w = k_s e^{[b(\theta_w - \theta_s)]}$	Hillel (1982) Davidson et al. (1969) Dane and Klute (1977)
$k_w = f(\psi)$	$k_w = a + b\psi$	Richards (1931)
	$k_w = a\psi^{-b}$	Wind (1955) Weeks and Richards (1967)
	$k_w = \frac{k_s}{1 + a\left(\frac{\psi}{\rho_w g}\right)^b}$	Gardner (1958) Arbhabhirama and Kridakorn (1968)
	$k_w = ae^{b\psi}$	Christensen (1943)
	$k = k_s \rightarrow \psi \leq \psi_b$	
	$k_r = \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^n \rightarrow \psi > \psi_b$	Brooks e Corey (1964)
	$k_w = k_s \rightarrow \psi \leq \psi_b$	Rijtema (1965)
	$k_w = k_s e^{[b(\psi - \psi_b)]} \rightarrow \psi > \psi_b$	Phillip (1986)
	$k_r = \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^b \right] \right\}^{c'}}$	Leong and Rahardjo (1997),

ψ_b : valor de entrada de ar; a, b, n: parâmetros de ajuste do modelo.

Sendo: k_w : permeabilidade relativa do solo, k_s : permeabilidade saturada do solo, θ_w : Umidade volumétrica relativa do solo, θ_s : Umidade volumétrica saturada, g : aceleração da gravidade e ψ : Sucção total

Fonte: (MONCADA, 2008).

Já os modelos macroscópicos têm o objetivo de encontrar um modelo analítico para a função permeabilidade e partem da hipótese de semelhança entre o fluxo laminar (nível microscópico) para o fluxo no meio poroso (nível macroscópico). Geralmente os modelos seguem a forma geral da Equação 4.

$$k_r = \frac{(S - S_r)^\delta}{(1 - S_r)} \quad (4)$$

Sendo:

k_r : coeficiente de permeabilidade relativa

S: Grau de saturação

S_r : Grau de saturação residual

δ : Depende das suposições feitas, podendo assumir valores entre 2 e 4.

Os modelos probabilísticos são os mais rigorosos para a obtenção da função permeabilidade. Nesses modelos a função permeabilidade é obtida a partir da curva de retenção e é baseada no fato de que, tanto a curva de retenção quanto a função permeabilidade, são dependentes da distribuição de poros. Segundo Moncada (2008), os diferentes modelos se diferenciam na interpretação da configuração geométrica do poro e na estimativa da sua distribuição.

Segundo Moncada (2008), a utilização desses modelos é desenvolvida a partir de três hipóteses básicas.

- O meio poroso é formado por um conjunto de poros interconectados, aleatoriamente distribuídos, caracterizados por um raio de poro r com distribuição estatística dada por $f(r)$. A distribuição da área dos poros é a mesma para todas as seções transversais e é igual a $f(r)$.
- A equação de Hagen-Poiseulle, Equação 5, é válida para estimar a permeabilidade no canal poroso e a permeabilidade total é determinada pela integração de todos os poros preenchidos.

$$\bar{v} = - \left(\frac{r^2 \cdot g}{C \cdot \nu} \right) \cdot \left(\frac{d\phi}{dx} \right) \quad (5)$$

Sendo:

\bar{v} : velocidade de fluxo média

$\frac{d\phi}{dx}$: gradiente hidráulico

ν : coeficiente de viscosidade cinemético

g : aceleração da gravidade

r : raio hidráulico

C : fator geométrico

- Usando a lei de capilaridade de Kelvin a curva de retenção de água no solo é considerada análoga à distribuição de tamanhos de poros.

Uma vez obtida a curva característica de sucção do solo é possível estimar uma função permeabilidade (relação entre a permeabilidade do solo e a sucção atuante), utilizando-se de um procedimento estatístico que calcula a probabilidade de ocorrência de pares sequenciais de poros de todos os possíveis tamanhos (CARDOSO JUNIOR, 2006) e (SILVA, 2005). Utilizando o modelo de Van Genuchten (1980) para curva de retenção de água no solo com a função de Mualem (1976) tem-se as Equações 6 e 7.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_{sat} - \theta_r}{[1 + |\alpha \psi|^n]^m} \quad (6)$$

Sendo:

θ : Umidade volumétrica do solo

θ_r : umidade volumétrica residual

θ_{sat} : Umidade volumétrica saturada

α , m e n são específicos para cada tipo de solo e encontrados por processos numéricos iterativos.

ψ : Sucção total

$$k(\theta) = k_{sat} \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \right)^l \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (7)$$

Sendo:

k : permeabilidade do solo

k_{sat} : permeabilidade saturada do solo

θ : Umidade volumétrica do solo

θ_r : umidade volumétrica residual

θ_{sat} : Umidade volumétrica saturada,

l : parâmetro que indica o nível de conexão dos poros

m : é específico para cada tipo de solo e encontrado por processos numéricos iterativos

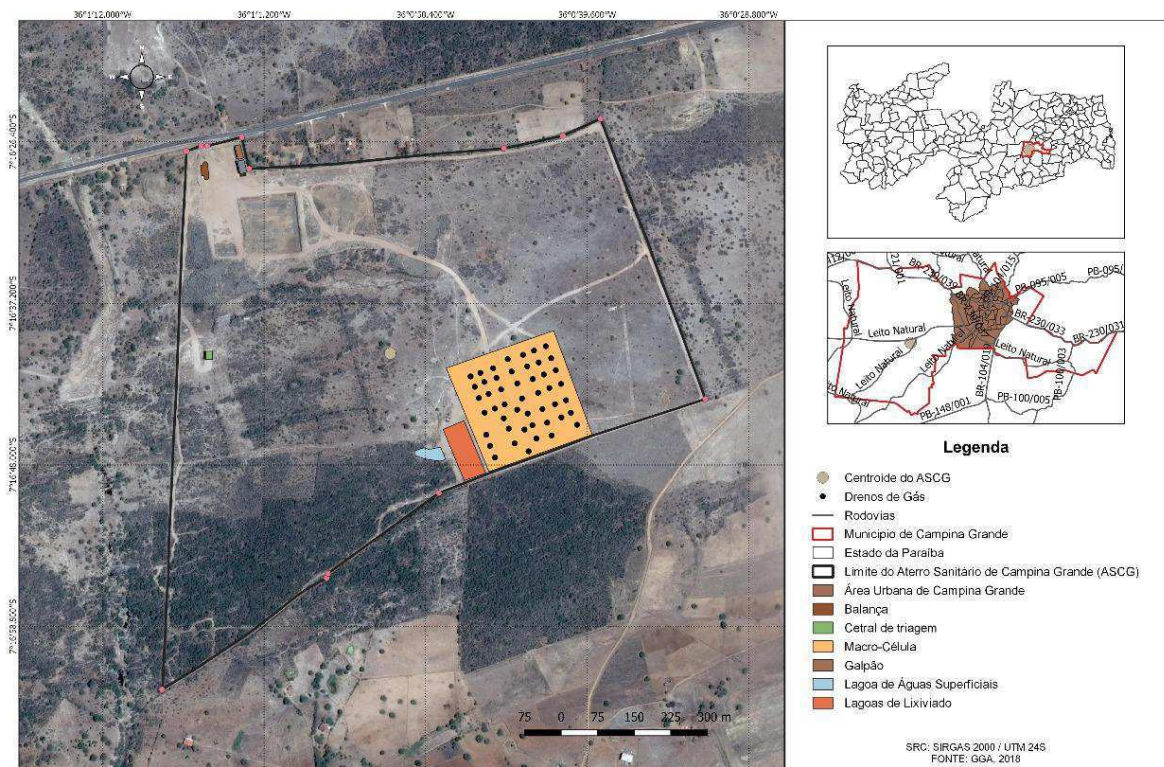
3. METODOLOGIA

3.1 CENÁRIO DE ESTUDO

O Aterro Sanitário em Campina Grande (ASCG), Figura 6, está localizado na Fazenda Logradouro II, distrito de Catolé de Boa Vista, município de Campina Grande, Paraíba, com Latitude $7^{\circ}16'45,22''S$ e Longitude $36^{\circ}0'48,36''O$. O acesso principal é a PB-138, que se interliga a BR 230 a 10 km do aterro.

O empreendimento conta com unidades de tratamento e disposição final de vários tipos de RSU (domésticos, resíduos de poda, resíduos de construção e demolição), ocupando uma área total de 64 ha, sendo 39,89 ha destinados à disposição de RSU.

Figura 6: Localização do Aterro Sanitário de Campina Grande.



Fonte: GGA (2018)

Tendo em vista que o ASCG foi projetado para receber 350 toneladas de resíduos diários e, atualmente, conforme informações obtidas junto ao engenheiro responsável pelo

empreendimento, o Sr. João Azevêdo Freire, são depositados em torno de 700 toneladas de RSU diariamente no Aterro, corroborando assim, para que houvesse a necessidade da ampliação da área de disposição destes resíduos.

Desde o início da operação do ASCG – PB, julho de 2015 até julho de 2019, foram implantadas 4 Células, denominadas de Células 1 (C_1), 2 (C_2), 3 (C_3) e 4 (C_4). Na fase atual, o ASCG encontra-se com as seguintes configurações: Células 1, 2, 3 e 4 e as junções entre as Células de resíduos, denominadas, como: junção entre a Célula 1 e a Célula 2 (C_{1+2}), junção entre a Célula 1 e a Célula 3 (C_{1+3}) (Figura 7 a), junção entre a Célula 2 e a Célula 4 (C_{2+4}) e junção entre a Célula 3 e a Célula 4 (C_{3+4}).

Vale salientar que nas áreas que corresponde aos pontos de junções das Células (C_{1+2} , C_{1+3} , C_{2+4} , C_{3+4}) foi realizado a instalação do sistema de drenagem de gases e de líquidos seguindo o mesmo padrão de construção das Células já executadas, de acordo com o projeto original, conforme ilustrado na Figura 7 a e b. O sistema de drenagem de lixiviado da camada de base do aterro sanitário é do tipo espinha de peixe, onde todo o efluente coletado é encaminhado para o exutório¹ e coletado para o tratamento por evaporação natural.

Figura 7 - Construção do sistema de drenagem de lixiviado do ASCG



a) Drenagem de uma Célula de resíduo

b) Drenagem da junção do C_{1+3}

Fonte: GGA/UFCG (2018)

A configuração inicial das células de resíduos, apresentava dimensões de 100x100 m, na base, correspondentes a largura e comprimento, respectivamente, e uma altura média de 20m, apresentando 4 taludes com altura de 5m cada um, com uma inclinação de 1:2

¹ Exutório: Ponto onde se dá todo o escoamento superficial gerado por uma célula de RSU.

(vertical:horizontal). Após a junção das Células, o ASCG constitui-se apenas de uma Célula única com dimensões de base de 210x210 m, e uma altura média de 25 m.

As camadas de impermeabilização de base deste aterro (Figura 7 a) são executadas seguindo uma composição de solos na proporção de 80% de solo natural do próprio local e 20% de um solo (bentonita sódica) proveniente de uma jazida localizada no município de Boa Vista-PB.

3.2 EXPERIMENTOS

Para este trabalho foram coletadas amostras de solo natural proveniente do terreno do aterro sanitário de Campina Grande. As amostras desse solo foram coletadas seguindo os procedimentos recomendados pela NBR 9604 (ABNT, 1986c), para que fosse possível garantir uma melhor representatividade do material e de dados nos ensaios em laboratório.

A bentonita utilizada nesse estudo foi proveniente de uma jazida localizada no município de Boa Vista-PB. As amostras de bentonita estavam dispostas a céu aberto, no ASCG, e a sua coleta seguiu recomendações da norma NBR 10007 (ABNT, 2004c) adaptada.

Na etapa de caracterização foram ensaiados o solo natural e a bentonita isoladamente, para a determinação das suas propriedades. As composições de solos nos percentuais com adição de bentonita ao solo natural foram realizadas em laboratório com o auxílio de uma balança com precisão de 0,01 g.

As amostras de solo estudadas basearam-se na adição de bentonita ao solo natural nos percentuais de 10%, 20% e 30%. A adição de Bentonita adotada como ponto central seguiu o que já era praticado no aterro sanitário (20%), com uma variação de 10% para obtenção dos valores de mínimo e máximo.

Nos ensaios de permeabilidade a adição de 30% de bentonita tornou-se desnecessária por apresentar valores de permeabilidade saturada do solo à água muito abaixo do limite máximo aceitável na NBR 13896 (1997) e EPA (1993), sendo refeito o planejamento experimental de forma a analisar o solo natural e os percentuais de adição de bentonita de 10% e 20%.

3.2.1 Ensaios de caracterização do solo

Após serem separadas e pesadas em laboratórios, as amostras foram preparadas para a caracterização física, química e mineralógica. Os ensaios realizados e as suas respectivas normas estão dispostos no Quadro 5.

Quadro 5: Caracterização do solo

Ensaio	Método
Preparação das amostras	NBR 6457/16
Massa específica dos grãos	Embrapa (2011)
Tamanho das partículas dos grãos	NBR 7181/16
Tamanho das partículas dos grãos	Difração a laser
Limite de Liquidez	NBR 6459/16
Limite de Plasticidade	NBR 7180/16
Limite de Contração	DNER-ME 087/94
Ensaio de Compactação	NBR 7182/16
Capacidade de troca catiônica	Embrapa (2011)
Complexo sortivo	Embrapa (2011)
Carbono Orgânico Total (COT)	Embrapa (2011)
Sólidos voláteis	WHO (1979)
pH em H ₂ O	Embrapa (2011)
Curva de retenção	Embrapa (2007)

O ensaio da distribuição do tamanho dos grãos para a bentonita foi realizado utilizando-se a difração a laser (Figura 8) que segue recomendações da ISO 13320 (2009) devido as características do material não favorecer a execução do ensaio seguindo a NBR 7181 (ABNT, 2016).

Figura 8: Analisador de partículas por difração a laser



Fonte: Catálogo de produtos shimadzu

3.2.2 Determinação da permeabilidade não saturada do solo

A determinação das curvas de retenção de água no solo em laboratório foi realizada utilizando-se da câmara de pressão de Richards, no Laboratório de Solos localizado no Campus II em Areia-PB. A câmara simula uma determinada tensão na amostra de solo, e que por método gravimétrico da estufa, determina a umidade do solo referente aquela tensão. Os procedimentos para a determinação seguiram recomendações da EMBRAPA (2007) e as tensões aplicadas na câmara foram as de 10 KPa (umidade de saturação), 30 KPa, 100 KPa, 300 KPa, 1000 KPa e 1500 KPa (umidade residual). As tensões utilizadas na Câmara de Richards seguiram recomendações propostas pela EMBRAPA (2007).

As curvas de retenção de água no solo foram ajustadas seguindo o modelo proposto por Van Genuchten (1980) e a permeabilidade não saturada do solo foi determinada utilizando-se a rotina RETC (RETention Curve), desenvolvida por Van Genuchten *et al* (1991).

A rotina RETC utiliza de funções analíticas computacionais para estimar as propriedades hidráulicas do solo. Para estimar o valor do coeficiente de permeabilidade não saturada, o autor combinou a Equação 6 com o modelo de Mualem (1976). Considerado o valor de $m = 1 - \frac{1}{n}$, deduziu a Equação 7. Sendo m e n específicos para cada tipo de solo e encontrados por processos numéricos iterativos.

3.2.3 Ensaios de permeabilidade saturada à água e ao lixiviado

3.2.3.1 Ensaios de permeabilidade à água

Com o intuito de realizar os ensaios de permeabilidade saturada de solo utilizado em *liner*, utilizou-se uma bentonita proveniente de uma jazida localizada no município de Boa Vista – PB e o solo natural do Aterro Sanitário localizado em Campina Grande – PB, misturados nas

proporções de 0%, 10% e 20% de adição de bentonita ao solo natural, para serem analisadas as suas propriedades hidráulicas.

O planejamento experimental utilizado, Delineamento Composto Central (DCC), consistiu na escolha das variáveis que refletissem uma maior influência no desempenho dos *liners*, sendo elas a umidade do solo, o teor de adição de bentonita e a energia de compactação. O desempenho do *liner* deve ser avaliado observando se a variável resposta do modelo, coeficiente de permeabilidade, é compatível com o proposto nas normas vigentes.

A umidade central utilizada, 13%, foi a obtida no ensaio de compactação para a mistura com adição de 10% de bentonita, por ser, aproximadamente, a umidade média entre os solos analisados no planejamento experimental. A partir dessa umidade central, variou-se 3,5% em torno do valor, com o cuidado de não atingir a curva de saturação do solo.

A adição de bentonita adotada como ponto central seguiu o que já era praticado no aterro sanitário (20%), com uma variação de 10% para obtenção dos valores de mínimo e máximo. Porém, observou-se que esses valores praticados estavam bem abaixo do que era observado nas legislações, sendo necessário tomar como ponto central o valor de 10% de adição de bentonita e com variação de 10% dos valores de extremidade.

A energia de compactação utilizada como ponto central foi a proctor normal e variou-se 20% em torno desse valor, adotando-se a metodologia proposta por Silva (2017), obtendo-se um valor superior e um inferior. Todas as faixas de variação adotadas podem ser observadas no Quadro 6.

Quadro 6: Faixa de valores adotados para o planejamento experimental

	- 1	0	+ 1
Teor de umidade (%)	9,50	13,00	16,50
Teor de Bentonita (%)	0,00	10,00	20,00
Energia de compactação (MN.m/m ³)	0,47	0,59	0,70

Com o intuito de otimizar o processo, foi gerada uma matriz de planejamento com as faixas propostas, seguindo um DCC. O número de ensaios foi definido pela Equação 8 e

resultou em 11 experimentos (Quadro 7). Sendo a variável resposta do modelo a permeabilidade à água e ao lixiviado.

$$n_1 = 2^k + P_c \quad (8)$$

Sendo:

n_1 = número de ensaios para o DCC

k = número de fatores

P_c = número de pontos centrais

Quadro 7: Delineamento dos experimentos

Experimentos	Teor de umidade (%)	Teor de Bentonita (%)	Energia de compactação (MN.m/m ³)	Permeabilidade à água (m/s)	Permeabilidade ao lixiviado (m/s)
1	9,500	0,000	0,470	R1	R12
2	9,500	0,000	0,700	R2	R13
3	16,500	0,000	0,470	R3	R14
4	16,500	0,000	0,700	R4	R15
5	9,500	20,000	0,470	R5	R16
6	9,500	20,000	0,700	R6	R17
7	16,500	20,000	0,470	R7	R18
8	16,500	20,000	0,700	R8	R19
9 (C)	13,000	10,000	0,585	R9	R20
10 (C)	13,000	10,000	0,585	R10	R21
11(C)	13,000	10,000	0,585	R11	R22

Para a realização dos ensaios de permeabilidade saturada do solo à água foi utilizado o permeâmetro de parede flexível e carga constate, *Tri-Flex 2 da ELE Internacional Inc./Soiltest Products Division* (Figura 9) com temperatura controlada de $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Figura 9: Permeâmetro de parede flexível TRI-Flex 2



As amostras de solo foram moldadas de acordo com as especificações determinadas no DCC, seguindo a sua respectiva energia de compactação, teor de bentonita e teor de umidade. Os corpos de prova foram confinados com tensão de 31,9 psi e o gradiente hidráulico adotado seguiu recomendações da D5084 da American Society for Testing Materials (ASTM, 1990).

O procedimento adotado seguiu metodologia adaptada de Zanon (2013). Antes do início do ensaio de permeabilidade saturada à água, com o corpo de prova já na câmara de permeabilidade, iniciou-se o processo de adensamento, com aplicação de uma tensão confinante de 31,9 psi e com as drenagens de base e topo abertas até que não houvesse mais a saída de água do corpo de prova. A tensão confinante adotada baseou-se na aplicação de uma pressão que garantisse que o fluxo na amostra de solo não ocorresse entre a interface membrana/corpo de prova.

Após a etapa de adensamento, iniciou-se a percolação em fluxo ascendente com a aplicação de uma pressão de 29 psi, seguindo recomendação da D5084 (ASTM, 1990). O

processo de saturação de baixo para cima visa facilitar a saída de bolhas de ar presente na amostra para obtenção de um grau de saturação elevado na amostra, o processo de saturação pode ser observado na Figura 10, com uma frente de avanço de umidade de baixo para cima no corpo de prova.

Figura 10: Câmara de permeabilidade com corpo de prova evidenciando a frente de umidade na saturação



De acordo com D5084 (ASTM, 1990), o ensaio pode ser finalizado quando as leituras de volume de água na entrada e na saída do corpo de prova forem estáveis e a razão entre as duas, em pelo menos quatro leituras ao longo do tempo, situe-se no intervalo de 0,75 e 1,25. Se os coeficientes de permeabilidade forem menores que 1×10^{-10} m/s esse erro deve ser considerado no intervalo de 0,50 e 1,50. Para a determinação da permeabilidade saturada do solo à água e ao lixiviado utilizou-se a Equação 9.

$$k = \frac{V(t_1, t_2) \cdot L}{P_B \cdot A \cdot t} \left(\frac{cm}{s} \right) \quad (9)$$

Sendo:

k: coeficiente de permeabilidade saturado do solo

v (t₁, t₂): Volume lido entre o tempo inicial e o final (cm³)

L: Comprimento do Corpo de Prova (cm)

P_B: Diferença de pressão entre a entrada e a saída (cmca)

A: Área do corpo de prova (cm²)

t: Tempo gasto entre as leituras inicial e final

3.2.3.2 Ensaio de permeabilidade ao lixiviado

A permeabilidade ao lixiviado foi obtida utilizando-se o mesmo permeâmetro, porém, foi confeccionado um reservatório auxiliar em aço inox (Figura 11) visando preservar as características do lixiviado caso fosse exposto à luz e para evitar danos físicos às tubulações e painel de controle do equipamento, devido a toxicidade do lixiviado.

Figura 11: Reservatório em aço inox para armazenamento de lixiviado



A esquematização do ensaio de permeabilidade ao lixiviado em andamento pode ser observado na Figura 12.

Figura 12: Ensaio de permeabilidade ao lixiviado



O ensaio de permeabilidade ao lixiviado foi executado após a realização da permeabilidade à água, devido ao melhor controle da saturação da amostra. O reservatório de inox foi preenchido com lixiviado, recebeu por um orifício de entrada a aplicação de uma pressão de 29 psi, seguindo recomendação da D5084 (ASTM, 1990), e na saída desse reservatório uma mangueira foi conectada à entrada da câmara de permeabilidade.

O fluxo escolhido para a permeabilidade ao lixiviado foi o descendente por representar melhor a infiltração do lixiviado no subsolo a partir de um acúmulo na superfície, como pode ser observado na Figura 13. A permeabilidade foi determinada aferindo os volumes efluentes ao corpo de prova ao longo do tempo.

Figura 13: Corpo de prova após ensaio de permeabilidade ao lixiviado



A determinação do coeficiente de permeabilidade saturada do solo ao lixiviado foi obtida de maneira análoga à obtida para à água, seguindo a Equação 9.

3.2.3.2.1 Fluido percolante utilizado no ensaio de permeabilidade ao lixiviado

O lixiviado utilizado foi proveniente do poço de coleta (C1+C2), Figura 14, da célula de disposição de resíduos sólidos urbanos (C1+C2) do aterro sanitário em Campina Grande – PB, que iniciou a operação em maio de 2018 e ainda está em operação. No dia da coleta, o resíduo, estava com 7 meses de aterramento.

Figura 14: Célula de disposição entre as células 1 e 2 (C1+C2)



Após a coleta, o lixiviado foi encaminhado ao Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA), localizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), para a realização de análises físico-químicas de acordo com a metodologia preconizada em APHA (2012). A coleta, transporte e preservação dessas amostras seguiram as recomendações da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2011).

Para a determinação da viscosidade do lixiviado, utilizou-se o método de determinação utilizando-se o viscosímetro de Ostwald com tubo capilar, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15: Viscosímetro Ostwald com tubo capilar



O lixiviado foi transferido para o capilar (Figura 16) e acoplou-se o tubo ao equipamento para a aferição da viscosidade. Foram realizadas três leituras para a determinação da viscosidade para as referidas temperaturas.

Figura 16: Tubo Capilar com lixiviado



3.2.3.3 Ensaio de permeabilidade à água *in situ* (cilindro de anel simples)

Realizaram-se ainda ensaios de permeabilidade à água *in situ*, permeâmetro de anel simples, na camada de base (solo natural) localizada na célula C2+C4. Esse ensaio seguiu recomendações propostas na IN-09 (DEINFRA, 1994). A realização deste ensaio visa comparar às permeabilidades em campo com as obtidas em laboratório.

4. RESULTADOS

4.1 Ensaaios de caracterização do solo

4.1.1 Umidade higroscópica

Os solos estudados apresentaram uma faixa de umidade higroscópica com valores de 0,84% para o solo natural, 1,54%, 2,24% e 2,94% para o solo com 10%, 20% e 30% de bentonita, respectivamente. A bentonita pura apresentou um elevado teor de umidade higroscópica de 7,84%, que sinaliza um solo com alta capacidade de retenção de água.

Os valores de umidade higroscópica para o solo natural e bentonita estão semelhantes aos observados por Silva (2017) que estudou solos da mesma jazida em estudos de permeabilidade em camadas de base.

4.1.2 Peso específico dos grãos de solo

O peso específico dos grãos representa a predominância do mineral existente no solo e sua determinação é utilizada quando se quer obter uma relação entre massa e volume de determinado solo. Os valores observados nos solos estudados variaram entre 25,3 kN/m³ e 26,6 kN/m³, conforme Quadro 8.

Pode-se observar que o solo natural apresentou o valor de 26,5 kN/m³. Segundo Carvalho (2004) é comum nos solos ricos em quartzo valores de peso específico próximos a 26,7 kN/m³. Apesar da variação de valores para os solos com as adições de bentonita, os valores giraram em torno do valor do peso específico dos grãos de solo em maior percentual (solo natural). O valor de 25,3 kN/m³ observado para a bentonita está coerente, visto que o seu principal mineral constituinte, a montmorilonita, apresenta um peso específico de 24,0 kN/m³ e contribuindo para o reduzido valor observado.

Quadro 8: Valores do peso específico dos grãos de solo

Solo Natural	26,5 kN/m ³
Solo natural +10% de bentonita	26,4 kN/m ³

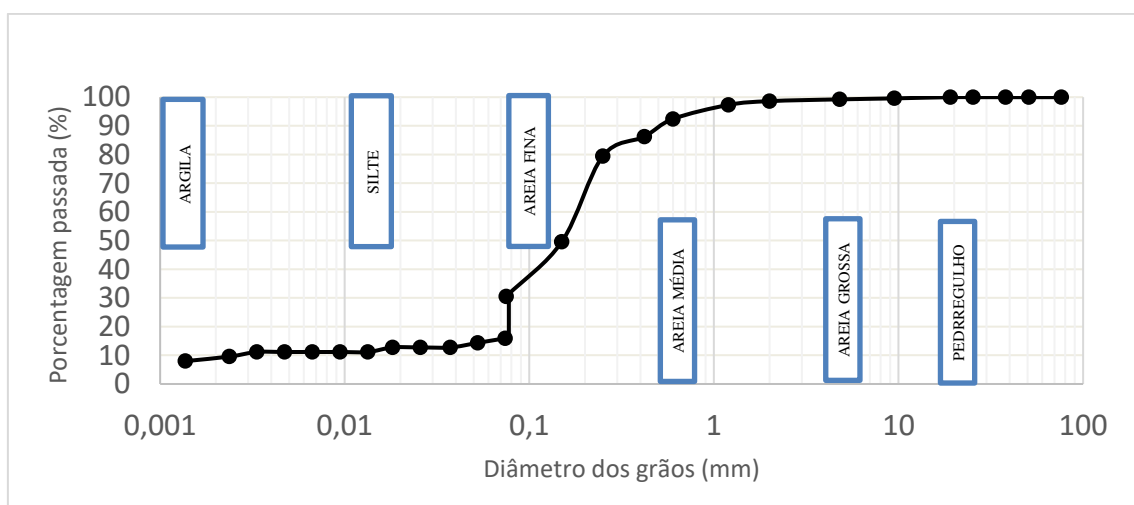
Solo natural +20% de bentonita	26,6 kN/m ³
Solo natural +30% de bentonita	26,3 kN/m ³
Bentonita	25,3 kN/m ³

4.1.3 Distribuição granulométrica

Na curva granulométrica do solo natural (Figura 17) observa-se o aparecimento de um degrau entre a fase de sedimentação e peneiramento e que contribui para a característica de um solo mal graduado. A partir da curva granulométrica pode-se classificar o solo pelo Sistema de Classificação Unificada dos Solos (SUCS) como sendo uma areia argilosa mal graduada (SP-SC).

O solo natural apresentou coeficiente de não uniformidade (CNU) de 7,7 e um Coeficiente de curvatura (CC) de 4,2. Segundo Pinto (2006), quanto maior o CNU, mais bem graduado é o solo e quando o CC é maior que 3 a curva tende a ser muito uniforme na sua parte central. O solo natural apesar de ser classificado como mal graduado pela SUCS, apresentou CNU de um solo bem graduado e com uma uniformidade de grãos na sua parte central, apresentando uma característica granular com os finos preenchendo os vazios.

Figura 17: Curva granulométrica do solo natural

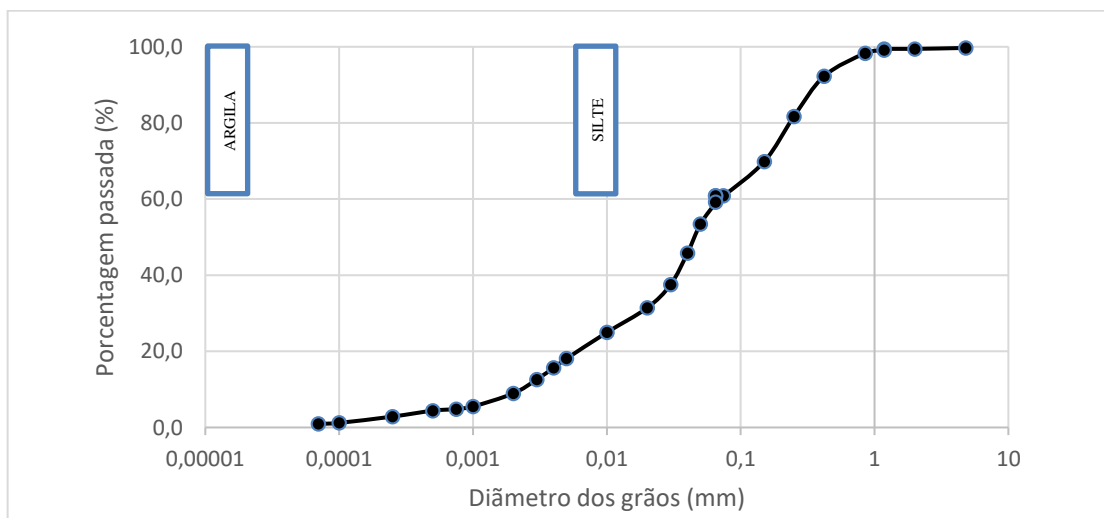


A distribuição granulométrica da bentonita só foi possível por meio do método de difração a laser. Pode-se observar a presença de uma curva suave com todas as frações de solo

presentes na faixa observada, conforme apresentado na Figura 18. O solo analisado apresentou um CNU de 0,5 e um CC de 6,7. Segundo Pinto (2006), solos com CNU menores que 2 e CC maior que 3 tende a ser considerados uniformes.

Ao observar a curva granulométrica abrangendo todas as faixas presentes no material, pode-se observar a presença de aproximadamente 20% de material com tamanho superior a 0,074, Figura 18. Segundo a API 13-A (1990), uma bentonita sem impurezas deve apresentar a quantidade de material retido na peneira de abertura 0,074mm igual ou inferior a 4%, sendo assim, trata-se de um material com grande percentual de impurezas. Um dos fatores que podem ter contaminado a amostra estudada foi pelo fato da coleta da bentonita ter sido realizada em pilhas do estoque que estava sob a ação de agentes de intemperismo, sendo contaminada por outros tipos de solo.

Figura 18: Curva granulométrica da bentonita abrangendo todas as faixas do solo



4.1.4 Índices de consistência

Devido ao elevado percentual de material granular no solo natural, observou-se a não existência de limites de consistência, enquadrando-o como um solo NL (Não Líquido) e NP (Não Plástico). Segundo Gonçalves e Monteiro (2018), os índices de consistência do solo exercem considerável influência sobre o comportamento da água nele presente, afetando a condutividade hidráulica e permitindo fazer inferências sobre a curva de umidade.

Ao contrário do que acontece com os solos granulares, os solos finos apresentam características de consistência diferentes de acordo com o teor de água que possuem. No caso

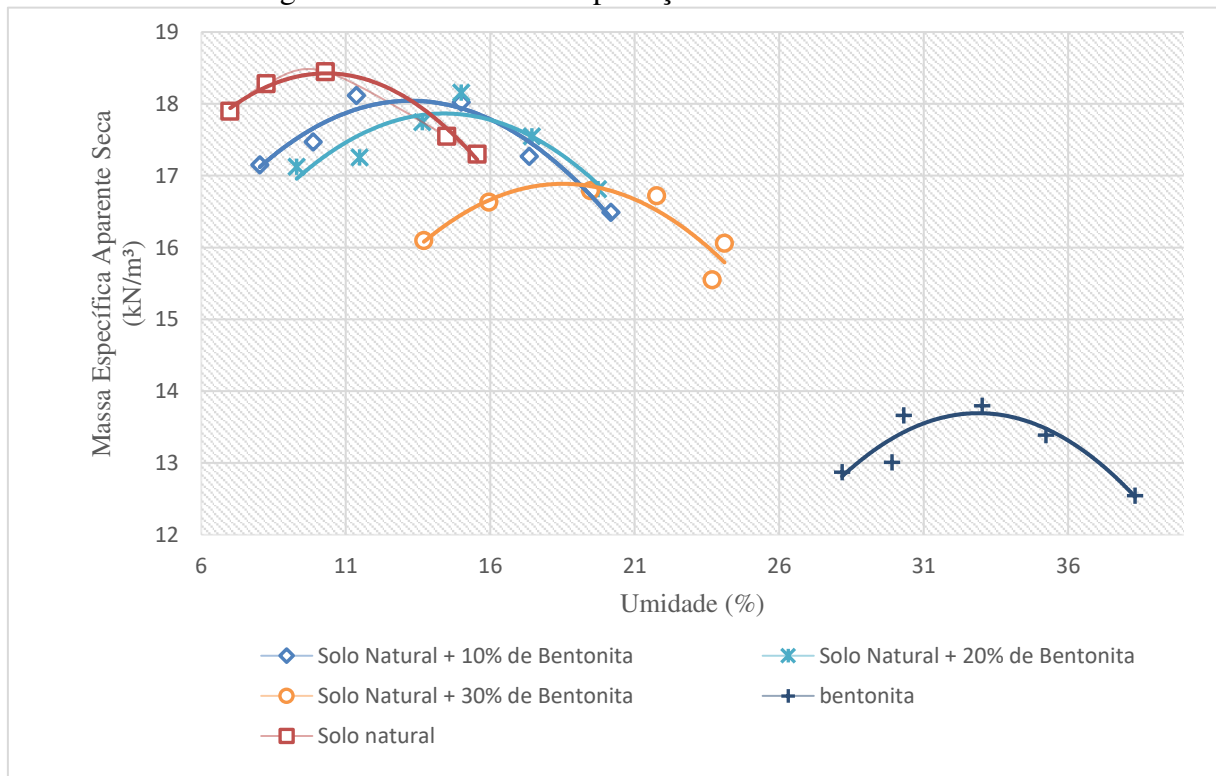
da bentonita, um solo altamente expansivo e com elevadas quantidades de argilominerais, o limite de liquidez de 86% e um limite de plasticidade de 25% justificam seu potencial para a utilização em camadas de impermeabilização e segundo a CETESB (1993), trata-se de um solo adequado para compor esse tipo de camada. De acordo com a classificação pela carta de plasticidade de Casagrande, pode-se observar a ocorrência de um solo CH, sendo assim uma argila de alta plasticidade.

Certos solos possuem um potencial de contração quando apresentam determinados argilominerais. Essa característica de expansão e contração, perda de água, resulta em fissuras, gretas de contração e trincas de expansão que formam caminhos preferencias de fluxo. A bentonita apresentou um limite de contração de 38% que está dentro da faixa observada por Camargo (2012) para bentonitas sódicas.

4.1.5 Curva de compactação

A curva resultante do ensaio de compactação utilizando-se a energia de compactação do Proctor Normal, para o solo natural do aterro, é apresentada na Figura 19 e indica uma umidade ótima de 10,25% e massa específica aparente seca máxima de 18,40kN/m³. Já a curva de compactação da bentonita apresenta uma umidade ótima de 33% e massa específica aparente seca máxima de 13,70 kN/m³. Pinto (2006) observou esse comportamento entre solos finos e granulares, onde as grandezas umidade ótima e massa específica aparente seca máxima se deslocam para a esquerda e para cima do gráfico de compactação quando se trata de solos granulares e o inverso para solos finos.

Figura 19: Curvas de Compactação dos solos analisados



A bentonita utilizada nesse estudo estava na forma hidratada, sódica e que evidenciam características expansivas e de alta capacidade de retenção de água desse solo. O solo natural do aterro sanitário apresenta características de um solo granular, sendo classificado como uma areia argilosa mal graduada (SP-SC) e que remete a baixa capacidade de retenção de poluentes. Esse tipo de solo é classificado segundo a Taxonomia do solo (1999) e Oliveira *et al.* (2008) como um planossolo sódico e bem recorrente na região semiárida.

4.1.6 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

No Quadro 9 pode-se observar os valores da capacidade de troca catiônica (CTC) das amostras de solo analisadas. Os valores encontrados foram semelhantes ao observado por Silva (2018), que estudou o liner de base do aterro sanitário em Campina Grande-PB. Segundo Melo e Alleoni (2009), os valores das CTC observados estão dentro dos valores de CTC comumente encontrados para aterros brasileiros.

Quadro 9: Complexo sortivo dos solos analisados

	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	H^+	Al^{3+}	CTC
	$cmol_c.kg^{-1}$						
Solo Natural	1,99	2,21	0,42	0,16	0,16	0,28	5,22
Solo natural + 10% de bentonita	2,61	2,96	2,41	0,14	0,00	0,00	8,12
Solo natural + 20% de bentonita	4,64	3,53	4,40	0,56	0,00	0,00	13,13
Solo natural + 30% de bentonita	5,84	4,02	6,81	0,45	0,00	0,00	17,12
Bentonita	9,38	4,89	33,99	0,34	0,00	0,00	48,60

Ao analisar a CTC da bentonita pode-se observar o seu elevado valor e que remete a um solo com alta capacidade de reter poluentes em sua superfície. Ao ser estudado para ser utilizado em camadas de base em aterros sanitários da região, a bentonita foi escolhida por ser um material regional, de fácil acesso, devido à proximidade das jazidas ao local de disposição de resíduos (ASCG). Além de ser um material de alta eficiência na impermeabilização e adsorção de poluentes inorgânicos.

4.1.7 pH e condutividade elétrica

A acidez de um solo pode ser devido à perda de bases (Na, K, Ca e Mg) arrastadas pela infiltração de água e que resulta em alterações de pH, que por sua vez têm influência direta na permeabilidade dos solos pois modifica a agregação das partículas. O Quadro 10 apresenta valores de pH e a sua respectiva classificação.

Quadro 10: Classificação do solo de acordo com o pH

Indicador pH	
Faixa de analisada	Classificação
pH<5	Ácido

5,5<pH<6,4	Moderadamente ácido
6,5<pH<6,9	Praticamente neutro
pH=7,0	Neutro
pH>7,1	Alcalino

Fonte: Bigarella *et al.* (1996)

De acordo com a classificação proposta por Bigarella *et al.* (1996), o solo natural do aterro, com um pH de 5,77, é moderadamente ácido, e de acordo com a classificação agronômica, como um solo ácido.

O elevado valor do pH para a bentonita, Quadro 11, e para os solos com adições de bentonita é justificada pelos incrementos da quantidade de sódio, verificada no complexo sortivo e que, segundo a Embrapa (2015), justifica os valores observados. Outra maneira de observar a presença do sódio no solo é observando o aumento da condutividade elétrica do solo conforme o Quadro 11.

De acordo com a classificação da Embrapa (2015), a bentonita trata-se de um solo salino com Relação de Adsorção de Sódio (RAS) de 12,11 e uma condutividade de 0,0419 mmhos/m. Os valores observados para a bentonita desse estudo estão de acordo com os observados por Luz e Oliveira (2008) para bentonitas típicas de Wyoming.

Quadro 11: Valores de pH e condutividade elétrica do solo

	pH	Condutividade elétrica
Solo Natural	5,77	0,0034 mmhos/m
Solo natural + 10% de bentonita	7,76	0,0083 mmhos/m
Solo natural + 20% de bentonita	7,86	0,0186 mmhos/m
Solo natural + 30% de bentonita	8,13	0,0222 mmhos/m
Bentonita	9,33	0,0419 mmhos/m

Alterações de pH, em solos utilizados em camadas de base de aterros sanitários, são previsíveis devido ao contato com o lixiviado, que contém uma carga orgânica bastante elevada, e que ao longo do processo de biodegradação, assume valores em torno da basicidade.

A atividade dos metais pesados no solo é influenciada diretamente pelo pH, e uma das principais funções das barreiras impermeabilizantes de solo, é reter esses poluentes. À medida que o pH do meio diminui, aumentam as chances de mobilidade desses metais para camadas mais abaixo do *liner*, aumentando assim, o risco de contaminação do lençol freático e do solo. Dessa forma, as camadas impermeabilizantes de solo compactado exercem a função de impedir o fluxo de contaminantes para as camadas abaixo do *liner*, que é ocasionado pela afinidade entre as partículas do solo e o contaminante.

4.1.8 Carbono Orgânico Total e Matéria Orgânica

Apesar dos solos estudados terem apresentado elevada CTC e umidade higroscópica, que são características pertinentes de solos com elevado teor de matéria orgânica, os valores de carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica (MO) observados foram bastante reduzidos (Quadro 12). Segundo a EPAMIG (2012), os valores observados abaixo de 0,65% de COT estão em baixa concentração no solo e são classificados como inorgânicos.

Segundo Silva (2017), o percentual de matéria orgânica 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 contribui para o aumento na capacidade de retenção de metais no solo. Porém, a característica do argilomineral predominante na composição do solo, montmorilonita, contribui para a falsa impressão de um solo com elevado teor de matéria orgânica, visto que, ela apresenta elevada área de superfície e alta capacidade de retenção de água nos espaços interlamelares da sua estrutura.

No caso do solo natural do aterro, o percentual de COT e matéria orgânica foram próximos a zero e que confirmam o que já estava sendo observado na caracterização do material, visto que é um solo com baixa capacidade de retenção de água.

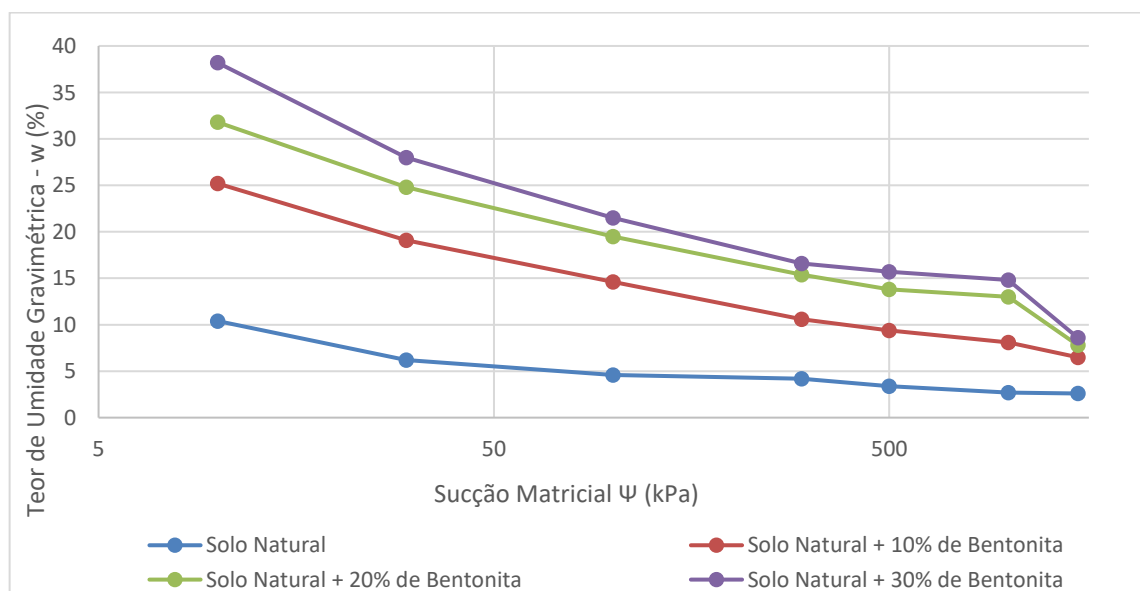
Quadro 12: Valores de COT e MO observados nos solos

	Carbono Orgânico Total (COT)	Matéria orgânica (MO)
Solo Natural	0,43 %	0,74 %
Solo natural + 10% de bentonita	0,44 %	0,76 %
Solo natural + 20% de bentonita	0,65 %	1,12 %
Solo natural + 30% de bentonita	0,43 %	0,74 %
Bentonita	0,28 %	0,48 %

4.2 Determinação da permeabilidade não saturada do solo

As curvas de retenção de umidade das cinco amostras de solo estudadas, Figura 20 e Figura 21, apresentam a relação do teor de umidade gravimétrica com a sucção matricial.

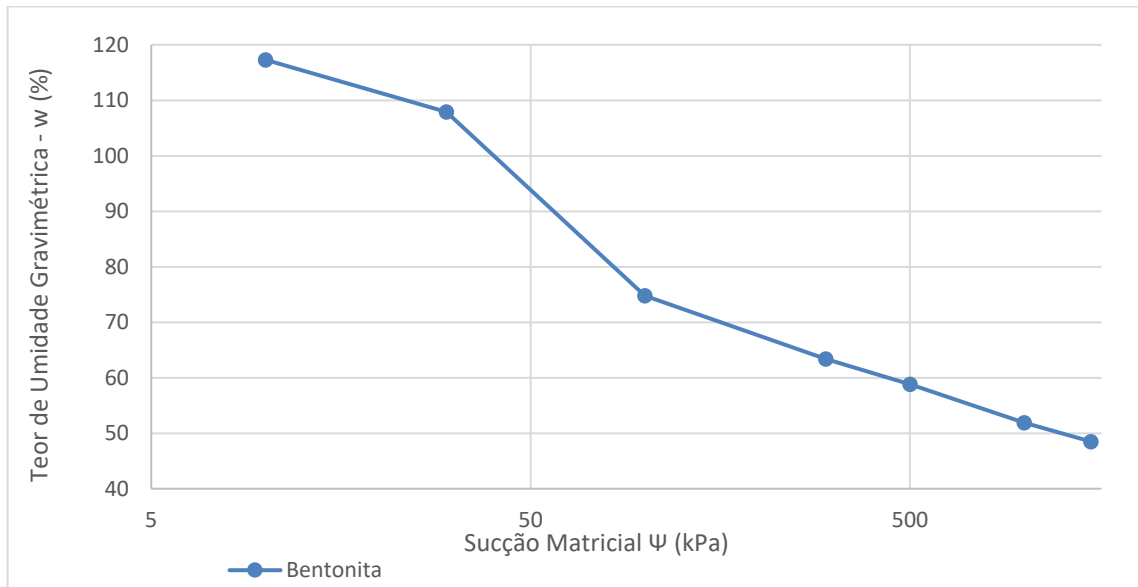
Figura 20: Curva de retenção de umidade



A curva de retenção de umidade do solo natural do aterro apresenta formato semelhante aos observados por Vanapalli (1994), com características de um solo grosso. O formato das curvas características dos solos com adição de bentonita se assemelham aos observados por Lins (2003) e Santos (2015) que apresentam características de um solo fino.

A Figura 21 apresenta a curva de retenção de umidade da bentonita representada pela relação entre a sucção matricial e o teor de umidade gravimétrica.

Figura 21: Curva de retenção de umidade



As mudanças nas características importantes para a avaliação do comportamento não saturado do solo (coeficiente de permeabilidade, variação de volume e transporte de contaminantes em zona não saturada) estão ligados a alterações na sucção matricial e não em mudanças na sucção total (LEMES, 2013). Segundo Barbour (1998) e Lemes (2013), a faixa entre 0 e 1000 kPa de sucção nas curvas de retenção refere-se à atuação da fase líquida, de energia mecânica e de forças de capilaridade nos solos, enquanto a faixa a partir de 1000 kPa compreende a fase de vapor, energia química e forças de adsorção.

No caso de solos finos, a curva característica possui um trecho linear bem definido, a inclinação é chamada de capacidade de sucção e é representada como a relação entre a variação do teor de umidade gravimétrica e o logaritmo da variação da pressão observada. Os valores das capacidades de sucção, mostraram-se semelhantes às observadas por Araújo (2017) e Lira (2018), que estudaram o comportamento de camadas de cobertura em aterros sanitários. Os valores observados neste estudo foram 5,7%, 6,2% e 7,8%, respectivamente, para as misturas de 10%, 20% e 30%. Observa-se que a mistura com 30% de adição de bentonita apresenta maior capacidade de sucção que as outras misturas, indicando que, quanto maior o percentual de bentonita, maior a retenção de água no solo. De acordo com Lorenzo (2010), solos que têm

maior percentual de argila, possuem maior proporção de microporos, que solos com estrutura granular, apresentando maior capacidade de retenção de água.

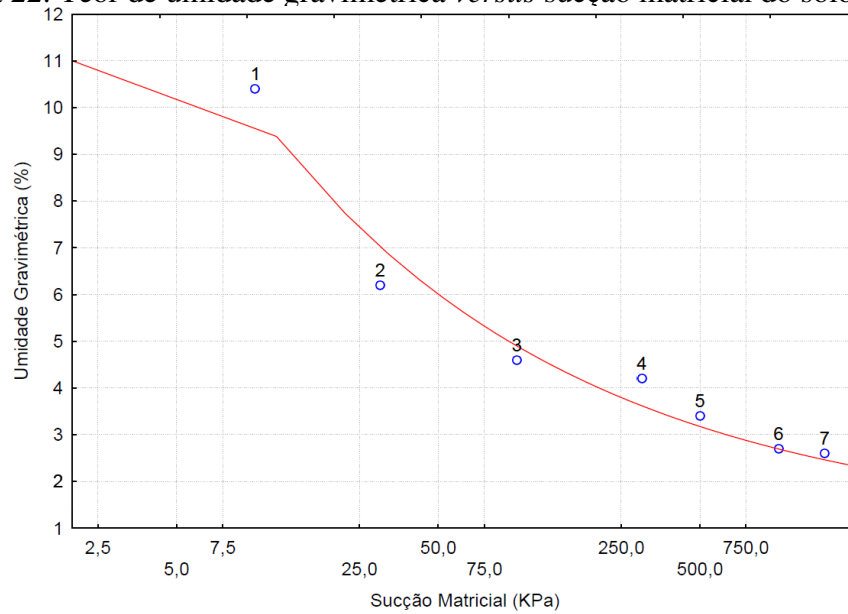
Os valores obtidos nas curvas características do solo foram ajustados ao modelo proposto por Van Genuchten com um coeficiente de correlação superior a 0,98 para todas as curvas. Outros modelos não foram analisados pois não existia a possibilidade de utilizá-los para a determinação da permeabilidade não saturada na rotina RETC. Os parâmetros obtidos estão representados no Quadro 13.

Quadro 13: Parâmetros estimados pela equação de Van Genuchten

	Parâmetros		
	m	n	α
Solo Natural	0,012232	29,5751	0,135295
Solo Natural + 10% de Bentonita	0,026364	18,8269	0,026364
Solo Natural + 20% de Bentonita	0,017748	21,4687	0,067022
Solo Natural + 30% de Bentonita	0,010358	38,0362	0,080369
Bentonita	0,020521	23,8991	0,047427

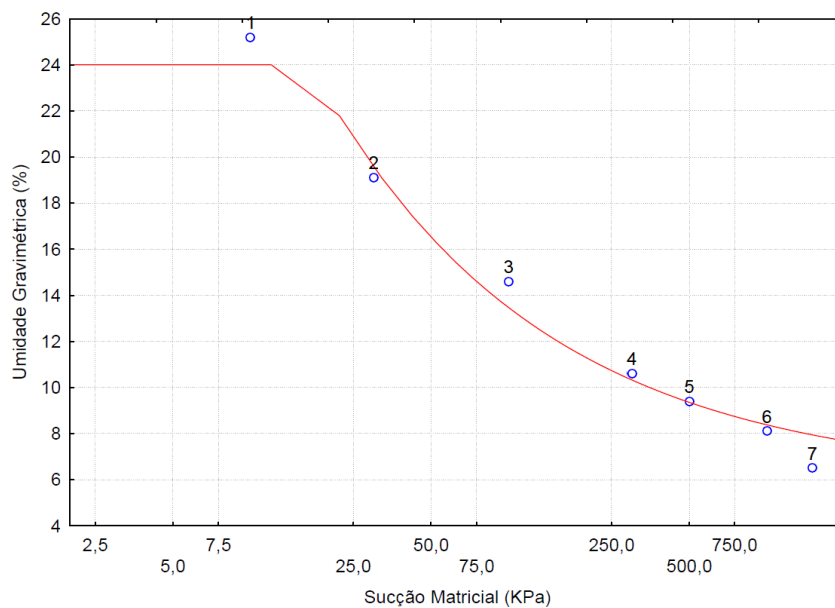
Na Figura 22, pode-se observar a curva referente ao solo natural e que apresentou uma inclinação mais suave próximo a saturação, que se inicia no ponto 1.

Figura 22: Teor de umidade gravimétrica *versus* sucção matricial do solo natural



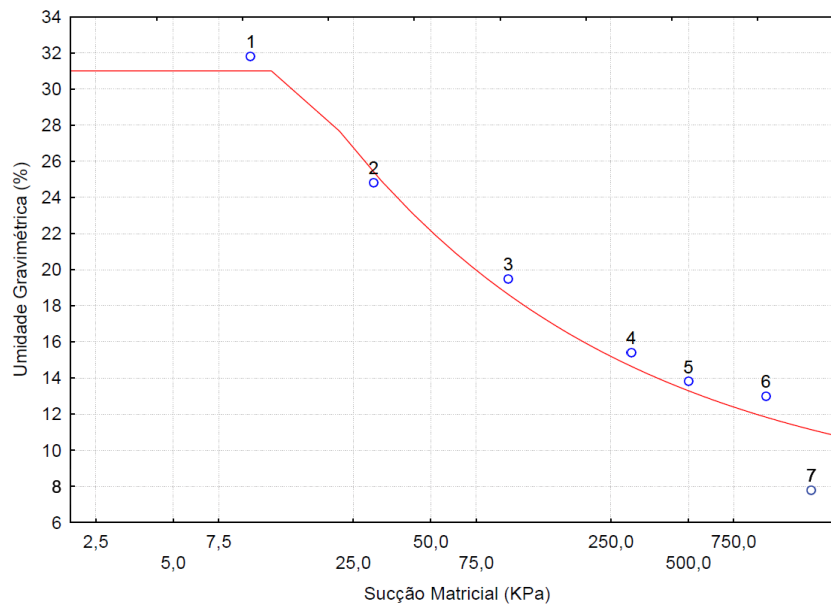
A curva de ajuste para o percentual de adição de 10 % de bentonita, pode ser observada na Figura 23. Segundo Vanapalli (1994), essa característica de curva observada, assemelha-se a de um solo siltooso, devido a inclinação acentuada da curva próximo a saturação, que se inicia próximo ao ponto 1.

Figura 23: Teor de umidade gravimétrica *versus* sucção matricial da composição de solos com 10 % de Bentonita



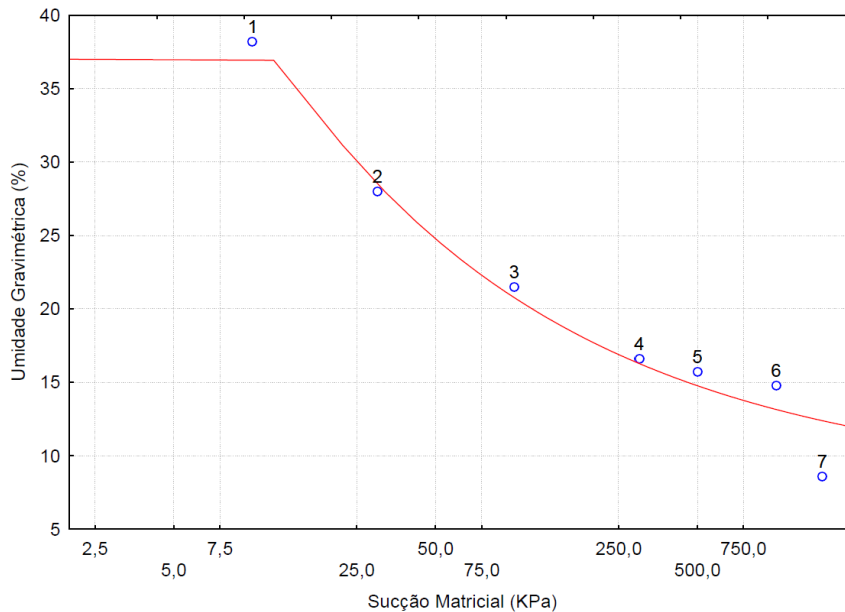
A curva de ajuste para o percentual de adição de 20 % de bentonita, pode ser observada na Figura 24. Devido a sua inclinação acentuada próximo a saturação, trata-se de um solo predominantemente siltoso. Segundo Fredlung e Xing (1994), os valores encontrados para as respectivas umidades estão dentro dos valores observados para solos com características areno-siltosas.

Figura 24: Teor de umidade gravimétrica *versus* sucção matricial da composição de solos com 20 % de Bentonita



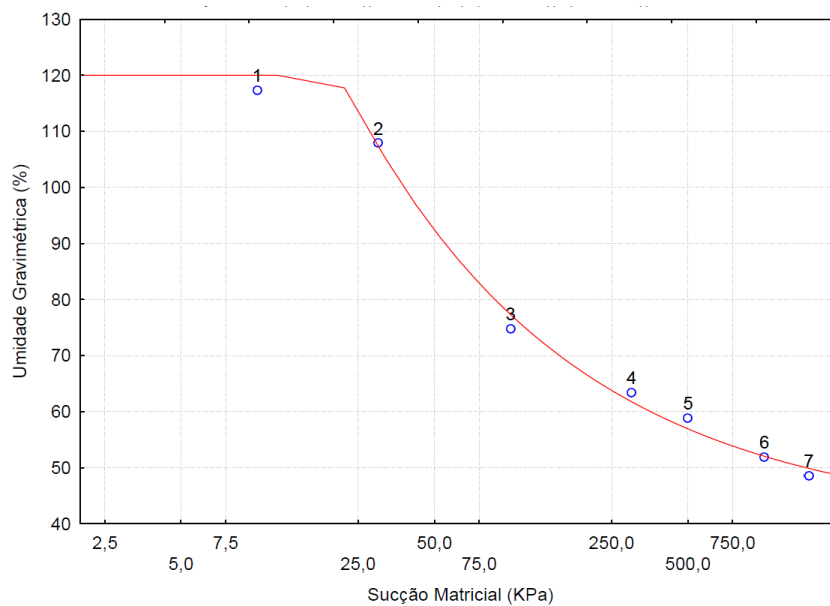
A curva de ajuste para o percentual de adição de 30 % de bentonita, pode ser observada na Figura 25. Semelhante ao observado nas misturas de solos analisadas, a mistura com 30% de adição de bentonita apresentou comportamento de um solo predominantemente siltoso. Pode-se observar que a adição de bentonita ao solo resultou em um aumento gradativo da capacidade de retenção de água no solo.

Figura 25: Teor de umidade gravimétrica *versus* sucção matricial da composição de solos com 30 % de Bentonita



Na Figura 26 pode-se observar a curva de retenção de água no solo para a bentonita segundo o modelo de Van Genuchten. O formato da curva assemelha-se ao de um solo argiloso, por apresentar um comportamento com a maior inclinação observada entre os solos estudados. Apesar da faixa de valores de sucção escolhidas abranger os valores comumente estudados para os solos em geral, a bentonita apresenta um comportamento regido, principalmente, pela energia química e pelas forças de adsorção, que segundo Lemes (2013), inicia-se a partir da tensão de 1000 KPa.

Figura 26: Teor de umidade gravimétrica *versus* sucção matricial da Bentonita



Nas Figura 27 e Figura 28 estão os resultados da determinação da permeabilidade não saturada do solo *versus* o teor de umidade gravimétrica para o solo natural, solos com adição de 10%, 20% e 30% de bentonita e bentonita, respectivamente. Ao analisar os resultados, pode-se observar que, os coeficientes de permeabilidade não saturada foram diretamente proporcionais à umidade gravimétrica.

Figura 27: Teor de umidade gravimétrica *versus* permeabilidade não saturada do solo

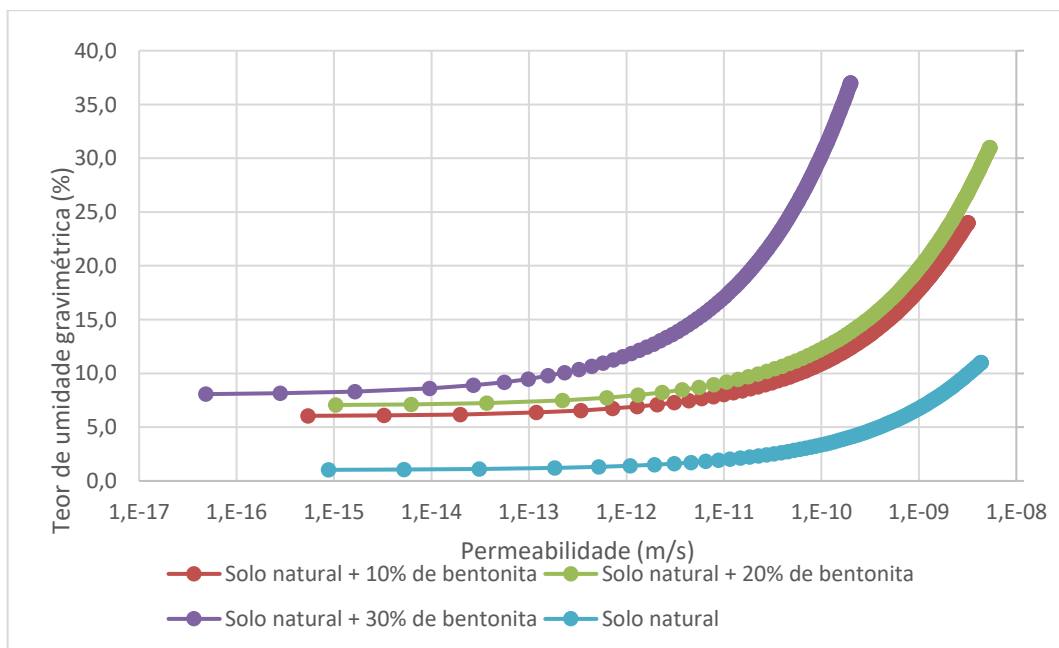
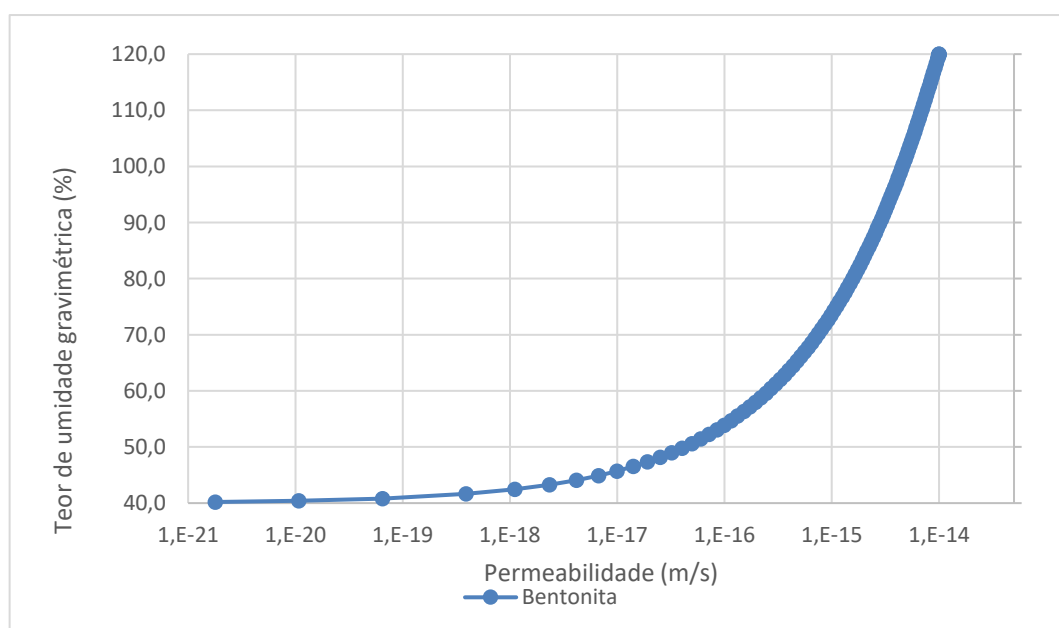


Figura 28: Teor de umidade gravimétrica versus permeabilidade não saturada da Bentonita



Pode-se observar, que para elevados valores de teor de umidade, o valor do coeficiente de permeabilidade não saturada do solo à água tende a um valor constante, e isto coincide com o coeficiente de permeabilidade saturado do solo à água. Esse comportamento também foi observado por Leme (2013), que estudou um solo fino (CL) para ser utilizado em uma camada de impermeabilização de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos em Campinas-SP.

Segundo Benatti *et al* (2009), esse valor de umidade corresponde à quantidade de água necessária para a saturação do solo, onde o valor da sucção é nulo. Quando os teores de umidade vão diminuindo, o coeficiente de permeabilidade não saturado do solo aproxima-se de zero. Quando o teor de umidade residual se aproxima, os canais formados pelas interconexões dos vazios do solo não apresentam uma lâmina contínua e faz com que a água não possa permear livremente. Essa condição é favorável para o retardamento da poluição em áreas com solos contaminados, por fazer com que haja um retardo no avanço da pluma de contaminação. Nas regiões de clima semiárido essa condição é observada ao longo do ano no período de agosto a dezembro, onde nesse período o índice pluviométrico é bastante reduzido.

Segundo a Equação de Poisseuille, para fluxos laminares em tubos capilares, o fluxo de água é diretamente proporcional ao quadrado do raio do tubo. Sabe-se também que o coeficiente de permeabilidade não saturado à água é diretamente proporcional à quantidade de fluxo de água (BENATTI *et al.*, 2009).

Pode-se observar que, até aproximadamente 12% de umidade gravimétrica, o coeficiente de permeabilidade não saturado à água é bastante baixo para as misturas de solo com a adição de bentonita, indicando que o fluxo se dá apenas pelos microporos, que são os primeiros a serem preenchidos, e que são regidos pela fase de vapor, energia química e forças de adsorção. A partir desse valor de umidade, pequenos acréscimos no seu percentual acarretam grandes acréscimos de permeabilidade não saturada do solo à água. Nesse momento os macroporos começam a ser preenchidos, permitindo o fluxo contínuo nos canais, e iniciando a atuação dos efeitos capilares e da distribuição dos poros no solo.

4.3 Ensaios de permeabilidade à água e ao lixiviado

4.3.1 Análise geral dos experimentos

Com as variações entre energia de compactação, umidade e teor de bentonita foi possível realizar as análises estatísticas por meio de planejamento fatorial tendo como o foco a permeabilidade à água e ao lixiviado.

O Quadro 14 mostra os resultados obtidos nos experimentos de permeabilidade à água e ao lixiviado utilizando-se o permeâmetro de parede flexível. Pode-se observar as 22 respostas do planejamento experimental, sendo 11 referentes à permeabilidade à água e 11 referentes à permeabilidade ao lixiviado. Com esse procedimento foi possível otimizar o número de experimentos sem perder a confiabilidade dos resultados e com redução no número de ensaios.

Os coeficientes de permeabilidade à água (Quadro 14) encontraram-se na faixa entre $1,49 \times 10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ e $2,89 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Já os coeficientes de permeabilidade ao lixiviado (Quadro 14) encontraram-se na faixa entre $7,77 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$ e $5,67 \times 10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$. Os valores observados sinalizam que o solo possui características de alto potencial de impermeabilização.

Quadro 14: Resposta do planejamento com Delineamento Composto Central (DCC)

Variações			Respostas	
Energia de compactação (MN.m/m ³)	Teor de umidade (%)	Teor de bentonita (%)	Permeabilidade à água (m/s)	Permeabilidade ao lixiviado (m/s)
0,47	9,50	0,00	$1,44 \times 10^{-8}$	$7,77 \times 10^{-9}$
0,70	9,50	0,00	$6,49 \times 10^{-9}$	$5,49 \times 10^{-9}$
0,47	16,50	0,00	$1,49 \times 10^{-8}$	$7,45 \times 10^{-9}$
0,70	16,50	0,00	$1,19 \times 10^{-8}$	$7,02 \times 10^{-9}$
0,47	9,50	20,00	$1,70 \times 10^{-9}$	$1,68 \times 10^{-9}$
0,70	9,50	20,00	$6,90 \times 10^{-10}$	$8,42 \times 10^{-10}$

0,47	16,50	20,00	$4,47 \times 10^{-10}$	$7,93 \times 10^{-10}$
0,70	16,50	20,00	$2,89 \times 10^{-10}$	$5,67 \times 10^{-10}$
0,585	13,00	10,00	$2,03 \times 10^{-9}$	$2,87 \times 10^{-9}$
0,585	13,00	10,00	$1,78 \times 10^{-9}$	$2,12 \times 10^{-9}$
0,585	13,00	10,00	$1,94 \times 10^{-9}$	$2,41 \times 10^{-9}$

Os dados referentes a caracterização do lixiviado utilizado nos ensaios de permeabilidade consta no Quadro 15. O lixiviado analisado encontra-se dentro da faixa observada por Souto e Povinelli (2007) para aterros brasileiros.

Quadro 15: Dados de caracterização Físico-química do Lixiviado da Célula C1+C2

pH	7,83
Alcalinidade	9000 mg/L
Ácidos Graxos Voláteis	540 mg/L
Cloretos	4798,51 mg/L
DQO	2233,33 mg/L
Nitrogênio Amoniacal Total	2030 mg/L
Ferro	3,09 mg/L
Zinco	0,20 mg/L
Manganês	0,30 mg/L
Chumbo	0,14 mg/L
Cromo	0,16 mg/L
Alumínio	0,31 mg/L
Sólidos Totais	14500 mg/L

Sólidos Voláteis	2700 mg/L
Sulfatos	751 mg/L
Turbidez	873 UNT
Temperatura	31,4 °
Massa específica (T=20°)	$\gamma=1,011618273 \text{ g/cm}^3$
Massa específica (T=25°)	$\gamma=1,010226876 \text{ g/cm}^3$
Viscosidade cinemática (T=20°)	$\nu=1,2904708 \text{ mm}^2/\text{s}$
Viscosidade cinemática (T=25°)	$\nu=1,284097153 \text{ mm}^2/\text{s}$

Durante a execução dos ensaios de permeabilidade ao lixiviado, foi observado a diminuição da permeabilidade nos ensaios sem a adição de bentonita (Quadro 14). Esse comportamento pode ser explicado devido a diferença de viscosidade observada entre o lixiviado e a água, sendo o lixiviado mais viscoso que a água. Os dados referentes a viscosidade da água encontram-se no Quadro 16.

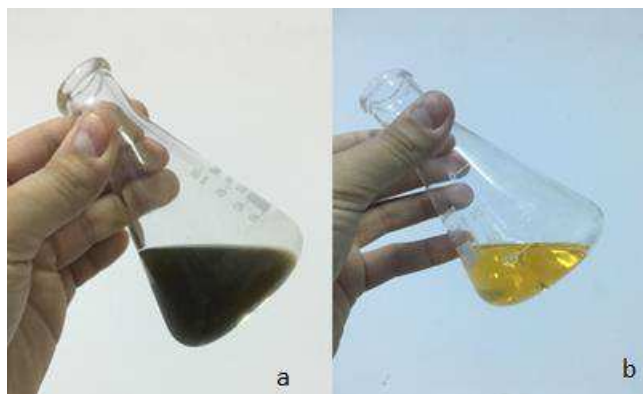
Quadro 16: Dados de viscosidade da água realizados em laboratório

Viscosidade cinemática (T=20°) $\nu=0,9265 \text{ mm}^2/\text{s}$

Viscosidade cinemática (T=25°)	$\nu=0,9386 \text{ mm}^2/\text{s}$
--------------------------------	------------------------------------

No entanto, nas misturas com a adição de bentonita, a redução da permeabilidade não foi tão expressiva quanto nos experimentos com o solo natural (Quadro 14). Observou-se uma redução menos significativa e em alguns casos, praticamente nula. A bentonita tem a propriedade de expandir, quando em contato com a umidade, desta forma, ao iniciar a percolação pelo corpo de prova, o lixiviado percolou por um ambiente menos permeável e menos poroso, apresentando assim, uma barreira filtrante mais eficaz para o lixiviado. O solo com a adição da bentonita funcionou como um filtro mais eficiente para reter os sólidos dissolvidos do lixiviado, que passaram pela pedra porosa, pelo papel filtro e se depositaram na superfície do corpo de prova, conforme observado na Figura 13 e deixando o fluido percolante com a coloração cada vez mais clara conforme observado na Figura 29.

Figura 29: Líquidos afluentes (a) e efluentes (b) do corpo de prova com solo natural



A percolação do lixiviado no *liner* a longo prazo pode ser um ponto favorável à vida útil da camada impermeabilizante de solo, visto que a colmatção² ocorrerá e a infiltração do lixiviado do aterro sanitário tenderá apenas a escoar para as redes de drenagem e serem encaminhadas para a estação de tratamento.

O uso do solo como uma camada capaz de reter poluentes já foi estudado por Silva (2018), que encontrou um potencial grande de retenção de poluentes inorgânicos no solo devido a capacidade de troca catiônica e a superfície específica que esses argilominerais possuem. Dessa forma, o uso do solo como uma forma de tratamento de lixiviado, é uma solução viável para a remoção de poluentes inorgânicos, desde que seja feita uma etapa anterior para a remoção de contaminantes orgânicos e sólidos dissolvidos e em suspensão. Percebe-se assim, a influência do líquido intersticial na permeabilidade do solo. As alterações na permeabilidade causadas pela percolação de substâncias químicas podem ser compreendidas à luz de seus efeitos na estrutura do solo. Essas alterações na permeabilidade do solo são fortemente influenciadas pelas forças de repulsão entre as partículas de argila. Sendo assim, essas forças controlam os comportamentos de floculação, dispersão, contração e expansão (BOSCOV, 2009).

A mistura de solo com adição de bentonita apresentou fissuras ao longo do corpo de prova durante os ensaios de permeabilidade. Esse comportamento acarretou no aparecimento de caminhos preferenciais de percolação do fluido, aumentando assim a permeabilidade do solo, conforme observado na Figura 30. A utilização de uma camada de solo com adição excessiva de um material altamente expansivo, apesar de parecer estar trabalhando a favor da segurança, pode acarretar o surgimento de fissuras ao longo da camada, fazendo com que essa camada

² Colmatção: Entupimento do solo por excesso de materiais depositados sobre ele.

perca a sua funcionalidade e gere caminhos preferenciais de percolação favorecendo o avanço da contaminação

Figura 30: Corpo de prova com 20% de adição de bentonita



Ao comparar os resultados de permeabilidade realizados em laboratório com um ensaio realizado na camada de base no aterro sanitário, na junção entre a Célula 2 e Célula 4, que consiste apenas em solo natural e não apresenta a adição de bentonita, a permeabilidade à água verificada foi de $6,57 \times 10^{-8}$ m/s e encontra-se dentro dos padrões exigidos para a execução de camadas de base em aterros sanitários dispostos em norma nacional, NBR 13896 (ABNT, 1997) que exige $1,0 \times 10^{-8}$ m/s. Porém, segundo a CETESB (1993), que exige um coeficiente de 1×10^{-9} m/s, não atenderia as exigências para a execução de camadas de base.

Durante a execução dos ensaios de permeabilidade à água em campo, com a utilização do cilindro de anel simples, observou-se o tráfego de diversos veículos de grande porte, passando pelo trecho ensaiado. O trânsito de veículos faz com que gere uma tendência a aumentar a energia de compactação da camada. Por outro lado, esse tráfego pode ter alterado os resultados do ensaio tendo em vista que gera zonas de compressão e alívio de cargas durante a execução dos ensaios.

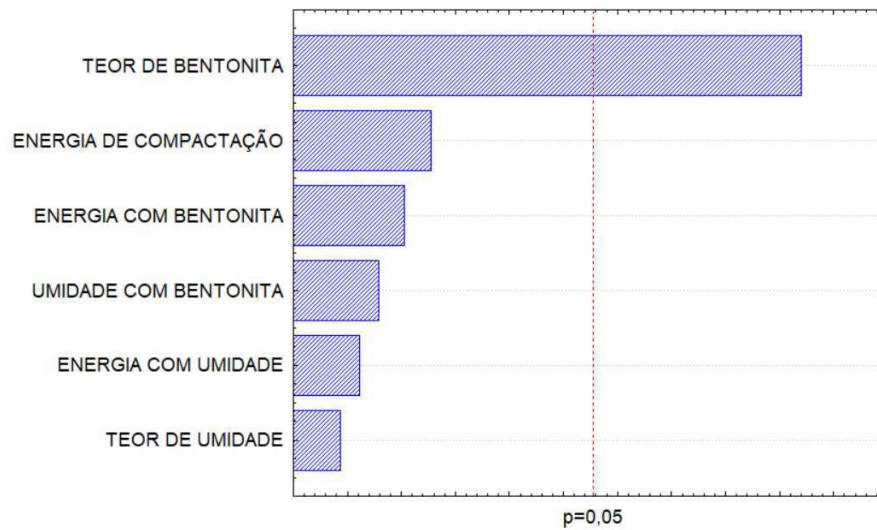
A inexistência da adição da bentonita, com a finalidade de reduzir a permeabilidade do solo natural, pode ser uma possível causa para a ocorrência da permeabilidade acima dos padrões exigidos e observada nos ensaios de campo.

Levando-se em consideração os ensaios realizados em campo e em laboratório, a diferença de permeabilidade observada pode ter sido devido ao fluxo durante o ensaio não ser apenas na vertical, mas também pela horizontal e pelas laterais, visto que, mesmo com o selo de bentonita nas laterais, a vedação ainda não é completa.

4.3.2 Análise estatística dos experimentos

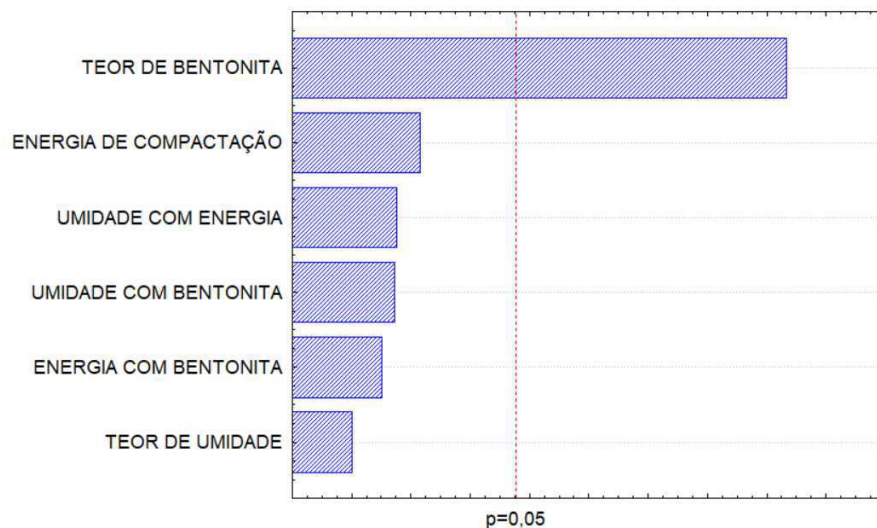
O gráfico de Pareto representado na Figura 31 avalia a influência que cada variável tem sobre a permeabilidade à água. Pode-se observar com 95% de certeza que, o teor de bentonita é a variável que exerce maior influência sobre a permeabilidade à água e que, pode ser justificada, por ser a fração fina a principal responsável pelo comportamento do solo quanto à permeabilidade. A energia de compactação foi a segunda variável que apresentou influência sobre o processo que, devido a um aumento do peso específico de compactação, as partículas tendem a ficar mais próximas e aumentar assim a resistência à passagem de líquidos no meio. Apesar de ser um fator muito representativo na alteração da permeabilidade do solo à água, o teor de umidade, para esse modelo, não representou grande influência no processo, e isso pode ser justificado pela ampla faixa de variação da adição de bentonita ao solo, que apesar de se ater aos pontos de saturação das amostras de solo, fez com que pontos interessantes não fossem avaliados. Ou seja, ao observar as curvas de compactação, apresentados na Figura 19, pode-se observar que para o solo com a adição de 20%, as umidades analisadas não abrangeram toda a zona admissível máxima, que se localiza no ramo úmido (lado direito) da curva de compactação e que, apresenta as melhores características para a impermeabilização.

Figura 31: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o DCC - permeabilidade à água



A Figura 32 representa o gráfico de Pareto para a variável resposta permeabilidade ao lixiviado. O comportamento das variáveis envolvidas no processo apresentou comportamento semelhante aos observados na permeabilidade à água, porém o valor de p ficou mais próximo das variáveis, representando uma maior influência sobre a permeabilidade ao lixiviado que no caso da permeabilidade à água.

Figura 32: Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o DCC - permeabilidade ao lixiviado



O Quadro 17 apresenta os valores do p_{valor} obtido por meio da análise de variância (ANOVA) para o DCC – permeabilidade à água. O modelo gerado apresentou um coeficiente

de determinação (R^2) de 0,87 para um nível de significância de 5%, isso significa que 87% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado. Os valores de p_{valor} observados estão acima do nível de significância, com exceção do teor de bentonita, que confirma que o teor de bentonita é a variável que mais influencia no processo.

Quadro 17: p valor para o modelo DCC - Permeabilidade à água

Variáveis	Grau de Liberdade	p_{valor}
Energia de compactação	1	0,270287
Teor de umidade	1	0,682647
Teor de Bentonita	1	0,009334
Energia com umidade	1	0,574755
Energia com Bentonita	1	0,360463
Umidade com Bentonita	1	0,474178
Falta de ajuste	5	

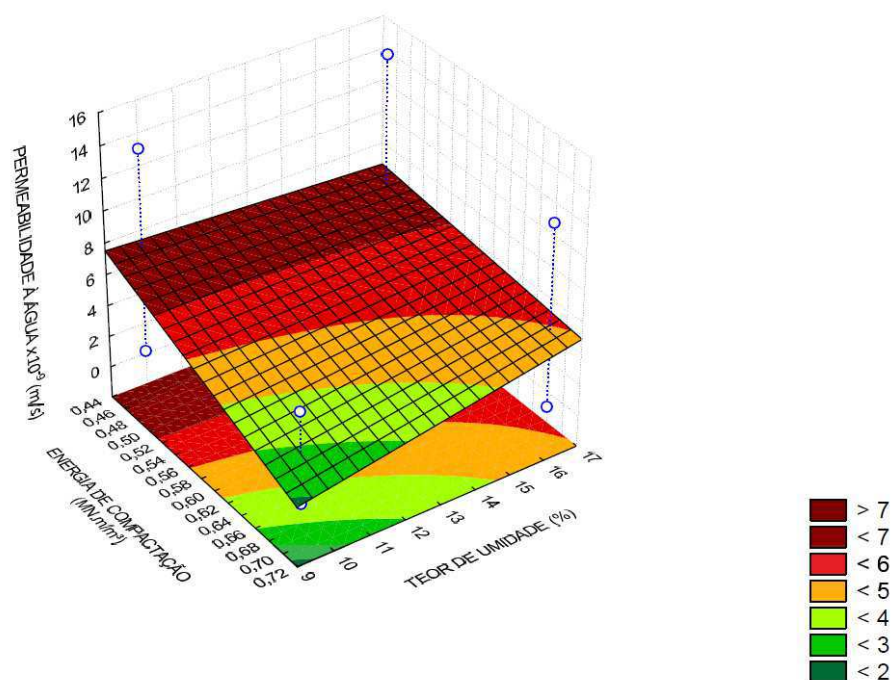
O Quadro 18 apresenta os valores do p_{valor} obtido por meio da análise de variância (ANOVA) para o DCC – permeabilidade ao lixiviado. O modelo gerado apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,93 para um nível de significância de 5% significando que 93% da variabilidade do processo pode ser explicada pelo modelo gerado. Observando os valores de p_{valor} é possível afirmar que o teor de bentonita é a variável que mais influencia no processo. Pode-se observar um aumento em todos os valores de p_{valor} quando comparado com o modelo de permeabilidade à água, exceto para a interação da energia com a umidade e o teor de bentonita.

Quadro 18:P valor para o modelo DCC - Permeabilidade ao lixiviado

Variáveis	Grau de Liberdade	<i>p</i> valor
Energia de compactação	1	0,310390
Teor de umidade	1	0,988931
Teor de Bentonita	1	0,001841
Energia com umidade	1	0,491161
Energia com Bentonita	1	0,639380
Umidade com Bentonita	1	0,506182
Falta de ajuste	5	

A Figura 33 ilustra a superfície resposta para a permeabilidade à água, envolvendo as variáveis energia de compactação e teor de umidade e sendo fixado o teor de bentonita de 10%, por ser o ponto central.

Figura 33:Superfície resposta do DCC para Energia de compactação x Teor de umidade
Permeabilidade à água x 10^{-9}

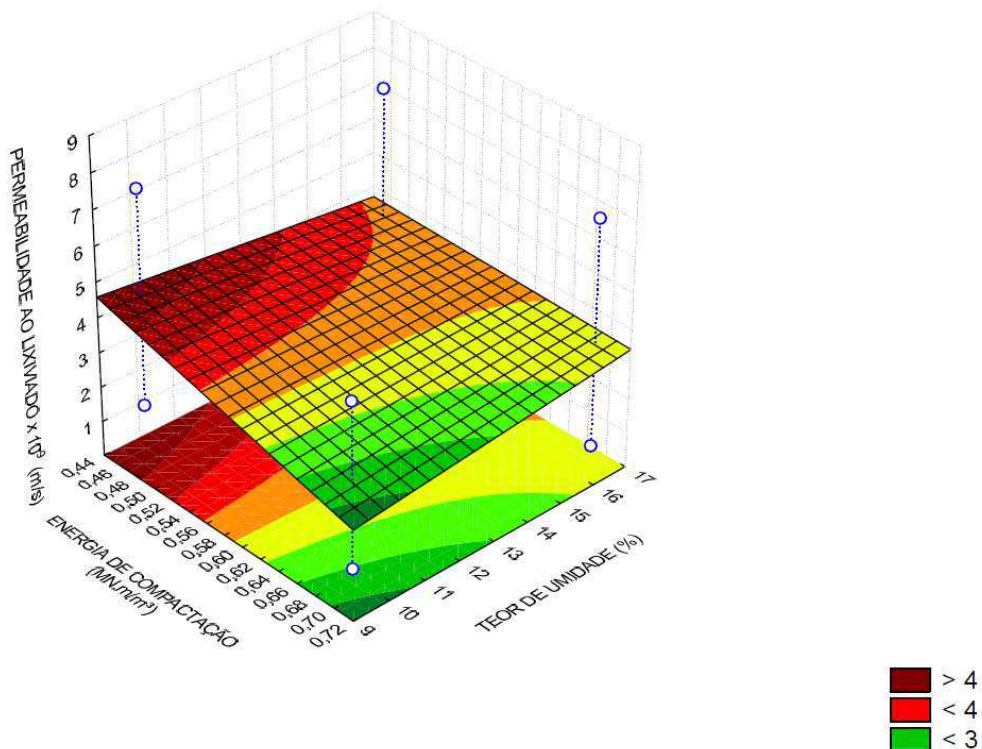


O modelo apresentado na Figura 33 demonstra que, quanto maior a energia de compactação e menor o teor de umidade, menor será o coeficiente de permeabilidade à água. Isso pode ser devido a característica expansiva da bentonita, quando compactada a uma umidade elevada, sua característica expansiva já havia sido estimulada, porém quando compactada com umidade reduzida, ao iniciar o processo de saturação, a expansão das partículas gerou uma melhor impermeabilização do solo.

Segundo Silva (2017), quanto maior o teor de umidade na compactação, maior será o esforço que deve ser aplicado, pois o aumento da energia de compactação, faz com que seja possível uma maior acomodação dos grãos. De maneira análoga, em todos os pontos de menor energia de compactação, pode-se observar que se obteve os menores coeficientes de permeabilidade à água.

A Figura 34 ilustra a superfície resposta de permeabilidade ao lixiviado para as variáveis energia de compactação e teor de umidade, com o teor de bentonita fixado em 10%, por ser o ponto central.

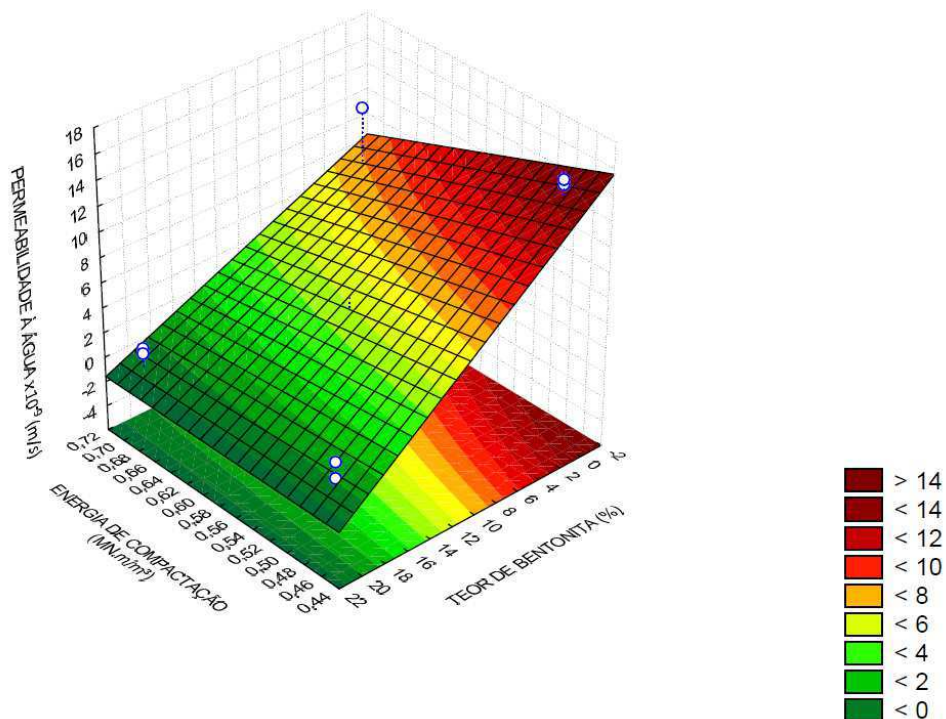
Figura 34: Superfície resposta do DCC para Energia de compactação x Teor de umidade – Permeabilidade ao lixiviado $\times 10^{-9}$



O ensaio de permeabilidade ao lixiviado apresentou coeficientes inferiores aos observados para a permeabilidade à água. De maneira geral, a superfície resposta apresentou o mesmo comportamento e os menores valores de permeabilidade ao lixiviado observados foram com menor umidade e maior energia de compactação.

A Figura 35 apresenta a superfície resposta para a energia de compactação, teor de bentonita e a umidade fixada em 13%, por ser o ponto central, quando submetido ao fluxo à água.

Figura 35: Superfície resposta do DCC para Energia de compactação x Teor de bentonita – permeabilidade à água

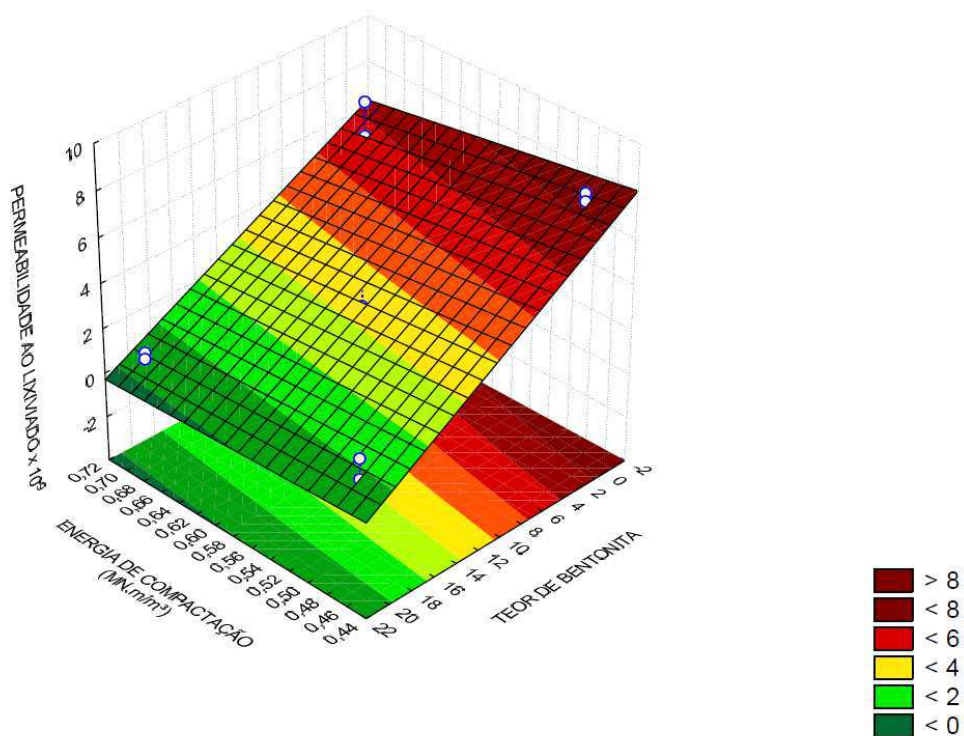


A redução do teor de bentonita e a redução da energia de compactação gerou os maiores coeficientes de permeabilidade à água no modelo observado. Isso é devido, provavelmente, o teor de bentonita ser uma das variáveis que mais influenciam na permeabilidade, mostrado na Figura 31.

É possível observar que, para um elevado teor de bentonita, independente da energia de compactação e com a umidade fixada em 13%, a mistura de solo se comportou com coeficientes de permeabilidades bem reduzidos e semelhantes, evidenciando assim, a independência do teor de bentonita para justificar a permeabilidade à água.

A Figura 36 apresenta a superfície resposta do teor de bentonita, energia de compactação e com o teor de umidade fixado em 13%, por ser o ponto central, para a permeabilidade ao lixiviado.

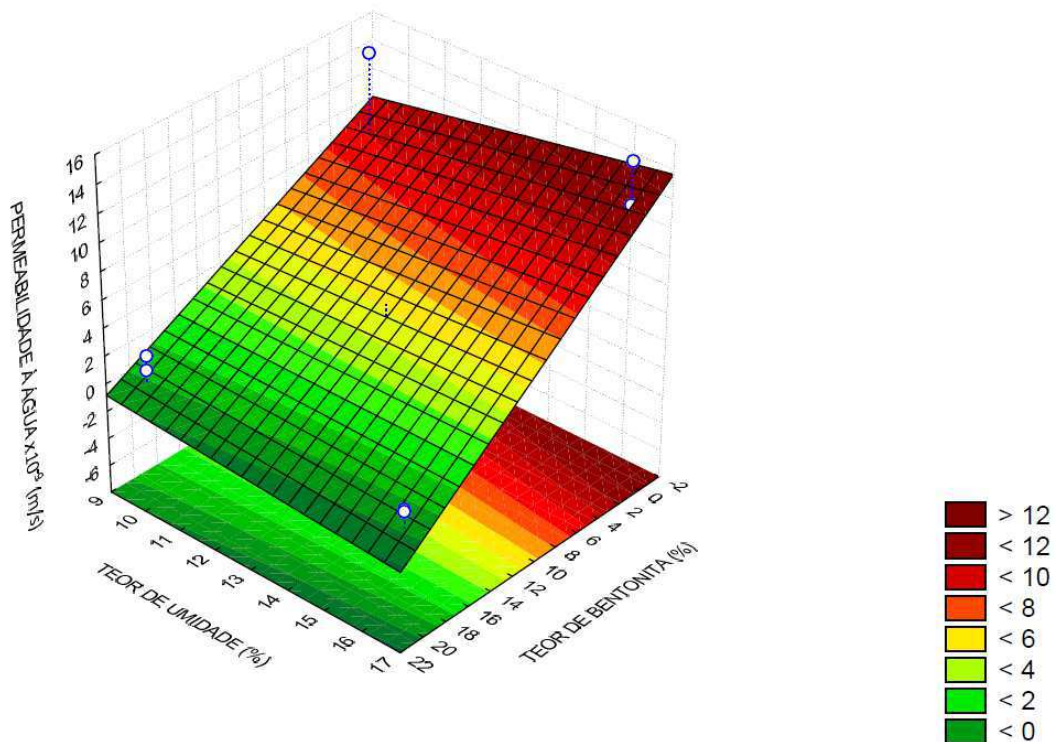
Figura 36: Superfície resposta do DCC para Energia de compactação x Teor de bentonita – permeabilidade ao lixiviado



De maneira geral, a superfície resposta da permeabilidade ao lixiviado apresentou comportamento semelhante ao da permeabilidade à água, exceto para as ordens de grandeza da permeabilidade. Vale salientar que, a inclinação da superfície resposta pode ser justificada, pois a medida que a energia de compactação aumenta, ocorre quebra das partículas de solo. Segundo Silva (2017) esse comportamento faz com que gere uma nova distribuição granulométrica, permitindo uma melhor acomodação das partículas e, dessa forma, reduzindo a permeabilidade ao lixiviado suavemente.

A Figura 37 ilustra a superfície resposta do DCC para o teor de bentonita, teor de umidade e energia de compactação fixada em seu ponto central de 0,585 MN.m/m³ para a permeabilidade à água.

Figura 37: Superfície resposta do DCC para teor de bentonita x teor de umidade – permeabilidade à água.

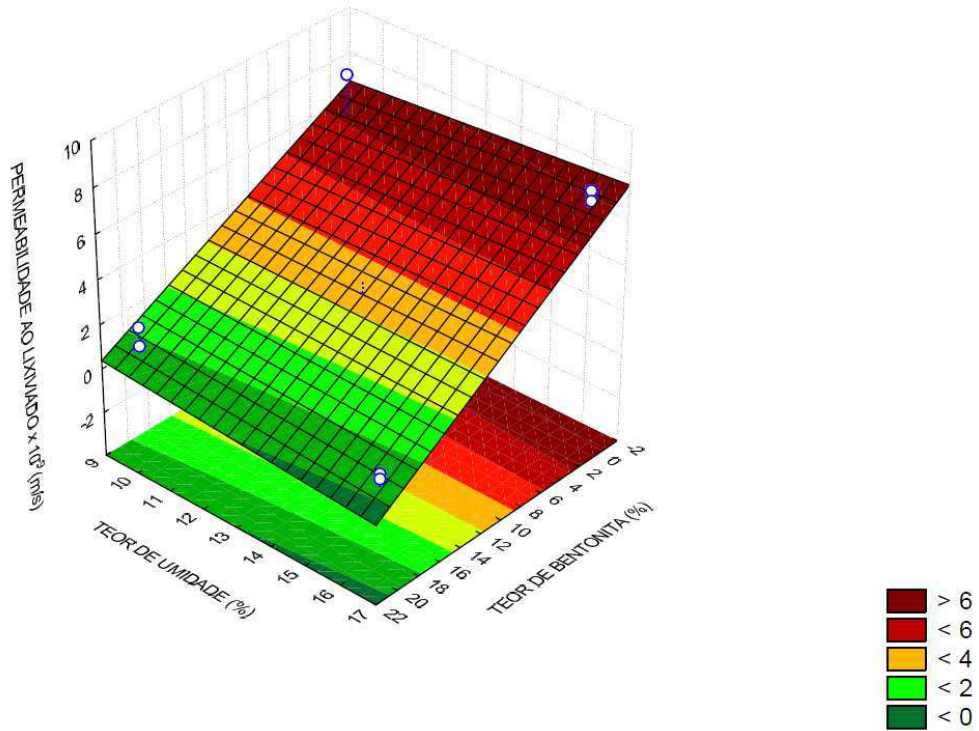


A partir do modelo plano, para a permeabilidade à água, pode-se observar que, para valores de adição de bentonita muito elevados, o teor de umidade de compactação não interfere muito na permeabilidade. À medida que os percentuais de bentonita vão diminuindo, principalmente abaixo do teor de 10% de bentonita, pode-se observar que as linhas vão ficando mais curvas com centro no menor teor de bentonita e maior teor de umidade, representando o ponto de maior permeabilidade à água. Assim, para teores de adição de bentonita abaixo de 10%, o elevado teor de umidade de compactação gera misturas de solo mais permeáveis, ao passo que teores de umidade de compactação reduzidos geram misturas de solo menos permeáveis.

Esse comportamento é devido a característica de expansão das montmorilonitas, principal argilomineral formador das bentonitas que, quando o solo é compactado a baixas umidades, gera possibilidades de expansão no processo de saturação, e nesse caso, uma melhor impermeabilização da camada. Vale ressaltar que, esse modelo foi o que gerou as menores permeabilidades à água.

A Figura 38 apresenta a superfície resposta para a permeabilidade ao lixiviado levando em consideração o teor de bentonita, teor de umidade e fixando a energia de compactação de $0,585 \text{ MN.m/m}^3$, por ser o ponto central.

Figura 38: Superfície resposta do DCC para teor de bentonita x teor de umidade – permeabilidade ao lixiviado.



Pode-se observar a partir da superfície resposta que a umidade obteve pouca influência para todos os teores de bentonita.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÕES

- O comportamento da permeabilidade saturada do solo à água e ao lixiviado, para os solos analisados com a finalidade de impermeabilizar a camada de base de aterros sanitários, mostrou-se eficiente em relação ao atendimento dos requisitos mínimos requeridos pelas normas nacionais.
- A utilização de uma camada de solo com adição excessiva de um material altamente expansivo, apesar de parecer estar trabalhando a favor da segurança, pode acarretar no surgimento de fissuras ao longo da camada, fazendo com que essa camada perca a sua funcionalidade e gere caminhos preferenciais de percolação, aumentando a permeabilidade do solo, e favorecendo o avanço da contaminação.
- As características físicas e químicas das misturas de solos para a utilização em camadas de base em aterros sanitários, sugerem que eles têm uma boa capacidade de retenção de água, que está diretamente ligada a baixos coeficientes de permeabilidade.
- Os modelos de permeabilidade saturada do solo ao lixiviado apresentaram valores inferiores aos modelos de permeabilidade saturada do solo à água, devido, principalmente, as características de viscosidade, de maior peso específico e de elevada concentração de sólidos totais do lixiviado. E isso favorece o retardamento da pluma de contaminação.
- As baixas condutividades hidráulicas à água observadas na condição não saturada, que ocorre ao longo de grande parte de ano na região semiárida, indicam que o solo e a água sob essa camada de solo são muito protegidos da poluição devido ao baixo coeficiente de permeabilidade permitir a decomposição de componentes degradáveis antes de atingi-los.
- Nota-se que o solo da barreira impermeabilizante de base na sua condição de campo, isto é, não saturado, atende aos valores de coeficiente de permeabilidade recomendados para compor barreiras impermeabilizantes de base de aterros sanitários.
- Levando-se em conta que o controle de execução dessas camadas não é tão eficiente e que o líquido lixiviado é altamente tóxico em diversas regiões, sugere-se a adoção de

um critério mais rigoroso e que não leve em consideração apenas um critério, mas também critérios de transporte de contaminantes em meios porosos.

- Com a análise estatística observou-se que o parâmetro que exerceu maior influência sobre a alteração da permeabilidade do solo foi a adição do teor de bentonita nas misturas, seguido da energia de compactação.

Sugestões para pesquisas futuras

- Avaliação da correlação entre a permeabilidade e expansão de solos utilizados em camadas de base em aterros sanitários.
- Avaliação do comportamento do solo natural com a utilização de uma bentonita pura e organofílica.
- Avaliar o comportamento da permeabilidade ao lixiviado no solo com fluidos de diferentes estágios de biodegradação.
- Análise das características não saturadas do solo ao lixiviado.

CAPÍTULO 6

6. 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 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

_____. **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.

ALMEIDA, F. T. R.; SANTOS, G. O.; SILVA, R. A. C. da; GOMES, C. C. Caracterização física do solo utilizado em camadas de cobertura no aterro sanitário de Caucaia-Ceará. In: **CONGRESSO NORTENORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO**, 5., Maceió. Anais... Maceió: CONNEPI, 2010.

ALONSO, T. P., **Condutividade Hidráulica de Solos Compactados em Ensaio com Permeômetro de Parede Flexível**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005, 113 p.

APHA – American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 2012. v. 22. AWWA and WEF, 2012.

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. **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.

ARAÚJO, P. S.; SILVA, D. L. M.; CARIBE, 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. **Anais Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Goiânia: ABMS, 2014.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5084-90**: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. West Conshohockex, 1990. 23p.

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.

Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. João Karlos Locastro, Bruno Luiz Domingos De Angelis. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 20, n. 1, jan.-abr. 2016, p. 200-210.

BAUN, A. *et al.* Natural attenuation of xenobiotic organic compounds in a landfill leachate plume (Vejen, Denmark). **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 65, n. 3, p. 269-291, 2003.

BENATTI, J. C. B. ; BONDER, B. H. ; MIGUEL, M. G. . **Coefficiente de permeabilidade não saturado ao longo de um perfil de um solo coluvionar e laterítico de Campinas/SP**. In: Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, 2009. 5^a Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas. v. 1. p. 415-424.

BENSON, C. H.; DANIEL, D. E. Influence of clods on hydraulic conductivity of compacted clay. **Journal Geotechnical Engineering**, ASCE, v.116, n.8, 1990, p.1231-1248.

BOFF, F. E. Estudo da seletividade iônica na interação solo-contaminante aplicado a liners. São Carlos: EESC/USP. **Seminário (Seminários Gerais em Geotecnia)** - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

Cardoso Junior, C. R. **Estudo do comportamento de um solo residual de gnaiss não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. 158p.

CASAGRANDE, A. **Classification and identification of soils**. Am. Soc. Civil Eng., Virgínia, v. 113, p. 901-930. 1948.

CATANA, C.; VANAPALLI, S. K. CARGA, V. K. The water retention characteristics of compacted clays. **Unsaturated Soils**, v., 189, p. 1348-1359, 2006.

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

Daniel, d. e., trautwein,s.j., boynton, s.s., foreman, d. e. Permeability testing with flexible wall permeameters. **Geotechnical testing jornal**, v7,n3,p.113-122,set.1984.

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.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 1997. 2 ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. rev. atual. Rio de Janeiro-RJ, 1997.

FERNANDES, J. G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG, 2009.

FOUL, A. A. *et al.* Primary treatment of anaerobic landfill leachate using activated carbon and limestone: batch and column studies. **International Journal of Environment and Waste Management**, v. 4, n. 3-4, p. 282-298, 2009.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**. v. 31, n. 3, p. 521-532, 1994.

FUJIMAKI, H.; INOUE, M. Reevaluation of the multistep outflow method for determining unsaturated hydraulic conductivity. **Vadose Zone Journal** 2, 409-415, 2003.

GIUSTI, L. *A review of waste management practices and their impact on human health*. **Waste Management**, v.29, p.2227-2239, 2009.

HOEKS, J.; GLAS, H.; HOFKAMP, J.; RYHINER, A. H. *Bentonite Liners for Isolation of Waste Disposal Sites*. **Waste Management & Research**, 1987, n. 5, p. 93-105.

<http://www.culturaambientalnasescolas.com.br/index.html>> (acessado em 04/08/2019).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). *Manual de Gerenciamento Integrado*. **Lixo Municipal**: 2. ed. São Paulo. 2000. 29 p.

KENNEY, T.C.; VAN VEEN, W. A.; SWALOW, M. A.; SUNGAILA, M. A. *Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures*. **Canadian Geotechnical Journal**, v.29, p.364-374, 1992.

KNOP, A. **Estudo do comportamento de liners atacados por ácido sulfúrico**. 2007. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

LAMBE, T. W. **Soil Testing For Engineers**. New York: John Wiley & Sons, 1951.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics, SI version**. New York, John Wiley and Sons Inc. 553p. 1969

LEMES, M. A. G. **Caracterização de solo utilizado no sistema de barreira impermeabilizante de base de uma célula experimental de resíduos sólidos urbanos**. 208f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2013.

LENGEN, A.; SIEBKEN, J. **Geomembrane in the United State: a brief discussion**. New York: De Groat, Den Hoedt & Termaat, 1996.

LIMA, J. D. de; CARVALHO JR., F. H. de; JUCÁ, J. F. T.; LIMA, M. T. C. D de. A utilização de um sistema de barreiras ativas em um aterro sanitário no município de Campina Grande – Paraíba – Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 26., 2011, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ABES, 2011.

LINS, E. A. M. **A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca**. 2003. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2003.

LIRA, B. S. **Uso de composto orgânico como material componente para camada de cobertura oxidativa**. 2018. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2018.

LOCASTRO, J. K.; DE ANGELIS, B. L. D. *Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários*. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. V20, pag. 200-210, 2016.

LORENZO, M. P. **Pedologia – Morfologia: Retenção de água no solo**. 2017. Disponível em: <https://marianaplorenzo.com/2010/10/18/pedologia-morfologia-retencao-de-agua-no-solo/>. Acesso em: 01 dez. 2018.

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.

MAHLER, C. F.; HUSE, K. *Estudos da adição de bentonita ao solo de cobertura de aterros sanitários*. In: VIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADO, 2015, Fortaleza. **Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**. CT/UFC, 2015. p. 339-344.

MANNING, J. C. (1992) – **Applied Principles of Hydrology**, 2ª ed. Macmillam Publishing Company.

MELO, V. D. F., & ALLEONI, L. R. F. (2009). **Química e mineralogia do solo**. Parte I, Viçosa-MG, 529.

MERAYYAN, S.; HOPE, A. The Affect of Municipal Landfill Leachate on the Characterization of Fluid Flow Through Clay. In: **WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS**, 2009, Great Rivers, Proceedings... Great Rivers: ASCE, 2009. p. 2505-2519.

MOLLINS, L.H.; STEWART, D.I.; COUSENS, T.W. Predicting the properties of bentonite-sand mixtures. **Mineralogical Society**, 31, p.243-252, 1996.

MONCADA, M. P. H. **Avaliação de propriedade hidráulicas de solos tropicais não saturados**. 2008 324f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica – Rio, Rio de Janeiro-RJ, 2008.

MONTEIRO, V. E. D. **Análises física, químicas e biológicas no estudo do comportamento do Aterro da Muribeca**. 2003. 232 fls. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

MONTGOMERY, D. C. Design and analysis of experiments. 7. ed. New York: **John Wiley & Sons**, 2009. 656 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. Rio de Janeiro: **LTC**, 2012.

MONTGOMERY, D.; CALADO, V. Planejamento de Experimentos usando o Statistica. **E-papers Serviços Editoriais Ltda**, 2003. 260 p.

Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resour. Res.** 12:5 13-522.

NASCENTES, A. L. *et al.* Tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico: aspectos operacionais e microbiológicos. **Revista TECCEN**, v. 6, n. 1, p. 05-12, 2015.

NASCIMENTO, P. dos S. **Análise do uso da curva de retenção de água no solo determinada por diferentes métodos e planilha para manejo da irrigação**. 2009. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2009.

OLLER, I.; MALATO, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. A. Combination of advanced oxidation processes and biological treatments for waste watered contamination: a review. **Science of the total environment**, v. 409, n. 20, 2011, p. 4141-4166.

PADILLA, R. S. **Aplicação de um modelo computacional tridimensional para estimativa de balanço hídrico em aterros sanitários**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte - MG. 2007.

PORTILHO, M. F. F. **Profissionais do Lixo: um estudo sobre as representações sociais de engenheiros, garis e catadores**. 1997. Dissertação (Mestrado em). Rio de Janeiro (RJ): Universidade Federal do Rio de Janeiro;1997.

REBELO, K. M. W. **Resistência de interface entre geomembranas e solos através do ensaio de Ring Shear**. 2003. 216 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

REINHART, D.R.; GROSH, C.J. **Analysis of Florida MSW landfill leachate quality**. University of Central Florida, 1998

Richards, L. A. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. **Journal of Agricultural Research**, v.37, p.719-742, 1928.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. *Planejamento de experimentos e otimização de processos*. 2a ed. **Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor**. Campinas, SP. 2009. 618p.

ROWE, R. K. Barrier systems. In: **Geotechnical and Geoenvironmental engineering handbook**. Ontario, Kluwer academic publishers, 2000, chapter 25, p. 25, p. 739-788.

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.

SCOTT, D. H. **Soil physics: agricultural and environmental applications**. Ames: Iowa state university press, 2000. 421p.

SILVA, A. M. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SILVA, A. S. **Avaliação da secagem do bagaço de cajá usando planejamento fatorial composto central**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 83 p. Natal, 2008.

SILVA, D. L. M. **Adsorção de metais tóxicos em liners de solo compactado em aterros sanitários**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2018.

SILVA, T. F. **Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2017.

SOUTO, G. D. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros: estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (stripping)**. 2009. 371 fls. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SOUZA, R. F. C. **Migração de poluentes inorgânicos em liners compostos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, São Carlos, SP, 2009.

STEWART, D.I.; STUDDS, P.G.; COUSENS, T.W. The factors controlling the engineering properties of bentonite-enhanced sand. **Applied Clay Science**, 23, p.97-110, 2003.

TARAZONA, C.F. **Estimativa de Produção de Gás em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2010.210f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio de Janeiro- RJ.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. **Integrated solid waste management: engineering principle sand management issues**. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1993, 978 p.

Van Genuchten, M. Th.; Leij F. J.; Yates S. R.. 1991. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. EPA/600/2-91/065. 93 pp.

Van Genuchten, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

VANAPALLI, S. K. **Simple procedures and their interpretation in evaluating the shear strenght na unsaturated soil**. 1994. PhD Thesis, University of Saskatchewan, Canadá.

VELLOSO, M. P. Os restos na história: percepções sobre resíduos. **Ciência e Saúde coletiva**, 2008 p. 1953-1964

VIEIRA, A. M. (2005). Estudo de Barreiras Capilares como Cobertura Final de Aterro de Resíduos. Tese de Doutorado, Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 265p.

ZANON, T. V. B. **Avaliação da contaminação de um solo laterítico por lixiviado de aterro sanitário através de ensaios de laboratório e análise de dados de campo.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Politécnica Universidade de São Paulo, São Paulo, 117p.

ZUQUETTE, L. V. Geotecnia Ambiental. 1ª ed. **Elsevier**. Rio de Janeiro, RJ. 2015. 399 p.