



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ANA CÁSSIA NASCIMENTO SILVA

**PERMEABILIDADE DE MISTURAS DE SOLOS UTILIZADOS EM CAMADA DE
BASE DE UM ATERRO SANITÁRIO**

RUSSAS

2022

ANA CÁSSIA NASCIMENTO SILVA

PERMEABILIDADE DE MISTURAS DE SOLOS UTILIZADOS EM CAMADA DE BASE
DE UM ATERRO SANITÁRIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Me. Daniela Lima Machado da Silva

RUSSAS

2022

S578p Silva, Ana Cássia Nascimento.
Permeabilidade de Misturas de Solos Utilizados em Camadas de Base de um Aterro Sanitário /Ana
Cássia Nascimento Silva. – 2022.
64 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas,
Curso de Engenharia Civil, Russas, 2022.
Orientação: Prof. Me. Daniela Lima Machada da Silva.

1. Camada de Base. 2. Bentonita. 3. Caracterização Geotécnica. 4. Permeabilidade. I. Título.

CDD 620

ANA CÁSSIA NASCIMENTO SILVA

PERMEABILIDADE DE MISTURAS DE SOLOS UTILIZADOS EM CAMADA DE BASE
DE UM ATERRO SANITÁRIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Profa. Me. Daniela Lima Machado da Silva (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Me. Camila Lima Maia (Examinadora Interna)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Thiago Fernandes da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

A Deus, força e refúgio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter sido meu melhor amigo, força e refúgio em todos os momentos. E por ter permitido a realização desse sonho, e nunca me deixado desistir.

A meus Pais, Auxilia e Dadá, que mesmo não concordando com minhas escolhas, me apoiaram. Rezaram por mim, me deram força, e sempre acreditaram em mim.

A minha irmã e melhor amiga, Ana Clara. Que sempre me ouviu, me acalmou, me deu bronca e foi apoio e força em todas as minhas decisões.

A UFC, que além de ter sido a responsável pela minha formação, me deu auxílio financeiro para chegar até aqui.

A minha orientadora Professora Daniela, e a todos os professores e técnicos da UFC Campus Russas, pelos conhecimentos a mim transmitidos.

A minha amiga Rebeca, que mesmo com suas dificuldades, me deu todo apoio e força para começar essa jornada, me encorajou e sempre topou todas as minhas loucuras. A Joseanne e sua família, pela acolhida e incentivo.

A Iveline, que desde o período que estudei no IFCE tem sido minha orientadora, por todo apoio e amizade.

A meus amigos Natacha, Dalyson, Felipe e Lucas pelas noites em claro, por tolerar meus momentos mais difíceis, me apoiar e nunca me deixarem sozinha. Pelos nossos vinhos, comidas, churrascos na laje, conselhos loucos, conversas, risos, por tudo.

A meus amigos da turma 2020.2 e agregados, nas pessoas do Renato, Adiláyne, Mateus Jesus, Mateus Viana, Thayná, Douglas, Rafael e Auciane. Por todos os momentos loucos, pelas farras, danças, conversas, e todos os momentos vivenciados.

Enfim, a todas as pessoas que passaram pelo meu caminho nesse período, que não só dividiram comigo o Campus, a EJ, as aulas, as festas, os projetos, as bolsas, estágio, trabalho, mas também a vida e com certeza me fizeram uma pessoa e profissional melhor.

“ O ato mais corajoso é pensar por você
mesma. Em voz alta!” (COCO CHANEL)

RESUMO

Diante da problemática da geração de resíduos sólidos urbanos, a busca por alternativas eficientes para a destinação desses resíduos, tornou-se um grande desafio. Os aterros sanitários apresentam-se como uma alternativa economicamente viável, de simples funcionamento e que minimizam os impactos ambientais gerados pela biodegradação dos resíduos. Entretanto, para a utilização desta solução, faz-se necessário que os subprodutos gerados durante este processo não contaminem o solo e as águas subterrâneas. Para isso, os aterros sanitários devem ser impermeabilizados com camadas de base, que possuam uma baixa permeabilidade a ponto de impedir o fluxo desses contaminantes. Assim, o objetivo deste trabalho é analisar a variação da permeabilidade em misturas de solos a serem utilizadas, em células de um aterro sanitário. Para isso, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica com amostras de solo natural da região acrescido de bentonita em 5%, 15% e 25% da massa da mistura. Além disso, realizou-se o ensaio de permeabilidade a carga variável, em condições de confinamento e saturação. A área experimental foi o Aterro Sanitário de Campina Grande, sendo o solo natural proveniente da região do aterro e a bentonita, de uma jazida no município de Boa Vista. Assim, verificou-se que a amostra com teor de bentonita de 5%, apresentou coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-7} m/s, sendo a adição de bentonita quase irrelevante para seu comportamento. A amostra de 15%, mesmo sendo caracterizado como solo arenoso, apresentou coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-8} m/s, valor aceitável pela NBR 13896. Já a mistura com 25%, apresentou-se como material argiloso e seu coeficiente de permeabilidade foi de $9,9 \times 10^{-9}$ m/s. Diante desses resultados, é possível afirmar que a mistura contendo teor de bentonita de 25%, é a mais adequada para ser utilizada como camada de base do aterro, tendo em vista que atende todas as normas nacionais e internacionais, e seu uso ainda pode ser justificada por outros estudos, que comprovam a necessidade de camadas com essas características.

Palavras-chave: Camada de base; Bentonita; Caracterização geotécnica; Permeabilidade

ABSTRACT

Faced with the problem of generating urban solid waste, the search for efficient alternatives for the destination of this waste has become a great challenge. Sanitary landfills present themselves as an economically viable alternative, of simple operation and that minimize the environmental impacts generated by the residues. However, in order to use this solution, it is necessary that the by-products generated during the biodegradation of waste do not contaminate the soil and groundwater. For this, sanitary landfills must be waterproofed with base layers, which have a low permeability to the point of preventing the flow of these contaminants. Thus, the objective of this work is to analyze the variation of permeability in soil mixtures to be used, in cells of the Landfill of Campina Grande in Paraíba. For that, tests of geotechnical characterization were carried out with samples of natural soil of the region added of bentonite in 5%, 15% and 25% of the mass of the mixture. In addition, the permeability test was carried out at variable load, to verify the permeability of the soil, under confinement and saturation conditions. The experimental area was the Landfill of Campina Grande, with the natural soil coming from the landfill region and the bentonite, from a deposit in the municipality of Boa Vista. Thus, it was found that the sample with a bentonite content of 5% presented a permeability coefficient of the order of 10^{-7} cm/s (ten to less than seven centimeters per second), with the addition of bentonite being almost irrelevant to its behavior. The 15% sample, even being characterized as sandy soil, presented a permeability coefficient of the order of 10^{-8} m/s (ten to less eight centimeters per second), an acceptable value by NBR 8413. presented as a clayey material and its permeability coefficient was 9.9×10^{-9} m/s (ten to minus nine centimeters per second). In view of these results, it is possible to state that the mixture containing 25% bentonite content is the most suitable to be used as a base layer of the landfill, considering that it meets all national and international standards, and its use can still be justified by other studies, which prove the need for layers with these characteristics.

Keywords: Base layer; bentonite; Geotechnical characterization; Permeability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Estrutura de um aterro sanitário	18
Figura 2	– Principais estados produtores de bentonita no Brasil em 2007	21
Figura 3	– Microestrutura da bentonita	22
Figura 4	– Esquema simplificado do experimento de Darcy	25
Figura 5	– Aparelho utilizado no ensaio para determinação da permeabilidade do solo– Método A.	28
Figura 6	– Esquema da aparelhagem para o ensaio para determinação da permeabilidade do solo – Método B.	29
Figura 7	– Detalhe do cilindro utilizado para o ensaio para determinação da permeabilidade do solo – Método B.	29
Figura 8	– Vista de uma das células do Aterro Sanitário de Campina Grande	31
Figura 9	– Vista superior da localização do Aterro Sanitário de Campina Grande	31
Figura 10	– Municípios que encaminham RSU para o Aterro Sanitário de Campina Grande	32
Figura 11	– Construção de uma das células do Aterro Sanitário de Campina Grande	32
Figura 12	– Construção da camada de base do ASCG	33
Figura 13	– Coleta de solo natural para ensaios, na região do ASCG	33
Figura14A	– Destorroamento da amostra de solo	42
Figura14B	– Peneiramento das amostras de solo	42
Figura15A	– Bentonita no recipiente superior e o solo natural no inferior antes da mistura	42

Figura15B – Mistura de solos com 15% de bentonita	42
Figura16A – Moldagem do corpo de prova para a amostra com 25% de bentonita	43
Figura16B – Compactação do corpo de prova para a amostra com 25% de bentonita	43
Figura16C – Colocação da camada permeável	43
Figura 17 – Permeâmetro a carga variável da UFC – Campus PICI	44
Figura18A – Processo de saturação dos corpos de prova	44
Figura18B – Esquema de saturação do corpo de prova	44
Figura 19 – Fórmula para o cálculo do coeficiente de permeabilidade	45
Figura 20 – Curva de compactação da mistura contendo 5% de bentonita	46
Figura 21 – Curva de compactação da mistura contendo 15% de bentonita	46
Figura 22 – Curva de compactação da mistura contendo 25% de bentonita	47
Figura 23 – Variação do coeficiente de permeabilidade com a adição de bentonita	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva granulométrica da amostra contendo 5% de bentonita	43
Gráfico 2 – Curva granulométrica da amostra contendo 15% de bentonita	44
Gráfico 3 – Curva granulométrica da amostra contendo 25% de bentonita	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limite de Atemberg	41
Tabela 2 – Resultado do ensaio de granulometria por amostras	44
Tabela 3 – Resumo da classificação das amostras	45
Tabela 4 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de compactação	47
Tabela 5 – Verificações durante o ensaio de permeabilidade para a mistura de 5%	48
Tabela 6 – Verificações durante o ensaio de permeabilidade para a mistura de 15%	49
Tabela 7 – Verificações durante o ensaio de permeabilidade para a mistura de 25%	49
Tabela 8 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de permeabilidade	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Limites de permeabilidade à água para solos usados em camadas de base em aterros sanitários	27
Quadro 2 – Procedimentos empregados na caracterização dos solos.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ASCG	Aterro Sanitário de Campina Grande
CE	Estado do Ceará
cm	Centímetro
cm ²	Centímetro quadrado
cm ³	Centímetro cúbico
CP	Corpo de prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
Fc	Fator de correção
GGA	Grupo de Geotecnia Ambiental
ha	Hectare
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMASUL	Instituto de Meio Ambiente do Mato Grosso do Sul
IP	Índice de Plasticidade
km	Quilômetros
Km ²	Quilômetro quadrado
LAGETEC	Laboratório de Geotécnia e Prospecção
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
m	Metro
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
nm	Nanômetro
NP	Não Plástico
O	Oeste
PB	Estado da Paraíba
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
s	Segundo
S	Sul
SUCS	Sistema Unificado de classificação dos solos
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
K	Coefficiente de Permeabilidade
CO ₂	Dióxido de Carbono
Q	Vazão
A	Área da Seção transversal do recipiente
h ₁	Carga piezométrica inicial
h ₂	Carga piezométrica final
A	Proporcional
L	Comprimento
<i>i</i>	Gradiente hidráulico
<i>v</i>	Velocidade de descarga do fluido
+	Mais
#	Malha
n°	Número

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos da pesquisa	16
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	16
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Aterros sanitários	17
<i>2.1.1</i>	<i>Estrutura de um aterro sanitário</i>	17
<i>2.1.2</i>	<i>Camada de base dos aterros sanitários</i>	18
<i>2.1.3</i>	<i>Fatores que afetam na qualidade das camadas de base</i>	19
2.2	Mistura solo natural – bentonita	20
<i>2.2.1</i>	<i>Bentonita</i>	20
<i>2.2.1</i>	<i>Mistura solo natural – bentonita</i>	22
<i>2.2.3.1</i>	<i>Estudo da proporção das misturas e sua influência para a permeabilidade</i>	23
2.3	Permeabilidade a água	24
<i>2.3.1</i>	<i>Apermeabilidade para os aterros sanitários</i>	26
<i>2.3.2</i>	<i>Ensaio laboratoriais para determinação da permeabilidade</i>	26
<i>2.3.2.1</i>	<i>Ensaio de permeabilidade a carga variável</i>	28
3	METODOLOGIA	31
3.1	Campo experimental	31
3.2	Coleta de amostras deformadas	34
3.3	Definição das porcentagens de bentonita	35
3.4	Ensaio laboratoriais	35
<i>3.4.1</i>	<i>Ensaio de Caracterização dos solos</i>	36
<i>3.4.2</i>	<i>Ensaio de permeabilidade do solo</i>	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Caracterização Geotécnica	41
<i>4.1.2</i>	<i>Limites de consistência</i>	41
<i>4.1.3</i>	<i>Granulometria</i>	42
<i>4.1.4</i>	<i>Compactação</i>	45
4.2	Permeabilidade a água	48

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
5.1	Conclusões	52
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	52
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população nas zonas urbanas, aliado a seu crescente poder de consumo, somado a industrialização, vem trazendo consigo elevados índices de geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Segundo dados do Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe, 2019), apenas em 2018 foram gerados cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos no país, o que evidencia diversos problemas, principalmente no que está relacionado ao destino final desses resíduos.

De acordo com Braga (2018), a gestão dos resíduos sólidos é uma problemática notória nas áreas urbanas dos países em desenvolvimento, podendo causar impactos negativos para a saúde da população, o meio ambiente e também para as condições sociais dos indivíduos. Segundo a Lei Nº 12.305 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil (PNRS), a gestão desses RSU deve considerar alguns aspectos, como a reutilização, a reciclagem e aproveitamento energético. Já nos casos de rejeitos, que não podem ser submetidos a nenhum dos processos citados anteriormente, deve-se utilizar formas de disposição admitidos por órgãos competentes brasileiros, como é o caso dos aterros sanitários.

Os aterros constituem uma das soluções mais viáveis para o tratamento de resíduos sólidos urbanos na atualidade. De acordo com Silva (2018), são obras de engenharia que têm como função principal, dispor os resíduos, prevenir a contaminação do subsolo e de lençóis freáticos. Além de evitar danos que possam afetar a qualidade do ar da região e o bem-estar físico e social da população. Sobre a estrutura desses aterros, sua impermeabilização pode ser realizada por camada de base com solo compactado, além da existência de sistema de drenagem de gases e lixiviado.

Para obter uma camada que exerça a função de barrar a passagem de contaminantes para camadas subjacentes, faz-se necessário a utilização de um material de baixa permeabilidade. Segundo Magalhães (2019) essa camada de impermeabilização pode ser composta por um solo fino compactado ou uma combinação de solos também compactadas, bem como por geossintéticos.

De acordo com Mendes (2017), define-se como permeabilidade a capacidade de percolação da água, ou outros tipos de líquidos, através do solo. Na constituição de alguns aterros sanitários, faz-se necessário a construção de uma camada de base composta de solo

natural compactado, em condições saturadas, com permeabilidade menor que 10^{-8} m/ valor este estabelecido pela NBR 13896.

Um desses materiais que vem sendo empregado como componente da camada de base de aterros é a mistura de solo arenoso com bentonita, que consiste num solo que tem em sua composição mineralógica o argilomineral montmorilonita (SILVA e FERREIRA, 2018). É um solo argiloso, formado por finas partículas que conferem a qualquer estrutura um grau acentuado de impermeabilização, podendo ser empregadas porcentagens desse material na mistura que compõem a base do aterro. Obtendo assim uma camada resistente a passagem do lixiviado, composta com material natural e de melhor custo benefício.

1.1 Justificativa

É notório que as diversas alterações sociais, vem gerando um impacto no que tange a geração de resíduos sólidos fazendo-se necessário o estudo e a articulação para que haja uma destinação adequada para os resíduos gerados.

Para o bom funcionamento das estruturas dos aterros, deve-se adotar procedimentos adequados na sua concepção e execução. No caso da camada de base, é necessária a adoção de materiais com características impermeáveis, para garantir seu bom desempenho, sendo imprescindível estudos acerca do comportamento desses materiais, levando em consideração, a disponibilidade na região do aterro e também seu desempenho.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a permeabilidade de solos com a adição de bentonita, utilizados na camada de base de um Aterro Sanitário.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar o comportamento geotécnica das misturas de solo com bentonita, elencando aspectos que influenciam na permeabilidade;

- Verificar permeabilidade das misturas pelo incremento de bentonita em camada de base de aterro sanitário;
- Propor direcionamento para a construção da camada de base do aterro sanitário de Campina Grande, ressaltando que este mesmo modelo pode ser aplicado a aterros sanitários, em condições semelhantes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aterros sanitários

Os aterros sanitários consistem em uma técnica na qual ocorre a disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, seguida pela cobertura desses resíduos através de camadas de solo (NBR 8419, 1992).

Caracterizam-se por serem estruturas eficientes e economicamente viáveis para a recepção de resíduos de origem doméstica e comercial. Sendo considerada uma das formas mais adequadas para a disposição de RSU, utilizando princípios de engenharia para realizar o confinamento dos resíduos sólidos em uma menor área, reduzindo o volume desses resíduos. Para Alonso (2005) os aterros são uma forma de dispor os RSU, com custo relativamente baixo, e que permitem a disposição de grande quantidade de resíduos, sob condições favoráveis para a decomposição da matéria orgânica, além de impedir a proliferação de vetores de doenças, como ratos, moscas, urubus e baratas.

São estruturas que possuem diversas vantagens, que vão desde a facilidade de operação, utilização de um plano de monitoramento de impacto ambiental, baixo custo quando comparado a técnicas como triagem e incineração, simplicidade e flexibilidade operacional. (ARAÚJO, 2017).

Segundo Araújo (2019), os aterros devem ser construídos baseados em técnicas de impermeabilização do solo, compactação e cobertura diárias das camadas de resíduos. Além de sistema de coleta e tratamento do líquido lixiviado e dos gases, deve haver ainda uma estrutura de drenagem da água proveniente da chuva que atinge a estrutura.

Apesar das inúmeras vantagens do uso e operação dos aterros sanitários, para Lopes (2016), os aterros sanitários apresentam alguns desafios em relação a sua operação, principalmente no que está relacionado a poluição ambiental, pois o lixiviado, proveniente da decomposição do RSU pode contaminar o solo e os lençóis freáticos.

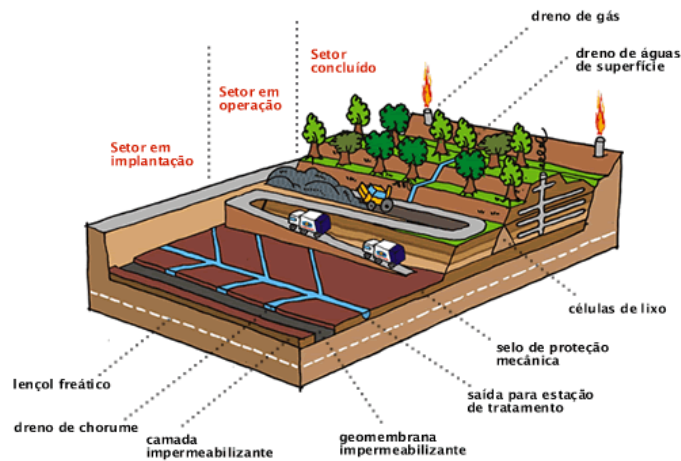
2.1.1 Estrutura de um aterro sanitário

De acordo com Almeida (2016), o processo de concepção de um aterro sanitário envolve uma seleção apropriada da região na qual a estrutura do aterro deverá ser inserida, sendo necessário a realização de diversos estudos, levando em consideração critérios técnicos, a viabilidade econômica de sua construção e manutenção e seu impacto ambiental.

Existem vários critérios para a construção de um aterro sanitário, como a topografia da região, geologia e tipos de solos existentes, fator de extrema relevância, pois determina a capacidade de depuração do solo e da velocidade de infiltração. Para a instalação de um aterro, considera-se desejável a existência, no local, de um depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} m/s (NBR 13896, 1997).

De acordo com Araújo (2017), a estrutura de um aterro sanitário é composta por uma camada de solo superior, submetida a um processo de compactação, o sistema de drenagem, responsável por coletar o lixiviado. Além da camada de base, que deve ser uma camada impermeável, capaz de impedir a passagem de poluentes que contaminam o solo e os lençóis freáticos. A Figura 1, mostra a estrutura base dos aterros.

Figura 1 – Estrutura de um aterro sanitário



Fonte: Rede Educativa Mato Grosso do Sul (2017)

2.1.2 Camada de base dos aterros sanitários

Para o perfeito funcionamento de qualquer equipamento é necessário que todos os constituintes de sua estrutura atendam as especificações necessárias para o bom desempenho. No caso de aterros sanitários, todo sistema de drenagem, cobertura, monitoramento e camadas de base devem apresentar um bom desempenho, evitando danos ao meio ambiente e ao bem-estar e a saúde da população.

De acordo com Costa (2019), um constituinte primordial dos aterros sanitários é a camada de base que consiste na parte da estrutura que tem como função principal impedir a passagem, ou seja, o fluxo de líquidos contaminantes para o solo e os lençóis freáticos.

Para Alonso (2005), a camada de base, deve funcionar como uma barreira impermeabilizante, impedindo a passagem dos líquidos para o meio hidrológico, devendo constituir-se de um material impermeabilizante.

De acordo com a NBR 13896 (1997), a camada de base de um aterro deve ser constituída por camada de solo, com espessura e resistência, capaz de suportar as pressões hidrostáticas evitando possíveis rupturas. Além de prevenir o contato físico entre o solo natural com o líquido percolado e com os resíduos, e de suportar e resistir aos gradientes de pressão acima e abaixo da impermeabilização.

Segundo Boscov (2008), para promover essa impermeabilização, as estruturas dessas camadas podem ser compostas por materiais como, camadas de solo compactadas, solos argilosos, geocomposto bentônico, solo cimento, camada natural de rochas, geossintéticos ou a combinação de dois desses materiais. Vale salientar ainda, que a composição de solos pode ser originária da mistura de materiais com características distintas, para assim obter bom desempenho em termos de permeabilidade.

2.1.3 Fatores que afetam no desempenho hidráulico das camadas de base

Para Neto e Mota (1999), o problema principal atrelado ao emprego dos aterros sanitários como forma de tratamento do RSU é o grande potencial poluidor do líquido gerado pelo processo de decomposição dos resíduos, para as águas subterrâneas e o próprio solo. Pois o lixiviado, possui carga poluidora maior que a do esgoto doméstico.

Segundo Gomes (2017), o processo de biodegradação dos RSU no interior do aterro, geram subprodutos, devido aos mecanismos de transporte metais pesados gerados nesse processo, são capazes de acarretar diversos problemas ambientais relativos à saúde pública, ao solo e aos recursos hídricos, tanto os superficiais, quanto os subterrâneos.

Assim, para evitar tal dano ao meio ambiente e a saúde pública, é necessário o bom desempenho da camada de base do aterro sanitário, devendo esta ser composta de materiais impermeáveis, que impeçam a passagem de líquidos contaminantes para as camadas subsequentes de solo.

As áreas de deposição dos RSU devem ser executadas e operadas dentro de padrões exigidos pelas legislações e normas vigentes. Levando em consideração fatores ambientais e critérios técnicos, que viabilizem e diminuam qualquer tipo de impacto negativo gerado na operação dessas estruturas (CATAPRETA, 2008).

Essas barreiras de impermeabilização devem atender além do critério de permeabilidade outros critérios como a estanqueidade, durabilidade, resistência a deformações e a ação da água (LUKIANCHUKI, 2007). Para Silva (2017), os casos de vazamento de lixiviados representam acidentes ambientais de forte impacto, sobretudo quando atingem aquíferos. Podem ocorrer principalmente por negligências na fase de projeto ou na execução do aterro. A escolha de um material de base com coeficiente de permeabilidade menor do que o estabelecido na norma, o uso de materiais sem estudos prévios e embasamento técnico, além de falhas no sistema de coletas do lixiviados, são algumas das causas que podem levar a essa situação.

2.2 Mistura solo natural – bentonita

A utilização de solos como materiais de camadas de base de um aterro sanitário, apresentam-se como uma forma de utilizar materiais de origem natural, presentes na natureza de forma mais abundante, além de obter uma estrutura que atenda a critérios necessários para seu funcionamento. De acordo com Leme e Miguel (2014), solos argilosos, como a bentonita, são um dos mais vantajosos materiais, a serem utilizados como camada de base de aterros, apresentando excelente custo-benefício, e baixa permeabilidade. Contando que haja disponibilidade de jazidas desse material na região.

Para Costa (2019), a utilização da bentonita como aditivo para solos arenosos, ao serem compactados, são uma solução eficaz para o uso como camadas de bases de aterros sanitários. Ao associar a elevada capacidade de retenção de água da bentonita, com um solo permeável, mas que equilibra sua capacidade de retenção a bentonita, confere a camada de base resistência à passagem de água.

2.2.1 Bentonita

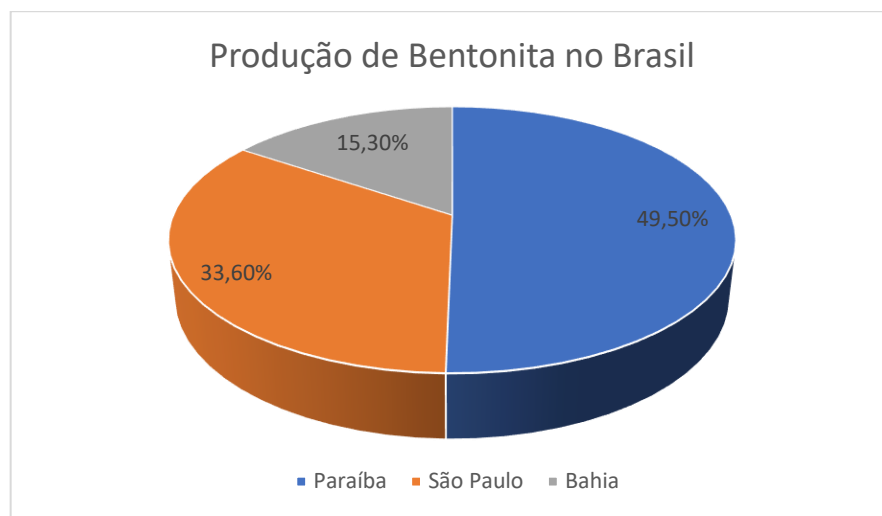
Segundo Batista (2010), a bentonita caracteriza-se como uma argila constituída por um argilomineral esmectítico, o aluminossilicatos de sódio, e outros minerais, como mica, feldspato e quartzo. É um material de origem natural, mas frequentemente origina-se de sedimentos originários de uma rocha composta de uma argila cristalina, provenientes das alterações de cinzas vulcânicas.

As montmorilonitas são filossilicatos com formato hexagonal composta por alumínio e magnésio, possuindo em sua composição cátions trocáveis. (LUKIANCHUKI,

2007). Possui como principais características a presença de partículas muito finas, apresentando cor branca acinzentada, baixa permeabilidade e capacidade de expansão.

De acordo com Luz e Oliveira (2008), a cidade brasileira que possui as principais jazidas de bentonita em operação no Brasil está localizada na Paraíba, o município de Boa Vista. Segundo dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), em 2017 o estado da Paraíba foi responsável por 49,5% de toda a bentonita bruta produzida no Brasil. Seguida pelos estados de São Paulo com 33,6%, Bahia com 15,3% como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Principais estados produtores de bentonita no Brasil em 2007

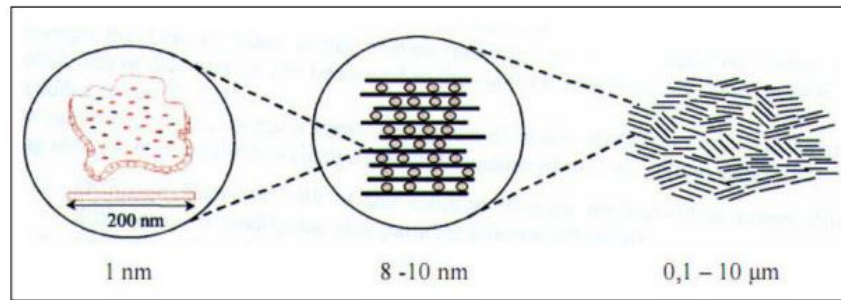


Fonte: Departamento Nacional de Produção Mineral (2007).

A bentonita possui partículas com grandes áreas superficiais o que leva a sua capacidade de adsorver íons, conferindo um melhoramento substancial na contenção de líquidos, inclusive do lixiviado, provenientes dos RSU (SILVA, 2017). Segundo Lukiantchuki (2007), ao ser submetida a condições de confinamento, como nos casos das camadas de bases dos aterros sanitários, as partículas da bentonita exercem uma força umas contra as outras. Ocorrendo assim, o preenchimento dos vazios entre as partículas do solo, formando uma barreira impermeabilizante, que impede passagem de fluxo.

Segundo Barbosa (2009), em termos de microestrutura, as partículas da bentonita possuem formato lamelar, sendo consideradas nanopartículas, com cerca de 200nm de comprimento e 1nm de largura. Entretanto, na natureza são encontradas de forma agrupada, como pode ser observada na figura 3.

Figura 3 – Microestrutura da bentonita



Fonte: Barbosa (2019)

Algumas características que também podem interferir no desempenho da bentonita como componente da camada de base de um aterro, são o tipo de solo a ser utilizado junto a bentonita, espessura da camada e profundidade da fundação do aterro. Além de grau de compactação do solo, umidade, densidade e grau de saturação.

Para Pitanga (2007), a bentonita é um material que têm apresentado crescente emprego nas áreas ambientais e geotécnicas, possuindo qualidades reológicas, que promovem um bom desempenho nesses setores. Para Yong (2001), o uso desse tipo de solo, na composição das bases de aterros, mostra-se como uma solução viável e promissora, pois além de inibir a passagem de contaminantes para as camadas subsequentes de solo, e para os lençóis freáticos, apresentam baixo custo.

2.2.2 Mistura solo natural – bentonita

Para Mahler e Huse (2015), na grande maioria das regiões de instalação de aterros sanitários, o solo natural da região, mesmo presente em abundância, não apresenta características eficientes, que possibilitem a sua utilização como camada de base do aterro, principalmente analisando o critério de permeabilidade. Logo, faz-se necessária a utilização de um material alternativo para atender a esses índices ou a mistura desse solo com outro material.

Segundo Costa (2019), o uso de solo natural, com características arenosas, com a adição de bentonita tem sido uma solução muito utilizada para bases de aterros sanitários, após compactados. A elevada capacidade de retenção de água e de expansão da bentonita, como forma de preenchimento dos poros, conferem ao material resistência à passagem de água e líquidos, como o chorume, características do argilomineral montmorilonita.

Para Silva (2017), nos casos onde o solo natural apresenta altas taxas de permeabilidade à água, a adição de bentonita a este material reduz a condutividade hidráulica

do solo, possibilitando que sejam atendidas as exigências normativas com relação a permeabilidade à água.

A redução da condutividade hidráulica, depende de vários fatores, desde o percentual adicionado de bentonita ao solo, o grau de compactação e umidade a que essas são expostos no processo de construção das camadas do aterro, e a granulometria do solo natural. Sendo necessário um real entendimento de todos esses fatores, para a definição de uma camada que atenda aos critérios de desempenho, e normas vigentes, como NBR 8419: 92, que aponta como coeficiente de permeabilidade ideal para essa estrutura o valor de 10^{-8} m/s.

2.2.3.1 Estudo da proporção das misturas e sua influência para a permeabilidade

Para Huse (2007), um dos fatores que mais influência para o bom desempenho de uma camada de solo natural + bentonita, quando utilizado como camada de base de um aterro sanitário, é a proporção de cada um desses materiais na mistura. A bentonita possui como principal característica, além da sua baixa permeabilidade, sua capacidade de expansão, o que pode ser prejudicial se for muito alta, levando em consideração que este processo leva a formação de fendas, o que interfere no desempenho da camada quanto ao bloqueio da passagem de contaminantes.

Já os solos de arenosos, possuem valores maiores de permeabilidade, apresentando em sua composição uma estrutura com maiores índices de vazios. Entretanto, podem proporcionar um equilíbrio às propriedades da bentonita, como é o caso da expansão, além de serem materiais mais abundantes, em comparação com outros tipos de solos.

Segundo Soares (2012), a adição de bentonita, é uma das formas de viabilizar a utilização de solos com características arenosas, como material de base para aterros sanitários, levando em consideração o aspecto da permeabilidade. Para Soares (2017), a determinação do teor de bentonita necessária, nessas misturas, para a obtenção de uma camada de base que atenda a permeabilidade estabelecida pelas normas técnicas, deve ser determinado através da realização de ensaios de permeabilidade com a mistura de várias proporções.

Segundo Magalhães (2019), a bentonita deve promover a impermeabilização da camada de base de um aterro, minimizando a percolação do lixiviado, através do seu processo de expansão, o que leva a preenchimento dos vazios e a formação da barreira que impede o fluxo dos líquidos. Costa (2019), define essa propriedade das misturas com bentonita cicatrização, e afirma que esta é o que garante a eficiência da camada e que está trabalhe

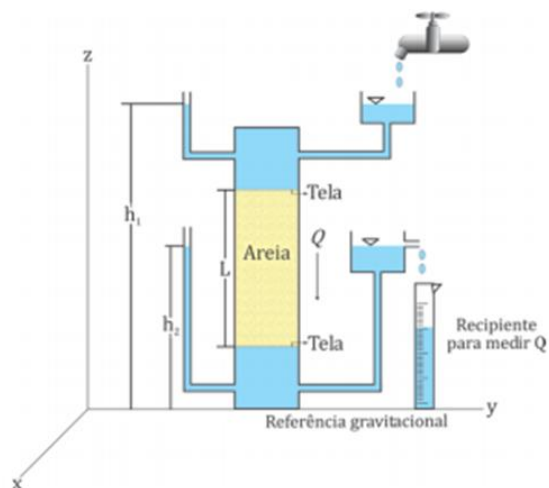
impedindo a passagem de fluxo. O mesmo autor ainda afirma, que a mistura de solo com bentonita é excelente filtro eficiente para reter o lixiviado.

2.3 Permeabilidade à água

Define-se como permeabilidade a capacidade que determinado tipo de solo possui de permitir a passagem de água, através de sua estrutura. Sendo este índice geométrico, representado numericamente pelo coeficiente de permeabilidade (K), que denota a capacidade da água passar através de uma massa de solo (MARANGON, 2018). Para Daas (2007), a permeabilidade dos solos depende diretamente de vazios interconectados componentes da microestrutura do solo, pois através deste é que ocorre o transporte da água, que flui dos pontos de maior para os de menor energia.

Sendo um índice primordial de caracterização do solo, a permeabilidade é influenciada por diversos fatores e propriedades do solo. A granulometria, composição mineralógica, índice de vazios, grau de saturação, e estrutura das partículas do solo, são alguns dos fatores que podem interferir na permeabilidade (JESUS, 2017). Segundo Libardi (2005), os primeiros conceitos de permeabilidade, surgiram em 1856 através do experimento de Henry Darcy. Que submeteu um corpo de prova de areia, em condições de saturação, a uma coluna de infiltração natural, de acordo com a figura 04.

Figura 4 – Esquema simplificado do experimento de Darcy



Fonte: Jesus (2017)

Após a realização desse experimento, atingidas as condições de equilíbrio, nas quais não ocorrem mais variações na vazão Q , Darcy chegou às seguintes conclusões (LIBARDI, 2005):

a) A vazão Q , o volume de solução que atravessa a coluna por unidade de tempo, é proporcional à área A de sua secção transversal:

$$Q \propto A. \quad (1)$$

b) A vazão Q é proporcional à diferença entre as cargas piezométricas ($h_1 - h_2$) que atuam nas extremidades da coluna:

$$Q \propto (h_1 - h_2). \quad (2)$$

c) A vazão Q é inversamente proporcional ao comprimento L do filtro de areia:

$$Q \propto 1/L. \quad (3)$$

Após várias considerações de proporcionalidade, Darcy obteve a seguinte equação, conhecida como a equação de Darcy:

$$Q = KA \times (h_1 - h_2) / L. \quad (4)$$

O autor ainda relata que a parte da expressão que relaciona a diferença de altura ($h_1 - h_2$) / L e o comprimento do filtro, pode ser escrita de forma diferencial e ser denominada gradiente hidráulico (i), logo tem-se:

$$Q = KiA \quad (5)$$

Substituindo vazão (Q), pela relação entre velocidade e área, tem-se por fim:

$$v = Ki \quad (6)$$

Onde v é a velocidade de descarga do fluido na seção transversal (A) e K foi definido como uma propriedade do meio poroso, que traduz a rapidez com que determinado líquido atravessa esse meio, que posteriormente foi chamado de constante de condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade (LIBARDI, 2005).

Segundo Mendes (2017), a definição do coeficiente de permeabilidade de determinado solo, apresenta-se como um índice de extrema relevância para sua caracterização. Na engenharia, conhecer a permeabilidade auxilia na execução e nos projetos de obras de engenharia, como na construção e concepção de barragens e aterros sanitários, obras de

drenagem, e rebaixamento de lençóis freáticos. A informação da permeabilidade e de sua variação é fundamental para a solução desses problemas.

2.3.1 A permeabilidade em camadas de base de aterros sanitários

De acordo com Silva (2017), a permeabilidade caracteriza-se como a variável mais relevante para a análise e definição do solo a ser utilizado na camada de base de aterros sanitários. Tendo em vista que esta camada impermeabiliza as camadas subsequentes. Logo, é necessário entender e analisar as características físicas e as propriedades químicas e mineralógicas dos solos, para assim definir de forma mais precisa os fluxos da camada de base de aterros sanitários.

O aterro sanitário necessita em sua estrutura de uma camada de proteção inferior que além de funcionar como suporte para os resíduos e camadas superiores, deve atuar como uma barreira hidráulica, impedindo a percolação dos líquidos para as camadas higroscópicas evitando danos físicos e químicos, causados por esses.

De acordo com a NBR 13896:97 solos componentes da estrutura das camadas de base de aterro sanitários devem apresentar coeficiente de permeabilidade à água (k) de 10^{-8} m/s. Para a mesma norma, um aterro não pode ser implantado em regiões cujo coeficiente de permeabilidade do solo natural seja superior a 10^{-6} m/s, mesmo sob a utilização de materiais adicionais com características impermeabilizantes.

Entretanto, mesmo a norma brasileira, definindo esses valores, segundo Soares (2012), às normas internacionais definem um coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-9} m/s para a camada de base de aterros de RSU. Sendo esse índice também apontado por Potter e Yong (1993), que afirmam que baseando-se na lei de Darcy, para uma camada com esse valor de k , seriam necessários cerca de 30 anos para que o líquido perolasse uma camada de 1,0 metros desse material, o que representa tempo suficiente para o lixiviado não ser poluente. No quadro seguem valores limites de permeabilidade a água para os solos utilizados como camada de base de aterros sanitários.

Quadro 1- Limites de permeabilidade à água para solos usados em camadas de base em aterros sanitários.

Referência	Especificação (m/s)
------------	---------------------

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)	$k < 1 \times 10^{-9}$
NBR 13896 (ABNT, 1997)	$k < 1 \times 10^{-8}$
Environmental Protection Agency (USEPA, 1991)	$k < 1 \times 10^{-9}$
Qasim e Chiang (1994)	$k < 1 \times 10^{-9}$

Fontes: NBR 13.836/97; Rocca (1993); Qasim e Chiang (2017).

2.3.2 Ensaios laboratoriais para determinação da permeabilidade

Para a determinação da permeabilidade do solo utilizam-se dois métodos de ensaios baseando-se nas normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O primeiro deles é balizado pela NBR 13292: 95 que determina o coeficiente de permeabilidade (k) para solos granulares, utilizando o método das cargas constantes. Já para a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos, utiliza-se a NBR 14545:2021.

Em ambos os ensaios a determinação do coeficiente de permeabilidade (k), baseia-se no princípio de percolação de água através do solo em regime de escoamento laminar. Além disso, na aplicação de ambos os métodos são utilizados podem ser utilizados corpos-de-prova moldados, obtidos a partir de amostras indeformadas ou da compactação de amostras deformadas.

Todos os ensaios de permeabilidade, baseiam-se nos princípios da Lei de Darcy, já citado na seção 2.4 deste trabalho. Vale ressaltar ainda que o coeficiente de permeabilidade é uma constante de proporcionalidade relacionada com a facilidade pela qual o fluxo passa através de um meio poroso.

Sobre o ensaio de permeabilidade a carga constante, NBR 13292: 95, este aplica o princípio de percolação de água sobre uma massa de solo granular isto é, solos que contenham no máximo 10%, em massa, de material que passa na peneira de 0,075 mm. É realizado, baseia-se nos mesmos princípios do ensaio com carga variável. (NBR 13292, 1995).

2.4.3.1 Ensaio de permeabilidade a carga variável

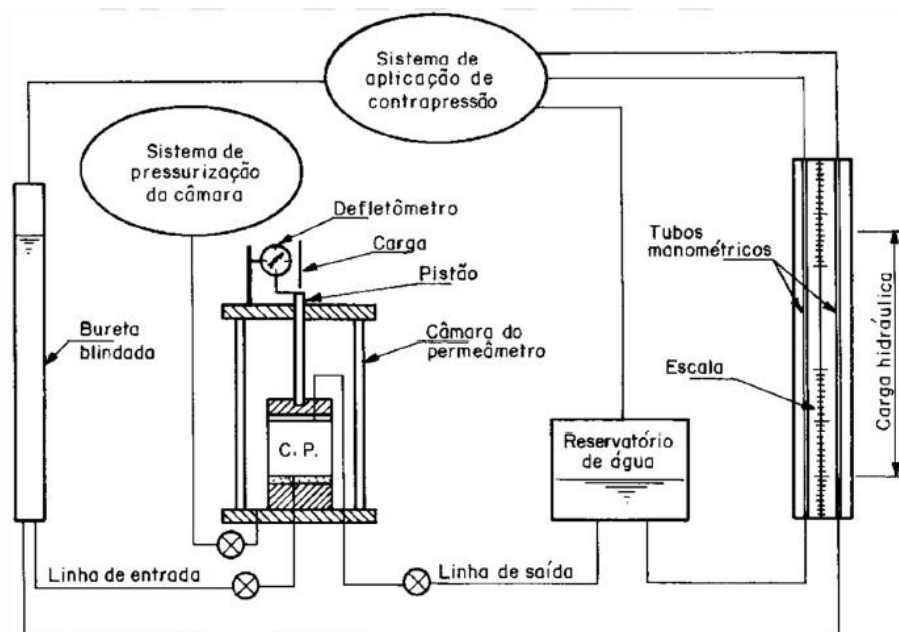
O ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade para solos argilosos a carga variável, baseiam-se no princípio de Darcy, com a água percolando pelo solo em regime de escoamento laminar, partindo da proporcionalidade direta entre a velocidade do fluxo e os gradientes hidráulicos (NBR 14545, 2021).

A norma apresenta dois métodos de ensaio para a determinação da permeabilidade. Ambos utilizam corpos de prova compactados ou talhados na umidade ótima, além de necessitarem da completa saturação do material.

Para Jesus (2012), o processo de saturação dos corpos de prova nesses ensaios, ocorrem por meio de um processo de percolação ascendente, que impõe uma carga hidráulica constante sob o corpo de prova, essa carga geralmente é baixa, mas pode ser elevada gradualmente ao longo do tempo de saturação.

O método A utiliza aparelhagem mais robusta, composta por sistemas de pressurização e contra pressão, buretas manométricas, sistemas de entrada e saída de água, figura 5.

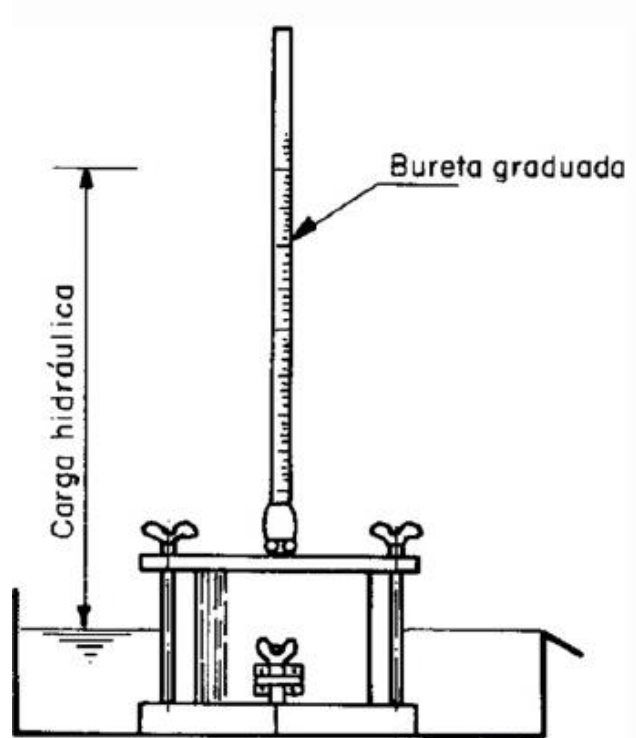
Figura 5 – Aparelho utilizado no ensaio para determinação da permeabilidade do solo – Método A.



Fonte: NBR 14545 (2021)

Já o sistema B é composto por uma bureta graduada e um cilindro metálico, interligados, para o processo de saturação a um recipiente com água, figura 6.

Figura 6 – Esquema da aparelhagem para o ensaio para determinação da permeabilidade do solo – Método B.



Fonte: NBR 14545 (2021)

Em termos de execução de ensaio do método B, após a preparação da amostra e moldagem do corpo de prova, o mesmo deve passar por processo de saturação ascendente, sendo injetada a água no corpo de prova através de um orifício localizado na parte superior do cilindro.

O processo será considerado satisfatório assim que a água surgir no orifício inferior do reservatório. Após a saturação deve-se conectar o cilindro, ao sistema de aplicação e medição de cargas hidráulicas, geralmente a bureta instalada sobre certa altura. E assim realizar medições periódicas até obter-se quatro medições iguais ou bem próximas (NBR 14545, 2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo, tem como objetivo descrever o campo de estudo, além de descrever todos os métodos utilizados para a caracterização geotécnica das misturas e determinação do coeficiente de permeabilidade das camadas de solo compactadas.

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus Fortaleza, e Laboratório de Mecânica dos Solos da UFC Campus de Russas. Além disso, o trabalho foi realizado em parceria com o Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), que é conveniada à empresa ECOSOLO, operadora do aterro.

3.1 Campo experimental

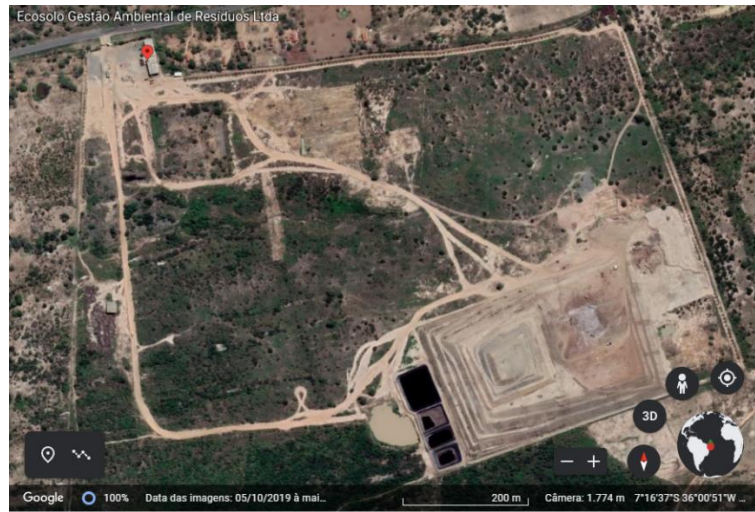
O Aterro Sanitário de Campina Grande (ASCG), figura 8, está localizado na Fazenda Logradouro II distrito de Catolé de Boa Vista, a cerca de 10 km da área urbana de Campina Grande, figura 8. Ocupa atualmente uma área total de 64 ha, com 39,89 ha deste total destinados à disposição de RSU de origem domésticas, de construção e demolição e resíduos da poda de árvores. O aterro está localizado a uma Latitude $7^{\circ} 16'45,22''S$ e Longitude $36^{\circ} 0'48,36''O$, e seu principal acesso é a PB-138.

Figura 8 – Vista de uma das células do Aterro Sanitário de Campina Grande.



Fonte: GGA/ UFCG (2022)

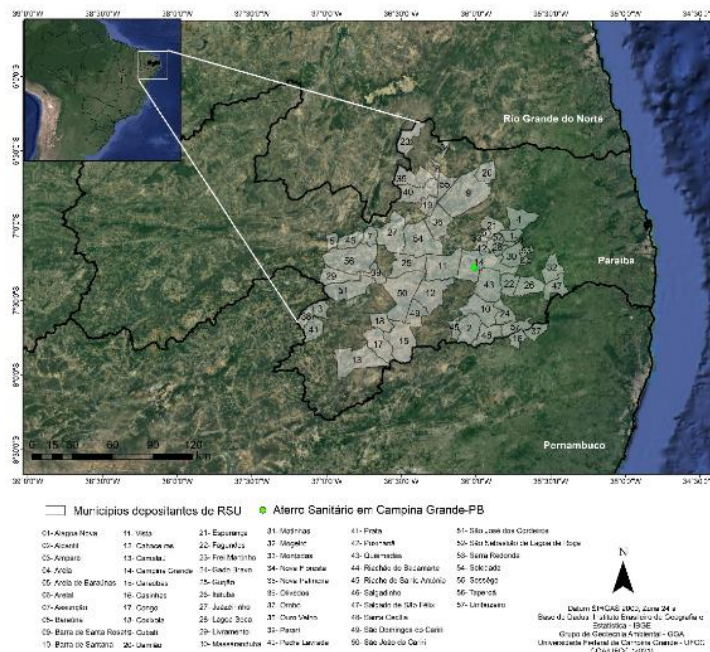
Figura 9 – Vista superior da Localização Aterro Sanitário de Campina Grande -PB



Fonte: Google Earth (2022)

Projetado para receber 350 toneladas de resíduos sólidos por dia, o ASCG iniciou sua operação em julho de 2015, considerando-se que sua vida útil será de 25 anos. Atualmente o aterro recebe cerca de 500 toneladas de resíduos por dia do município de Campina Grande-PB, além de receber resíduos dos municípios de Boa Vista, Barra de Santana, Queimadas, Puxinanã, Montadas e Lagoa Seca, dentre outros Municípios do entorno do aterro, figura 10.

Figura 10 – Municípios que encaminham RSU para o Aterro Sanitário de Campina Grande.



Fonte: GGA/ UFCG (2022)

O ASCG conta com 4 células de disposição de resíduos, sendo prevista a instalação de 20 unidades, figura 11. As células, possuem formato piramidal, com área de base de aproximadamente 100 x 100 m, altura em torno de 20 metros, divididas em Platôs de 5 m, com Bermas de 6 m (SANTOS et. al. 2019).

Figura 11 – Construção de uma das células do Aterro Sanitário de Campina Grande.



Fonte: GGA/ UFCG (2022)

Sobre a estrutura do aterro, o mesmo é formado por camada de solo, inserida após a colocação de cada camada de resíduo. Além da camada de base, que no caso do ASCG utiliza uma mistura de solo local com solo bentonítico em uma proporção de 20% de bentonita. A mistura entre os dois solos é realizada na própria área do aterro, seguido de espalhamento e compactação mecânica, figura 12.

Figura 12 – Construção da camada de base do ASCG



Fonte: GGA/ UFCG (2022)

3.2 Coleta de amostras deformadas

Os solos utilizados nesse estudo, foram coletados na jazida do próprio ASCG, figura 13. Já a bentonita foi coletada em jazida localizada na cidade de Boa Vista, na Paraíba, a cerca de 50 km da região do aterro.

Figura 13 – Coleta de solo natural para ensaios, na região do ASCG



Fonte: GGA/ UFCG (2022)

Vale ressaltar que após a coleta dos solos, as amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFCG na cidade de Campina Grande – PB para a cidade de Fortaleza - CE e Russas – CE para a realização dos ensaios.

3.3 Definição das porcentagens de bentonita

A análise do presente trabalho foi realizada com amostras de solo contendo respectivamente, 5%, 15% e 25% de bentonita em sua composição. Para definição das porcentagens dessa pesquisa, foi levada em consideração a composição utilizada atualmente na camada de base do ASCG com 20% de bentonita. Logo, os valores a serem analisados, deveriam estar nas proximidades desse valor.

Além disso, as porcentagens, foram selecionadas a partir dos estudos de Costa (2019) e Silva (2017), que após a aplicação de um modelo de planejamento experimental, definiram como base de seus estudos, as porcentagens de 10%, 20% e 30%, isso permitiu que fossem desenvolvidos estudos com teores de bentonita semelhantes, mas com valores diferentes dos analisados pelos respectivos autores.

3.4 Ensaios laboratoriais

3.4.1 Ensaios de Caracterização dos solos

Com o objetivo de caracterizar os solos e ambas as misturas, foram realizados os ensaios de caracterização, expostos no Quando 2 a seguir, seguindo-se as normas vigentes para a execução de cada ensaio. Os locais de realização dos ensaios foram Laboratório de Mecânica dos solos e Pavimentação da UFC (LMSP - UFC), Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFCG (LGA – UFCG) e Laboratório de Mecânica dos solos da UFC Campus de Russas (LMS – Campus Russas)

Quadro 2 – Procedimentos empregados na caracterização dos solos

Ensaio	Método	Local de realização do ensaio
Preparação das amostras	NBR 6457/2016a	LPMS - UFC e LGA - UFCG
Limite de Liquidez	NBR 6459/ 2016b	LMS – Campus Russas
Limite de Plasticidade	NBR 7180/ 2016d	LMS – Campus Russas
Compactação dos Solos	NBR 7182/ 2016f	LMS – Campus Russas

Granulometria	NBR 7181/ 2016e	LGA - UFCG
---------------	-----------------	------------

Fonte: Autora (2022).

3.4.2 Ensaio de permeabilidade do solo

O ensaio para determinação da permeabilidade de solos argilosos, baseou-se na NBR 14545: 2021, foi utilizado para esta determinação o método B da norma. Assim, iniciou-se o processo com a preparação da amostra, destorroamento e peneiramento na peneira nº 10, Figura 14 A e B.

Figura 14 – A) Destorroamento da amostra de solo natural; B) Peneiramento das amostras de solo



Fonte: Autora (2022)

Após a preparação de ambos os solos, bentonita e solo natural, realizou-se a mistura entre os solos, considerando as porcentagens de 5%, 15% e 25% de bentonita para uma massa de 2000 gramas de solo. Na figura 15 A é possível observar os dois solos, já preparados e pesados, já na Figura 15 B, temos a mistura de 15%.

Figura 15 – A) Bentonita no recipiente superior e o solo natural no inferior antes da mistura; B) mistura com 15% de bentonita

A

B



Fonte: Autora (2022)

Depois da mistura das amostras, realizou-se a umidificação desta, com as quantidades de água necessárias para a obtenção da umidade ótima para cada amostra, já calculadas previamente por meio do ensaio de compactação. Após a preparação total da amostra, realizou-se a moldagem dos corpos de prova, utilizando-se um cilindro metálico, realizando-se a colocação do solo em camadas e compactando cada uma delas, figura 16 A e 16 B. Em seguida realizou-se a regularização do topo de cada corpo de prova e a adição de camada permeável, com a utilização de brita, figura 16 C.

Figura 16 – A) Moldagem de corpo de prova; B) Compactação do corpo de prova para a amostra com 25% de bentonita; C) Colocação da camada permeável CP.

A

B

C



Fonte: Autora (2022)

Após o fechamento do cilindro, iniciou-se o processo de saturação dos corpos de prova, utilizando o permeâmetro de carga variável de parede rígida, Figura 17. O processo de saturação dos corpos de prova, era acompanhado inicialmente, pela ocorrência da saída de água através da mangueira presente na região inferior do cilindro, figura 18 A e 18 B.

Numa segunda etapa, o controle de saturação ocorreu através de três verificações semanais, durante 1 hora. Nas quais eram realizadas leituras no permeâmetro a cada 20 minutos, verificando a variação da altura de água, objetivando a constância na medição para assim realizar o ensaio.

As amostras com as porcentagens de 15% e 25%, duraram respectivamente, 25 e 31 dias, para que ocorresse a saturação completa do corpo de prova, para assim serem realizadas as leituras para cálculo da permeabilidade. Já a amostra que continha 5% de bentonita, passou 8 dias em processo de saturação. Vale salientar que a carga altimétrica do permeâmetro utilizado nos experimentos é de 0,145 m.

Figura 17 – Permeâmetro a carga variável da UFC – Campus Pici



Fonte: Autora (2022)

Figura 18 – A) Processo de saturação dos corpos de prova; B) Esquema de saturação

A



B



Fonte: Autora (2022)

Após a saturação completa dos corpos de prova, iniciaram-se as leituras no permeômetro, sendo realizadas três verificações, uma a cada 24 horas. E por fim, realizados os

cálculos utilizando como fórmula para o cálculo da permeabilidade a exposta na Figura 19, vale ressaltar que o fator de correção utilizado foi de 0,811.

Figura 19 – Fórmula para o cálculo da permeabilidade

$$K_{20} = 2,3 \cdot \frac{aL}{At} \cdot \log \frac{h_0}{h_f} \cdot F_c$$

Fonte: Autora (2022)

Onde:

K_{20} = Coeficiente de Permeabilidade (m/s)

a – Área da seção transversal da bureta (cm²)

L – Espessura do corpo de prova (cm)

A – Área da seção transversal do corpo de prova (cm)

t – Tempo decorrido do ensaio (s)

h_0 – Altura inicial do nível de água (cm)

h_f – Altura final do nível de água (cm)

F_c – Fator de correção (20°C)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização Geotécnica

4.1.2 Limites de consistência

Os resultados obtidos para os limites de consistência estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Limite de liquidez das misturas

Mistura	Porcentagem de bentonita (%)	LL (%)	LP (%)	IP
01	5	12,5	12,5	0
02	15	32	19,30	5
03	25	24,5	20,20	11

Fonte: elaborada pela autora.

Analisando os resultados do ensaio de limite de liquidez, para a amostra com 5% de bentonita, foi possível verificar que mistura apresentou comportamento não plástico (NP), o que permite identificar que essa porcentagem de adição não afeta a plasticidade do solo, sendo predominante as características do solo natural, que é um solo arenoso. Esse resultado pode ser justificado pelos estudos realizados por Costa (2019) e Silva (2017), que ao definirem as porcentagens de bentonita nas misturas para seu estudo optaram por porcentagens acima de 10%, tendo em vista o impacto quase desprezível em adições menores que essa.

Os valores obtidos para o índice de plasticidade estão de acordo com o esperado para cada uma das misturas, como foi definido por Batista (2010), a bentonita é uma argila de finos grãos, o que lhe confere elevados índices de plasticidade. Pelos resultados, é possível verificar que a adição de bentonita ao solo natural, o tornou um material com maior plasticidade. Isso pode inclusive ser justificado também pelo resultado da amostra com adição de 5%, que apresentou comportamento não plástico. À medida que a porcentagem de adição da argila foi crescendo, a plasticidade da mistura também apresentou o mesmo comportamento.

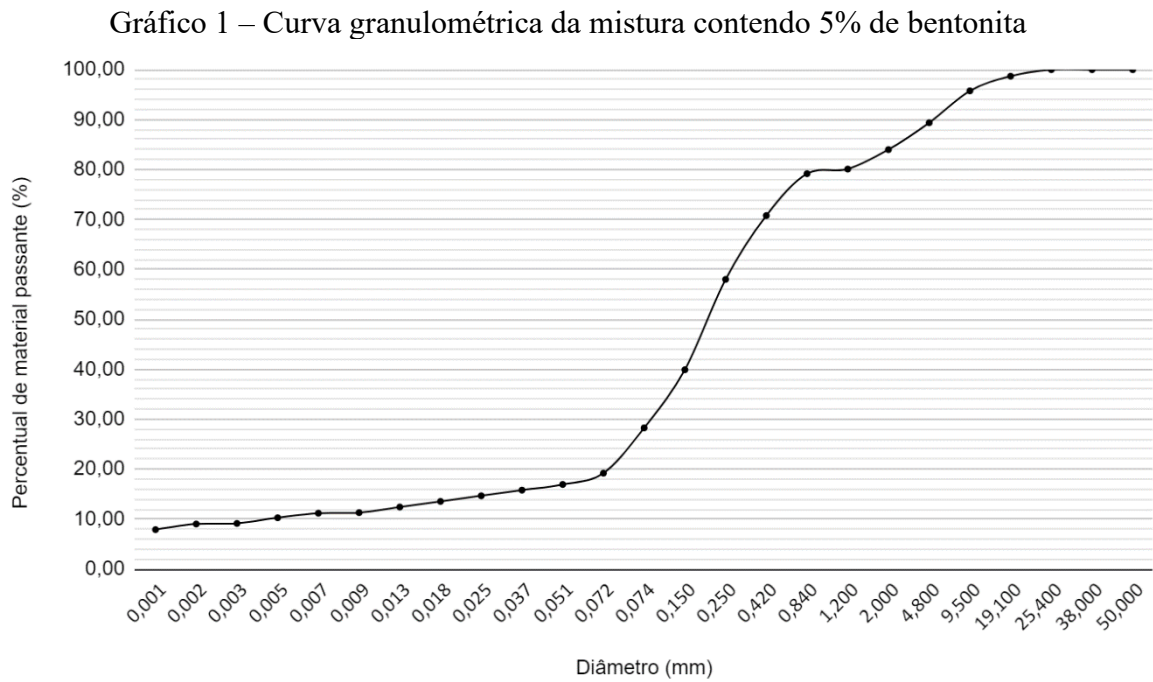
De acordo com Rowe et. al. (1995) e Araújo (2017), camadas de bases de aterros sanitários devem apresentar IP superior a 7%. Sendo assim das misturas analisadas apenas a contendo 25% de bentonita, atenderia esse critério, com IP de 11%, o que considerando este aspecto, lhe confere característica de camada de base.

Analisando esses resultados para a permeabilidade das camadas de base de aterro sanitário, é notório que materiais com características argilosas, apresentam melhor desempenho

quanto camada de base, tanto em termos de custo-benefício, quanto em relação permeabilidade, o que foi citado por Leme e Miguel (2014).

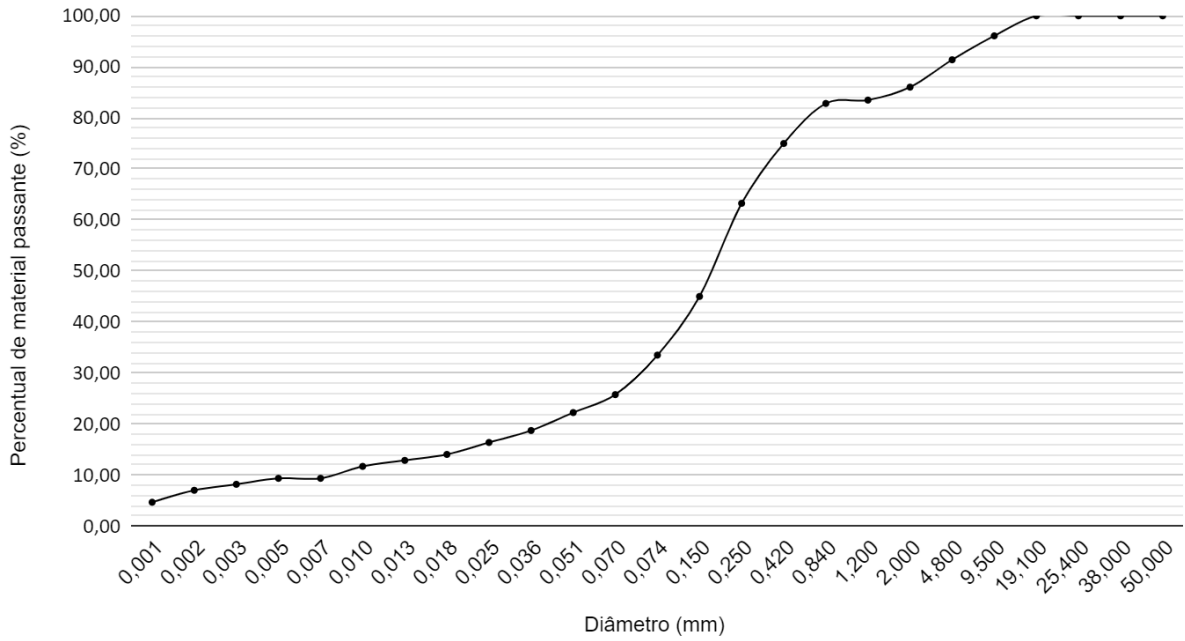
4.1.3 Granulometria

Para a amostra contendo 5%, 15% e 25% de bentonita, respectivamente foram obtidas as curvas granulométricas nos gráficos 1, 2 e 3.



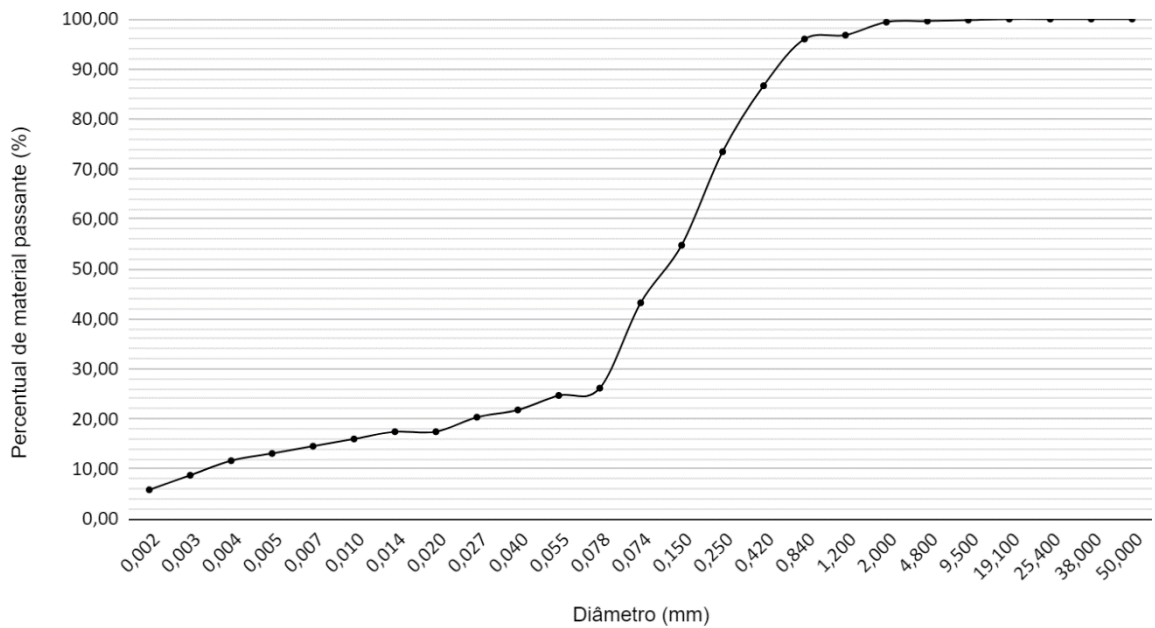
Fonte: Autora (2022)

Gráfico 2 – Curva granulométrica da mistura contendo 15% de bentonita



Fonte: Autora (2022)

Gráfico 3 – Curva granulométrica da mistura contendo 25% de bentonita



Fonte: Autora (2022)

Analisando cada uma das curvas granulométricas é possível observar que à medida que o percentual de bentonita cresce nas amostras, a porcentagem de finos cresce também, sendo que a granulometria da mistura com 25% é a que apresenta variação mais expressiva em comparação às outras misturas. Na Tabela 2, é possível observar o resumo do ensaio de granulometria de ambas as amostras.

Tabela 2 – Ensaio de granulometria por amostra

	Mistura 01 - 5%	Mistura 02 - 15%	Mistura 03 - 25%
Pedregulho (%)	10,64	8,62	0,41
Areia grossa (%)	10,20	8,56	3,60
Areia média (%)	21,16	19,57	22,5
Areia fina (%)	41,06	41	48,76
Silte (%)	6,67	12,88	11,68
Argila (%)	10,27	9,37	13,06

Fonte: elaborada pela autora.

Analisando os resultados obtidos tanto nos ensaios de limite de liquidez e plasticidade, quanto na granulometria, considerando o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), as misturas foram classificadas. As misturas que continham 5% e 15% de bentonita, foram classificadas como uma areia siltosa (SM). Já a amostra com 25%, de bentonita mesmo com o IP maior em comparação às misturas analisadas anteriormente, também apresentaram classificação semelhante Areia Argilosa (SC).

Na Tabela 3, segue a classificação de cada uma das amostras, os principais dados de cada uma das amostras utilizadas na classificação.

Tabela 3 – Resumo da classificação das amostras

Mistura	% de bentonita (%)	% Passante na peneira de N° 200	Limite de Liquidez (%)	Índice de Plasticidade (%)	Classificação da SUC
01	5	10,27	-	NP	Areia Siltosa - SM
02	15	9,37	19,3	5	Areia Siltosa - SM
03	25	13,06	20,2	11	Areia Argilosa - SC

Fonte: elaborado pela autora.

Comparando os resultados obtidos para a granulometria com o estudo de Costa (2021), que fez esta mesma análise para amostras com 10% e 20% de bentonita, essa

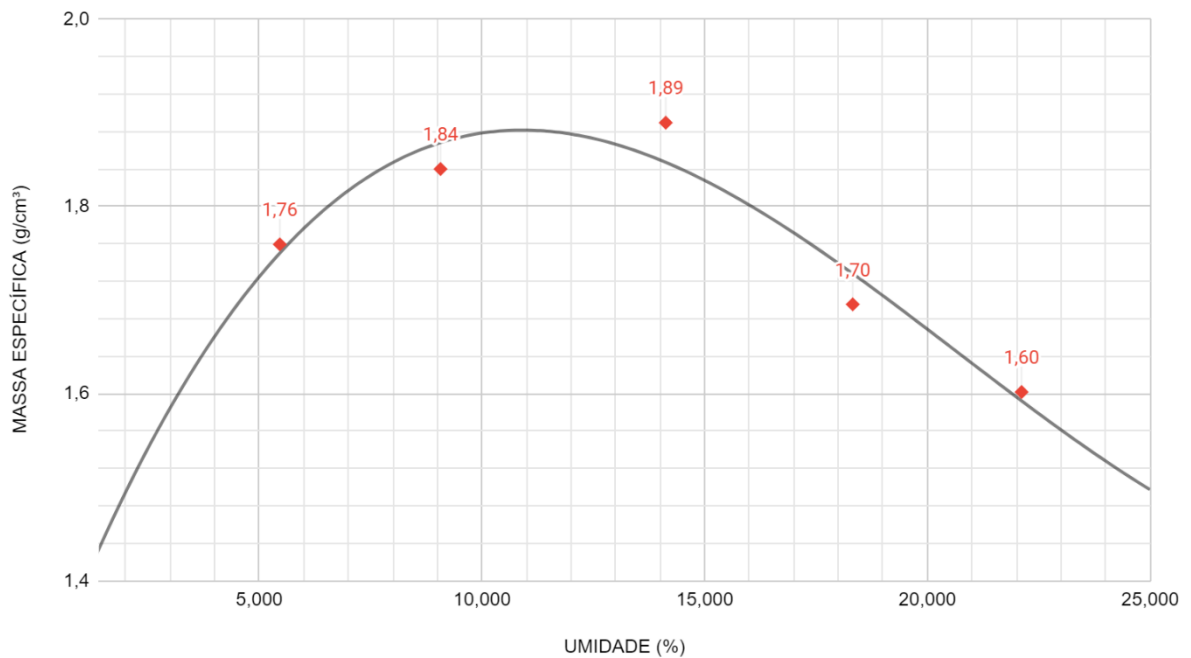
classificação está coerente, pois à medida que se aumenta a porcentagem de bentonita na mistura, cresce o percentual de finos da amostra. O que de acordo com o mesmo autor evidencia um aumento na superfície específica das partículas do solo, fator que eleva a superfície de contato do solo com cátions das soluções contaminantes.

Analisando estes resultados baseando-se também nos estudos de Rowe et. al. (1995), que afirma que as camadas de base de aterros sanitários devem possuir entre 15 a 20% de partículas finas, é possível afirmar que nenhuma das misturas, poderia ser utilizada como camada de base do aterro sanitário, levando em consideração o aspecto da granulometria.

4.1.4 Compactação

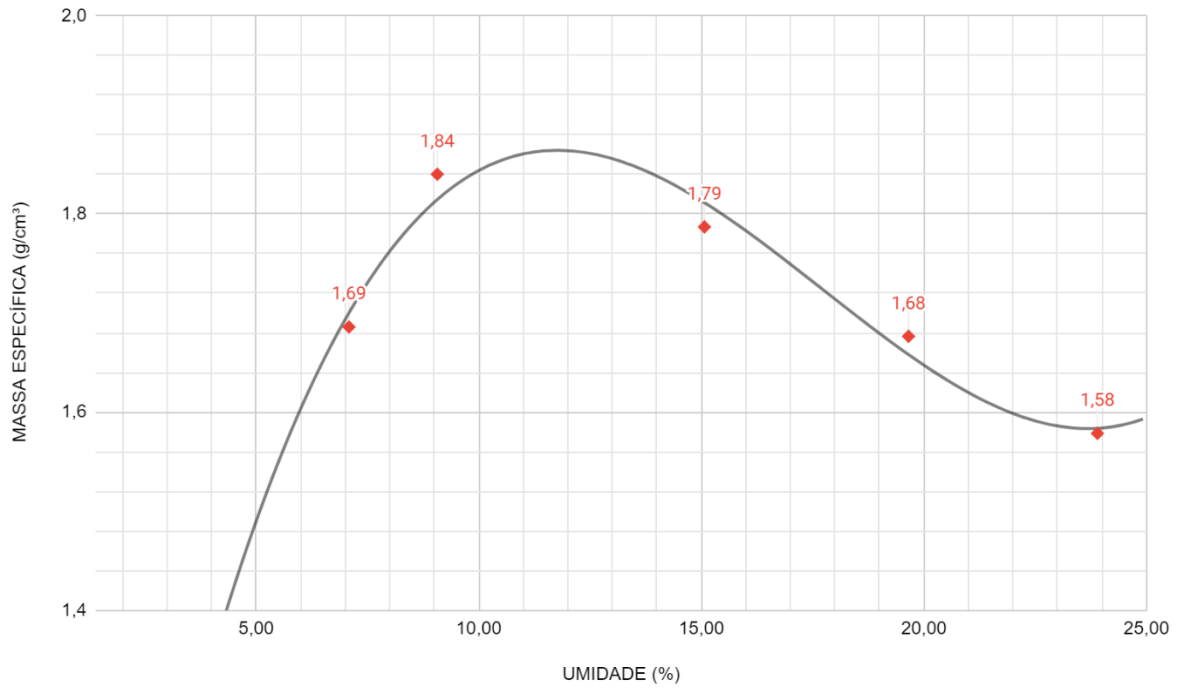
O ensaio de compactação foi base para o ensaio de permeabilidade. A seguir estão dispostas as curvas de compactação para as misturas com 5%, 15%, e 25% de bentonita, figura 20, 21 e 22, respectivamente.

Figura 20 – Curva de compactação da mistura contendo 5% de bentonita



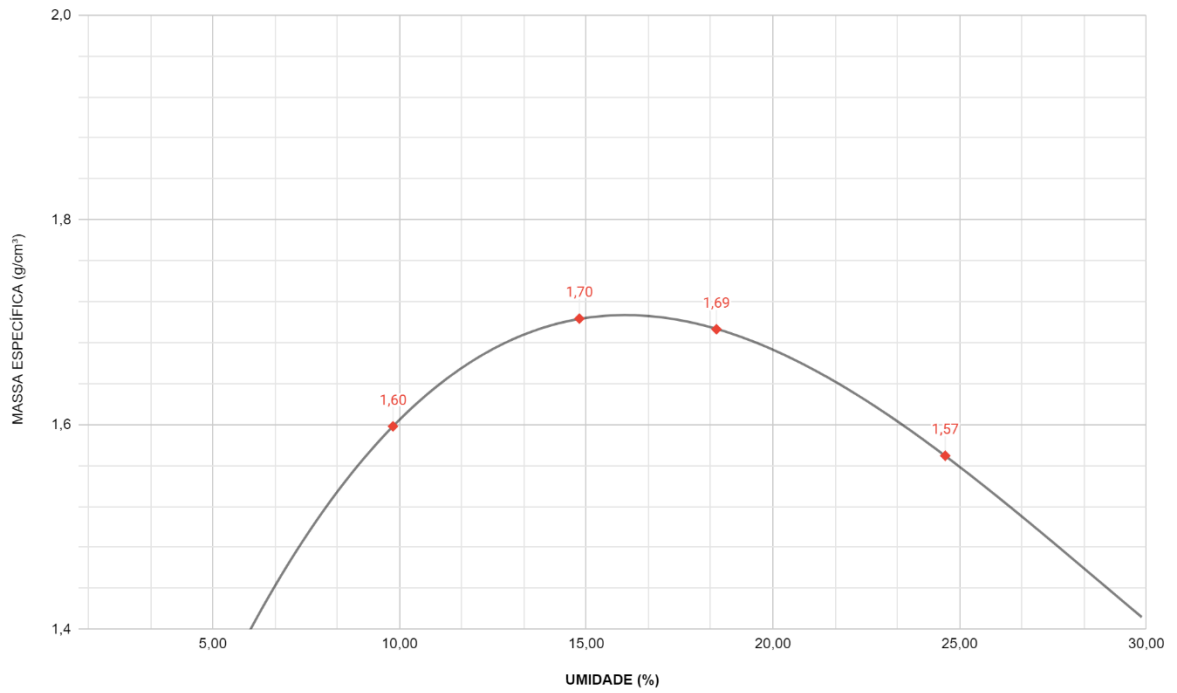
Fonte: Autora (2022)

Figura 21 – Curva de compactação da mistura contendo 15% de bentonita



Fonte: Autora (2022)

Figura 22 – Curva de compactação da mistura contendo 25% de bentonita



Fonte: Autora (2022)

Em termos de valores, a Tabela 04, expressa numericamente os resultados obtidos no ensaio de compactação.

Tabela 04 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de compactação

Mistura	% de bentonita	Massa específica aparente máxima (g/cm ³)	Umidade Ótima (%)
01	5	1,88	11
02	15	1,83	11,8
03	25	1,71	20,2

Fonte: Autora (2022)

Fazendo também uma comparação desses resultados com o estudo de Costa (2021), em ambos os trabalhos, o aumento da porcentagem de bentonita na mistura, promoveu redução nos valores de massa específica seca e um aumento da umidade ótima da mistura, o que está relacionado também com a granulometria das misturas, tendo em vista que quanto mais finos, maior a absorção de água.

Vale salientar que à medida que se adiciona bentonita os valores da umidade ótima da amostra aumentam, o que também pode ser justificado pelo estudo de Lukiantchuki (2007), que relata que a bentonita possui alta capacidade de atrair umidade, o que afeta nas suas características expansivas e como ressaltado por vários estudos, esse é um dos fatores que confere às misturas uma menor permeabilidade a água.

Vale ressaltar ainda que as condições de compactação impuseram ao material uma situação de confinamento similar à que o material é submetido no processo de execução da camada de base. A aplicação da energia de compactação Procto Normal, como foi o caso desse ensaio, é apontada por Silva (2017), como o tipo de energia ideal para ser aplicada na execução de camada de base de aterro sanitário.

Pode-se relatar ainda que segundo Costa (2019), a compactação é o principal processo ao qual a camada de base de um aterro é submetida, pois a partir da energia aplicada sobre ela, as partículas iniciam seu processo de expansão, exercem força umas contra as outras, o que leva ao preenchimento dos vazios e conseqüentemente a formação da barreira impermeabilizante.

Em relação ao seguimento deste estudo, vale salientar que os resultados do ensaio de compactação são a base para o início dos estudos da permeabilidade, pois através do cálculo

da umidade ótima é possível definir a quantidade de água suficiente, a ser adicionada no processo de compactação e assim iniciar a saturação desse corpo de prova.

4.2 Permeabilidade a água

Segue abaixo os resultados obtidos para as amostras de 5% de bentonita, expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Verificações durante o ensaio de permeabilidade para a mistura de 5%.

Leitura	T (°C)	Fc	h ₀	h _f	t (seg)	K (m/s)	h (cm)	Δh (cm)
01	33	0,81	153	58	86.400	4,43x10 ⁻⁷	95	95
02	29	0,81	153	58	86.400	4,38x10 ⁻⁷	95	95
03	27	0,81	153	58	86.400	4,53x10 ⁻⁷	95	95

Fonte: elaborado pela autora.

A partir dos resultados da Tabela acima, verificou-se que a mistura com 5% bentonita, apresenta coeficiente de permeabilidade de 4,45x10⁻⁷ m/s.

Já para a amostra de 15%, foram verificadas as seguintes permeabilidades, Tabela 6.

Tabela 6 – Verificações durante o ensaio de permeabilidade para a mistura de 15%.

Leitura	T (°C)	Fc	h ₀	h _f	t (seg)	K (m/s)	h (cm)	Δh (cm)
01	30	0,81	148	58	86.400	8,35x10 ⁻⁷	23	23
02	26	0,81	148	58	86.400	8,27x10 ⁻⁷	23	23
03	28	0,81	148	58	86.400	8,33x10 ⁻⁷	23	23

Fonte: elaborado pela autora.

A partir desses resultados, verifica-se que para a mistura com 15% bentonita, apresenta coeficiente de permeabilidade de 8,31x10⁻⁸ m/s.

Para a amostra de 25%, foram encontrados os seguintes valores de permeabilidade, Tabela 7.

Tabela 7 – Verificações durante o ensaio de permeabilidade para a mistura de 25%.

Leitura	T (°C)	Fc	h ₀	h _f	t (seg)	K (m/s)	h (cm)	Δh (cm)
01	30	0,81	148	142	86.400	$9,87 \times 10^{-7}$	3	3
02	26	0,81	148	142	86.400	$9,85 \times 10^{-7}$	3	3
03	28	0,81	148	142	86.400	$9,91 \times 10^{-7}$	3	3

Fonte: elaborado pela autora.

Já para a amostra com maior teor de bentonita, o valor encontrado para o coeficiente de permeabilidade foi de $9,87 \times 10^{-9}$ m/s, que pode ser visto na tabela acima. Na Tabela 8, é possível verificar o resumo dos resultados dos três ensaios.

Tabela 8 – Resumo dos valores obtidos no ensaio de permeabilidade

Mistura	% de bentonita	Leitura da bureta (cm)	Coefficiente de permeabilidade (m/s)
01	5	1,88	$4,45 \times 10^{-7}$
02	15	1,83	$8,34 \times 10^{-8}$
03	25	1,71	$9,87 \times 10^{-9}$

Fonte: elaborado pela autora.

Através dos resultados dispostos acima, é possível verificar que para a amostra de 5% os valores encontrados para permeabilidade estão acima dos permitidos pela NBR 13896:97, que ponto como valor mínimo para o coeficiente de permeabilidade de camadas de base de aterros sanitários o valor de 10^{-8} m/s. Já para a amostra de 15% o valor encontrado está para o coeficiente de permeabilidade está dentro deste intervalo $8,31 \times 10^{-8}$ m/s, bem como para a amostra com 25% que apresenta o valor de $9,87 \times 10^{-9}$ m/s.

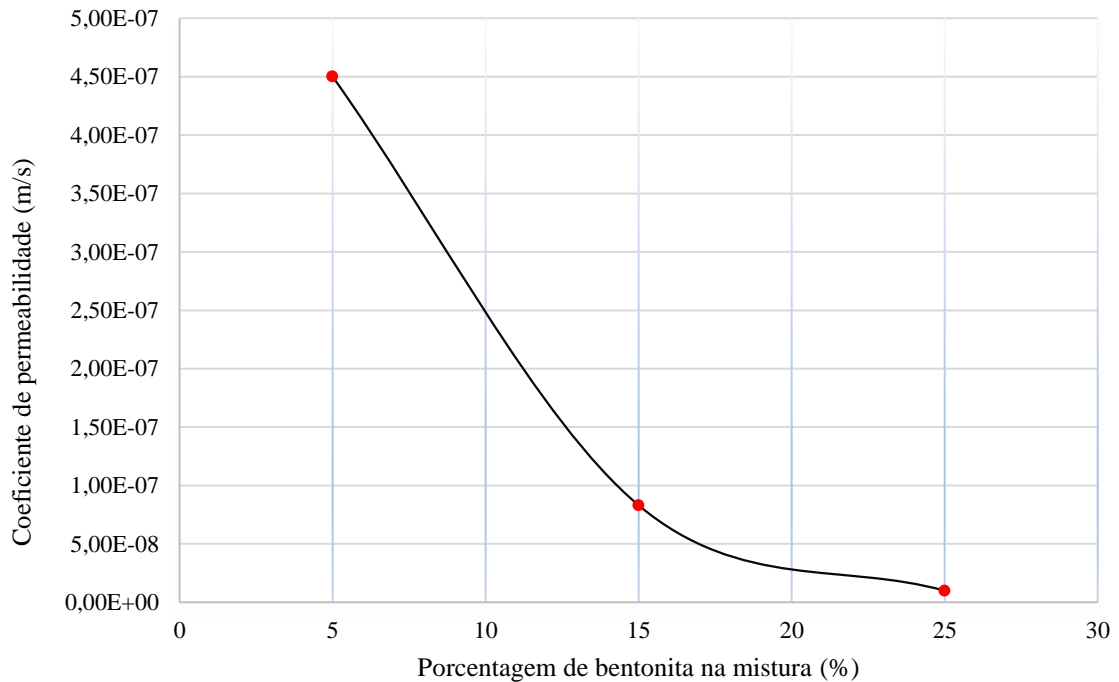
Comparando os resultados obtidos nesse ensaio com os valores apresentados no Quadro 1, baseados na NBR 13896:97, e nos estudos de Rocca (1993) e Qasim e Chiang (2017), tanto a mistura com 15%, quanto a com 25% de bentonita atende aos valores mínimos de permeabilidade a água para materiais a serem utilizados quanto camada de base. Sendo que a mistura com 15% atende apenas a Norma Brasileira ($k=1 \times 10^{-8}$), enquanto a mistura com 25% de bentonita atende a todos os estudos apresentados, com exceção da granulometria.

Considerando o estudo e Potter e Yong (1993) e as normas internacionais, uma camada de base deve apresentar valor de k de pelos menos 10^{-9} m/s. Para Costa (2021) mesmo as normas

brasileiras apontando valores para coeficiente de camada de base de aterros sanitários, de 10^{-8} , as normas internacionais apresentam maior respaldo, devido as normas brasileiras serem antigas e adotarem critérios geotécnicos com menor rigor. Sendo assim a amostra com teor de 25% de bentonita atenderia melhor a todos esses critérios.

Na figura 23, é possível realizar um comparativo entre os coeficientes de permeabilidade encontrados para cada amostra. Através dele pode-se afirmar que à medida que é adicionado maiores teores de bentonita, o coeficiente de permeabilidade apresenta crescimento, o que é um resultado esperado, considerando as características argilosas atribuídas a este solo.

Figura 23 – Variação do coeficiente de permeabilidade com a adição de bentonita



Fonte: Autora (2022)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

A partir do estudo apresentado ao decorrer deste trabalho, é possível afirmar que a bentonita é uma argila que ao ser adicionada a solos arenosos interfere diretamente nas características geotécnicas do solo, aumentando sua plasticidade, quantidade de finos, umidade ótima e, conseqüentemente, reduzindo a permeabilidade a água. De modo a dificultar o fluxo hidráulico e assim evitar problemas ambientais como a contaminação do solo e da água presente no solo, o que também é apontado pelo estudo de Costa (2021).

As misturas que contaram com a adição de 15% e 25% de bentonita apresentaram-se como plásticas. Entretanto, levando em consideração os estudos supracitados apenas a mistura com 25% de bentonita atende ao critério de plasticidade para ser utilizada como camada de base de aterro sanitário. Em relação a granulometria dos solos, nenhuma das amostras atende a esse aspecto.

Analisando a permeabilidade das misturas é possível afirmar que considerando os valores estabelecidos pela NBR 13896:97, tanto a mistura com 15% de bentonita, quanto a com possui 25% pode ser utilizada para a composição da camada de base do aterro, levando em consideração o critério de permeabilidade.

Entretanto, considerando ambos os aspectos analisados, tanto a parte de caracterização geotécnica, quanto os resultados da permeabilidade, pode-se afirmar que a mistura contendo 25% de bentonita é a mais adequada, tendo em vista que atende todas as normas nacionais e internacionais, e ainda pode ser justificada a sua utilização por outros estudos como o de Costa (2021) e Costa (2019) que apontam que a mistura ideal deve apresentar coeficiente de permeabilidade acima de 10^{-9} m/s.

Em relação a situação atual do ASCG é sabido que a composição atual da camada de base conta com um teor de 20% de bentonita + 80% de solo natural. Entretanto, para um melhor desempenho dessa camada, o presente estudo sugere uma adição de pelo menos 25% em massa de bentonita, tendo em vista que a partir desse valor obteve-se um valor de k satisfatório e que atende aos valores situados por outros estudos e normas vigentes.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

- Analisar a relação porcentagem de bentonita adicionada *versus* expansão *versus* permeabilidade.
- Ampliar esse estudo para argilas encontradas no município de Russas - CE, comumente usadas nas olarias, de modo que o estudo possa auxiliar na escolha de materiais de camada de base para o aterro sanitário da região.
- Estudar a adição de outros materiais para serem adicionados à camada de base de aterro sanitário, como por exemplo, resíduos da construção e demolição (RCD), após processo de tritramento.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Simone N. Ribeiro. **Geoprocessamento na identificação de áreas para implantação de Aterro Sanitário no Município de Pombal - PB.** 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Agroindustriais) – Programa de Pós-Graduação Sistemas Agroindustriais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017.

ALONSO, Thiago de Paula. **Condutividade hidráulica de solos compactados em ensaios com Permêmetro de parede flexível.** 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2019.

ARAÚJO, Hugo A. S. **Estudo da adsorção de Pb, Zn e Cd por material inconsolidado transportado da região do Vale do Ribeira (SP).** 2015. 81 f. (Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

ARAÚJO, Liz Geise Santos de. **Avaliação do lixiviado de aterro sanitário: geração e tecnologias de tratamento.** 2019. 111 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.

ARAÚJO, P. da S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário.** 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018 - 2019.** São Paulo: 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8419:** Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13896**: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. 1. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Determinação do índice de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solo - Ensaio de Compactação. Versão corrigida em 2020. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459** – Solo – Determinação do limite de liquidez. Versão corrigida em 2017. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BARBOSA, Elisangela M. C. **Materiais mistos nanoestruturados baseados em argilas bentonita e cobalto coloidal**. 2009. 70 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2009.

BRAGA, Adriana Fonseca. **A reciclagem de resíduos sólidos urbanos: um olhar a partir de três estudos de casos**. 2018. 259 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Casa Civil, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 08 set. 2020.

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

CATAPRETA, Cícero A. Antunes. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação.** 2007. 337 f. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2005.

COSTA, Danilo Brito da. **Transporte de metais pesados em liner de solo compactado de aterro sanitário** 2021. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2021.

COSTA, Magdalena Duarte. **Estudos de camadas de cobertura de aterros sanitários em colunas de solos.** 2015. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2015.

COSTA, Wlysses Wagner M. L. **Estudo da Permeabilidade em Solos utilizados em camada de Base de Aterro Sanitário no Semiárido Paraibano.** 2019. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2019.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** 6ª. edição. São Paulo: Thomson, 2007. 562 p.

GOMES, Naiara Angelo. **Análise da toxicidade do lixiviado gerado em uma célula do Aterro Sanitário em Campina Grande - PB.** 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL. **Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: 2001.

JESUS, Lucas S. de. **Estudo da permeabilidade dos solos de fundação do aterro de resíduos sólidos urbanos de Bauru/ SP**. 2012. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Programa Interunidades, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

LEME, Mariane. A. G.; MIGUEL, Miriam. G. Estudo geotécnico de uma mistura de solos utilizada em liner de aterros sanitários. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 14., 2014, Goiânia. **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**. Goiânia: Comitê Brasileiro de Mecânica das Rochas, 2014. p 1 - 10.

LIBARDI, Paulo L. **Dinâmica da água no solo**. 1ª. edição. São Paulo: Edusp, 2005. 323 p

LUKIANCHUKI, Juliana Azoia. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. 2007. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LUZ, Adão B. OLIVEIRA Cristiano H. Argila - Bentonita. **Rochas e Minerais Industriais - Centro de Tecnologia Mineral**, Rio de Janeiro, v. 2 n.1, p 241-253, 2008. Disponível: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1100/1/11.BENTONITA%20Rev%20Adao%20Fernando%20Lins.pdf>.

MAGALHÃES, Paulo R. F. **Caracterização de argilas para a utilização em camadas de impermeabilização em sistemas de cobertura de aterros sanitários no semiárido**. 2019. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

MAHLER, C. F.; HUSE, K. Estudos da adição de bentonita ao solo de cobertura de aterros sanitários. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADO, 8. 2015, Fortaleza. **Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**. CT/UFC, 2015. p. 339-344.

MARANGON, M. **Hidráulica dos Solos**. 2ª. edição. Minas Gerais: Núcleo de Geotecnia, 2018. 29 p.

MENDES Vinícius Thomazelli. **Estudo da Permeabilidade e Características Físicas do Solo na Fazenda Argentina no Município de Campinas, SP**. 2017. 57 f. (Bacharel em Geologia) - Instituto de Geociência, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, Campinas, 2017.

NETO José Capelo; MOTA Suetonio. Caracterização e Avaliação da Tratabilidade Biológica do Percolado Gerado no Aterro Sanitário Oeste em Caucaia (Ceará). *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 20., 1999, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária, 1999. p. 3697 - 3703.

POTTER, H. A. B.; YONG, R. N. Waste disposal by landfill in Britain: problems, solutions and the way forward. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOTECHNICS RELATED TO THE ENVIRONMENT*, Bolton, Reino Unido. **Anais [...]**, 1993, p. 41-48.

QASIM, Syed R.; CHIANG, Walter. **Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment**. Routledge, 2017.

ROCCA, A.C.C. et al. **Resíduos sólidos industriais**. 2.ed. São Paulo. CETESB, 234p. 1993.

ROWE, K. R. **Clayey barrier systems for waste disposal facilities**. E & FN Spon, 1995. 404p.

SANTOS, Jeovana J. das Neves. **Avaliação geotécnica de misturas de solo e composto orgânico para uso como biocoberturas em aterros sanitários**. 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2019

SILVA A. R. V.; FERREIRA H. C. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v.3 n.2, p. 26-35, 2008.

Disponível em: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/77/91>. Acesso em: 11 set. 2021.

SILVA, Daniela L. Machado da. **Adsorção De Metais Tóxicos Em Liners De Solo Compactado Em Aterros Sanitários**. 2018. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2018.

SILVA, Thiago F. da. **Estudo de mistura de solos para a impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários**. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2017

SOARES, Valéria. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários**. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Estruturas Geotécnicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

YONG, R. N. **Geoenvironmental engineering: Contaminated soils, pollutant fate and mitigation**. Boca Raton. 227p. 2001.