



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA CIVIL**

AUCIANE DYRLLEN DA SILVA

**EXPANSIVIDADE DE MISTURAS DE SOLOS EM CAMADA DE BASE DE
ATERRO SANITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO NO SEMIÁRIDO PARAIBANO**

RUSSAS

2022

AUCIANE DYRLLEN DA SILVA

EXPANSIVIDADE DE MISTURAS DE SOLOS EM CAMADA DE BASE DE ATERRO
SANITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO NO SEMIÁRIDO PARAIBANO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará - Campus
Russas, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ms. Daniela Lima Machado
da Silva.

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S578e Silva, Auciane Dyrllen da.
Expansividade de misturas de solos em camada de base de aterro sanitário : um estudo de caso no semiárido paraibano / Auciane Dyrllen da Silva. – 2022.
81 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2022.
Orientação: Profa. Ma. Daniela Lima Machado da Silva..
1. Bentonita. 2. Índice de expansão. 3. Liners. I. Título.

CDD 620

AUCIANE DYRLLEN DA SILVA

EXPANSIVIDADE DE MISTURAS DE SOLOS EM CAMADA DE BASE DE ATERRO
SANITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO NO SEMIÁRIDO PARAIBANO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Ceará - Campus
Russas, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Daniela Lima Machado da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Andriele Nascimento de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Me. Wlysses Wagner Medeiros Lins Costa
Universidade Federal de Campina Grande (Doutorando)

A Deus.

Aos meus pais, Artur Filho e Angerlândia e
minha irmã Audivânia Darllen.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço a Deus, por todos os momentos onde me encontrei desesperada e me sentindo despreparada, por me fortalecer e me deixar de pé, e por todas as glórias com a qual me agraciou.

Agradeço imensamente as pessoas mais importantes da minha vida e as responsáveis por eu nunca desistir, meus pais Artur e Angelândia e minha irmã Audivânia. Obrigado por serem minha inspiração, meu porto seguro, meus principais apoiadores e por sempre acreditarem em mim. Nossa realidade não é fácil, mas vocês nunca mediram esforços para que eu realizasse meu sonho, tenho certeza absoluta quando digo que sem vocês nada seria possível. Minhas palavras nunca serão suficientes para demonstrar minha gratidão e amor por vocês.

Agradeço a todos da minha família que contribuíram de alguma forma em minha jornada. De forma especial a minha vó Raimunda por toda a sua alegria e carinho e a minha avó Ana (in memória) que com seu amor me ensinou a nunca desistir e a sempre batalhar por meus objetivos.

Ao meu namorado Rafael Diógenes por toda a compreensão, apoio, carinho, paciência e atenção durante este trabalho. Agradeço pelas inúmeras vezes em que me incentivou, e buscou uma forma de me fazer rir e me acalmar nos momentos de dificuldade. Obrigado também pelas vezes em que se dispôs a ler e compreender o assunto do trabalho comigo. Seu aporte foi primordial neste momento.

A minha orientadora Daniela Lima Machado por toda a sua dedicação, empenho e amizade durante sua orientação. Obrigada por estar comigo durante estes últimos dois anos me orientando, apoiando e contribuindo de forma primordial ao meu crescimento profissional e pessoal. No mais, obrigada por toda a confiança a mim depositada e por acreditar na minha capacidade durante este trabalho, por sua paciência em todos os meus momentos de desespero e por sua amizade, serei eternamente agradecida.

A prof. Me. Andriele Nascimento de Souza e ao Me. Wlysses Wagner Medeiros Lins Costa por aceitarem participar da minha banca e disporem do seu tempo, deixo aqui meu agradecimento por suas valiosas colaborações e sugestões.

Aos técnicos de laboratório Myckelle Michely, Roberto e Anselmo que me auxiliaram durante os ensaios, bem como por toda a paciência e solicitude que por estes me foi dada. Ao GGA (Grupo de Geotecnia Ambiental) da UFCG pela parceria e colaboração durante este estudo.

Aos amigos da graduação Clécia Naiara, Diego Costa, Evilaine Paiva, Gertrudes Regis e Leonardo de Moraes por todos os momentos de risada, diversão, choro e estudos compartilhados. O nosso “magote” com toda certeza foi meu porto seguro dentro da universidade, cada um de vocês contribuiu de forma especial na minha jornada, não tenho como agradecer-los por tudo que representam para mim.

As meninas do grupo “Unidas venceremos” (Thayná e Cássia) além de toda a amizade durante a graduação, agradeço pelo apoio e companheirismo durante este trabalho. Obrigada por dividirmos as felicidades, frustrações e resultados desta pesquisa, bem como por todas as risadas e momentos de descontração. Agradeço ainda a todos os amigos e colegas que compartilharam esta fase da minha vida, em especial a Natasha Falcão e Matheus Henrique e meus amigos veteranos Caio Diógenes, Adilayne Mendes e Matheus Jesus.

As meninas do grupo “Quarteto” (Beatriz, Iara e Rayssa) por toda amizade, carinho e companheirismo. Grata por todos os conselhos, pelo apoio, por compartilharem e estarem presentes em todos os momentos (até mesmo nos laboratórios de ensaio). Obrigada por sempre se fazerem presentes, a amizade de vocês é um grande presente.

A Universidade Federal do Ceará docentes, diretores, coordenadores, colaboradores e aos meus professores pelo ambiente de aprendizagem e de formação durante toda a minha graduação. De maneira especial agradeço aos Programas de Assistência Estudantil da Universidade, que me permitiram o aporte financeiro durante a graduação, sendo estes auxílios essenciais para que eu tenha alcançado a minha formação profissional.

RESUMO

A camada de base, comumente denominada de *liner*, tem grande relevância para a proteção ambiental nos aterros sanitários, sendo responsável por inibir a migração de poluentes ao subsolo e ao meio ambiente. Misturas de solos são amplamente utilizadas na confecção destes elementos quando o solo da região não fornece características suficientes que assegurem o correto funcionamento das *liners*. Neste contexto, a bentonita é uma opção viável por possibilitar o melhoramento de algumas características geotécnicas. No entanto, é indicado analisar a expansividade destas misturas devido a característica expansiva desse solo. Diante disso, este trabalho propõe uma avaliação do potencial expansivo de três misturas de solos nas proporções de 5%, 15% e 25% de bentonita, para utilização em *liners*, tendo como campo experimental o Aterro Sanitário de Campina Grande - PB, situado no semiárido brasileiro, congregando aspectos geotécnicos, químicos e mineralógicos. Para tal, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica e física, pH, CTC, matéria orgânica, DRX, EDX, bem como o ensaio edométrico para a avaliação do índice de expansão. Pela análise dos resultados inferiu-se que o índice de expansão das misturas foi baixo, tendo contribuído o fato da bentonita em seu estado natural ser do tipo cálcica. No mais, têm-se que a proporção de 25% é a mais indicada para utilização em *liners* de aterros sanitários com características semelhantes, pois além das análises de expansão aceitáveis, apresenta-se como o teor mais próximo dos recomendados em outros trabalhos na mesma área de estudo, para atender o parâmetro da permeabilidade do solo.

Palavras-chave: bentonita; índice de expansão; *liners*.

ABSTRACT

The base layer, commonly called liner, has great relevance for environmental protection in landfills, being responsible for inhibiting the migration of pollutants to the subsoil and the environment. Soil mixtures are widely used in the manufacture of these elements when the soil of the region does not provide enough characteristics to ensure the correct functioning of the liners. In this context, bentonite is a viable option because it allows the improvement of some geotechnical characteristics. However, it is indicated to analyze the expansivity of these mixtures due to the expansive characteristic of this soil. Therefore, this work proposes an evaluation of the expansive potential of three soil mixtures in the proportions of 5%, 15% and 25% of bentonite, for use in liners, having as an experimental field the Landfill of Campina Grande - PB, located in the Brazilian semiarid region, bringing together geotechnical, chemical and mineralogical aspects. To this end, tests of geotechnical and physical characterization, pH, CTC, organic matter, DRX, EDX were carried out, as well as the edometric test to evaluate the expansion index. From the analysis of the results, it was inferred that the expansion index of the mixtures was low, which contributed to the fact that the bentonite in its natural state is of the calcium type. Furthermore, the proportion of 25% is the most suitable for use in sanitary landfill liners with similar characteristics, because in addition to the acceptable expansion analysis, it is presented as the closest content to those recommended in other works in the same study area, to meet the parameter of soil permeability.

Keywords: bentonite; expansion index; liners.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Esquematização de um Aterro Sanitário de RSU	22
Figura 2	- Variação nos valores de CBR com o aumento da porcentagem de bentonita na areia	29
Figura 3	- Diagrama esquematizado da estrutura de uma montmorilonita sódica	31
Figura 4	- Representação esquemática da hidratação da montmorilonita cálcica e sódica	32
Figura 5	- Tabela estimativa da produção mundial de bentonita em 2016	33
Figura 6	- Estrutura de argilominerais	36
Figura 7	- Esquematização das principais argilas expansivas	37
Figura 8	- Análise dos ensaios expansão em função da adição de bentonita	38
Figura 9	- Critério de expansão de Seed et al. (1962)	43
Figura 10	- Metodologia de pesquisa	46
Figura 11	- Aterro Sanitário de Campina Grande - PB	47
Figura 12	- Municípios que depositam RSU no ASCG	48
Figura 13	- Camada de base compactada da Célula 5	49
Figura 14	- Local de coleta do material	49
Figura 15	- Preparação das amostras para ensaios geotécnicos.....	51
Figura 16	- Procedimento do ensaio edométrico para as M5, M15 e M25	53
Figura 17	- Procedimento de preparação da amostra para o ensaio edométrico	54
Figura 18	- Procedimento de moldagem do CP para o ensaio edométrico	54
Figura 19	- Procedimento de preparação da amostra para o ensaio edométrico	55
Figura 20	- Preparação da célula de adensamento	56
Figura 21	- Realização do ensaio (Inundação e medição)	56
Figura 22	- Curvas granulométricas	60
Figura 23	- Curvas de compactação	62
Figura 24	- Análises de DRX	66

Figura 25 – Representação gráfica da expansão livre da bentonita e das misturas (7 kPa) 70

Figura 26 – Comportamento de variação de deformação com o tempo sob tensão com avanço da frente de umedecimento: (a) há pequena alteração na umidade do solo; (b) há mudança de umidade na periferia do solo; (c) apenas o núcleo central mantém a umidade inicial; (d) há mudança de umidade em todo o solo.71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Caracterização geotécnica	57
Tabela 2	- Critérios de classificação da expansividade pelos limites de consistência	59
Tabela 3	- Análise da expansividade pelos critérios de Skempton (1953) e Seed et al. (1962)	64
Tabela 4	- Caracterização físico-química e mineralógica	65
Tabela 5	- Resultados do índice de expansão com carga de 7 kPa para bentonita e as misturas	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo das características Geotécnicas de solo para uso em aterros sanitários	25
Quadro 2 – Resumo dos resultados do estudo de Thakur e Yadav (2018)	28
Quadro 3 – Relação dos fatores intrínsecos e extrínsecos que influenciam o potencial de expansão	39
Quadro 4 – Métodos diretos e indiretos para identificação da expansão do solo	42
Quadro 5 – Classificações do grau de expansão relacionada ao Limite de Liquidez (LL) e ao Índice de Plasticidade (IP)	42
Quadro 6 – Critérios de classificação de solos expansivos com base na expansão livre e tensão de expansão	45
Quadro 7 – Resumo dos Ensaio de caracterização geotécnica, físico-química e mineralógica e os métodos empregados	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANM	Agência Nacional de Mineração
ASCG	Aterro Sanitário em Campina Grande
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Térmica Gravimétrica
BUN	Bentonit União Nordeste S.A.
CCL	<i>Compacted Clay Liner</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH	Argila de alta compressibilidade
CL	Argila de baixa compressibilidade
cm	Centímetro
cm/s	Centímetro por segundo
CP	Corpo de prova
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difração de Raios – X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EDX	Fluorescência de Raios-X
EUA	Estados Unidos da América
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
GCL	<i>Geosynthetic Clay Liner</i>
GGA	Grupo de Geotecnia Ambiental
h	Hora
ha	Hectare
IA	Índice de Atividade
IP	Índice de Plasticidade
I.S.R.M	<i>International Society for Rock Mechanics</i>

LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
kN/m ³	kiloNewton por metro cúbico
kg	Quilograma
kg/ano	Quilograma por ano
km	Quilômetro
kPa	KiloPascal
m	Metro
min	Minuto
mm	Milímetro
m/s	Metro por segundo
µm	Micrômetro
MO	Matéria Orgânica
nm	Nanômetro
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OH	Argila orgânica de média e alta plasticidade
PB	Paraíba
pH	Potencial hidrogeniônico
PVC	Policloreto de Vinila
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SC	Areia argilosa
SM	Areia siltosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
t	Tonelada
t/dia	Tonelada por dia
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
W	Umidade Higroscópica
W _{ótima}	Umidade ótima

LISTA DE SÍMBOLOS

Å	Angstrom
Al	Alumínio
C ₅	Célula 5
Ca	Cálcio
Ca ²⁺	Íon cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Cl	Cloro
E ₁	Expansão livre
Fe	Ferro
H ₂ O	Água
H	Altura inicial do corpo de prova
L _{t0}	Leitura do tempo inicial
L _t	Leitura do tempo final
Mg	Magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
Na	Sódio
Na ⁺	Íon sódio
Ni	Níquel
SiO ₂	Óxido de Silício
OH ⁻	Hidroxila
>	Maior que
<	Menor que
%	Porcentagem
ρ	Massa específica aparente seca máxima
ρ _s	Massa seca
ρ _d ^{máx}	Peso específico aparente seco máximo
v	Volume do anel edométrico
ΔH	Varição da altura da expansão
ΔW	Varição entre a umidade ótima e a umidade higroscópica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivos	20
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	20
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	Aterro Sanitário	21
<i>2.1.1</i>	<i>Definições e Aspectos Gerais</i>	21
<i>2.1.2</i>	<i>Monitoramento de Aterros Sanitários</i>	22
2.2	Camada de base em Aterro Sanitário	23
<i>2.2.1</i>	<i>Definições e Aspectos Gerais das camadas de base</i>	23
<i>2.2.2</i>	<i>Legislação e confecção das camadas de base</i>	24
<i>2.2.3</i>	<i>Uso de misturas de solo natural e bentonita em camadas de base</i>	26
2.3	Bentonita	29
<i>2.3.1</i>	<i>Definições e tipos de bentonita</i>	29
<i>2.3.2</i>	<i>Composição Mineralógica</i>	31
<i>2.3.3</i>	<i>Produção de bentonita</i>	33
2.4	Solos expansivos	34
<i>2.4.1</i>	<i>Definição</i>	34
<i>2.4.2</i>	<i>Principais argilominerais dos solos expansivos</i>	35
<i>2.4.3</i>	<i>Relevância do estudo da expansividade em aterros</i>	38
<i>2.4.4</i>	<i>Fatores que afetam a expansão</i>	39
<i>2.4.5</i>	<i>Métodos de identificação e classificação de materiais expansivos</i>	41
3	METODOLOGIA	46
3.1	Campo Experimental	47
3.2	Materiais	49
<i>3.2.1</i>	<i>Solo natural (Snt)</i>	49
<i>3.2.2</i>	<i>Solo bentonítico (Sbt)</i>	50
<i>3.2.3</i>	<i>Misturas de Snt e Sbt</i>	50
<i>3.2.4</i>	<i>Preparação das amostras</i>	51
3.3	Caracterização Geotécnica, Mineralógica e Físico- Química	51
3.4	Ensaio Edométrico Simples	52
<i>3.4.1</i>	<i>Preparação do corpo de prova</i>	53

3.4.2	<i>Procedimento do ensaio</i>	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	Caracterização geotécnica	57
4.1.1	<i>Umidade higroscópica e peso específico aparente seco máximo</i>	58
4.1.2	<i>Limites de consistência</i>	58
4.1.3	<i>Análise granulométrica</i>	60
4.1.4	<i>Ensaio de compactação</i>	61
4.1.5	<i>Índice de atividade</i>	63
4.2	Caracterização físico-química e mineralógica	64
4.3	Ensaio edométrico - Índice de Expansão	68
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
5.1	Conclusão	72
5.1	Sugestões para futuros trabalhos	73
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Os aterros sanitários são construídos sobre camadas de base, que possuem a função de inibir a migração de poluentes ao subsolo e ao meio ambiente, provocada pela percolação de líquidos e emissão de gases. Essas camadas geralmente são compostas por solos argilosos compactados, no entanto o uso de misturas de solos é uma técnica comumente empregada nesses elementos, principalmente quando o solo da região de implantação do aterro não fornece propriedades adequadas.

Solos com argilominerais são bastante utilizados para compor misturas de solos, isso se deve ao fato destes apresentarem características que se adequam às exigências e necessidades para a utilização nos aterros sanitários. Como exemplo deste material, pode-se citar a bentonita que, além de apresentar o argilomineral montmorilonita e possuir características que favorecem seu emprego, tem grande predominância de produção na região foco deste estudo.

Em seu estudo sobre mistura de solos para a impermeabilização eficiente de camadas de base em Aterros Sanitários, Silva (2017), apontou que para um solo com em média 90% de materiais granulares em sua composição, ou seja, um solo muito arenoso, recomenda-se utilizar como mistura 30% em massa de p'orcentagem de um solo com alto potencial de argilominerais, como é o caso da bentonita.

O uso da bentonita, no entanto deve ser empregado com cautela, pois embora esta apresente propriedades que auxiliam nos critérios de impermeabilização, este material se caracteriza por manifestar potencial de expansão.

Bosco (2009), ao estudar as propriedades geotécnicas de misturas com bentonita concluiu que o processo de expansão do solo avaliado, com adição de 5% deste material sujeito a tensão nos valores médios de 20 kPa e 34 kPa se relacionava respectivamente, ao solo e à mistura.

Tendo a autora observado aumento significativo do potencial de expansão com a adição de apenas 5% de bentonita. Isso demonstra que mesmo teores baixos deste material favoreceram a expansão dos solos. Tal comportamento em regiões que facilitem este processo pode ocasionar prejuízos a estruturas como de aterros sanitários, bem como outras obras de engenharia civil.

A expansividade de solos tem provocado inúmeros imprevistos em obras de engenharia. O processo de modificação volumétrica que estes apresentam causam deformações diferenciais em fundações, desmoronamento em túneis, desagregação em lastros de ferrovias,

enrocamento de barragens e tantos outros danos causados pela alteração de outras propriedades do solo por consequência da expansão (COSTA, 2005).

Analisar o comportamento expansivo dos solos utilizados nessas camadas, viabiliza a melhoria dos parâmetros de segurança impostos na construção dos aterros sanitários, assim como no desempenho destas estruturas.

Além disso, conhecer a capacidade de expansão do solo torna possível antecipar-se aos problemas que o mesmo ocasiona, seja no processo de execução, utilização ou desempenho, possibilitando evitar problemas de contaminação do solo e do meio ambiente. Um exemplo que se pode citar é a fissuração das camadas que tende a facilitar a percolação do lixiviado ocasionando contaminação do solo e meio ambiente.

Diante do exposto, sabendo que a região foco deste estudo possui um grande potencial na produção de bentonita no país, espera-se determinar o índice de expansão de misturas de solos utilizadas nas camadas de base de aterros sanitários, contendo bentonita, de modo a avaliar o potencial de expansão que esse material pode agregar ao solo.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo analisar a expansão de misturas de solos em camada de base em um aterro sanitário no semiárido paraibano.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a mudança nas características geotécnicas, químicas, físicas e mineralógicas das misturas analisadas;
- Relacionar o índice de expansão com as propriedades geotécnicas e químicas das misturas.
- Analisar a relação do comportamento expansivo de solos com teor de bentonita presente nas camadas de base de aterros sanitários;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aterro Sanitário

2.1.1 Definições e Aspectos Gerais

A produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), vem aumentando consideravelmente ao longo dos anos em todo o planeta. Este fator além de agravar questões ambientais, repercute sobre a qualidade de vida e saúde da humanidade. Tal condição, evidencia a necessidade de soluções e tecnologias que minimizem os impactos provocados pela geração destes resíduos.

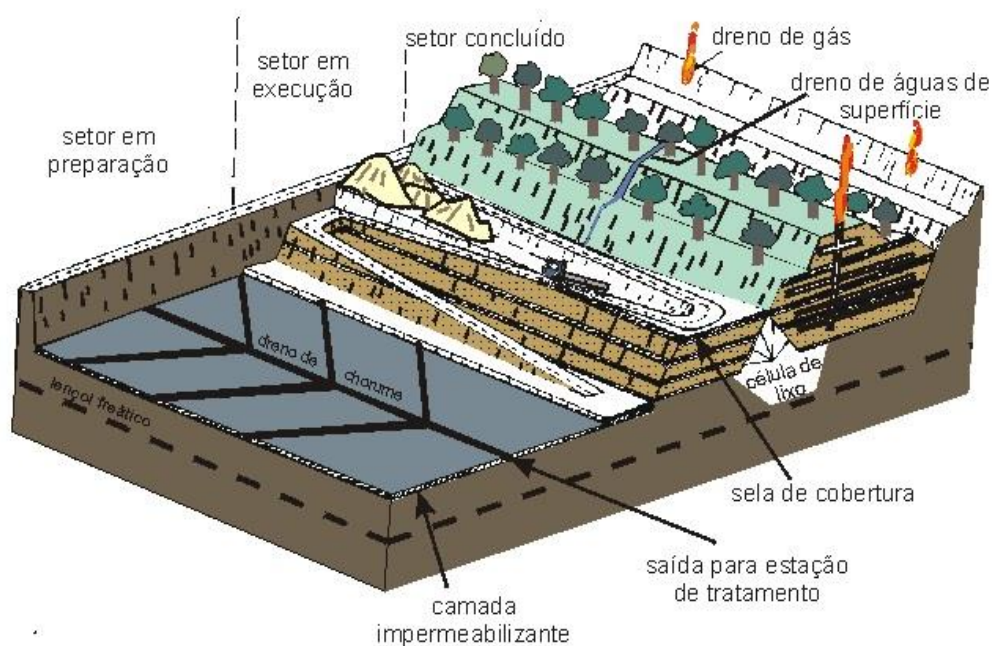
No Brasil, de acordo com dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE (2020), a produção de RSU, que em 2010 era de 66,7 milhões de toneladas, atingiu um valor de 79,1 milhões em 2019. Neste mesmo intervalo, a geração per capita apresentou um salto de 348 kg/ano para 379 kg/ano. Sendo os aterros sanitários um dos principais locais de disposição final dos RSU no país.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) através da NBR 8419 (ABNT, 1992), se define como aterro sanitário, uma técnica de disposição dos resíduos sólidos urbanos no solo que se utiliza de princípios de engenharia para o confinamento dos resíduos sólidos na menor área e menor volume permitido. Sendo os RSU cobertos por uma camada de solo na conclusão de cada jornada de trabalho, ou quando necessário, sem provocar danos à saúde pública e ao solo, além de minimizar os impactos ambientais.

O aterro sanitário é uma obra geotécnica e de saneamento básico, instalada e operada através de elementos de controle de segurança, cuja solução mais recomendada está na escolha do local, funcionamento e controle operacional adequado. Esta técnica incorpora princípios da engenharia com o objetivo de confinar os RSU na menor área possível, com a colocação de camadas de solo e compactação dos mesmos para redução de seu volume, sendo os líquidos e gases gerados subprodutos da decomposição destes resíduos, que são coletados com o intuito de minimizar os impactos ambientais (SILVA, 2016).

A Figura 1, ilustra uma representação esquematizada de alguns elementos típicos encontrados em um aterro sanitário, os quais destinam-se a minimizar os impactos ambientais e ao meio ambiente de implantação do aterro.

Figura 1 – Esquematização de um Aterro Sanitário de RSU



Fonte: SAMAE (2015).

Durante a operação de um aterro sanitário ocorre a geração de subprodutos aquosos e gases, a partir da decomposição dos resíduos e de mineralizados. Este líquido é conhecido na literatura técnica e científica brasileira como: chorume, percolado ou lixiviado, sendo o último termo a nomenclatura mais usual, para retratar o efluente líquido gerado no aterro sanitário estudado (Gomes, 2017).

Para Zanon (2014), entende-se por lixiviado, o líquido gerado nos aterros sanitários devido a infiltração das águas pluviais na massa dos resíduos e o resultante da mistura dos líquidos infiltrados com aqueles gerados a partir da degradação dos resíduos. Sendo a fase solvente deste produto, aquela predominantemente procedente das águas de chuva, e os solutos ou poluentes, aqueles oriundos da degradação das massas do RSU lixiviadas pelas águas pluviais incidentes.

2.1.2 Monitoramento de Aterros Sanitários

A realização do monitoramento geotécnico nos aterros sanitários, assume uma grande importância no âmbito da disposição final de resíduos, visto que, além de consentir o controle operacional, coopera no entendimento do comportamento geotécnico dos resíduos (SIMÕES et al., 2006).

Para Catapreta e Simões (2016) tanto o monitoramento geotécnico, quanto o geoambiental de um aterro sanitário, é realizado através dos resultados das observações de campo, dos diagnósticos da instrumentação instalada e das análises físico-químicas e microbiológicas em amostras de lixiviado, de águas superficiais e subterrâneas. Além disso, deve-se monitorar as condições de qualidade do solo e do ar. Os autores, caracterizam como atividade de monitoramento geotécnico e ambiental:

- Deliberar o padrão de desempenho mecânico ambiental;
- Definir os indicadores e parâmetros de verificação do desempenho;
- Assentar e obter os dados necessários à análise e interpretação do desempenho geotécnico e ambiental, ou seja, observacionais e instrumentais;
- Analisar e interpretar os dados coletados e compará-los com os padrões de desempenho estipulados e de referência para qualidade ambiental;
- Aplicar os resultados na operação, conservação e manutenção do aterro sanitário: o objetivo é identificar, em tempo hábil, alterações de padrões de comportamento de qualidade ambiental ou inadequações de desempenho geomecânico, e permitir a apresentação de propostas de medidas corretivas, preventivas ou de remediação.

2.2 Camada de base em Aterro Sanitário

2.2.1 Definições e Aspectos Gerais das camadas de base

Locastro e Angelis (2016), definem como elementos de proteção dos aterros sanitários as estruturas que o compõem e que tem a função de permitir a disposição dos RSU em locais com áreas menores, garantindo a segurança do meio ambiente e da saúde pública. Além de cada um ser elemento responsável por sua função dentro do sistema, estes auxiliam na etapa de operação, evitando-se danos indesejáveis.

A camada de base é um dos principais elementos que constituem o aterro sanitário, tendo como função principal minimizar o transporte de poluentes a zona não saturada e/ou aquíferos subjacentes (REGADÍO et al., 2015; BOSCOV, 2008). Assim, em aterros sanitários a camada de base, também denominada de *liner*, usada para impermeabilização, tem como função impedir a migração de poluentes para o meio ambiente (SILVA, 2018).

As barreiras impermeabilizantes podem se apresentar como: depósitos naturais de solos argilosos; *liners* de argila compactada (*compacted clay liner* -CCL); camada natural de rocha, parede de *cut-off* e *liners* argilosos com geossintéticos (geocomposto argiloso para barreira impermeável – GCL) (ROWE, 1995; BOSCOV 2008).

As camadas de base são essenciais nessas obras de engenharia, no entanto não é sempre que o solo natural fornece propriedades necessárias para ser empregado nessa ou em qualquer outro tipo de construção. Tais propriedades apresentam variabilidades que dependem da origem, clima e meio ambiente em que o solo é encontrado. Esses fatores ocasionam escassez de solos adequados para emprego em obras de engenharia em diversas regiões do mundo (COSTA, 2019; LATIFI et al., 2017).

De acordo com Boscov (2008), quando não é possível abranger os parâmetros recomendados do solo para segurança ambiental do subsolo e dos aterros, se opta por implementar revestimentos de fundo alternativos, como pode-se citar as misturas de solo com bentonita, zeólitas ou microssílicas.

Diante dos diversos tipos de *liners*, segundo Leme e Miguel (2014), os compostos por solos argilosos apresentam-se como mais vantajosos em relação ao custo-benefício, no entanto, é necessário realizar um estudo prévio do solo, visto a variabilidade de características e propriedades diferentes do solo.

De acordo com Brandl (1992), as barreiras de solo argiloso compactado possuem como função:

- Capacidade baixa de expansão e contração;
- Minimizar a migração de poluentes por advecção e/ou difusão;
- Capacidade alta de adsorção e retardamento de poluentes;
- Compatibilidade química e habilidade de autocorreção;
- Flexibilidade, ou seja, não possui susceptibilidade a recalque diferencial.

2.2.2 Legislação e confecção das camadas de base

Para Soares (2012), existe uma ausência de normativas e legislações a nível nacional sobre projeto, construção e operação das camadas de base, Silva (2017) afirma que a grande diversidade das jazidas disponíveis agrega dificuldade para existência de uma única legislação que provenha critérios para esta camada.

O Quadro 1, dispõe em resumo de algumas características geotécnicas do solo, determinadas pela normativa nacional e por normas estaduais e internacionais, acerca dos parâmetros que o solo deve apresentar para uso em aterros sanitários.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), recomenda além do disposto no quadro abaixo, que na confecção de *liners* seja adotada pH do solo maior que 7.

Quadro 1 - Resumo das características Geotécnicas de solo para uso em aterros sanitários.

Norma	CETESB (1993)	Norma alemã (1993)	ABNT (1997)	USEPA (2004)	FEAM (2006)
Classificação do solo (SUCS)	CL, CH, SC ou OH	-	-	-	-
Condutividade hidráulica (m/s)	-	5×10^{-10}	5×10^{-8}	5×10^{-9}	-
% passante de finos	> 30%	-	-	30 – 50%	-
Índices de Consistência	LL \geq 30% IP \geq 15%	-	-	IP: 7 – 15%	-
Espessura (m)	-	>0,50	-	0,30 – 0,60	0,20 – 0,60

Fonte: Araújo (2017), adaptado pela autora (2022)

Rowe et al. (1995) sugerem, que os sistemas de argila compactada empreguem os seguintes parâmetros:

- Condutividade hidráulica máxima de 10^{-7} cm/s;
- Solo deve apresentar quantidade mínima de 15 a 20% de argila e índice de plasticidade (IP) >7%.
- Solo deve alternativamente possuir capacidade de troca catiônica > 10 meq/100g;
- A barreira argilosa deve apresentar compatibilidade química com o resíduo, não passando por aumentos significativos, ao entrar em contato com estes, de condutividade hidráulica;
- Recomenda-se espessura mínima da camada argilosa compactada para disposição de resíduos sólidos de 90 a 100 cm, caso associado a geomembranas esse valor deve ser 60 cm; se a disposição for de resíduos tóxicos e industriais o valor deve variar entre 3 e 4 m.

O monitoramento da camada de base de um aterro sanitário se torna muito difícil após a disposição dos resíduos na célula sanitária, visto que essas camadas funcionam como isolante entre o maciço sanitário e o solo. Portanto erros de operação, execução ou do sistema de drenagem de lixiviado, tendem a provocar impactos ambientais graves (SILVA, 2017; COSTA, 2019).

Embora as normativas não estabeleçam exigências relacionados a outras características do solo, que não a permeabilidade, o uso de materiais alternativos para as camadas de base de

solo compactado tem se tornado muito utilizado, quando o solo da região não imprime características necessárias à implantação desse empreendimento.

Ao longo do tempo, vêm se utilizando as misturas de bentonita com outros solos e materiais sintético que contém bentonita principalmente na construção de barreiras selantes em sítios de disposição de resíduos, no entanto estas também têm sido empregadas como impermeabilizante de fundações em aterros, barreiras verticais para reter plumas contaminantes e elemento estabilizante de escavações (MORANDINI, 2014).

Neste cenário, a utilização de misturas com solo bentonítico, principalmente na região do semiárido paraibano, onde esse material é abrangente, tem se tornado uma alternativa viável técnica e economicamente nas camadas de base de solo compactado.

2.2.3 Uso de misturas de solo natural e bentonita em camadas de base

Para Eklund (1985) a proteção ambiental devido às aplicações de bentonita como componente vedante em *liners* funciona de acordo com dois mecanismos: (a) Impedir que o fluxo poluente transportado entre no subsolo; ou (b) Atenuar poluentes suspensos ou dissolvidos, possibilitando que o lixiviado chegue ao lençol freático com nível contaminante aceitável.

De acordo com Morandini (2014) a primeira aplicação consegue ser atendida na construção de barreiras de baixa permeabilidade, no entanto a segunda função depende da composição química e do posicionamento da barreira.

As propriedades físico-químicas da bentonita, como capacidade de adsorção, capacidade de troca catiônica e comportamento expansivo para Koch (2002), torna possível uma vasta possibilidade de proteção do ambiente contra contaminantes.

Os sistemas de vedação com utilização de bentonita, principalmente os sistemas horizontais de selagem (*liners*), divididos em sistemas basais (*base liners systems*), sistemas de coberturas (*cover systems*) e as barreiras verticais (*cut-off walls*), possibilita mais facilmente a observação de normas legais para descarte de lixo ou encapsulamento de áreas contaminadas (MORANDINI, 2014).

Silva (2018) relata que a adição de bentonita ao solo natural é realizada com o intuito de reduzir a condutividade hidráulica, quando este não apresenta baixa permeabilidade à água. Nos aterros sanitários, o uso dessa mistura nas camadas impermeabilizantes é largamente utilizado, visto a escassez dos solos naturais em atender as exigências normativas com relação à permeabilidade à água.

Para a projeção de *liners* utilizando mistura de areia e solo bentonítico, se faz necessário a verificação da melhor proporção entre estes materiais. Como este processo demanda muito tempo, Chapuis (1990), propôs um método para se prever a condutividade hidráulica da mistura, através de parâmetros como distribuição granulométrica, curva de compactação (Proctor Normal), teor de bentonita e grau de saturação.

As análises de Chapuis (1990), se basearam através dos resultados de ensaios de 45 amostras dessas misturas, com variação de teor de bentonita de 0% a 33,3%, definido pela razão do peso seco da bentonita com o peso seco da areia, sendo as amostras arenosas uniformes com presença de 2 a 15% de finos não plásticos.

Assim, segundo o autor, realizar a previsão de bentonita necessária para o projeto preliminar de um sistema basal de selagem, contribui na seleção do solo que se utilizará na mistura, bem como as heterogeneidades de campo provocam influências na performance global da condutividade hidráulica.

Sivapullaiah et al. (1998), objetivando avaliar o uso de misturas para sistemas basais de selagem, executaram ensaios de expansão/contração, compactação, adensamento e condutividade hidráulica com teores de 10, 15, 20, 25, 30, 50, 65 e 80% de bentonita, além da bentonita pura. Os estudiosos concluíram por meio de seus critérios que o uso das proporções no intervalo de 20 a 30% eram os melhores.

Em seu estudo de mistura de solos para impermeabilização de camada de base, realizado no aterro sanitário de Campina Grande - PB, Silva (2017) ensaiou misturas com adição de bentonita ao solo natural da área de instalação do aterro, de característica arenosa. Ao fim da pesquisa, concluiu-se que a mistura indicada para os solos utilizados na camada de base seria uma porcentagem de 29,68% de bentonita., o mesmo ainda recomendou que a energia de compactação adequada para a camada fosse de $0,4 \text{ MN.m/m}^3$ com umidade da mistura de 8,28%.

O referido autor explica que a adição de bentonita em excesso além de levar a produção de uma baixa permeabilidade, pode levar a uma alta expansão da mistura. No entanto, baixas proporções deste material podem levar ao não fornecimento do coeficiente de permeabilidade ideal.

A bentonita possui uma elevada capacidade de reter água e alta capacidade de expansão, o que confere a esta resistência a passagem de água. A cicatrização, fenômeno que ocorre quando as partículas expandidas confinadas, são forçadas entre si provocando o preenchimento dos vazios entre partículas do solo formando uma barreira contra a passagem de fluxo, garante

que a mistura solo-bentonita evite continuamente a ultrapassagem de fluidos a camada tratada, além da eficiência da camada ativa (LUKJANTCHUKI, 2007; COSTA, 2019).

A adição de percentuais de argilas, como a bentonita, contribui para melhoria granulométrica, além de conceder propriedades coesivas a solos com baixo coeficiente de permeabilidade (BENSON et al., 1994). O uso da bentonita em *liners* ou barreiras verticais baseia-se de acordo com Shackelford et al. (2000), nas seguintes propriedades:

- Capacidade de inchamento (devido a adsorção de moléculas de água nos cátions e na superfície mineral);
- Capacidade elevada de troca catiônica;
- Granulometria muito pequena, em comparação com outros minerais argilosos (ilita ou caulinita).

Thakur e Yadav (2018) estudaram o comportamento de cisalhamento e características de resistência de misturas de areia-bentonita, conduzindo ensaios no solo virgem para a determinação dos limites de Atterberg, distribuição granulométrica, característica de compactação, resistência ao cisalhamento e valores de CBR (*California Bearing Ratio*), sendo este parâmetro estudado para se conhecer a sobrecarga que o *liner* pode suportar. Para os testes de compactação, CBR e cisalhamento foram utilizadas misturas com 5%, 10%, 15%, 20%, 25% em peso seco de bentonita.

Assim, estes concluíram que houve aumento nos valores densidade seca máxima e umidade ótima das misturas, bem como aumento na coesão e diminuição nos valores do ângulo de atrito das misturas. Os valores encontrados por Thakur e Yadav (2018) para CBR, umidade ótima e densidade seca máxima para as diferentes proporções de mistura de areia e bentonita, estão dispostos no Quadro 2, abaixo:

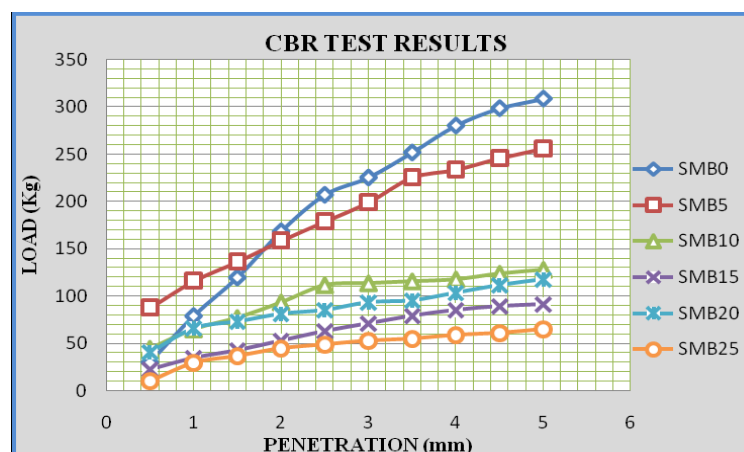
Quadro 2 - Resumo dos resultados do estudo de Thakur e Yadav (2018)

Nomenclatura da amostra	Proporção de material	Umidade ótima (%)	Densidade seca máxima (gm/cc)	CBR (%)
SMB0	Areia	5.70	1.96	15.41
SMB5	95% Areia + 5% bentonita	9.38	2.01	13.04
SMB10	90% Areia + 10% bentonita	9.06	2.04	8.14
SMB15	85% Areia + 15% bentonita	10.23	2.05	4.60
SMB20	80% Areia + 20% bentonita	17.38	1.86	6.23
SMB25	75% Areia + 25% bentonita	18.28	1.85	3.56

Fonte: Thakur e Yadav (2018), adaptado pela autora (2022)

A Figura 2, abaixo, ilustra os resultados dos testes realizados pelos autores após a imersão das amostras em água por um período de 4 dias, sendo os valores apresentados como a expansão percentual.

Figura 2 - Variação nos valores de CBR com o aumento da porcentagem de bentonita na areia



Fonte: Thakur e Yadav (2018).

2.3 Bentonita

2.3.1 Definições e tipos de bentonita

Santos (1989) define como bentonita uma argila formada pela alteração de cinzas vulcânicas possuindo a montmorilonita, argilomineral pertencente ao grupo das esmectitas, como predominante em sua estrutura, a qual recebe esta nomenclatura em referência a primeira jazida onde esse material foi identificado, situada no Fort Benton, Wyoming, EUA.

Grim et al. (1978) definiram a bentonita como qualquer argila constituída basicamente pelo argilomineral esmectita, atribuindo a essas suas propriedades físicas, a qual independente da origem ou ocorrência, apresenta percentual do argilomineral montmorilonita variando de 55 a 70%.

Para estes, esmectitas são minerais que ocorrem exclusivamente em partículas ínfimas, cuja estrutura cristalina e cátions adsorvidos conferem as argilas montmorilonitas as seguintes características: partículas muito finas; elevada carga superficial; capacidade de troca catiônica alta; elevada área superficial; alto grau de expansão na presença de água (vinte vezes o volume inicial).

Devido à sua constituição mineralógica, as bentonitas na conceituação americana segundo Morandini (2014), podem ser divididas em bentonitas que incham (*swelling bentonites*) e as que não incham (*non-swelling bentonites*).

De acordo com Santos (1989) as bentonitas que expandem são as argilas caracterizadas pela propriedade de inchar quando imersas em água até vinte vezes o volume da argila seca. O autor ainda afirma que:

Uma vez colocada em água e expandida, a argila entra em suspensão formando espontaneamente uma solução ou gel tixotrópico, permanecendo em suspensão por meses. (...) apresentam teores apreciáveis de metais alcalino-terrosos; o sódio é o cátion trocável predominante. (...) formam-se pela alteração *in situ* de cinzas vulcânicas ácidas depositadas em ambiente lacustre, rico principalmente em sais sódicos. (SANTOS, 1989, p. 143).

Já as bentonitas não-expansivas segundo Santos (1989), têm a mesma composição mineralógica das bentonitas que incham, no entanto diferem nos cátions trocáveis, pois predominam o cálcio e magnésio. Para o autor, "A troca do sódio por cálcio ou magnésio em uma bentonita sódica destrói a propriedade de inchar e dispersar espontaneamente em água, além da tixotropia" (SANTOS, 1989, p. 143).

Para Huse (2007) embora sejam compostas principalmente de montmorilonita (60% a 80%), as argilas bentoníticas contêm diferentes proporções de outras argilas, como a illita e caulinita, além de minerais como quartzo, feldspato, calcita ou pirita e ferro, que as conferem propriedades particulares de plasticidade e resistência. Para o autor, a bentonita cálcica e a bentonita sódica são os tipos mais comuns de bentonitas.

Para Tomio (1999) um método de classificação da bentonita está relacionado à capacidade de expansão deste mineral pela absorção de água. As bentonitas sódicas (*bentonitas wyoming*) expandem-se mais e apresentam aspecto de gel. Já as bentonitas cálcicas (bentonitas brancas, quando são muito claras e brilhantes) se expandem menos ou não apresentam expansão.

Quando estas têm uma capacidade de expansão moderada são nomeadas intermediárias ou mistas. As bentonitas sódicas artificiais podem ser produzidas através do tratamento das bentonitas cálcicas com uso da barrilha (carbonato de sódio). Tal processo é muito comum no Brasil, visto que o país não possui bentonitas sódicas naturais (TOMIO, 1999).

Para Silva e Ferreira (2008) a bentonita sódica caracteriza-se por alto potencial de expansão do seu volume quando entra em contato com a água, se comportando como um gel. Huse (2007) acrescenta que além disso, este tipo possui alto grau de contração e forte tendência de se fraturar durante aquecimento e esfriamento. Segundo este, a bentonita sódica apresenta os seguintes parâmetros:

- Composição granulométrica formada basicamente de finos (argila 86,6%, silte 13% e areia fina 0,4%);
- Densidade real dos grãos de 2,78;

- Limites de liquidez e plasticidade são de 50, 56% e 46,3%, respectivamente;
- Possui alto potencial de trabalhabilidade (valor alto umidade similar ao limite de liquidez);
- Condutividade hidráulica da ordem de 1×10^{-10} m/s.

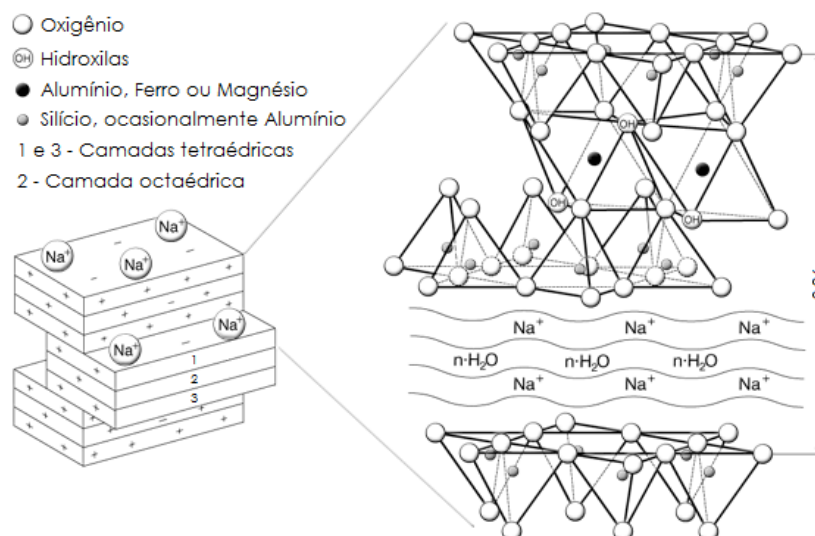
Já a bentonita cálcica, segundo Cortes et al. (2018), também conhecidas como bentonitas policatiônicas, são aquelas que não incham, sendo este tipo às encontradas em território brasileiro. No entanto, as policatiônicas cálcicas, depois de estudos de caracterização podem ser quimicamente modificadas e aproveitadas em aplicações que utilizam do tipo sódico de bentonita. Quando são modificadas pôr Na, estas passam a inchar em água similar ao que acontece com as bentonitas sódicas naturais (CUTRIM et al., 2015).

2.3.2 Composição Mineralógica

Para Amorim et al. (2006) a montmorilonita se constitui em camadas compostas de duas folhas de silicato tetraédricas, com uma folha central octaédrica de alumina, no espaço dentre as camadas há moléculas de água adsorvidas e cátions trocáveis, que podem ser Ca^{2+} , Mg^{2+} e/ou Na^+ .

De acordo com os autores, quando se predomina o cátion Ca^{2+} , a argila é denominada de bentonita cálcica e se o cátion é o Na^+ , esta é nomeada de bentonita sódica. As argilas magnesianas, não são comuns, no entanto para estes quando as argilas apresentam os três cátions supracitados, são denominadas de bentonitas policatiônicas. A Figura 3, ilustra o diagrama esquematizado da estrutura de uma montmorilonita sódica.

Figura 3 - Diagrama esquematizado da estrutura de uma montmorilonita sódica.

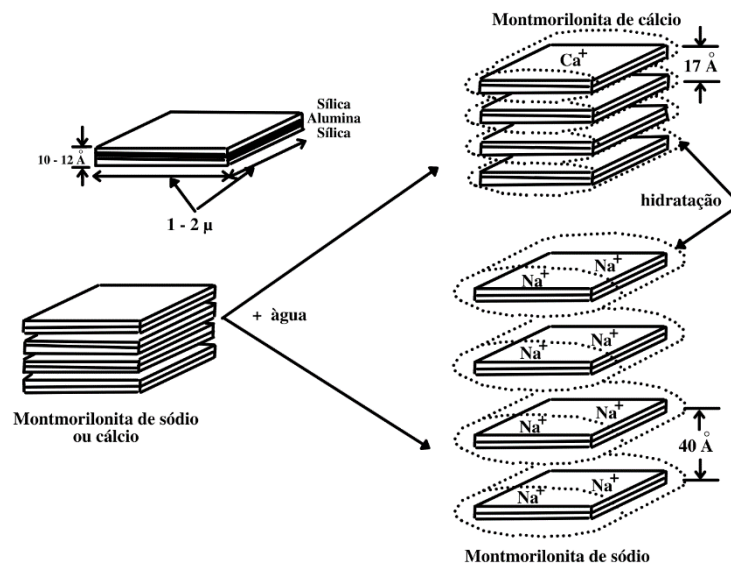


Fonte: Silva (2015) adaptado de Mitchell e Soga (2005).

A propriedade de inchar em meio aquoso das bentonitas cálcicas ocorre porque o Na^+ permite que várias moléculas de água sejam adsorvidas, provocando aumento na distância entre as camadas, e conseqüentemente a separação das partículas de argila uma das outras. Já nas argilas cálcicas ou policatiônicas, a quantidade de água adsorvida é limitada, permitindo que as partículas permaneçam unidas por interações elétrica e de massa (AMORIM et al., 2006).

Tonnesen et. al (2010) explicam que essa diferença de inchamento das montmorilonitas sódicas e cálcicas se deve ao fato do íon sódio (Na^+) ter maior facilidade de hidratação do que o íon cálcio (Ca^{2+}), justificando o porquê a capacidade de expansão da bentonita sódica é muito maior do que a do tipo cálcica. O processo de hidratação das montmorilonitas cálcicas e sódicas, está ilustrado no esquema da Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática da hidratação da montmorilonita cálcica e sódica



Fonte: Lummus e Azar (1986).

Segundo Paiva (2016) a natureza do cátion presente nas argilas é quem determina seu comportamento, ou seja, se o cátion é o sódio essa expande e absorve água, já quando o cátion é o cálcio ou magnésio a argila não expande e a absorção de água é limitada, mantendo as placas unidas por interações eletrostáticas. Assim o cátion apresenta-se como um floculador, diminuindo a força de repulsão das placas.

A expansão das bentonitas ocorre facilmente pela alta capacidade de absorção de água deste argilomineral. Este processo ocorre por absorção, que permite a entrada de água nas lamelas da bentonita, provocando o primeiro fenômeno de expansão, ou por adsorção, processo no qual ocorre uma nova expansão devido às reações químicas entre a bentonita e a água (LIMA et al., 2011). No entanto Morandini (2014) explica que as propriedades reológicas da bentonitas

cálcicas como expansão, viscosidade, estabilidade e suspensão, são mais fracas comparativamente às das bentonitas sódicas.

2.3.3 Produção de Bentonita

Dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM 2011), informam que em 2010 a produção mundial aproximada de bentonita era de 10,3 milhões de toneladas, onde os Estados Unidos era responsável por 39,7% desta produção e o Brasil detinha a 5ª colocação na produção com, 4% da produção mundial, produzindo 0,42 milhões de toneladas.

De acordo com Cortes et. al (2018), desde 2011 as reservas mundiais de bentonita deixaram de ser estimadas, isso acontece porque estas são muito abundantes nos principais países produtores. Esses autores também afirmam que até o ano supracitado, não havia informação da existência de depósitos de bentonitas sódicas no Brasil, sendo conhecidas no país somente as do tipo policatiônicas cálcicas.

Conforme ilustrado na Figura 5, extraído do Sumário Mineral de 2017 da Agência Nacional de Mineração (ANM), a estimativa de produção mundial de bentonita em 2016 de acordo com dados do *Mineral Commodity Summaries – 2017* da *United States Geological Survey* (USGS) apresentou leve decréscimo em comparação ao ano de 2015.

Figura 5 - Tabela estimativa da produção mundial de bentonita em 2016

TABELA 1 RESERVA E PRODUÇÃO MUNDIAL				
Discriminação Países	Reservas (10 ³ t) 2016 ^(p)	Produção (t)		
		2015 ^(p)	2016 ^(p)	(%)
Brasil ⁽¹⁾	32.161	517.607	354.016	2
Estados Unidos da América ⁽²⁾	-	4.040.000	3.800.000	24
China	-	3.650.000	3.650.000	23
Índia	-	1.100.000	1.100.000	7
Grécia ⁽³⁾	-	1.010.000	1.200.000	7
Turquia	-	1.090.000	1.200.000	7
México	-	470.000	500.000	3
Irã	-	420.000	600.000	4
Outros países	-	3.797.000	3.765.000	23
TOTAL	nd	16.000.000	16.200.000	100

Fonte: ANM/SRD e USGS-Mineral Commodity Summaries 2017 (1) Reservas incluem somente a reserva medida e o dado para produção compreende apenas a bentonita bruta; (2) produção substituída pelas vendas apuradas do produto; (3) inclui a produção de minério e caulim bruto; (t) toneladas; (p) preliminar; (r) revisado; nd: dados não disponíveis; (-) as reservas mundiais de Bentonita são abundantes.

Fonte: ANM (2017).

De acordo com o levantamento da ANM (2017), a produção de bentonita bruta no Brasil foi de 354.016 t em 2016, apresentando decréscimo de 31,6% comparado a 2015. O estado da Paraíba é o principal produtor de bentonita do país, com 64,9% da produção, seguido pela Bahia (35,1%).

O município de Boa Vista -PB é o maior produtor de bentonita do estado. Segundo o DNPM (2014) no estado atuam nove empresas de mineração, dentre estas está a principal responsável pela produção de bentonita do Brasil, a *Bentonit* União Nordeste S.A. (BUN).

Diversos autores já estudaram as propriedades das bentonitas encontradas na região de da Paraíba, dentre estes pode-se citar os trabalhos de Amorim et al., 2004; Farnezi, 2006; Menezes et al., 2009; Cortes et al., 2018; Nogueira, 2018.

2.4 Solos expansivos

2.4.1 Definição

Carvalho et al. (2015) definem como solo expansivo aquele originário da decomposição de rochas que permitem o surgimento de argilominerais de estrutura laminar 2:1 (grupo das Esmectitas). Por exemplo, o argilomineral montmorilonita pode ser formado a partir de rochas ígneas básicas, basaltos ou diabásio, as formações sedimentares e metamórficas possibilitam através do intemperismo o surgimento de solos expansivos.

Solos expansivos ou potencialmente expansivos são aqueles solos não saturados que o volume tende a aumentar ou diminuir quando há mudanças nas condições de umidade. Esse fenômeno de expansão está associado à presença do argilomineral do grupo 2:1, particularmente montmorilonita e ilitas (SILVA, 2003).

No entanto, todos os solos podem manifestar aumento de volume. Estes podem aumentar o volume: (a) quando ocorre alívio de tensão, podendo estar saturado ou não e não ser expansivo, (b) outro caso são os solos compactados ou argilas pré-adensados que durante o processo de cisalhamento (dilatância), estando saturado ou não, e não são solos expansivos. Assim, para se definir solos expansivos é necessário entender a expansibilidade intrínseca e extrínseca (FERREIRA, 1995).

A expansividade é a propriedade do solo experimentar variações de volume com a modificação das suas condições de umidade ou deste gerar pressões se houver impedimento nestas variações. Embora alguns solos ou rochas apresentam inchamento por descompressão ou modificações mineralógicas e texturais, quando atingem cotas superficiais, o fenômeno de expansão está convencionalmente associado à capacidade intrínseca de alguns minerais argílicos no solo, especialmente montmoriloníticos, de modificar sua estrutura laminar por adsorção de moléculas polares. Sendo esta capacidade associada a especificidades como mineralogia, tamanho e organização.

O fenômeno da expansão é desencadeado pela variação do teor de umidade do solo. Diante disso, é imprescindível o estudo das condições do meio ambiente, vinculadas não somente ao clima, mas como à posição do nível freático, vegetação, profundidade, estrutura do solo e posição estratificada, sendo a ação humana vinculada às modificações impostas na admissão e eliminação da água no solo, visto os solos apresentarem expansão quando umedecidos e contração quando ressecados.

É válido ressaltar que os solos expansivos ocorrem em todo o mundo, no entanto as regiões semiáridas destacam-se por uma maior ocorrência deste tipo de solo. Quando instaladas em regiões onde o solo apresenta propriedade expansiva, as obras de infraestrutura como construções civis e estradas, estão sujeitas à ocorrência de danos.

Segundo Oliveira e Jesus (2006), essa ciclagem de umidade que os solos apresentam ocasiona uma fadiga, o que os torna erodíveis, provocando o fenômeno do empastilhamento. Além disso, o potencial de expansão do solo está sobretudo atrelado ao arranjo estrutural de seus argilominerais, a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e a sucção.

2.4.2 Principais argilominerais dos solos expansivos

O caráter expansivo do solo depende do tipo de mineral existente na fração argila, visto que nem todos os filossilicatos relacionados a essa fração experimentam modificações volumétricas quando inundados por água, essa característica está atrelada nos minerais 2:1, como nas vermiculitas e nas esmectitas, especialmente na montmorilonita (MITCHELL, 1976). No entanto, para Ferreira e Ferreira (2009) isto também se apresenta nos minerais interstratificados, regulares ou não, fazendo parte de uma espécie expansiva, como a montmorilonita com clorita e mica com vermiculita.

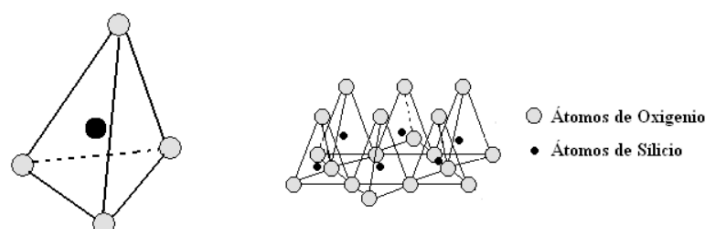
A determinação dos tipos de minerais presentes nas estruturas dos solos é realizada por seu processo de formação. O estudo dos minerais que compõem o solo é primordial para se conhecer e explicar o comportamento deste quando sofre variação volumétrica (COSTA, 2005). Para Vilar (1998) a fração fina do solo, que compõem alguns grupos de minerais, é responsável pelo comportamento plástico e pela expansão do solo.

Para Santos (1989) os argilominerais são comumente silicatos de Alumínio (Al), Magnésio (Mg) e Ferro (Fe), podendo haver adição de elementos alcalinos ou alcalinos terrosos. A estrutura destes é constituída pela intercalação de unidades compostas por tetraedros de oxigênio e silício ou alumínio e octaedros de oxigênio ou OH⁻, tendo o centro ocupado por cátions como Al³⁺, Fe³⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ e esporadicamente Ni²⁺ (GRIM, 1962).

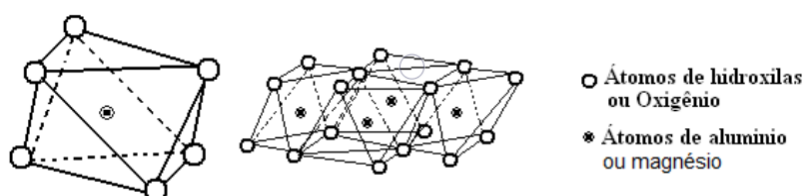
A Figura 6, ilustra a estrutura tetraédrica de silício e octaedros (b) de alumínio ou magnésio, respectivamente.

Figura 6 - Estrutura de argilominerais

a) Estrutura de uma folha tetraédrica de silício e oxigênio



b) Estrutura de uma folha octaédrica.



Fonte: Cristelo (2001).

De acordo com Carvalho (1997) os principais argilominerais dos solos expansivos são:

- Caulinita (Grupo 1:1)

É um argilomineral do tipo 1:1, formada por camadas com estrutura tetraédrica SiO_4 e uma estrutura octaédrica de $\text{Al}_2(\text{OH})_6$, estando estas ligadas por oxigênio produzindo um pequeno espaço entre elas. Esta estrutura é muito estável, com alta resistência à presença da água, o que confere a esta uma baixa ou nenhuma substituição isomórfica (PEREIRA, 2004) e com distância interplanar basal constante 7,2 Å (CARVALHO et al., 2015). Segundo Carvalho (1997) esta estrutura não é expansiva no processo de saturação, sendo abundante na maioria dos solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais.

- Montmorilonita (Grupo 2:1)

Pertencente ao grupo 2:1 (esmectitas) sendo a principal espécie deste grupo, é formada pelo empilhamento de camadas compostas por uma folha octaédrica de alumínio intercalada a duas folhas tetraédricas de silicato. Nestas quando o Ca e o Mg são os cátions trocáveis dominantes a expansão é menor por apresentar aumento com a diminuição da valência do cátion. (PEREIRA, 2004; CARVALHO, 1997). Segundo Paiva (2016) estas são pequenos

cristais com grande capacidade de reter íons, encontradas em regiões temperadas e áridas, solo pouco intemperizado as quais possuem elevado poder de contração e expansão, quando secos, consistência dura e fendilhada e, quando úmidos altas pegajosidade e plasticidade.

- Ilita (Grupo 2:1)

Pertencem ao grupo das micas. formada por uma folha octaédrica intercalada a duas folhas tetraédricas, apresenta rigidez entre as camadas o que dificulta a penetração das águas e íons. Além disso, por apresentar potássio nas suas estruturas ocorre uma baixa expansão, absorção de água e plasticidade (PEREIRA,2004; OLIVEIRA, 2011; HOUSECROFT e SHARPE, 2013).

- Vermiculita (Grupo 2:1)

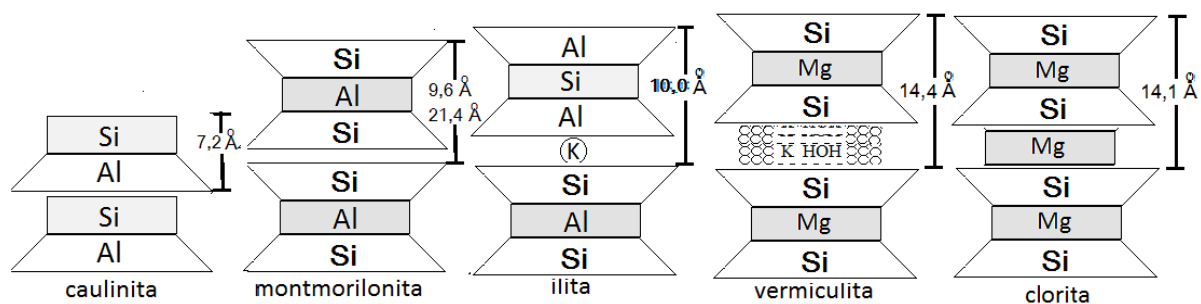
É um argilomineral do tipo 2:1 expansivo, formada pela modificação da mica e clorita do tipo 2:1, possui potássio e moléculas de água entre suas camadas com elevada capacidade de expansão e contração quando úmido. Devido a substituição do silício pelo alumínio, apresenta uma carga negativa, sendo neutralizada pelos cátions hidratados, não se expandindo tanto quanto a esmectita, e sua distância basal varia de 10 a 15 Å (OLIVEIRA, 2011; HOUSECROFT e SHARPE, 2013; CARVALHO et al. 2015).

- Clorita (Grupo 2:1:1)

Apresenta camada do tipo 2:1 comumente intercalada com uma folha octaédrica (intercamada) na qual o cátion coordenado pelas hidroxilas geralmente é o Mg^{2+} ou também o Fe^{2+} ou o Al^{3+} e menos frequente o Li^+ (GOMES, 1986). De acordo com Grim (1962) o espaço basal destas é de 1,4 nm.

A Figura 7, apresenta uma ilustração deste principais argilominerais e suas respectivas distâncias basais de acordo com Carvalho (1997).

Figura 7 - Esquemática das principais argilas expansivas



Fonte: Carvalho (1997).

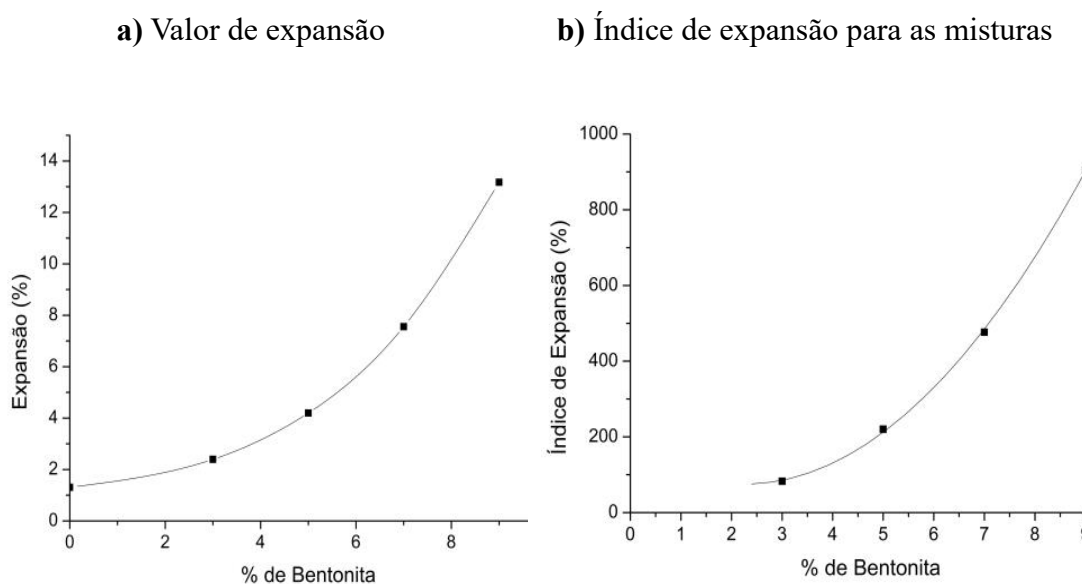
2.4.3 Relevância do estudo da expansividade em aterros

O efeito de uma expansão muito grande pode trazer consequências drásticas nas camadas de base, visto que após expandido o solo aumenta seu índice de vazios, e por consequência, a permeabilidade desse aumentará. Além disso, o processo de expansão pode provocar pressões no interior das camadas compactadas, as quais podem causar fissuras, que se tornam canais condutores dos contaminantes através das barreiras. Tais problemas demonstram a importância do conhecimento das modificações volumétricas (COSTA, 2005).

Mazza (2019) ao avaliar a formação de fissuras em camadas impermeabilizantes executadas com misturas com 5% de bentonita sódica e 5% de bentonita organofílica, concluiu que a presença destas aumenta significativamente o recalque total e o adensamento do solo, visto que em condições fissuradas o solo apresenta caminhos preferenciais de saída de água, o que facilita o processo de adensamento ao aumentar a velocidade de água dos vazios.

Em sua análise da expansão e índice de expansão, em solo puro (S00) e em misturas de com adição de 3 (S03), 5% (S05), 7% (S07) e 9% (S09) de uma bentonita sódica classificada como argila de alta compressibilidade (CH), para utilização em barreiras de impermeabilização, Martins (2017) encontrou os valores ilustrados nos gráficos da Figura 8.

Figura 8 - Análise dos ensaios expansão em função da adição de bentonita



Fonte: Martins (2017)

O autor concluiu, que nas proporções utilizadas em ambas as curvas a expansão apresentada pelo material com adição de bentonita foi crescente. Este explica que tal fator é consequência da propriedade de expansibilidade do material na presença de água.

Assim, no estudo este pontua que um comportamento expansivo pode trazer benefícios a construção das camadas de base. Visto que a expansividade provoca o aumento da espessura desta à medida que o lixiviado vai saturando, dificultando assim, a passagem deste contaminante até o subsolo e/ou lençol freático. No entanto, o mesmo ressaltou que apesar desta vantagem, outros parâmetros como contração e o recalque, devem ser analisados antes da validação da sua hipótese.

Vale ressaltar que em situações onde a expansão é muito alta, podem ocorrer danos às estruturas do aterro, sendo necessário haver um controle do potencial expansivo do solo, para evitar tais problemas, mas de forma que se possa garantir que as características favoráveis para uso nos *liners* desse tipo de solo sejam preservadas.

2.4.4 Fatores que afetam a expansão

Conforme Silva (2003), os mecanismos de expansão dependem do tipo de argilomineral, disponibilidade da água, tipo e quantidade de cátions trocáveis, bem como da ordem de interação entre estes e a água. Estes são classificados em três tipos básicos: (i) atração das partículas de argila; (ii) hidratação dos átomos; e (iii) repulsão osmótica

Para Nelson e Miller (1992) os fatores que intervêm nos mecanismos de expansão do solo, podem ser afetados pelas propriedades físicas do mesmo, sendo divididos em intrínsecos e extrínsecos. Ferreira (2008) considera fatores intrínsecos aqueles próprios dos solos como composição mineralógica, textura, capacidade de troca catiônica, estrutura e cátions trocáveis. Já os extrínsecos correspondem aos fatores externos como climatologia, hidrogeologia, vegetação e aqueles resultantes da ação humana.

O Quadro 3, apresenta uma relação destes fatores, apresentados no estudo de Nelson e Miller (1992).

Quadro 3 - Relação dos fatores intrínsecos e extrínsecos que influenciam o potencial de expansão

Fator	Descrição	Referência
Teor e tipo dos argilominerais*	Quanto maior o teor de argila no solo, há a possibilidade de uma maior expansão. Principalmente na presença dos argilominerais montmorilonitas, vermiculitas.	Grim (1968); Mitchell (1973, 1976); Snethen et al. (1977)
Química da água no solo*	Quando se aumenta o número de cátions e a valência do cátion, a expansão é reprimida.	Mitchell (1976)

Fator	Descrição	Referência
Sucção do Solo*	Independente da pressão efetiva, este fator é representado pela pressão negativa nos solos não saturados, estando diretamente relacionado à saturação do solo, tamanho dos poros, gravidade e as propriedades químicas e elétricas das partículas do solo.	Snethen (1980); Fredlund e Morgenstern (1977); Johnson(1973; Olsen e Langfelder (1965); Aitchisoneta!.(1965)
Plasticidade*	De modo geral solos com comportamento plástico e alto limite de liquidez mesmo sob grandes variações de umidade possuem um maior potencial para ser expansivo, sendo este fator, um indicador de expansão.	Nelson e Miller (1992)
Estrutura do Solo*	As argilas floculadas apresentam tendência de expansão superior as argilas dispersas. Já a presença de partículas cimentadas causa uma diminuição nesse potencial.	Johnson e Snethen (1978); Seed et al. (1962).
Densidade seca*	Quanto maior a densidade do solo, menor o espaçamento entre as partículas e maior a força de repulsão entre elas, proporcionando maior potencial de expansão.	Chen (1973); Komomik e David (1969); Uppal (1965)
Condições de umidade inicial**	Um solo com comportamento expansivo quando seco apresenta maior sucção de água do que estando com uma certa umidade. Assim como um perfil deste perde mais umidade quando submetido ao processo de secagem.	Nelson e Miller (1992)
Clima**	A quantidade e variação de chuva e do índice de evapotranspiração tem grande influência na disponibilidade e profundidade da umidade.	Holland e Lawrence (1980)
Lençol Freático**	A presença de lençóis freáticos rasos fornece uma fonte de umidade mais constante, não havendo grande variação de umidade.	Nelson e Miller (1992)
Vegetação**	Estas esgotam a umidade do solo através da transpiração, ou seja, locais onde há diversos tipos de vegetação apresentam variação de umidade do solo, podendo ocasionar retração.	Buckley (1974)

Fator	Descrição	Referência
Permeabilidade**	Solos muito permeáveis, principalmente devido à fissuração, permitem mais facilmente a entrada da água ocasionando assim maiores oscilações.	Wise and Hudson (1971); De Bruijn (1965)
Histórico de Tensões**	Um solo muito compactado é mais expansivo que um mesmo solo com número de vazios igual e normalmente compactado. Ciclos repetidos de umedecimento e secagem tendem a diminuir a expansão dos solos em laboratórios, porém em certo ponto a expansão não é mais afetada.	Mitchell (1976); Kassiff e Baker (1971)
Condições in situ**	Deve-se considerar o estado inicial de tensões ao se avaliar as prováveis consequências do carregamento da massa do solo e da alteração do ambiente de umidade.	Nelson e Miller (1992)
Carregamento**	A magnitude da carga submetida ao solo é a responsável pela mudança de volume que este sofrerá.	Holtz (1959)
Perfil do Solo**	A localização e espessura da camada de solo expansivo influencia o potencial de todo o perfil de solo, visto que grandes movimentos ocorrem quando esta camada é mais próxima da superfície.	Holland e Lawrence (1980)
Legenda: * Fator intrínseco; ** Fator extrínseco.		

Fonte: Adaptado de Nelson e Miller (1992).

2.4.5 Métodos de identificação e classificação de materiais expansivos

Os métodos utilizados para identificar se um solo é expansivo, estão divididos em dois grupos: os métodos diretos e indiretos. Os primeiros, utilizam-se de índices físicos e limites de consistência, ou das propriedades relacionadas à textura, que são de fácil obtenção por meio de ensaios em laboratório e campo para indicar o grau de expansividade. Os segundos estão relacionados à medida do potencial de expansão do solo verificadas por meio dos ensaios edométricos, de placa ou com expanso-colapsômetro (VILAR; FERREIRA, 2015).

O Quadro 4 apresenta uma divisão dos métodos, diretos e indiretos, e seus respectivos ensaios, realizados para identificação e classificação dos solos expansivos, de acordo com Costa (2005).

Quadro 4 - Métodos diretos e indiretos para identificação da expansão do solo

Métodos Indiretos	Métodos Diretos
1. Difração de raio X; 2. Análise Térmica Diferencial (ATD); 3. Adsorção de corantes; 4. Espectroscopia no infravermelho; 5. Capacidade de troca de íons; a. Titulação com azul de metileno. i. Método da mancha 6. Microscopia Eletrônica; 7. Limites de Atterberg; 8. Índice de atividade do solo.	1. Expansão livre; 2. Pressão de expansão; a. Método da amostra a volume constante; b. Ensaio edométrico direto; c. Ensaios edométricos múltiplos; d. Ensaios edométricos duplos; e. Ensaio edométrico simples. 3. Ensaio de CBR (<i>Compact Bearing Radio</i>)

Fonte: Costa (2005).

Estes ensaios foram determinados por diversos pesquisadores objetivando definir a susceptibilidade da expansividade de solos. Diante disso, o Quadro 5 apresenta as classificações do grau de expansão do solo baseado nos limites de consistência, apresentados por Vilar e Ferreira (2015).

Quadro 5 - Classificações do grau de expansão relacionada ao Limite de Liquidez (LL) e ao Índice de Plasticidade (IP)

Grau de Expansão	Chen (1965)	Seed et al. (1962)	Daksanamurthy e Raman (1973)
Muito Alto	$LL > 60$	$IP > 35$	$LL > 70$
Alto	$40 < LL \leq 60$	$20 < IP \leq 35$	$50 < LL \leq 70$
Médio	$30 \leq LL \leq 40$	$10 \leq IP \leq 20$	$35 < LL \leq 50$
Baixo	$LL < 30$	< 10	$20 \leq LL \leq 35$

Fonte: Vilar e Ferreira (2015).

Devido a vasta disponibilidades das técnicas a serem empregadas para classificação dos solos expansivos, segundo Pereira (2004) quando se deseja conseguir a identificação mais precisa e confiável se deve recorrer a ensaios laboratoriais, sendo que para determinação da constituição mineralógica dos materiais argilosos geralmente se emprega os ensaios de:

Difração de Raios - X, Análise Térmica Diferencial (ATD), Análise Térmica Gravimétrica (ATG), Capacidade de troca cátions (CTC) e Microscopia Eletrônica.

Outro método para a avaliação da expansibilidade de materiais argilosos é o índice de atividade de Skempton (1953), este é dado razão entre o índice de plasticidade (IP) pela porcentagem da fração granulométrica inferior a $2\mu\text{m}$, como visto na equação (1).

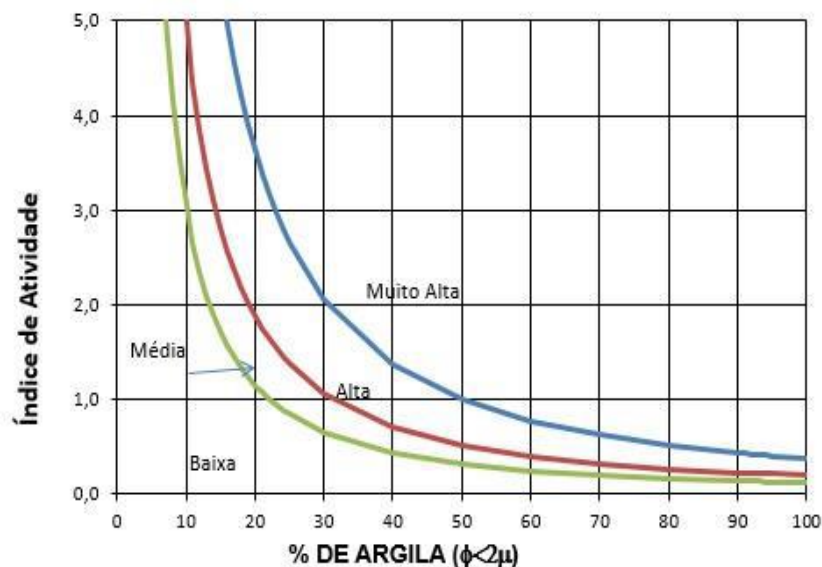
$$IA = \left(\frac{IP}{\% < 2\mu\text{m}} \right) \quad (1)$$

A partir dos valores deste índice em função do tipo de argilomineral, Skempton afirmou, considerando 5 grupos de solos, que a maior atividade dos argilominerais ministra um maior potencial de expansão, assim define-se que:

- $IA < 0,5$ (Solo inativo);
- $0,5 < IA < 0,75$ (Solo inativo);
- $0,75 < IA < 1,25$ (Solo normalmente ativo);
- $1,25 < IA < 2$ (Solo ativo);
- $IA > 2$ (Solo ativo);

Seed et al., (1962) apresentam um critério de classificação dos solos expansivos por meio do índice de atividade e da fração de argila presente no solo. Tal método está ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Critério de expansão de Seed et al., (1962)



Fonte: Seed et al., (1962).

As técnicas diretas são muito importantes nas aplicações geotécnicas, visto que as variações de volume e pressões desenvolvidas pelos materiais argilosos, ao entrarem em contato com a água, têm potencial de causar prejuízos à obras de engenharia. Estas variações de teores de água, bem como a descompressão dos terrenos e modificações de natureza química, são os principais mecanismos condicionantes do comportamento geotécnico das rochas, sendo o principal causador da expansão e do desenvolvimento das pressões de expansão as alterações nos teores de água (PEREIRA, 2004).

Segundo Ignatius e Frazão (1990), estas técnicas determinam a expansão e a pressão de expansão, se utilizando de metodologias que refletem as condições a que os materiais estão sujeitos. Assim, conforme Pereira (2004) os ensaios de expansão procuram medir as variações de volume, sujeitas ou não às cargas. Uma forma de avaliar o comportamento expansivo do solo é a partir do seu índice de expansão.

De acordo com Vilar e Ferreira (2015) os ensaios de expansão livre medem pela relação entre a altura inicial e final a variação da espessura da amostra quando esta é colocada dentro de um recipiente com água.

Uma maneira para se determinar a expansão livre segundo Campos (1989) adaptado por Pereira (2004) é acondicionar um corpo de prova (CP) cilíndrico em uma célula de endométrio convencional, podendo esta estar confinada ou não em um anel de PVC rígido. No topo do CP é colocado um relógio comparador, sustentado por um braço mecânico, que permite a leitura direta de 0,01 mm, com capacidade para até 10 mm.

Após o acondicionamento do CP na célula ajusta-se o relógio e se adiciona água destilada, e se anota as deformações observadas no relógio, em intervalos de tempo que obedecem a progressão geométrica de razão dois, sendo os CP's pesados antes e no fim do ensaio, lembrando de anotar sempre sua altura inicial. O ensaio citado pelo autor, segue as preconizações da *International Society for Rock Mechanics* - I. S. R. M (1972, 1989).

Conforme Vilar e Ferreira (2015) a expansão livre (E_I) é determinada em percentual após a sua estabilização. A porcentagem de expansão “livre” é dada pela equação (1), onde o termo E_I refere-se a expansão “livre”, em porcentagem; ΔH a altura da expansão devido à saturação e H é a altura do corpo de prova antes da inundação.

$$E_I = \left(\frac{\Delta H}{H} \right) * 100 \quad (2)$$

Alguns estudiosos apresentam métodos que utilizam pequenas sobrecargas antes da inundação do solo, como 7 kPa (Seed et al., 1962) e 10 kPa (Vijayvergiya e Ghazzaly, 1973).

O Quadro 6, além de apresentar um compilado dos métodos anteriormente comentados, apresenta um método proposto por Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) para tensão de expansão, que é aquela que o solo exerce durante o processo de expansão (VILAR; FERREIRA, 2015).

Quadro 6 - Critérios de classificação de solos expansivos com base na expansão livre e tensão de expansão

Critério de Seed et al.(1962)	Critério de Vijayvergiya & Ghazzaly (1973)		Grau de Expansividade
Expansão livre (%) para tensão de sobrecarga 7 kPa	Expansão livre (%) para tensão de sobrecarga 10 kPa	Tensão de expansão (kPa)	
0 - 1	< 1	< 30	Baixa
1 - 5	1 – 4	< 30 – 120	Média
5 - 25	4 – 10	120 – 300	Alta
> 25	> 10	> 300	Muito alta

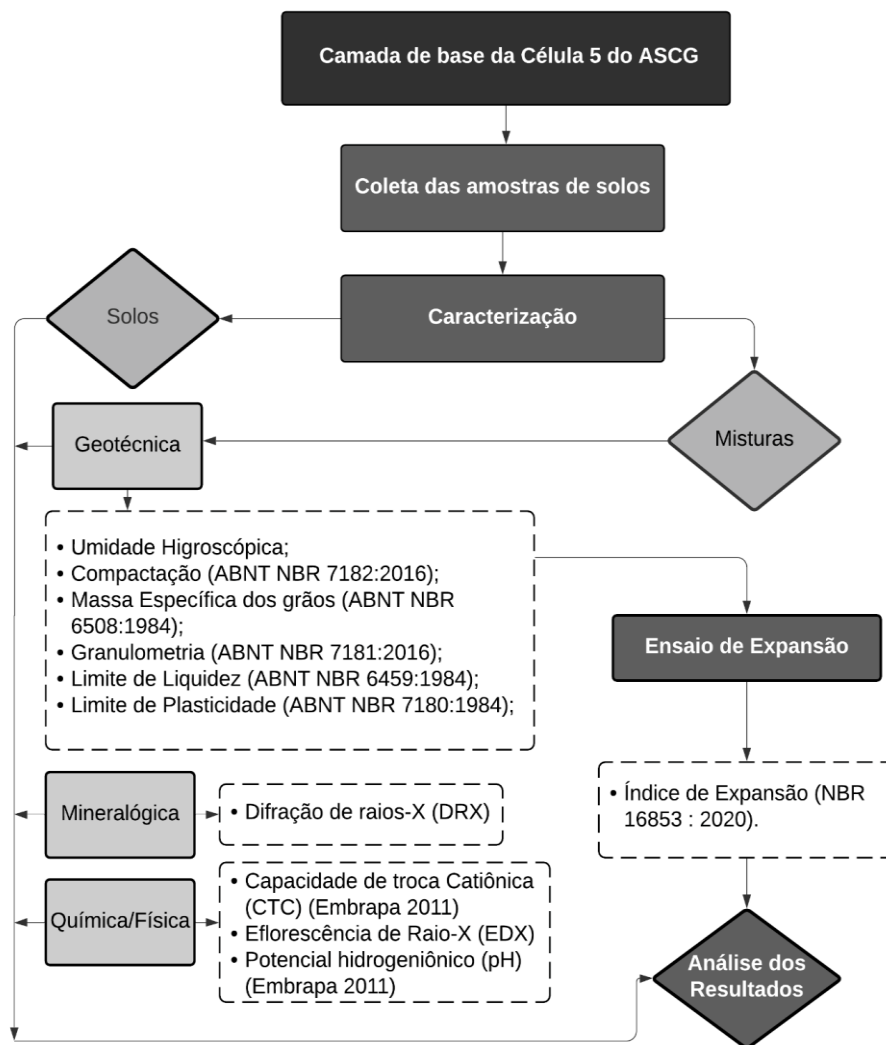
Fonte: Vilar e Ferreira (2015).

3 METODOLOGIA

Neste tópico será apresentada a metodologia empregada nesta pesquisa, bem como a descrição do campo experimental, materiais e métodos utilizados. Para determinação do comportamento das misturas analisadas, utilizou-se ensaios de caracterização geotécnica, química e mineralógica e determinação do índice de expansão por meio de ensaio edométrico.

Esta pesquisa foi realizada em parceria com o Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande), o qual possui convênio com a empresa Ecosolo Gestão Ambiental de Resíduos Ltda, responsável pela operação do Aterro Sanitário de Campina Grande (ASCG). A Figura 10, apresenta uma ilustração de todo o processo metodológico abordado.

Figura 10 - Metodologia de pesquisa



Fonte: Própria da autora (2022)

3.1 Campo Experimental

O campo experimental de realização deste estudo é o ASCG. O referido aterro, se localiza no distrito de Catolé de Boa Vista, na Fazenda Logradouro II, a uma distância de 10 km da zona urbana do município de Campina Grande - PB. A Figura 11, ilustra uma visão aérea da localização do Aterro Sanitário de Campina Grande - PB.

Figura 11 – Aterro Sanitário de Campina Grande - PB

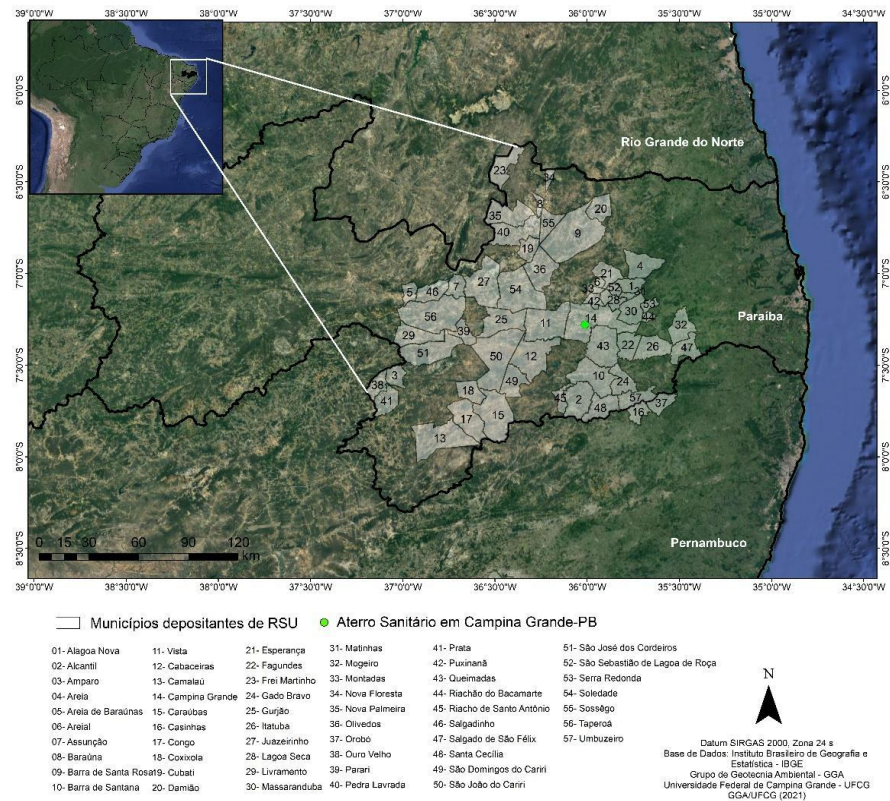


Fonte: Grupo de Geotecnia Ambiental - GGA (2021).

O ASCG iniciou suas atividades em julho de 2015, com perspectiva de vida útil de 25 anos e projeção de construção de 22 células, com uma área de base de 100 x 100 m e altura de aproximadamente 20 m, escalonadas em platôs de 5 m, com bermas de 6 m. As operações do ASCG são controladas pela empresa Ecosolo Gestão Ambiental de Resíduos LTDA, tendo destinação de resíduos Classes IIA e IIB de acordo com a classificação da NBR 10.004 (ABNT, 2004). (COSTA, 2019; SILVA, 2018; MOREIRA et al., 2017; SANTOS et al., 2019)

Este aterro possui área de 64 hectares, sendo deste montante um total de 40 ha destinada à disposição dos RSU. Inicialmente o mesmo foi projetado para recebimento de 350 toneladas diárias de resíduos. Atualmente, são recebidos cerca de 850 t/dia de resíduos, cerca de 90% são provenientes do distrito de Campina Grande e o restante de alguns municípios vizinhos, como se ilustra a Figura 12 (COSTA, 2019; SILVA, 2018; MOREIRA et al., 2017).

Figura 12 – Municípios que depositam RSU no ASCG



Fonte: Grupo de Geotecnia Ambiental - GGA/UFCG (2021).

Desde o início de sua operação, já foram implantadas no aterro 4 células, as quais foram denominadas de Células 1 (C_1), 2 (C_2), 3 (C_3) e 4 (C_4). Atualmente, essas quatro células encontram-se finalizadas, e conjuntas formam a macrocélula, que é a junção das Células 1, 2, 3 e 4 e as junções entre as células de resíduos, a macrocélula apresenta dimensões de base de 210 x 210 m, e uma altura média de 25 m. Em janeiro de 2020, se iniciou a operação de uma 5ª célula, a mesma será no decorrer deste estudo denominada de Célula 5 (C_5). (COSTA, 2019; SILVA, 2018)

Neste empreendimento, as camadas de impermeabilização de base que são executadas, possuem em sua composição uma proporção de solos de 80% de solo natural da área de implantação do aterro e 20% de um solo bentonítico, oriundo de uma jazida localizada no município de Boa Vista - PB. Com relação a permeabilidade, esta proporção se manteve adequada, pois apresenta condutividade hidráulica de 10^{-9} m/s, como preconiza a NBR 13.896 (ABNT, 1997) (COSTA, 2019; SILVA, 2017).

Diante do exposto, o foco de análise deste trabalho são os materiais que compõem a camada de base da célula 5 do ASCG. A Figura 13, ilustra a camada de base compactada na célula 5.

Figura 13 - Camada de base compactada da Célula 5

a) Compactação da camada de base da C₅

b) *Liner* da C₅ compactada e sistema de drenagens



Fonte :Grupo de Geotecnia Ambiental - GGA/ UFCG(2021)

3.2 Materiais

Os materiais que compõem esta pesquisa são o solo natural (Snt) e o solo bentonítico (Sbt). Estes integram a mistura de solos que é utilizada na execução da camada de base da célula 5 do ASCG, esta camada é a responsável por impermeabilizar a base da célula do aterro evitando a passagem de poluentes ao solo. A Figura 14, ilustra o local de coleta do material.

Figura 14 - Local de coleta do material



Fonte :Grupo de Geotecnia Ambiental - GGA/UFCG (2022)

3.2.1 Solo natural (Snt)

Foram realizadas as coletadas amostras do Snt, este solo é originário do terreno onde se localiza o ASCG. Este material, encontrava-se acumulado à céu aberto, na área próxima ao local de compactação da camada de base, onde foram coletas as amostras indeformadas deste

material seguindo as recomendações da NBR 9604 (ABNT, 1986), com o intuito de assegurar a representatividade deste nos ensaios de laboratório.

3.2.2 Solo Bentonítico (Sbt)

Neste estudo foram feitas as coletas das amostras do Sbt, esta argila bentonítica é originária de uma jazida localizada no município de Catolé da Boa Vista - PB, tal região é caracterizada por abundante presença desse tipo de material. As amostras estavam dispostas a céu aberto no ASCG, próximas ao local de execução dos serviços de preparação do terreno para camada de base, onde foram coletadas seguindo os procedimentos da norma NBR 10007 (ABNT, 2004) adaptada. Em seguida, as amostras foram enviadas aos laboratórios para realização dos ensaios de caracterização.

3.2.3 Misturas de Snt e Sbt

Durante este estudo será analisada a influência da variação de adição de solo bentonítico no comportamento expansivo dos solos utilizados na camada de base da C₅ do aterro sanitário. As proporções de uso da bentonita variam em torno de 20% que é o valor utilizado na prática. Assim decidiu-se realizar este estudo com misturas nas proporções de 5%Sbt + 95%Snt, 15%Sbt + 85%Snt e 25%Sbt + 75%Snt

As misturas de solos nos teores de 5%, 15% e 25% de bentonita durante este trabalho serão nomeadas M5, M15 e M25 respectivamente. As proporções de solo e bentonita foram calculadas em termo de massa seca de materiais, sendo a preparação dessas realizada adotando os seguintes procedimentos:

- 1) Homogeneização dos solos puros com auxílio da peneira de malha 2 mm;
- 2) Adição da bentonita no teor desejado, e posterior homogeneização manual da mistura;
- 3) Adição da água na quantidade prevista para cada ensaio em que este processo foi necessário, seguida pela completa mistura dos materiais;
- 4) Acondicionamento e identificação das misturas em sacos plásticos mantendo em repouso por um ou dois, antes da realização dos ensaios.

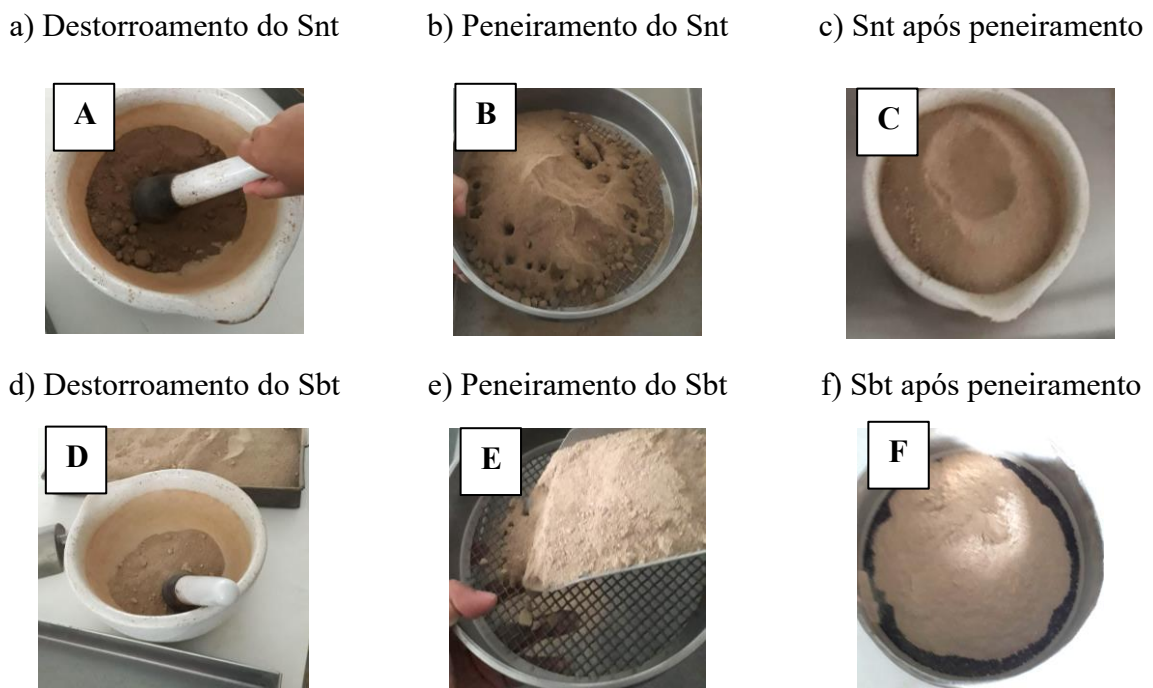
A escolha em analisar os teores citados, se baseou nos 20% usados na prática e nos estudos realizados por Costa (2019) e Silva (2017). Outros autores como Sivapullaiah et al. (1998) realizaram ensaios de expansão, contração, adensamento e condutividade hidráulica variando porcentagem de bentonita para avaliar as misturas em sistemas basais de selagem, e concluíram que as melhores proporções estavam entre 20 e 30%.

3.2.4 Preparação das amostras

Realizada a coleta, os solos foram acondicionados em sacos de *nylon* para assegurar a representatividade do material, evitando-se impurezas. Posteriormente, estes foram transportados para o Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde se realizou os ensaios de limite de liquidez e plasticidade, compactação e índice de expansão livre, e para o Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFCG, onde se realizou os demais ensaios de caracterização geotécnica, mineralógica e físico-química.

Antes da realização dos ensaios das amostras, cerca de 6 kg de cada solo passaram pela preparação, como preconiza a NBR 6457 (ABNT, 2016a). A Figura 15 ilustra esse procedimento.

Figura 15 - Preparação das amostras para ensaios geotécnicos



Fonte: Própria da autora (2022)

3.3 Caracterização Geotécnica, Mineralógica e Físico- Química

Realizada a preparação das amostras foi feita a caracterização geotécnica, mineralógica e físico-química das misturas com os materiais nas proporções de 5, 15 e 25% de solo bentonítico. O Quadro 7, apresenta os ensaios de caracterização executados e suas respectivas normas.

Quadro 7 - Resumo dos Ensaio de caracterização geotécnica, físico-química e mineralógica e os métodos empregados

Ensaio	Método
Umidade higroscópica	NBR 6457 (ABNT, 2016a) – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização
Preparação de amostras	NBR 6457 (ABNT, 2016a) – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016b) – Solo – Determinação do Limite de Liquidez
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016c) – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade
Compactação	NBR 7182 (ABNT, 2016d) – Solo – Ensaio de Compactação
Massa específica dos grãos	NBR 6508 (ABNT, 2016 e) – Solo – Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa específica
Granulometria por peneiramento e sedimentação	NBR 7181 (ABNT, 2016f) – Solo – Análise Granulométrica
Composição química	Difração de Raios – X
Mineralogia	Eflorescência de Raios – X
Capacidade de troca catiônica	Embrapa (2011)
Matéria Orgânica	Embrapa (2011)
pH (em H ₂ O)	Embrapa (2011)

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.4 Ensaio Edométrico Simples

O ensaio edométrico foi executado seguindo as preconizações da NBR 16853 (2020). A Figura 16 ilustra algumas etapas dos procedimentos realizados durante a execução do ensaio.

Figura 16 – Procedimento do ensaio edométrico para as M5, M15 e M25

a) Conjunto da célula de adensamento



b) Prensa de adensamento



c) Pesagem do corpo de prova ao final do ensaio



Fonte: Própria da autora (2022)

3.4.1 Preparação do corpo de prova

A NBR 16853 (2020), determina o processo de preparação de uma amostra indeformada para o anel do ensaio edométrico simples. No entanto, como este estudo é realizado com mistura de solos (amostras deformadas), a norma não regulamenta um método específico para a moldagem do corpo de prova essa, no entanto, exige que se explique o processo adotado. Desta forma, foi seguido o processo semelhante ao ensaio de compactação Proctor Normal, utilizando a massa específica seca máxima e umidade ótima.

O anel utilizado possui diâmetro de 5 cm, através disso, foi possível calcular a quantidade de massa necessária para o preenchimento do volume total do mesmo, por meio da equação (3), onde v é o volume do anel e ρ é massa específica aparente seca máxima.

$$\rho_s = vx\rho \quad (3)$$

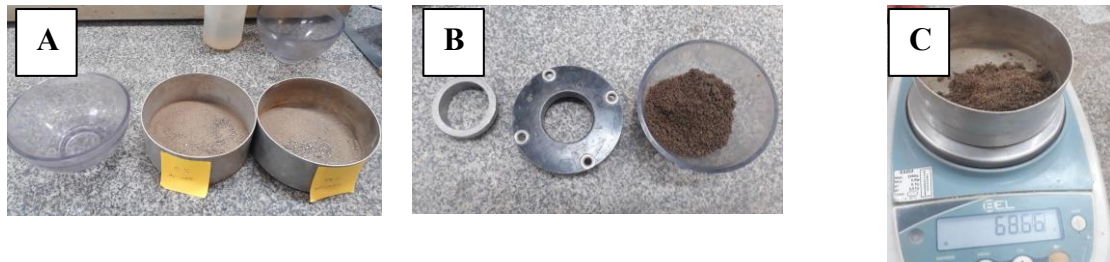
Após a determinação da quantidade de massa necessária para moldagem do CP, foi pesada a quantia de solo calculada para abranger o volume do cilindro de adensamento. Em seguida, se calculou a proporção de Snt e Sbt em gramas para preparar as M5, M15 e M25, e seguiu-se homogeneizando a mistura, com a quantidade de água previamente calculada. A quantidade de água adotada no ensaio foi calculada a partir da Equação (4), sendo ΔW a diferença entre umidade ótima e a umidade higroscópica e ρ_s a massa necessária para preencher o volume do solo.

$$P_a = \Delta W x \rho_s \quad (4)$$

Além disso, se separou e levou à estufa uma quantidade extra desse material para verificação posterior da umidade de acordo com o valor calculado. A Figura 17 ilustra esse procedimento.

Figura 17 – Procedimento de preparação da amostra para o ensaio edométrico

- a) Mistura e homogeneização b) Material homogeneizado c) Pesagem para verificação da umidade



Fonte: Própria da autora (2022)

Com o material homogeneizado, sabendo a quantidade de solo necessária para o volume do cilindro utilizado, foi feita uma divisão desse volume em três camadas de altura semelhantes, para garantir uma maior qualidade na moldagem do CP. Assim foi realizada a moldagem do CP no cilindro de adensamento, como mostra o passo a passo ilustrado na Figura 18.

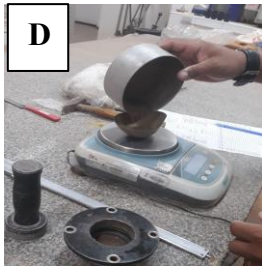
Ao final da moldagem das duas primeiras camadas, foram feitas pequenas ranhuras em suas superfícies, com o intuito de melhorar a aderência entre esta e a camada superior. Além disso, ao finalizar cada camada se realizava a medição da altura da mesma, com o auxílio de um paquímetro, para garantir que estas estavam sendo executadas com alturas semelhantes.

Figura 18 – Procedimento de moldagem do CP para o ensaio edométrico

- a) Depósito de solo para uso b) Moldagem da 1ª camada c) Ranhura da 1ª camada na 3ª camada



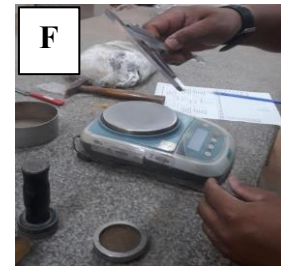
d) Pesagem do solo para uso na 2ª camada



e) Moldagem da 2ª camada



f) Medição para verificação da altura das camadas



g) Ranhura na superfície da 2ª camada



h) Depósito de solo para uso na 3ª camada



i) Moldagem da 3ª camada

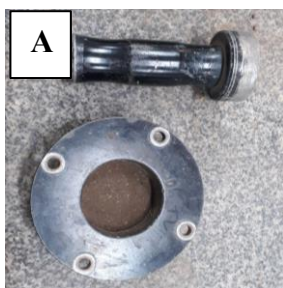


Fonte: Própria da autora (2022)

Realizada a moldagem do CP no cilindro edométrico, foi feita a verificação visual desse processo, e posteriormente a pesagem do conjunto CP + Cilindro, como ilustra a Figura 19, abaixo.

Figura 19 – Procedimento de preparação da amostra para o ensaio edométrico

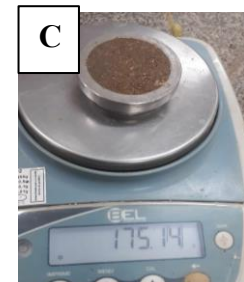
a) Verificação da moldagem ao finalizar a 3ª Camada



b) CP moldado no anel de adensamento



c) Pesagem do CP + Anel de adensamento



Fonte: Própria da autora (2022)

3.4.2 Procedimento do ensaio

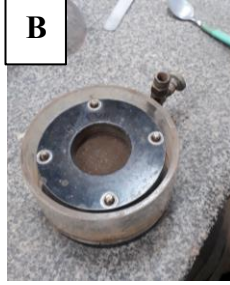
Seguindo as recomendações da NBR 16853 (2020) foi realizada a montagem da célula de adensamento. A Figura 20 ilustra esse processo.

Figura 20 – Preparação da célula de adensamento

a) Base rígida e CP no anel



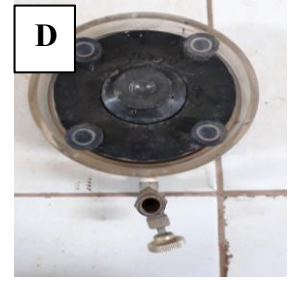
b) CP no anel acoplado a base



c) Fixação do conjunto a base



d) Base fixada e pedra porosa



Fonte: Própria da autora (2022)

Realizada a montagem da célula de adensamento e com o nivelamento do conjunto, se adicionou uma carga de acomodação das partículas, de 7 kPa, na prensa de adensamento. Em seguida a este processo, foi necessário o tempo de estabilização do corpo de prova. Sendo o mesmo estabilizado, a amostra foi inundada, e se verificou a expansão pelas variações no extensômetro nos tempos preconizados em norma ou após a estabilização do CP. A Figura 21, apresenta a ilustração do procedimento mencionado.

Figura 21 – Realização do ensaio (Inundação e medição)

a) Adição da carga na prensa



b) Inundação da amostra



c) Leitura no extensômetro



Fonte: Própria da autora (2022)

A estabilização foi conferida após cada leitura, verificando-se a diferença da leitura do tempo final (L_t) observado pelo tempo inicial (L_{t0}) multiplicado por 0,05 era maior ou igual a diferença do tempo final (L_t) pelo tempo anterior (L_{t-1}) observado ($L_t - L_{t0} * 0,05 \geq L_t - L_{t-1}$), se isso acontecesse o ensaio era finalizado.

Este procedimento foi repetido para as amostras das misturas de 5%, 15%, 25% e para Sbt. Em seguida foi realizada a plotagem e análise dos gráficos e resultados, para verificação do índice de expansão de cada amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos durante os ensaios citados no tópico anterior. Além disso, se analisará e discutirá como os resultados obtidos se relacionam à capacidade de expansão das misturas de solos, de forma a entender como a adição de bentonita e como essa característica pode interferir no desempenho das *liners* do aterro sanitário.

4.1 Caracterização geotécnica

A Tabela 1, dispõe dos resultados obtidos para os ensaios de caracterização geotécnica do Snt, Sbt, M5, M15 e M25.

Tabela 1- Caracterização geotécnica.

CARACTERIZAÇÃO	SOLOS		MISTURAS			
	Snt	Sbt	M5	M15	M25	
W (%)	0,48	10,9	0,9	1,7	3,6	
LL (%)	NL	178	NP	24,3	31,2	
LP (%)	NP	60	NP	19,3	20,2	
IP (%)	NP	118	NP	5	11	
W _{ótima} (%)	10,1	--	11	11,8	15,9	
Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	1,99	--	1,87	1,83	1,71	
G R A N U L O M E T R I A	Pedregulho	20,5	0	10,6	8,6	0,4
	Areia grossa	3,5		10,2	8,6	3,6
	Areia média	8,2	20,9	21,2	19,6	22,5
	Areia fina	52,3		41,1	41	48,8
	Silte	8,3	28,2	6,6	12,9	11,6
	Argila	7,2	50,9	10,3	9,4	13,1
	$\rho_{d\text{máx}}$ (kN/m ³)	27,8	22,6	26,5	26,3	24,0
Classificação SUCS	SM	CH	SM	SM	SC	
IA (%)	--	2,32	--	0,53	0,84	

Fonte: Própria da autora (2022)

4.1.1 Umidade higroscópica e peso específico dos grãos

A faixa de umidade higroscópica disposta na Tabela 1, se apresentou como esperado, visto que à medida que se adicionou bentonita (10,9 %) ao solo natural (0,48%), aumentou-se o valor da umidade destas nas misturas, sendo tais valores similares aos encontrados por COSTA (2019) que estudou solos da mesma jazida analisada neste estudo.

O elevado teor de umidade higroscópica da bentonita sinaliza a alta capacidade de retenção de água que esta possui. A capacidade de absorção de água de uma argila relaciona-se ao seu potencial de expansão, ou seja, quanto maior esta capacidade, maior a possibilidade deste solo apresentar-se como expansivo, sendo assim, infere-se que o solo da M15 apresenta uma capacidade de expandir-se menor que o da M25.

O peso específico dos grãos ($\rho_{d\text{máx}}$ (kN/m³) dos solos encontram-se na Tabela 1. Foram obtidos através do método do picnômetro o valor de 27,8 kN/m³ para o Snt e 22,6 kN/m³ para Sbt. Sabendo que este fator configura a predominância do mineral existente no solo, vale ressaltar que conforme Carvalho (2004) em solos ricos em quartzo comumente se encontra valores de peso específico próximos a 26,7 kN/m³.

Com o incremento de solo bentonítico nas misturas, pôde-se perceber uma pequena diminuição nos valores dos pesos específicos destas, no entanto esta variação, principalmente para M5 e M15 giraram em torno do peso específico dos grãos em maior porcentagem. Já M25, por apresentar uma maior porcentagem de finos do que as outras misturas, apresentou o valor de 24,0 kN/m³, valor que, segundo Costa (2019), é o mesmo encontrado na literatura para a montmorilonita.

4.1.2 Limites de consistência

De acordo com Frazão (1981) a expansividade pode ser analisada baseando-se nos limites de consistência através dos valores de LL, LP e IP. Pela análise destes dados na Tabela 1, pôde-se avaliar o grau de expansão dos solos e das misturas de acordo com os critérios expostos no Quadro 5, deste estudo. Tal análise é mostrada na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2- Critérios de classificação da expansividade pelos limites de consistência.

CRITÉRIO	Snt	Sbt	M5	M15	M25
Chen (1965)	N. A	Muito Alto	N. A	Baixo	Médio
Seed et al. (1962)	N. A	Muito Alto	N. A	Baixo	Médio
Daksanamurthy & Raman (1973)	N. A	Muito Alto	N. A	N. A	N. A

N. A - Parâmetro não se aplica aos dados analisados nos estudos dos respectivos autores

Fonte: Própria da autora (2022)

A análise dos dados mostra que o acréscimo de 5% de solo bentonítico não acarretou nenhuma alteração nos limites das misturas, e por consequência, esta permanece com potencial de expansão baixo. Esse comportamento decorre da presença majoritária de areia na composição granulométrica do solo.

Já o incremento de 15 e 25% deste solo ocasionou aumento nos valores de LL, no entanto como demonstra os critérios tanto de Chen (1965) quanto de Daksanamurthy e Raman (1973) o potencial de expansão do solo para 25% caracteriza o solo com potencial maior que o de 15%, tendo este classificado com médio.

Tal classificação corrobora com o uso destas misturas em camadas de base, visto que o potencial expansivo não é alto. Karakan e Demir (2020) identificaram uma tendência linear de crescimento do LL de solos arenosos com adição de bentonitas. No entanto, como relata os estudos Pandiam et al. (1995) a adição do Sbt acarreta aumento no LL de misturas de forma linear até o teor de 20%.

Após a obtenção dos valores de limite de plasticidade (LP) e limite de liquidez (LL), pôde-se obter os valores para o índice de plasticidade (IP) de cada mistura, sendo possível realizar a classificação do solo quanto a sua plasticidade.

A avaliação da plasticidade do solo tem relevância significativa na análise da expansividade do solo, visto que quanto maior a plasticidade do solo, maior é a probabilidade deste ser expansivo (Diógenes, 2021). Tal perspectiva é válida pela análise do critério de Seed et al. (1962), exposto no Quadro 5, que relaciona o aumento no IP ao grau de expansão do solo.

Como exemplifica a Tabela 2, a mistura de 5% e o Snt não podem ser analisadas pelos critérios dispostos por apresentar-se como não-plásticas. Bem como nenhuma das misturas adapta-se ao critério de Daksanamurthy e Raman (1973), por este ser proposto a valores acima dos que essas apresentam.

Já pelo critério de Seed et al. (1962), a amostra M15 apresentou grau de expansão baixo, com valores de IP menores que 10. Já a amostra de M15 é considerada com grau de expansão

médio, pois tem seu IP entre os intervalos de 10 e 20. Assim, nota-se que a medida que se aumenta a proporção de bentonita, aumenta-se o potencial de grau de expansão das misturas.

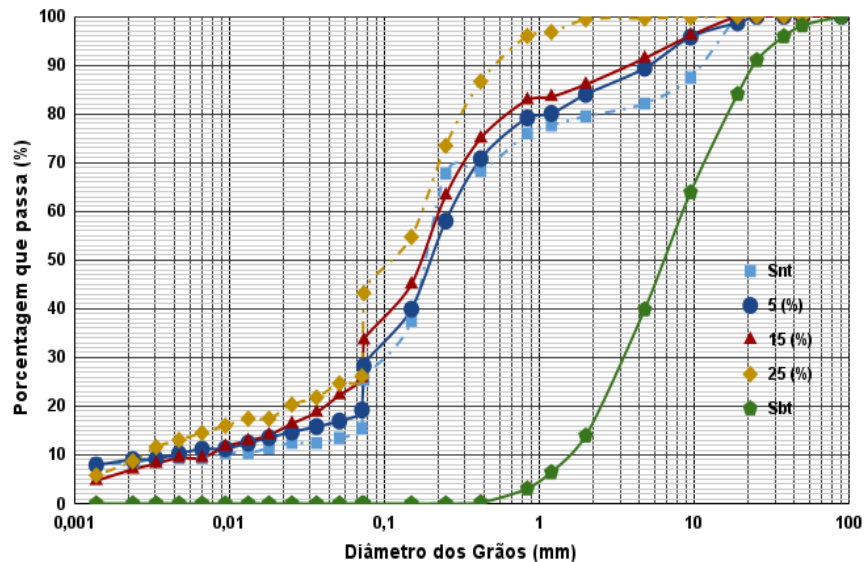
Esse aumento se justifica pelo comportamento expansivo que este material (Sbt) possui, sendo classificado como muito alto por ambos os critérios, como mostra a Tabela 2, bem como apresenta valores altos de limites de liquidez e índices de plasticidade, característica de solos expansivos.

O Sbt, M15 e M25 atendem às exigências de Rowe et al. (1995), possuindo IP superior a 7% sendo recomendados para utilização como barreira de aterro sanitário, estes também estão dentro das prerrogativas expostas por Daniel (1993) do índice de plasticidade ser maior ou igual a 7%. No entanto, tanto o solo natural como M5, não se encontram em conformidade com estas indicações literárias.

4.1.3 Análise granulométrica

Através do ensaio de granulometria por sedimentação foram obtidos os resultados de análise granulométrica das misturas expostas na Tabela 1, sendo estes ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Curvas granulométricas



Fonte: Própria da autora (2022)

Ao se avaliar a variação volumétrica de solos de ambiente tropical é importante se entender a natureza do mesmo, visto que sua granulometria e constituição implicam a estes comportamentos diferentes. Assim, quando o solo é arenoso, possui minerais pouco ativos na presença de água, apresentando assim pequenas variações de volume, visto que estas ocorrem

pelas pressões de sucção nos seus capilares. Já quando os solos são argilosos, a expansão além de ser mais significativa, apresenta-se em razão de sua natureza mineralógica (COSTA, 2005).

O Snt é constituído de 20,5% de pedregulho, 64% de areia (3,5% de areia grossa, 8,2% de areia média e 52,3% de areia fina), 8,3% de silte e 7,2% de argila. Já o Sbt é composto por 20,9% de areia, 28,2% de silte, 50,9% de argila e não possui pedregulho. Assim, analisando estes dados, infere-se que o Sbt apresenta maior possibilidade de expansão que o Snt (maior fração arenosa). Como justifica Chen (1988), na maioria dos solos expansivos predomina um alto percentual de partículas com dimensão inferior a 0,074 mm.

Conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM, 2017), o Snt e Sbt foram classificados como uma areia-siltosa (SM) e como uma argila de alta compressibilidade (CH), respectivamente. De acordo com esse critério de classificação segundo a CETESB (1993), o solo bentonítico é o único recomendado para utilização em camada de base em aterros sanitários.

A adição dos teores (5%, 15% e 25%) de solo bentonítico nas misturas, como era de se esperar, provocou mudanças na composição granulométrica, principalmente redução das frações de areia e aumento na fração de finos das misturas, o que pode ser observado na Tabela 1. De acordo com a classificação da SUCS, M5 e M15 são uma areia-siltosa (SM), assim como o Snt, e M15 é SC (areia argilosa), sendo a categoria de solo nesta última mistura a única, dentre as citadas, que se adequa para uso em camadas de base, de acordo com Rocca et al. (1993).

De acordo com Rowe et al. (1995) as barreiras selantes devem apresentar quantidade mínima de 15 a 20% de partículas menores que $2\mu\text{m}$ (argila) e seguindo estes critérios nenhuma destas misturas estariam indicadas para utilização em camadas de base. Mas como ressaltam os autores, estes dados representam características gerais da camada de argila, sendo necessário a análise de outras características, visto o projeto de camada de base ser específico para cada local. Estas misturas também não se adequaram às sugestões da CETESB, para uso em camada de base, com relação à classificação da SUCS e porcentagem de finos.

4.1.4 Ensaio de compactação

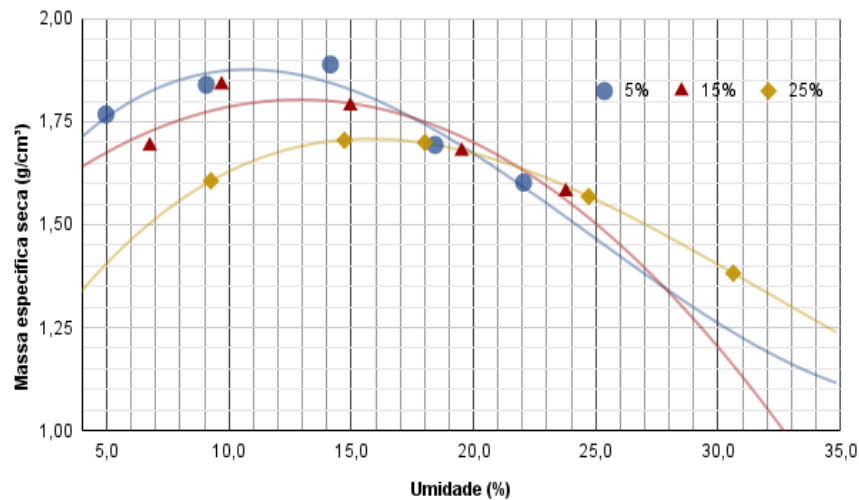
Por meio do ensaio de compactação utilizando-se a energia de compactação do Proctor Normal, pôde-se obter a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima do solo natural e das misturas, dados primordiais para a moldagem do CP no ensaio edométrico. Assim da Tabela 1, nota-se que o Snt apresenta umidade ótima de 10,1% e massa específica aparente seca máxima de $19,9 \text{ kN/m}^3$ ($1,99 \text{ g/cm}^3$).

No entanto, devido a alta plasticidade da bentonita pura, não se conseguiu executar o ensaio de compactação para este material, para tanto foram utilizados os valores encontrados por Costa (2019) visto se tratar de um material proveniente do mesmo local de realização deste estudo. O autor determinou que a bentonita apresenta umidade ótima de 33% e massa específica aparente seca máxima de $13,70 \text{ kN/m}^3$ ($1,37 \text{ g/cm}^3$), o mesmo ainda relatou que a bentonita utilizada estava na forma hidratada, sódica evidenciando características expansivas e de alta capacidade de retenção de água.

A massa específica aparente seca máxima do solo natural é significativamente superior à da bentonita. Assim, nas misturas se percebe que com o aumento da proporção de bentonita, há uma redução neste fator variando de $1,87 \text{ g/cm}^3$ à $1,71 \text{ g/cm}^3$. No entanto, analisando a umidade ótima, ocorreu o oposto, os valores variaram de 10,5% a 15,9%.

Com a adição de argila no solo arenoso, as misturas passam a ter uma maior proporção de grãos de menores dimensões, o que provoca diminuição da massa específica seca máxima e aumento da umidade ótima. As curvas resultantes do ensaio de compactação (Proctor Normal) para as misturas estão ilustradas na Figura 23, abaixo.

Figura 23 – Curvas de Compactação



Fonte: Própria da autora (2022).

O gráfico ilustrado embasa esta análise, pois com o aumento de bentonita as curvas de compactação apresentaram deslocamento para a direita e para baixo. Pinto (2006) explica que um gráfico com deslocamento para a direita, apresenta uma umidade maior, no entanto, quando a curva de compactação apresenta comportamento para baixo, a massa específica do solo é menor.

Durante a execução da moldagem dos corpos de prova no ensaio, à medida que se aumentava o teor de bentonita mais trabalhoso e de difícil homogeneização se tornava a mistura.

Isso se justifica principalmente pela alta capacidade da bentonita de reter água, sendo que este comportamento pode estar diretamente ligado à sucção do solo.

Costa (2019) ao analisar a sucção de misturas nos teores de 10%, 20% e 30% de bentonita, nos materiais desta mesma jazida, encontrou os valores de sucção de 5,7%, 6,2% e 7,8% respectivamente. Este autor observou que a mistura com 30% de adição de bentonita apresentou maior capacidade de sucção do que as outras misturas, indicando que quanto maior o percentual de bentonita, maior a retenção de água no solo.

Lee e Wray (1995), entendem por sucção a quantidade de energia necessária para retenção de água nos poros do solo. O fato citado, influencia de forma significativa o comportamento expansivo do solo, pois quanto maior a sucção do solo maior é o seu grau de expansibilidade.

Além disso, ao se analisar a massa específica aparente seca máxima, influi-se que a medida que se aumenta a proporção de bentonita, maior a possibilidade do solo se apresentar como expansivo. Segundo Ataíde (2017) solos com elevados teores de massa específica aparente seca possuem relação direta com o baixo potencial expansivo, porque os argilominerais existentes em um solo expansivo possuem baixa densidade. Ou seja, um solo com a presença de minerais como o quartzo por exemplo, denota uma baixa capacidade de reter água.

De acordo com o critério de Kabir e Taha (2004), todas as misturas atenderam ao requisito do ensaio de compactação, pois apresentaram massa específica aparente seca máxima superior a $1,45 \text{ g/cm}^3$, podendo ser utilizadas como barreiras impermeabilizantes em aterros sanitários. Todas as misturas analisadas também atenderam ao critério de Onorms (1990), citado por estes autores, possuindo massa específica aparente seca máxima maior ou igual a $1,71 \text{ g/cm}^3$, tendo a amostra M25 ficado no limite deste método.

4.1.5 Índice de Atividade

Neste estudo também foi realizada uma avaliação da expansividade dos solos e misturas por meio do índice de atividade e de outras classificações e metodologias que avaliam o grau de expansividade dos solos baseadas em ensaios como o de granulometria, índice de plasticidade e outros. A Tabela 3, apresenta a classificação da expansividade de acordo com os critérios de Skempton, 1953 e Seed 1962.

Tabela 3- Análise da expansividade pelos critérios de Skempton (1953) e Seed et al. (1962)

CRITÉRIO	Snt	Sbt	M5	M15	M25
Skempton (1953)	N. A	S. A	N. A	S. I	S. N. A
Seed et al. (1962)	N. A	Muito Alta	N. A	Baixa	Baixa

N. A - Parâmetro não se aplica aos dados analisados nos estudos dos respectivos autores; S.A - Solo Ativo; S.I - Solo Inativo; S.N.A - Solo normalmente ativo;

Fonte: Própria da autora (2022).

Para o Snt e M15 não se aplica atividade por se tratarem de solos não-plásticos, por conseguinte não foi possível definir a expansividade nos critérios dispostos na Tabela 3. Pelo critério de Skempton (1953) a bentonita é ativa, justificado principalmente pelo seu elevado valor de IP.

Quanto à atividade, as misturas M15 e M25 são classificadas como inativa e normalmente ativa, respectivamente. A variação, mesmo que não muito relevante de aumento do valor de atividade, está atrelada principalmente pela tendência crescente dos valores de índices de consistência encontrados à medida que se aumenta a proporção de bentonita.

Segundo Silva et al. (2016), as argilas caracterizadas como inativas sugerem pouca facilidade em expansão quando em contato com água. Sendo tal comportamento, segundo estes autores, adequado para uso em *liners* de aterros, visto que o solo quando exposto à precipitação o aumento de volume tende a acarretar formação de fissuras quando ocorre a secagem, bem como o processo de expansão neste elemento do aterro pode provocar desestabilização do maciço sanitário.

O potencial de expansão caracterizado pelo método de Seed et al. (1962) caracteriza a bentonita com alta expansividade, fator que justifica como o uso de misturas desse material em solos muito arenosos, como o Snt, favorece o atendimento dos critérios de permeabilidade do solo, quando utilizados na proporção corretas.

No entanto M15 e M25, segundo esta metodologia possuem capacidade de expansão baixa, isso se deve principalmente pela presença de materiais granulares nestas misturas, que possuem baixa capacidade de expansão. Tal fato corrobora, com a indicação do uso dessas misturas nas camadas impermeabilizantes dos aterros, principalmente a mistura de 25% que aproxima-se dos valores estudados por Silva (2017) para atender o critério de permeabilidade.

4.2 Caracterização físico química e mineralógica

A Tabela 4, apresenta um compilado dos resultados encontrados nas análises físicas, químicas e mineralógicas para o Snt e o Sbt.

Tabela 4- Caracterização físico-química e mineralógica

Solo	Composição Química (%)										Comp. mineralógica
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	Cl	Outros	Ensaio DRX
Snt	63	20	5	5	2	2	1	1	--	1	Quartzo
Sbt	62	21	10	1	1	3	1	--	1	1	Quartzo, Caulinita, Montmorilonita, Goetita e Nacrita
Solo	Química			Física					Classe Textural		
	pH a H ₂ O	CTC cmolc/kg	M.O (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Densidade (g/cm ³)				
Snt	7,9	17,3	0,377	68,4	26,3	5,3	2,68	Franco Arenosa			
Sbt	10,1	36,3	0,723	20,9	28,2	50,9	2,26	Argila			

Fonte: Própria da autora (2022).

As composições química e mineralógica do solo natural e do solo bentonítico foram determinadas através das análises de Fluorescência de Raios X (EDX) e Difração de Raios X (DRX). O teor de Sílica encontrado para o Snt e o Sbt foram 63% e 62% respectivamente, consistindo numa porcentagem significativa deste óxido na composição de ambos os solos.

O resultado encontrado se fundamenta pela presença das camadas tetraédricas de sílica, que conforme Carvalho (1997) compõem parte da estrutura do argilomineral esmectita, como comprova a composição mineralógica pela presença da montmorilonita. Além deste ainda foram encontradas amostras de Al₂O₃ e Fe₂O₃, compondo os principais constituintes de solos transportados de acordo com Marques (2014).

Já com relação à análise do solo bentonítico tem-se que a composição química deste é similar a de uma bentonita cálcica. No mais, a ausência do óxido de sódio e a presença significativa de magnésio e cálcio em sua composição, assim como relatam Silva et al. (2016) fundamentam a composição química de material mais próxima com a da bentonitas cálcicas, que possuem capacidade de expansão reduzida em comparativo com as sódicas.

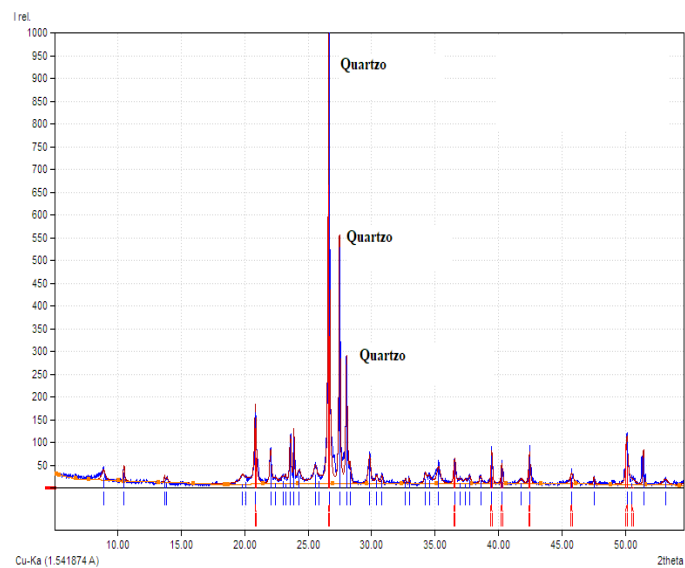
Além disso, de acordo com Tomio (1999) as bentonitas sódicas artificiais são produzidas através do tratamento das bentonitas cálcicas com uso da barrilha (carbonato de sódio), sendo tal processo muito comum no Brasil, visto que o país não possui bentonitas sódicas naturais. Vale ressaltar que os dados encontrados para o percentual de óxido de alumínio

(20,0%) são semelhantes aos valores dispostos nos trabalhos de Ferreira et al. (2013) e Cortes et al. (2018) para as argilas bentoníticas da região de Boa Vista-PB.

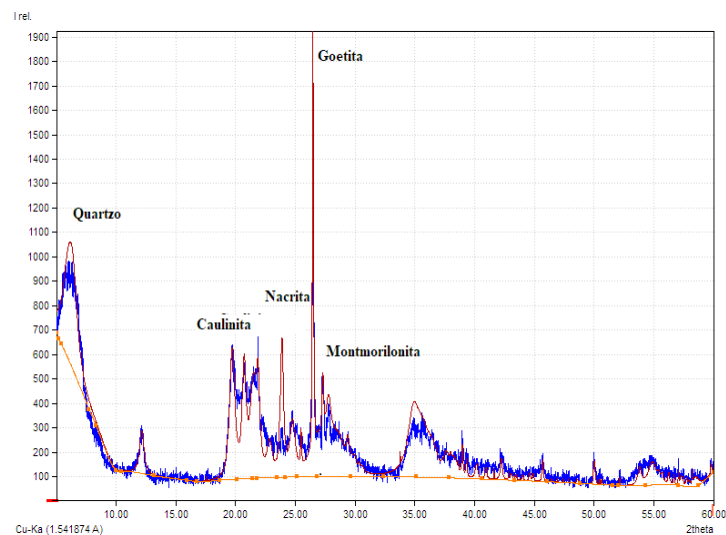
Pelo ensaio de DRX pode-se analisar quais minerais compunham os materiais da mistura. A Figura 24, ilustra os minerais encontrados para o solo natural (Figura 24-a) e para o solo bentonítico (Figura 24-b).

Figura 24 - Análises de DRX

a) Análises de DRX do Snt



b) Análises de DRX do Sbt



Fonte: Própria da autora (2022).

O solo natural se caracteriza por uma alta predominância de quartzo, como se pode observar pela grande predominância de picos deste mineral, tal resultado era esperado, visto o alto percentual de areia que este material possui e o elevado teor de sílica encontrado em sua

análise química. Como justifica Pinto (2006), este predomínio é característico de partículas de solos granulares, originados do intemperismo físico, não apresentando capacidade de adsorção de água.

Além disso, o ensaio de análise física deste material (Tabela 4) revelou que sua classe textural é franco arenosa e que este possui densidade de partícula de $2,68 \text{ g/cm}^3$ valor mais aproximado, do que no ensaio do picnômetro ($27,8 \text{ g/cm}^3$), para solos ricos em quartzos ($2,67 \text{ g/cm}^3$) conforme Carvalho (2004).

Outra característica marcante na Figura 24-a é a ausência de argilominerais, o que salienta a falta de plasticidade deste solo. O quartzo é um mineral abundante na crosta terrestre, tendo alta resistência ao intemperismo, bem como se caracteriza por uma capacidade de expansão bastante reduzida em comparação aos argilominerais.

Por meio da caracterização por difração de raio-x do material bentonítico (Figura 24b) se identificou que as principais fases cristalinas neste são quartzo, caulinita, montmorilonita, goetita e nacrita. A análise física desse solo, confirmou a grande presença de finos, principalmente de argila, e também em menor quantidade de material granular comprovada no difratograma de raios - x, no entanto este classificou-se como uma argila.

A presença de argilominerais influencia diretamente na expansividade do solo, visto por exemplo as montmorilonitas que apresentam alta capacidade de reter água e comportamento expansivo, além disso solos ricos nesse material tem característica indicadas para utilização em *liners*, principalmente pela redução da permeabilidade.

A análise do difratograma de raios - x dos solos ainda permite, conjuntamente com as análises de EDX, classificar esta argila como uma bentonita cálcica, ou seja, esta possui uma capacidade de expansão reduzida comparada às bentonitas sódicas. Tal confirmação se justifica pela presença de outros minerais, como a caulinita e o quartzo, por exemplo. Este dado é condizente ao encontrado por Lyra (2021).

Esta observação também se fundamenta nas discussões de Silva (2017), o qual fala que as caulinitas possuem baixa capacidade de retenção de água e pouca expansão. No mais a presença do quartzo na composição deste solo pode se dar pela forma de depósito a céu aberto em que este é submetido, que acaba por promover aumento de quartzo na composição do solo, devido algumas partículas serem transportadas pela ação do vento.

Ainda foram detectados picos de goetita e nacrita no solo bentonítico. A nacrita trata-se de um mineral de argila polimorfo da caulinita estando associada a presença desta ou do quartzo. Já a goetita, segundo Silva (2017), é um produto do intemperismo dos minerais de argila portadores de ferro, a qual explica a presença do óxido de ferro no ensaio de EDX.

De acordo com Lange (2012) o pH da maioria dos solos tropicais é baixo, caracterizando esses solos como ácidos, no entanto o solo natural possui pH de 7,9 e o solo bentonítico de 10,1. Baseado na classificação de Guimarães (2002) o Snt possui pH alcalino ($7,4 < \text{pH} < 8$) e do Sbt se classifica como fortemente alcalino ($\text{pH} > 8,0$). No entanto, os valores de pH conferem o uso de ambos como material para camada de base em aterros sanitários de acordo com o critério da CETESB ($\text{pH} > 7$).

A capacidade de troca Catiônica (CTC) está relacionada, segundo Ataíde (2017), à estabilidade do argilomineral. Para Buol et al. (1997) a CTC de um solo pode explicar propriedade como intemperismo, tipo de minerais argílicos e a expansividade, sendo que solos minerais com CTC maiores que 20 cmolc/Kg, têm potencial de apresentar altos teores de montmorilonita, configurando assim um solo expansivo. A EMBRAPA (2001) define como referência o limite de 27 cmolc/Kg para determinar valores altos de CTC dos baixos.

Assim, pela Tabela 4, o Snt (CTC = 17,3 27 cmolc/kg) apresenta baixa capacidade de troca catiônica e a bentonita (CTC = 36,3 27 cmolc/kg) apresenta alta capacidade (CTC > 27 cmolc/kg), o que se pode justificar pela presença do argilomineral montmorilonita. Ou seja, por apresentar maior CTC a bentonita tende a se expandir mais que o solo arenoso, no entanto a presença da montmorilonita confere baixa permeabilidade ao solo, fator interessante para utilização em *liners*.

De acordo com Paiva (2016), a quantidade de Matéria Orgânica (MO) regula a quantidade da CTC no solo controlando a permeabilidade. No entanto, o Sbt (M.O = 0,723 %) e o Sbn (M.O = 0,377%) não possuem resultado significativo de matéria orgânica. Conforme a EMBRAPA (1997), um solo rico em M.O deve apresentar M.O maior que 5%.

4.3 Ensaio edométrico - Índice de Expansão

A determinação do índice de expansão foi feita através do ensaio edométrico com uso de uma carga de 7 kPa inundada, a partir do qual se verificou a variação do corpo-de-prova. Segundo Diógenes (2021), quando o corpo de prova tem aumento de sua altura, a variação é considerada positiva.

A Tabela 5 dispõe dos valores de índice de expansão para as misturas e o solo bentonítico calculado por meio da equação 2. O solo natural, por ser arenoso, não apresenta expansão, não havendo assim necessidade de realizar o ensaio com esse material em estado puro.

Tabela 5- Resultados do índice de expansão com carga de 7 kPa para bentonita e as misturas

ÍNDICE DE EXPANSÃO (7 kPa)				
Material	Sbt	M5	M15	M25
E₁(%)	18,29	0,00	1,09	1,33

Fonte: Própria da autora (2022).

Por meio do critério de Seed et al. (1962) a bentonita tem grau de expansividade considerado alto (E_1 variando entre 5 e 25%). Com relação às misturas, de acordo com o disposto na tabela 5 o incremento de 5% de bentonita, não provocou nenhuma alteração no comportamento expansivo do solo, sendo considerada com grau de expansividade baixa.

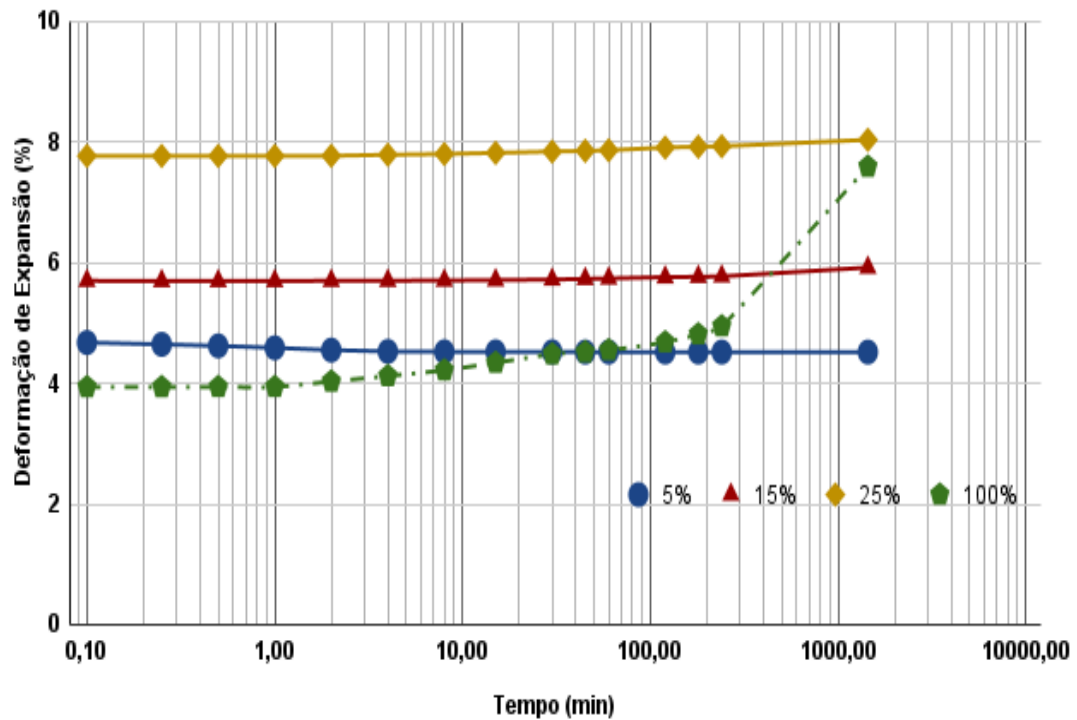
A mistura com proporção de 15% de argila bentonítica seguindo este critério apresentou potencial expansivo médio (E_1 variando entre 1 e 4%), no entanto o valor obtido de 1,09 é muito próximo dos valores considerados baixos. Já a mistura de 25% continuou assim como a M15 com expansividade média.

Embora o critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) tenha sido com uma carga de 10 kPa, a análise pode ser estendida aos dados deste estudo, porque a carga para o ensaio de expansão livre geralmente se comporta mais como uma carga de alocação, não modificando significativamente a análise geral da expansão. Assim, a bentonita foi considerada com expansividade muito alta ($E_1 > 10\%$), M5 continuou como baixa ($E_1 < 1\%$) e M15 e M25 seguem sendo médias (E_1 variando entre 1 e 4%).

A incorporação de bentonita ao solo natural segue a tendência de aumento do grau de expansão, no entanto este aumento não é muito significativo nas variáveis estudadas, sendo os estes valores baixos comparando aos encontrados por Thakur e Yadav (2018). Assim, o baixo potencial expansivo observado nas misturas, pode tornar viável a utilização do uso da bentonita como material complementar para utilização em camadas de base em aterros sanitários.

A Figura 25 ilustra o comportamento da variação de altura dos corpos de prova destes materiais com carga de 7 kPa ao longo do tempo.

Figura 25 – Representação gráfica da expansão livre da bentonita e das misturas (7 kPa)

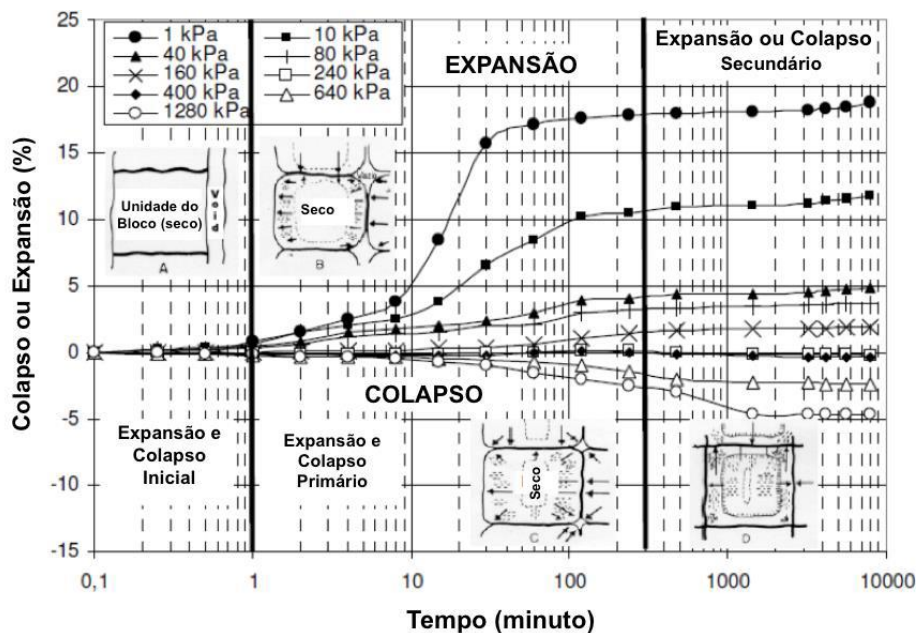


Fonte: Própria do autor (2022).

De acordo com Roo (2006) existem três fases para o processo de deformação e/ou colapso de um solo: Fase Inicial - acontece em intervalos de menos de 1 min, caracterizada por pequenas deformações no solo, visto que a água infiltra somente na periferia; Fase primária - ocorre no intervalo de 1 a 300 minutos, é nesta que a água se infiltra da periferia para o centro, umidificando o solo progressivamente, acontecendo assim deformações mais intensas. Fase secundária - inicia no intervalo superior a 300 minutos, e nesta fase que a água chega ao centro do núcleo, e os espaços vazios são quase completamente cheios de água e a velocidade da deformação diminui.

De forma geral, este conclui que as deformações iniciais se devem à microestrutura, enquanto que as deformações primária e secundária se associam a macroestrutura. Tal análise fica bem ilustrada no estudo de Ferreira e Ferreira (2009) ilustrado na Figura 26, abaixo.

Figura 26 – Comportamento de variação de deformação com o tempo sob tensão com avanço da frente de umedecimento: (a) há pequena alteração na umidade do solo; (b) há mudança de umidade na periferia do solo; (c) apenas o núcleo central mantém a umidade inicial; (d) há mudança de umidade em todo o solo.



Fonte: Ferreira e Ferreira (2009)

No gráfico ilustrado na Figura 25, ao se analisar o comportamento expansivo no decorrer do tempo, percebe-se que a maior parte da expansão ocorre nas primeiras horas do ensaio, no entanto, como as misturas apresentaram potencial de expansão relativamente baixo, esse comportamento é mais sutil, em contrapartida, na bentonita este fato é mais notório.

Costa (2005) relata que é neste período onde acontece a entrada de água no solo, ou seja, é quando a água penetra nos vazios e reduz as forças de atração entre as partículas de solo devido a sucção, sendo após a estabilização do fluxo de água que o solo atinge o patamar de equilíbrio de expansão devido às reações da sua estrutura, estabilizando assim seu volume.

Diante das discussões realizadas, os baixos valores de índices de expansão encontrados, justificam a consideração de que a bentonita utilizada na mistura é cálcica. Além disso, como observado nas análises de DRX essa apresenta minerais granulares, visto que Sbt não se trata de uma bentonita pura. No mais, o método de disposição deste material em campo favorece o aparecimento de minerais pouco expansivos devido a ação de intempéries, que se incorporam a este material.

Portanto, diante dos índices de expansão encontrados para as misturas estudadas, infere-se que estas não acarretariam problemas relacionados a variações de umidade, podendo ser utilizadas em *liners* de aterros sanitários. No entanto, a mistura com proporção de 25% é a mais indicada dentre as misturas analisadas para utilização em *liners*, diante do exposto no estudo de Silva (2017), principalmente para o critério de permeabilidade, sendo a proporção mais aproximada do valor de 29,68% indicado pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Este estudo concluiu que o comportamento expansivo do solo natural da região onde se localiza o ASCG com a adição de 5%, 15% e 25% de forma geral não apresentou valores de expansividade altos, característica que fundamenta a utilização de tais misturas como alternativa em camadas de base em aterros sanitários. No entanto, é válido ressaltar que a proporção de 25% se apresenta como a mais indicada a se utilizar principalmente com relação a permeabilidade, como indicam outros estudos da literatura.

Além disso, outros fatores devem ser analisados antes da implementação destas misturas nos aterros, visto que os solos possuem inúmeras propriedades que devem ser levadas em consideração para garantir o funcionamento eficiente das *liners*. Para mais, as características do solo da região onde está implantado o aterro sanitário devem ser avaliadas, principalmente na área estudada, que se destaca por uma maior ocorrência de solos bentoníticos, que apresentam potencial expansivo.

A caracterização geotécnica demonstrou que a adição de Sbt ao Snt acarreta aumento na plasticidade e porcentagem de finos do solo. A umidade higroscópica das misturas, assim como os resultados do ensaio de compactação evidenciaram que a bentonita possui uma alta capacidade de retenção de água, característica esta que aumenta conforme se eleva o percentual desta nas misturas.

A análise química, física e mineralógica dos solos puros fundamentara a característica do solo natural de não ser expansivo, bem como foram relevantes para classificar o incremento como uma bentonita cálcica, a qual possui característica expansiva bem menor comparada a bentonita sódica. Fator esse que influenciou não somente as características geotécnicas das misturas, como nos valores obtidos para o índice de expansão das misturas.

Os valores de índice de expansão foram baixos, o que demonstra que as proporções analisadas quando submetidas a variações de umidade, característica do clima regional

paraibano, não ocorreu excessiva expansão. Assim, a utilização da bentonita como material alternativo nas camadas de base dos aterros é considerada eficiente, sendo de acordo com as análises gerais deste estudo a proporção de 25% a que mais se aproxima das determinações expostas em diferentes conteúdos literários.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

- Determinar as tensões de expansão das misturas utilizadas no decorrer desta pesquisa;
- Correlacionar a permeabilidade das misturas com o índice e tensão de expansão dos solos;
- Avaliar o efeito da contaminação por lixiviado no comportamento expansivo de misturas de solo com bentonita;
- Obter correlações entre o índice de expansão e teor de bentonita por meio de ferramentas estatísticas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). **SUMÁRIO MINERAL 2017**. 37 ed. Brasília: Agência Nacional de Mineração, 2019.

AMORIM, L. V.; VIANA, J. D.; FARIAS, K.V.; BARBOSA, M. I. R. Estudo Comparativo entre Variedades de Argilas Bentoníticas de Boa Vista, Paraíba. **Revista Matéria**, v. 11, n. 1, p. 30 - 40, 2006.

AMORIM, L.V., PEREIRA, E. Bentonita da Paraíba: a exaustão de uma riqueza brasileira. **ABASInforma**, n. 147, mar. 2004.

ARAÚJO, P. S. **Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário. 2017. 139 fls.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABRELPE, p. 52, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 28 out. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **ABNT NBR 6.459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 10.004**: Resíduos Sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 13.896**: Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16853**: Solo – Ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, p. 20, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6.457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **ABNT NBR 7.180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **ABNT NBR 7.182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (ABNT). **ABNT NBR 7.181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 8.419:** Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: procedimentos: Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 9604:** abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – procedimento. Rio de Janeiro, 2016. 9p.

ATAIDE, S. O. F. Análise do comportamento de variação de volume devido à inundação de um solo expansivo quando misturado com areia. 2017. 117 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2017.

BENSON, C. H.; DANIEL, D. E. **Minimum thickness of compacted soil liners: I. stochastic models.** Journal Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 120 (1), p. 129-152, 1994.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental.** Oficina de Textos, 2008.

BOSCOV, M. E. G; SOARES, V.; VASCONCELOS, F. D; FERRARI, A. P . **Geotechnical Properties of a Silt-Bentonite Mixture for Liner Construction.** 2009 . Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Volumes 1, 2, 3 and 4). pag. 217 - 220, 2009.

BRANDL, H. **Mineral liners for hazardous waste containment.** Geotechnique, v. 42, n. 1, p. 57-65, 1992.

CARVALHO, J. B. Q. de. **Fundamentos da Mecânica dos Solos.** 1 ed. Campina Grande: Editora e Gráfica Marcone, 1997.

CARVALHO, J. C. JUNIOR, G. F. N. G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; FILHO, F. C. S. Propriedades Químicas, Mineralógica e Estruturais de solos naturais e compactados. In: CARVALHO, J. C. JUNIOR, G. F. N. G.; MACHADO, S. L.; MASCARENHA, M. M. A.; FILHO, F. C. S. (org.). **Solos não saturados no contexto geológico.** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), p. 39-78, 2015.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F. Monitoramento ambiental e geotécnico de aterros sanitários. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 7., 2016, Campina Grande. **Anais [...].** Disponível em: III-081 (ibeas.org.br). Acesso em: 04 jan. 2022.

CHAPUIS, R, P. **Sand-bentonite liners: predicting permeability from laboratory tests.** Canadian Geotechnical Journal, v. 27, p. 47-57, 1990.

CHEN, F. H. **Foundation on Expansive Soils.** New York: Elsevier, 463 p. 1988.

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

CORTES, G. R. M.; ESPER, F. J.; CARRARA, M.; ZACHARIAS, J. M. **Bentonitas do Brasil, características e usos**. In: Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 3., Workshop de Engenharia de Petróleo, 5., 2018, Salvador. **Anais [...]**. Disponível em: TRABALHO_EV104_MD1_SA98_ID32_13072018004212.pdf (editorarealize.com.br) . Acesso em: 11 jan. 2022 .

COSTA, O. P. **Avaliação de expansão, contração e resistência à compressão simples de barreiras selantes produzidas com solo laterítico estabilizado quimicamente**. 2005, 107 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) – Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira.

COSTA, W. W. M. L. **Estudo da permeabilidade em solos utilizados em camada de base de aterro sanitário no semiárido Paraibano**. 2019. 85 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2019.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilidade de solos residuais graníticos através da adição de cal**. 2001. Dissertação (Mestrado) Universidade de Minho, Portugal, 2001.

CUTRIM, A. A.; MARTÍN-CORTÉS, G. R., VALENZUELA-DÍAZ, F. R. **Bentonitas da Paraíba**. 1 ed.. Rio de Janeiro: Editora Interciência, p. 200, 2015.

DANIEL, D. E. **Geotechnical practice for waste disposal**. London: Chapman & Hall, 1993.

DIÓGENES, R. A. **Estudo da expansividade de solos: Um estudo de caso na UFC campus Russas**. 2021. 85 fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Russas - CE, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 2011.

EKLUND, A. G. **A Laboratory comparison of the effects of water and waste leachate on the performance in soil liners**. Hydraulic Barriers in soil and rock, p. 188-202, 1985.

FARNEZI, M. K. **Alternativa de melhoramento técnico de solos tropicais para uso em sistemas basais de selagem, através da aplicação de bentonita**. 2006. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2006.

FERREIRA, S. R. M. **Colapso e Expansão em Solos Naturais devido a Inundação**. 1995. 379 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, S. R. M.; FERREIRA, M. G. V. X. Mudanças de volume devido a variação de teor de umidade em um Vertisol no Semi-Árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), Viçosa, Minas Gerais, v. 33, p. 779-791, 2009.

FERREIRA, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 7., 2008, Salvador. **Anais**. v. 2. p. 593-619, Salvador, 2008.

- FRAZÃO, E. B. **Contribuição à metodologia para determinação da pressão de expansão em solos e rochas**. 1981. 71 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.
- GOMES, C. F. **Argilas: O que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 457 p., 1986.
- GOMES, N. A. **Análise da toxicidade do lixiviado gerado em uma célula do aterro sanitário em Campina Grande – PB**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2017.
- GRIM, R. E.; GUVEN, N. **Bentonites, geology, mineralogy, properties and use**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 256 p., 1978.
- GRIM, R. E. **Applied clay mineralogy**. New York: McGraw-Hill Publ. Company Ltda., 1962.
- GUIMARÃES, J. E. P. A. **Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2. ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2002.
- HOUSECROFT, C. E.; SHARPE, A. G. **Química Inorgânica**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 624 p. ISBN 978-85-216-2327-4.
- HUSE, K. **Estudo da influência da adição de bentonita em um solo areno-siltoso para uso como cobertura de aterros**. 2007. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 126p.
- IGNATIUS, S. G; FRAZÃO, E. B. **Estudo comparativo de metodologias para determinação de pressão de expansão em solos e rochas**. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 6., Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Fundações, 9., 1990, Salvador, **Anais** [...]. Salvador: ABGE, v. 2, p. 155-158, 1990.
- KABIR, M. H.; TAHA, M. R. **Assessment of physical properties of a granite residual soil as na isolation barrier**. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v.92c, 13pp, 2004.
- KARAKAN, E.; DEMIR, S. **Observations and findings on mechanical and plasticity behavior of sand-clay mixtures**. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 13, n. 19, 2020.
- KOCH, D. Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls. **Applied Clay Science**, v. 21, p. 1-11, 2002.
- LANGE, C. N. **Contaminação do solo e mobilidade de As, Cd, Mo, Pb e Zn em colunas de solo franco arenoso com cinza de carvão**. 2012. 165f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- LATIFI, N.; EISAZADEH, A.; MARTO, A.; MEEHAN, C. L. Tropical residual soil stabilization: a powder form material for increasing soil strength. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 827-836, 2017.

- LEE, H. C., WRAY, W. K. . **Techniques to Evaluate Soil Suction – A Vital Unsaturated Soil Water Variable**. Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soil, v. 2. Paris, France. Balkema. p. 615-622. 1995
- LEME, M. A. G; MIGUEL, M. G. Estudo Geotécnico de uma Mistura de Solos Utilizada em Liner de Aterros Sanitários. *In*: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 17. Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, 7.; Simpósio Brasileiro De Mecânica Das Rochas, 6.; Simpósio Brasileiro De Jovens Geotécnicos, 6., 2014, Goiânia. **Anais [...]**. Goiânia: Biblioteca Virtual da ABMS, 2014.
- LOCASTRO, J. K.; ANGELIS, B. L. D. Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 200-210, 2016.
- LUKIANCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- LUMMUS, J.L., AZAR, J.J., **Drilling Fluids Optimization A Practical Field Approach**. Oklahoma: PennWell Publishing Company, Tulsa, 1986.
- LYRA, M. V. M. **Alterações geomecânicas e mineralógicas de mistura solobentonita contaminada por lixiviado de aterro sanitário**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.
- MARTINS, L. A. **Influência da adição de bentonita em misturas alternativas para a utilização em barreiras impermeabilizantes de aterros sanitários**. 2017. 108 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, 2017.
- MAZZA, B. L. S. **Avaliação da formação de fissuras em camadas impermeabilizantes de aterros sanitários executadas com materiais alternativos**. 2019. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009, 75 p.
- MENEZES, R. R.; SOUTO, P. M.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; KIMINAMI, R. H. G. A.; FERREIRA, H. C. Argilas bentoníticas de Cubati, Paraíba, Brasil: Caracterização física-mineralógica. **Cerâmica**, v. 55, n. 334, p. 163-169, 2009.
- MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behavior**. 2. ed. New York: John Willey & Sons, Inc., 422 p., 1976.
- Morandini, T. L. C. **Solos Tropicais e Bentonita: Análise Geotécnica de Misturas com Ênfase na Abordagem Coloidal**. 2014. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia Universidade Federal de Ouro preto, Ouro Preto. 239 p.
- MOREIRA, F. G. S. M.; GUEDES, M. J. F.; AIRES, K. O. SILVA, D. L. M.; MELO, M. C. **Avaliação das concentrações de biogás na interface solo - Resíduo e no dreno central do Aterro Sanitário em Campina Grande - PB**. *In*: Congresso Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências II. , 2017, Campina Grande - PB.

NELSON, J.D., MILLER, D.J. **Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1992.

PAIVA, S. C. **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - PE e suas misturas com cal**. 2016. Dissertação (Tese de Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. Dissertação (Tese de Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos. 2004. 227p.

OLIVEIRA, A. G. d. S.; JESUS, A. C.; MIRANDA, S. B. **Estudo geológico-geotécnico dos solos expansivos da região do recôncavo baiano**. Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, 2., Geojovem, 2. 2006, Nova Friburgo. **Anais [...]**. Nova Friburgo, 2006.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. B. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 7. reimpressão, 2011.

PAIVA, S. C. **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca - PE e suas misturas com cal**. Dissertação (Tese de Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

PANDIAN, N. S.; NAGARAJ, T. S.; RAJU, PSR Narasimha. Permeability and compressibility behavior of bentonite-sand/soil mixes. **Geotechnical Testing Journal**, v. 18, n. 1, p. 86-93, 1995.

PINTO, C.S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1., 2006, 356p.

REGADÍO, M.; RUIZ, A. I.; RASTRERO, M. R.; CUEVAS, J. **Containment and attenuating layers: An affordable strategy that preserves soil and water from landfill pollution**. *Waste Management*, v. 46, p. 408-419, 2015.

ROCCA, A. C. C. et al. **Resíduos sólidos industriais**. 2. Ed. São Paulo: CETESB, 234 P., 1993.

ROO, S. M. **Identification and classification of expansive soils**. *In: AL-RAMS, A.A. & GOOSEN, M.F.A., eds. London: Taylor & Francis/Balkema, p. 15-24, 2006.*

ROWE, R, K; QUIGLEY, R, M. e BOOKER, J. R. **Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities**. London: E & FN SPON, 1995.

ROWE, R. K. **Barrier systems**. *In: Geotechnical and Geoenvironmental engineering handbook*. Ontario: Kluwer Academic Publishers, c. 25, p. 739-788, 2000. 25 p.

SAMAE. **Esquematização de um Aterro Sanitário de RSU**. Site. 2015. Disponível em: cogesan.com.br. Acesso em: 04 jan. 2022.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher. v. 1, 1989. 408p.

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

SILVA, A.; FERREIRA, H. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos** [Online], v. 3, n. 2, 2008. Disponível em: <http://www.dema.ufcg.edu.br/revista/index.php/REMAP/article/view/77/91>. Acesso em: 28 abr. 2018.

SILVA, C. F. **Estudo do Comportamento hidráulico de mistura solo - bentonita visando alternativa de emprego como sistema de proteção para aterros sanitários**. 2015. 114 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SILVA, D. L. M. et al. Influência da plasticidade e mineralogia do solo no desempenho de liners em aterros sanitários. *In*: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2016, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Disponível em: <https://www.confea.org.br/eventos/contecc/contecc-2016/civil>. Acesso em: 04 jan. 2022.

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

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.

SIVAPULLAIAH, P. V.; SRIDHARAN, A. e STALIN, V. K. Evaluation of bentonite and sand mixtures as liners. *In*: International CONGRESS ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNICS, 3., Lisboa, Portugal. **Anais [...]**. Rotterdam: Ed. Seco e Pinto, p. 17-21, 1998.

SIMÕES, G. F. CATAPRETA, C. A. A. MARTINS, H.L. Monitoramento Geotécnico de Aterros Sanitários - Trabalhos Realizados na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos da BR-040 em Belo Horizonte, MG. *In*: Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamento de Resíduos Sólidos, 2006, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: COOPE-UFRJ, 2006.

SHACKELFORD, C. D. *et al.* Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 18, p. 133-161, 2000.

SEED, H.B.; WOORDWARD, R.J. E LUNDGRAN, R. Prediction of swelling potential of compacted clays. **Proceedings ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, v. 88, p. 107-131, 1962.

SKEMPTON, A. W. The colloidal activity of clays. *In: International Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3., Switzerland. **Anais [...]**. v. 1, p. 57-61, 1953.

SOARES, V. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimento de fundo de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo (USP). São Paulo - SP, 2012.

THAKUR, Yatesh; YADAV, R. K. Effect of bentonite clay on compaction, CBR and shear behavior of narmada sand. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 5, n. 3, p. 2087-2090, 2018.

TOMIO, Alexandre. **A Mineração no Mercosul e o Mercado de Bentonita**. 1999. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999. 105 f.

TONNESEN, D. A.; LUZ, A.B; BERTOLINO, L. C. Caracterização e beneficiamento das bentonitas dos novos depósitos de Cubati e Pedra Lavrada-PB. *In: Simpósio De Minerais Industriais do Nordeste*, 2., 2010, Campina Grande. **Anais [...]**. Campina Grande: CETEM/UFPE, p. 31-38, 2010.

VILAR, O. M. **Notas de aula: Mecânica dos solos não saturados**. Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) – Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 1998.

VILAR, O. M.; FERREIRA, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos. *In: CARVALHO, J. C. et al. (orgs.). Solos não saturados no contexto geotécnico*. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica, cap. 15, p. 415-440, 2015.

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) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.