



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EFEITOS DE CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM NOS PARÂMETROS DE
TENSÃO DE EXPANSÃO E EXPANSÃO LIVRE DE UM SOLO EXPANSIVO

Larissa da Silva Oliveira

São Cristóvão
(2022)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EFEITOS DE CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM NOS PARÂMETROS DE
TENSÃO DE EXPANSÃO E EXPANSÃO LIVRE DE UM SOLO EXPANSIVO

Larissa da Silva Oliveira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE EM
ENGENHARIA CIVIL.

Orientador: DSc. Erinaldo Hilário Cavalcante.


São Cristóvão
(2022)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos 25 (vinte e cinco) dias do mês de julho de 2022, às 09h (nove horas), reuniram-se, por Webconferência, os membros da Comissão Examinadora, formada pelos professores doutores ERINALDO HILÁRIO CAVALCANTE (orientador – PROEC/UFS), GUILHERME BRAVO DE OLIVEIRA ALMEIDA (examinador interno ao Programa/UFS) e SÍLVIO ROMERO DE MELO FERREIRA (examinador externo à Instituição/UFPE), para a realização da Defesa de Dissertação ao Mestrado do trabalho intitulado “EFEITOS DE CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM NOS PARÂMETROS DE TENSÃO DE EXPANSÃO E EXPANSÃO LIVRE DE UM SOLO EXPANSIVO” da mestrand LARISSA DA SILVA OLIVEIRA. Após a apresentação da candidata e a arguição dos membros da supracitada Comissão, a candidata foi considerada **APROVADA**. Não havendo nada mais a tratar, eu, ERINALDO HILÁRIO CAVALCANTE, presidente da Comissão, lavrei e assinei a presente ata. As assinaturas dos demais membros da Comissão Examinadora ficam dispensadas nesta ata, uma vez que vêm anexadas a este documento suas declarações de participação nesta banca de defesa de dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/Universidade Federal de Sergipe, 25 de julho de 2022.

Documento assinado digitalmente
 ERINALDO HILARIO CAVALCANTE
Data: 25/07/2022 12:24:42-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. ERINALDO HILÁRIO CAVALCANTE
(participação a distância por webconferência)
(Presidente - Orientador)

Prof. Dr. GUILHERME BRAVO DE OLIVEIRA
ALMEIDA
(participação a distância por webconferência)
(Examinador interno ao Programa)

Prof. Dr. SÍLVIO ROMERO DE MELO
FERREIRA (participação a distância por
webconferência)
(Examinador externo à Instituição)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANEXO I
DECLARAÇÃO DE PARTICIPAÇÃO REMOTA EM BANCA
EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Declaro que no dia 25/07/2022, às 09 horas, participei, de forma remota, com os demais membros deste ato público, da banca examinadora de defesa de dissertação de mestrado da discente **Larissa Silva Oliveira**, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe – UFS. Considerando o trabalho avaliado, as arguições de todos os membros da banca e as respostas dadas pela discente, formalizo para fins de registro, minha decisão de que a discente está **Aprovada**.

Atenciosamente,



Documento assinado digitalmente
Guilherme Bravo de Oliveira Almeida
Data: 25/07/2022 16:17:41-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. GUILHERME BRAVO DE O. ALMEIDA
PROEC/UFS



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANEXO I
DECLARAÇÃO DE PARTICIPAÇÃO REMOTA EM BANCA
EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Declaro que no dia 25/07/2022, às 09 horas, participei, de forma remota, com os demais membros deste ato público, da banca examinadora de defesa de dissertação de mestrado da discente **Larissa Silva Oliveira**, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe – UFS.

Considerando o trabalho avaliado, as arguições de todos os membros da banca e as respostas dadas pela discente, formalizo para fins de registro, minha decisão de que a discente está **Aprovada**.

Atenciosamente,

Prof. Dr. SILVIO ROMERO DE MELO FERREIRA
DEC/UFPE

Dedico esta dissertação a minha mãe, Angela Maria, por todo incentivo e esforço para que a realização deste sonho fosse possível.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido a benção de chegar até aqui. A Ele seja toda a honra, glória e louvor para todo o sempre, amém.

A minha família, por não medirem esforços para realização deste sonho. Esta conquista também é de cada um de vocês.

Ao meu noivo, Ariel Linoan, por toda ajuda e contribuição dada no desenvolvimento desta pesquisa. Sua paciência, cooperação e auxílio foram cruciais para o êxito deste trabalho.

Ao meu orientador, professor DSc. Erinaldo Cavalcante, por orientar meus passos nessa árdua jornada. Enfim, conseguimos! Pesquisa concluída com esmero.

Aos professores DSc. Guilherme Almeida, DSc. Sílvia Ferreira e DSc. Paulo Burgos, pela assistência técnica prestada no desenvolvimento desta pesquisa.

A toda equipe do GeoPav, nas pessoas do técnico William Santos e da técnica Luíza Maria. O trabalho e cooperação de vocês foram indispensáveis para o sucesso deste trabalho.

Aos colegas de laboratório, que o GeoPav me presenteou, Silmara Nunes, Helen Mariana, Lucila Sales e Leandro Augusto, pelo apoio, ajuda e companheirismo.

Muito obrigada!

“Porquanto, toda casa é construída por alguém; no entanto, Deus é o supremo construtor de tudo”.

Hebreus 3:4 (KJA)

RESUMO

O solo expansivo é um típico exemplo de solo não saturado metaestável, fino, predominantemente argiloso e altamente plástico. Em sua composição mineralógica, a presença marcante de argilominerais instáveis do tipo 2:1, tais como a montmorilonita e a vermiculita, o torna susceptível a variações de volume. Mundialmente é um solo considerado problemático em decorrência dos danos que os efeitos da expansão e contração contínuas podem acarretar às obras construídas sobre eles. Quando umedecido, esse tipo de solo é capaz de apresentar elevado grau de expansão, que pode ser avaliado a partir da medição da expansão livre e da tensão de expansão. Quando ressecado, contudo, o solo expansivo se contrai e pode exibir grandes variações volumétricas. O fenômeno de expansão-contração de um solo expansivo é, portanto, cíclico e depende diretamente de um elemento deflagrador, especialmente a alteração da umidade. O clima, associado às variações sazonais de temperatura e umidade atua como fator favorável para desencadear as manifestações de um solo potencialmente expansivo. Desta forma, as regiões áridas e semiáridas apresentam maior suscetibilidade para sua ocorrência. *In situ*, o solo expansivo passa por diversos ciclos de umedecimento e secagem em decorrência dos sucessivos períodos de chuvas e estiagem. A literatura tem indicado que a variação sazonal de umidade pode influenciar na mudança de determinadas características geotécnicas de solos expansivos. Neste contexto, com esta pesquisa se propõe avaliar os efeitos que consecutivos ciclos de umedecimento e secagem podem ter sobre a tensão de expansão e a expansão livre de uma amostra de solo potencialmente expansivo. Para tanto, foram realizados ensaios de caracterização geotécnica, química, mineralógica e microestrutural da amostra. A expansividade do solo foi quantificada pelos ensaios de tensão de expansão – pelo método do carregamento após expansão, com sobrecarga de 0,5 kPa – e de expansão livre, ambos de forma cíclica, mediante a execução de oito ciclos contínuos de umedecimento e secagem. Os resultados mostraram que a amostra de solo ensaiada consiste de uma argila inorgânica de alta plasticidade (CH), com limites de Atterberg elevados e potencial de expansão muito alto. Os ensaios químicos evidenciaram que a amostra corresponde a um solo jovem composto por minerais primários e argilas silicatadas do tipo 2:1. A análise mineralógica identificou a presença dos argilominerais mica, esmectita, montmorilonita e caulinita e a observação microestrutural constatou características típicas de argilominerais pertencentes aos grupos da mica e da vermiculita. A avaliação da tensão de expansão e da expansão livre com base nos ensaios cíclicos comprovou a influência dos ciclos de umedecimento e secagem na tensão de expansão e expansão livre do solo. Concluiu-se que os maiores valores de tensão de expansão e expansão livre estão vinculados ao primeiro ciclo, e que o comportamento expansivo tende a diminuir com o aumento do número de ciclos de umedecimento e secagem.

Palavras-chave: Solo Expansivo; Ciclos de Umedecimento e Secagem; Tensão de Expansão; Expansão Livre.

ABSTRACT

Expansive soil is a typical example of unsaturated metastable, thin, predominantly clayey, and highly plastic soil. In its mineralogical composition, the notable presence of unstable argillominerals of the 2:1 type, such as montmorillonite and vermiculite, makes it susceptible to volume variations. Worldwide it is considered a problematic soil due to the damage that the effects of continuous swelling and shrinkage can cause to works built on it. When wet, this type of soil is able to present a high degree of expansion, which can be evaluated from the measurement of the swelling potential and the swelling pressure. When dry, however, expansive soil shrinks and can exhibit large volumetric variations. The swelling-shrinkage phenomenon of an expansive soil is therefore cyclical and directly dependent on a triggering element, especially the change in moisture. The climate, associated with the seasonal variations in temperature and moisture, acts as a favorable factor to trigger the manifestations of a potential expansive soil. Thus, arid and semi-arid regions are more susceptible to its occurrence. In situ, expansive soil goes through several wetting and drying cycles as a result of successive periods of rainfall and drought. The literature has indicated that seasonal variation in moisture can influence the change in certain geotechnical characteristics of expansive soils. In this context, with this study we propose to evaluate the effects that consecutive wetting and drying cycles can have on the swelling pressure and the swelling potential of an expansive soil specimen. To this end, geotechnical, chemical, mineralogical, and microstructural characterization tests of the specimen were performed. The soil expansiveness was quantified by swelling pressure tests - by the method of loading after expansion, with an overload of 0.5 kPa - and swelling potential, both in a cyclical manner, by performing eight continuous wetting and drying cycles. The results showed that the soil specimen tested consists of an inorganic high plasticity clay (CH), with high Atterberg limits and very high expansion potential. The chemical tests showed that the specimen corresponds to a young soil composed of primary minerals and silicate clays of the 2:1 type. Mineralogical analysis identified the presence of the argillominerals mica, smectite, montmorillonite and kaolinite, and microstructural observation found typical characteristics of argillominerals belonging to the mica and vermiculite groups. The evaluation of the swelling pressure and swelling potential based on the cyclic tests proved the influence of wetting and drying cycles on the swelling pressure and swelling potential of the soil. It was concluded that the highest values of swelling pressure and swelling potential are linked to the first cycle, and that the expansive behavior tends to decrease with the increase in the number of wetting and drying cycles.

Keywords: Expansive Soil; Wetting and Drying Cycles; Swelling Pressure; Swelling Potential.

SUMÁRIO

LISTA DE QUADROS E TABELAS	XII
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	XV
LISTA DE SÍMBOLOS	XVI
CAPÍTULO 1	18
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Justificativa.....	19
1.2 Objetivo Geral	20
1.3 Objetivos Específicos	21
1.4 Estrutura da Dissertação	21
CAPÍTULO 2.....	22
2 REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 Considerações Iniciais	22
2.2 Solo Expansivo	23
2.3 Registros de Ocorrência.....	25
2.4 Fatores Influenciadores.....	29
2.4.1 Fatores de Microescala	29
2.4.2 Fatores de Macroescala	32
2.5 Métodos de Identificação e Classificação	33
2.5.1 Métodos Indicativos	34
2.5.2 Métodos Orientativos	35
2.5.3 Métodos Quantitativos.....	37
2.6 Influência dos Ciclos de Umedecimento e Secagem.....	41
CAPÍTULO 3	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 Visita de Campo	49
3.1.1 Estudo do Local	49
3.1.2 Coleta de Amostras.....	50
3.2 Investigação Laboratorial	52
3.2.1 Caracterização Geotécnica e Compactação	52
3.2.2 Caracterização Química.....	53
3.2.2.1 Potencial de Hidrogênio.....	53

3.2.2.2	Teor de Matéria Orgânica	54
3.2.2.3	Complexo Sortivo do Solo.....	54
3.2.2.4	Óxidos do Solo.....	55
3.2.2.5	Adsorção de Azul de Metileno	56
3.2.3	Caracterização Mineralógica	59
3.2.4	Caracterização Microestrutural.....	60
3.2.5	Caracterização da Expansividade Cíclica.....	61
3.2.5.1	Confecção dos Corpos de Prova	61
3.2.5.2	Ensaio de Expansão Livre Cíclico	62
3.2.5.3	Ensaio de Tensão de Expansão Cíclico	64
CAPÍTULO 4	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	Caracterização Geotécnica e Compactação	67
4.2	Caracterização Química.....	71
4.3	Caracterização Mineralógica	74
4.4	Caracterização Microestrutural.....	75
4.5	Caracterização da Expansividade Cíclica.....	76
CAPÍTULO 5	88
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
5.1	Conclusões.....	88
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 2.1 – Critérios de Jimenez para os possíveis danos em estruturas.....	24
Quadro 2.1 – Registros de ocorrências de solos expansivos no Brasil (continua).	26
Quadro 2.1 – Registros de ocorrências de solos expansivos no Brasil (continua).	27
Quadro 2.1 – Registros de ocorrências de solos expansivos no Brasil (conclusão).	28
Tabela 2.2 – Características dos principais grupos de argilominerais.....	32
Tabela 2.3 – Métodos de identificação de solos expansivos.	34
Tabela 2.4 – Classificação do grau de expansão relacionada ao LL e ao IP.	35
Tabela 2.5 – Atividade de argila típicas dos principais grupos de argilominerais.	37
Tabela 2.6 – Potencial de expansão atribuído pelo Uniform Building Code (1979).....	38
Tabela 2.7 – Grau de expansividade baseado no índice de expansão e na tensão de expansão.	39
Tabela 3.1 – Ensaio de caracterização geotécnica e compactação.	53
Tabela 3.2 – Análise dos íons do solo.	54
Tabela 3.3 – Grau de atividade em função do coeficiente de atividade.	59
Tabela 3.4 – Picos de intensidade dos principais grupos de argilominerais.....	60
Tabela 4.1 – Características geotécnicas e de compactação do solo.	69
Tabela 4.2 – Potencial de expansão da amostra.	70
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios químicos.....	72
Tabela 4.4 – Resultado dos percentuais de óxidos no solo.	73
Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de adsorção de azul de metileno.....	73
Tabela 4.6 – Índices físicos iniciais do ensaio de expansão livre cíclico.....	76
Tabela 4.7 – Índices físicos e resultados do ensaio de tensão de expansão.	83
Tabela 4.8 – Deformações verticais e tensões de expansão correspondentes.	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Patologias decorrentes da expansão do solo de fundação.....	25
Figura 2.2 – Registro de ocorrência de solos expansivos no mundo.....	26
Figura 2.3 – Registros de ocorrência de solos expansivos no estado de Sergipe.	28
Figura 2.4 – Unidades elementares básicas dos argilominerais.	30
Figura 2.5 – Configuração estrutural dos principais grupos de argilominerais.....	31
Figura 2.6 – Fissuras de contração em solos expansivos.	33
Figura 2.7 – Eletromicrografias dos principais grupos de argilominerais.....	35
Figura 2.8 – Carta de Van der Merwe modificada por Williams e Donaldson.	36
Figura 2.9 – Zonas de predominância dos argilominerais na carta de plasticidade.	36
Figura 2.10 – Métodos usuais para determinação da tensão de expansão.....	39
Figura 2.11 – Modelo adaptado da célula edométrica convencional.	44
Figura 2.12 – Eletromicrografias do solo estudado por Al-Homould et al. (1995).....	45
Figura 2.13 – Eletromicrografias do solo estudado por Ma <i>et al.</i> (2020).....	46
Figura 3.1 – Plano de investigação geotécnica.....	48
Figura 3.2 – Localização de Nossa Senhora do Socorro-SE.	49
Figura 3.3 – Local de coleta.	50
Figura 3.4 – Condições do solo no dia da coleta.	51
Figura 3.5 – Amostras dispostas em bandejas metálicas.....	51
Figura 3.6 – Britador de mandíbula utilizado para o destorroamento primário da amostra.....	52
Figura 3.7 – Materiais utilizados no ensaio de adsorção de azul de metileno.....	56
Figura 3.8 – Sequência do ensaio de adsorção de azul de metileno.....	57
Figura 3.9 – Ponto de viragem do ensaio de adsorção de azul de metileno.	57
Figura 3.10 – Detalhes do ensaio de MEV.....	60
Figura 3.11 – Torrões utilizados na confecção dos corpos de prova.....	61
Figura 3.12 – Confecção dos corpos de prova.	62
Figura 3.13 – Fases do ensaio de expansão livre cíclico.	63
Figura 3.14 – Estrutura da câmara de secagem.	64
Figura 3.15 – Curva Expansão <i>versus</i> Tempo.....	65
Figura 3.16 – Estágio de secagem do ensaio de tensão de expansão cíclico.....	66
Figura 3.17 – Etapas do ensaio de tensão de expansão cíclico.....	66
Figura 4.1 – Curvas granulométricas.....	67
Figura 4.2 – Composições granulométricas da amostra.....	68

Figura 4.3 – Localização da amostra na carta de plasticidade.....	69
Figura 4.4 – Localização da amostra na Carta de Van der Merwe.....	70
Figura 4.5 – Curva de compactação.	71
Figura 4.6 – Difrátogramas de raios-X.	74
Figura 4.7 – Eletromicrografias da amostra.	75
Figura 4.8 – Espectrometria de dispersão.....	76
Figura 4.9 – Resultado do ensaio de expansão livre cíclico.....	77
Figura 4.10 – Fases da curva de expansão livre.	78
Figura 4.11 – Desenvolvimento da expansão livre em estágios de tempo.	78
Figura 4.12 – Expansão livre e percentuais de redução observados para cada ciclo.	80
Figura 4.13 – Variação de altura do corpo de prova no ensaio de expansão livre cíclico.....	81
Figura 4.14 – Percentuais de expansão e contração encontrados para cada ciclo.....	82
Figura 4.15 – Corpo de prova após o término do ensaio de expansão livre cíclico.	83
Figura 4.16 – Tensão de expansão e percentuais de redução observados para cada ciclo.	84
Figura 4.17 – Corpos de prova após o término do ensaio de tensão de expansão cíclico.	86
Figura 4.18 – Eventos observados no ensaio de tensão de expansão cíclico.	87

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CH	Argila inorgânica de alta plasticidade
CL	Argila inorgânica de baixa plasticidade
CP	Corpo de prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DRX	Difração de Raios-X
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FRX	Fluorescência de Raios-X
GeoPav	Laboratório de Geotecnia e Pavimentos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ITPS	Instituto Tecnológico e de Pesquisa do Estado de Sergipe
LACEM	Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas
LMDCEM	Laboratório Multiusuário do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais
MAQS	Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NEG	Núcleo de Estudos Geoquímicos
SAMA	Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente
SMP	Solução Tampão Shoe-Maker, Mclean e Patt
SUCS	Sistema Universal de Classificação de Solos
TRB	Transportation Research Board
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFS	Universidade Federal de Sergipe
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
WB	Método Walkley & Black

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Índice de atividade de argila de Skempton
A	Área
Al	Alumínio
C	Concentração
CA	Coeficiente de atividade
Ca	Cálcio
CTC	Capacidade de troca de cátions
D_{20}	Densidade real dos grãos
e	Índice de vazios
e_0	Índice de vazios inicial
H	Hidrogênio
h	Altura final do corpo de prova
h_0	Altura inicial do corpo de prova
IC	Índice de consistência
IE	Índice de expansão
IG	Índice de grupo
IP	Índice de plasticidade
K	Potássio
KCl	Cloreto de potássio
LC	Limite de contração
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
M	Massa molar
Mg	Magnésio
MO	Teor de matéria orgânica
N	Constante de Avogadro
Na	Sódio
P_{200}	Porcentagem da fração de solo passante na peneira de nº 200
P_F	Porcentagem dos grãos do solo $< 0,005$ mm

P.F	Perda ao fogo
PT	Potássio total
pH	Potencial de hidrogênio
S	Superfície específica
S _r	Grau de saturação
S _{r0}	Grau de saturação inicial
T _{argila}	Atividade de argila
V	Volume de azul
V _a	Valor de azul
Valor S	Soma de bases trocáveis
Valor V	Percentagem de saturação por bases
w	Umidade gravimétrica
w ₀	Umidade inicial
w _{ot}	Umidade ótima
δ _{exp}	Deformação de expansão
Δh	Deformação vertical
ρ _{d,máx}	Massa específica aparente seca máxima
ρ _{nat}	Massa específica natural
ρ _{seco}	Massa específica seca
σ _{exp}	Tensão de expansão

1 INTRODUÇÃO

O solo expansivo consiste em um típico exemplo de solo não saturado. Quando umedecido, apresenta elevados valores de expansão livre e tensão de expansão. Em sua composição há altos percentuais de argila, o que o classifica como um solo fino. Sua principal característica é a presença de argilominerais de estrutura do tipo 2:1, tais como montmorilonita e vermiculita. O processo de expansão e contração é responsável por diversas patologias nas obras construídas sobre o solo expansivo, o que o levou a ser conhecido mundialmente como um solo problemático.

Sabe-se que o solo expansivo é instável na presença de água e que sua expansão depende de um processo deflagrador, tal como a variação da umidade. O clima é um fator favorável para sua ocorrência. É comum encontrá-lo em regiões áridas e semiáridas, apesar de existirem registros de sua ocorrência no litoral Brasileiro (CAVALCANTE *et al.*, 2006; FERREIRA, 2007; GURGEL; SANTOS JÚNIOR, 2016).

De acordo com Fredlund, Rahardjo e Fredlund (2012) e Murthy (2010), há relatos da ocorrência de solo expansivo em diversos países, tais como a Austrália, Argentina, África do Sul, Canadá, China, Cuba, Egito, Espanha, Estados Unidos, Etiópia, Gana, Grã-Bretanha, Índia, Israel, Irã, Marrocos, México, Myanmar, Quênia, Turquia e Venezuela. Segundo Murthy (2010), estima-se para os Estados Unidos uma perda anual de mais de 4,5 bilhões de dólares em decorrência dos problemas causados pelo solo expansivo no país. Alguns exemplos de danos que o solo expansivo pode acarretar às obras apoiadas sobre ele são: curvaturas em pavimentos, fissuras em edificações, ruptura de taludes, desaprumo de pilares e de tubulações enterradas, entre outros (CAVALCANTE *et al.*, 2006; FERREIRA, 2007; SOARES; PIRES; CONTERATO, 2013).

No Brasil os primeiros estudos de identificação e caracterização do solo expansivo ocorreram no estado da Bahia, na década de 50, dada às dificuldades de implantação da rodovia federal BR-324, nos trechos que tangenciam a cidade de Feira de Santana à capital Salvador (SOBRAL, 1956). Desde lá, com a expansão territorial, diversos estados do Brasil registraram a presença de solos expansivos em seus territórios, com predominância para a Região Nordeste (CAMPOS; BURGO, 2004; ALVES *et al.*, 2015; CAVALCANTE JR, 2017; MORAIS, 2017; SILVA, 2020).

Acredita-se que o fenômeno da expansão e contração do solo expansivo está relacionado a uma série de eventos microscópicos e macroscópicos influenciados por razões de ordem naturais, antrópicas e ambientais. Na natureza, o solo expansivo passa por diversos ciclos de contração seguidos de expansão em decorrência dos períodos de seca e de chuvas respectivamente. A variação sazonal de temperatura e umidade consiste em um fator natural que influencia diretamente esse fenômeno. Contudo, ainda são poucos os estudos que avaliam sua relação com as alterações das características geotécnicas do solo expansivo.

Em se tratando de Brasil, tem sido crescente o número de pesquisas e publicações referentes ao solo expansivo. Contudo, em virtude da contemporaneidade da Mecânica dos Solos não Saturados como ciência, essa temática ainda dispõe de pontos importantes a serem abordados na geotecnia, que demandam estudos mais detalhados. Um deles são os efeitos cíclicos decorrentes da sazonalidade sobre as propriedades desse tipo de solo. Neste contexto, esta pesquisa visa contribuir com a literatura mediante a avaliação dos efeitos de consecutivos ciclos de umedecimento e secagem sobre os parâmetros de expansão livre e tensão de expansão de um solo potencialmente expansivo.

1.1 Justificativa

Sabe-se que a ocorrência de solos expansivos está diretamente correlacionada com o clima local e que o seu fenômeno de contração e expansão está associado às variações sazonais de temperatura e umidade. Logo, é se esperar que as características ou propriedades geotécnicas do solo expansivo sejam influenciadas pelos contínuos ciclos de umedecimento e secagem provocados pelas estações de chuva e estiagem. Entretanto, observa-se na literatura brasileira que poucas são as publicações onde a caracterização desse solo é realizada com base em mais de um ciclo de expansão (SILVA, 2019; ARAÚJO, 2020). Isto é, na maioria das vezes, o solo é umedecido uma única vez para incitar sua expansão e com auxílio de ensaios de laboratório é caracterizá-lo quanto à sua expansão livre, tensão de expansão e demais características de interesse. Por outro lado, em campo, os solos são submetidos a ciclos alternados, bem definidos, de períodos de chuva e de estiagem, situação muito comum na região Nordeste brasileira. De forma que, quando se faz ensaio com um único ciclo de expansão, pode ser que não se reproduza o que de fato acontece na natureza (*in situ*). A hipótese que se levanta é: será que inconscientemente, em escala de laboratório, tem-se desprezado o efeito que os ciclos de umedecimento e secagem provocam nas propriedades geotécnicas do solo expansivo? Os

ensaios de tensão de expansão e expansão livre que adotam apenas um único ciclo de expansão conseguem reproduzir o que de fato acontece na natureza?

Segundo Tripathy, Rao e Fredlund (2002), os ensaios de expansão livre cíclico em solos expansivos mostraram que o potencial de expansão vertical pode reduzir ou mesmo aumentar por um fator de dois quando comparado com o primeiro ciclo de expansão e contração. Portanto, a avaliação do comportamento expansivo do solo sem considerar flutuações sazonais cíclicas pode subestimar o potencial de expansão do solo, levando à ocorrência de danos nas estruturas construídas sobre solo dessa natureza.

Al-Taie *et al.* (2020) verificaram que amostras de solos expansivos apresentam valores mais elevados de expansão livre e tensão de expansão após o segundo ciclo de umedecimento e secagem, alterando o grau de expansão de “moderado” para “muito alto”. Estudos de Tripathy e Rao (2009), Tripathy, Rao e Fredlund (2002) e de Basma *et al.* (1996) também exibem resultados semelhantes para amostras de solos expansivos submetidas a ciclos de expansão total e contração total. Rao e Rao (2010) e Al-Homould *et al.* (1995), entretanto, indicaram que o solo sofre fadiga a cada ciclo, o que resulta em valores de expansão livre e a tensão de expansão menores. Ambos os estudos, contudo, relataram uma condição de equilíbrio nos valores de expansão livre e tensão de expansão após cerca de 4 a 5 ciclos consecutivos.

Desta forma, há indicações da literatura recente de que os constantes ciclos de umedecimento e secagem são responsáveis diretos por alterações dos valores de expansão livre e tensão de expansão de solos expansivos. Nota-se, contudo, que o Brasil, apesar de possuir um extenso número de registros de ocorrência dessa tipologia de solo, ainda não possui nenhum estudo análogo desenvolvido. Desta forma, a presente pesquisa buscou investigar os efeitos que a variação sazonal local de temperatura e umidade acarreta aos valores de expansão livre e tensão de expansão de um solo expansivo da região metropolitana de Aracaju-SE e comparar os resultados com estudos similares realizados em outros países.

1.2 Objetivo Geral

Investigar a influência de consecutivos ciclos de umedecimento e secagem nos parâmetros de expansão livre e tensão de expansão de um solo potencialmente expansivo da região metropolitana de Aracaju.

1.3 Objetivos Específicos

- Obter as características física, química, mineralógica e microestrutural de uma amostra de solo tipicamente expansivo, proveniente do município de Nossa Senhora do Socorro-SE;
- Avaliar o grau de expansão da amostra escolhida;
- Identificar se os valores de expansão livre e tensão de expansão sofrem alterações ao longo de consecutivos ciclos de umedecimento e secagem.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos compostos pelos seguintes itens:

- **Capítulo 1:** Apresenta introdução, justificativa, objetivos e estrutura do trabalho.
- **Capítulo 2:** Consta da revisão da literatura, com citações de trabalhos atuais sobre solos expansivos, os métodos disponíveis para sua identificação e classificação, propriedades geotécnicas e ensaios realizados sob a influência de cíclicos de umedecimento e secagem.
- **Capítulo 3:** Apresenta o plano de investigação realizado nesta pesquisa, o qual descreve detalhadamente cada procedimento realizado, bem como cada norma e método empregado.
- **Capítulo 4:** Dedicado à apresentação, análise e interpretação dos resultados obtidos, assim como as discussões relacionadas à comparação com os dados da literatura.
- **Capítulo 5:** São descritas as conclusões obtidas a partir dos resultados discutidos e interpretados no capítulo anterior, além de apresentar sugestões sobre o tema para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo é composto por seis subtópicos principais que exploram, de forma sucinta, os conceitos gerais pertinentes à temática “solo expansivo”. A revisão da literatura abrange a definição de solo expansivo como um solo não saturado, metaestável e problemático, prossegue com o detalhamento de suas principais características, indica os locais de ocorrência no Brasil e no mundo, comenta sobre os fatores influenciadores do mecanismo de expansão e contração, avança para a descrição dos métodos de identificação e classificação e culmina explanando sobre a influência dos ciclos de umedecimento e secagem nas propriedades geotécnicas de solos expansivos.

2.1 Considerações Iniciais

O solo constitui um sistema composto por múltiplas fases. Na natureza o solo pode se apresentar saturado com água ou ter seus vazios preenchidos por outros fluidos, como o ar. Em ambientes secos, as camadas superficiais do solo encontram-se sujeitas a poropressões negativas e uma provável dessaturação. As condições microclimáticas são o principal motivo que faz com que um depósito de solo seja não saturado. Circunstâncias antrópicas também podem resultar em um material não saturado, como o processo de escavação, remoldagem e recompactação do solo. Desta forma, solos não saturados ou solos com poropressões negativas podem ocorrer essencialmente em qualquer depósito geológico (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

Os solos não saturados apresentam a sucção como parâmetro de resistência, que por sua vez, é influenciada diretamente pelas variações climáticas. Em períodos de estiagem, qualquer solo que se encontre próximo à superfície do terreno pode apresentar elevado valor de sucção. Entretanto, com advento da precipitação a poropressão aumenta e tende a valores positivos, enquanto que o valor de sucção tende a zero. Como consequência da variação dos valores de sucção, o solo pode apresentar alterações de volume e de resistência ao cisalhamento. Os solos colapsíveis, por exemplo, são conhecidos por sua significativa perda de resistência e fenômenos de colapso após umedecimento. Os solos expansivos, por outro lado, exibem expansão ou expansão extrema quando umedecidos (FREDLUND; RAHARDJO; FREDLUND, 2012).

Os solos colapsíveis e expansivos compõem o grupo de solos não saturados metaestáveis referidos mundialmente como solos problemáticos. Eles estão relacionados com inúmeros problemas geotécnicos e sobre eles há inúmeros questionamentos. Esta revisão de literatura, por conseguinte, debruçará na problemática do solo expansivos, suas características e comportamento.

2.2 Solo Expansivo

O solo expansivo compreende um solo não saturado que apresenta grande instabilidade volumétrica. Sua terminologia está associada à sua elevada capacidade de se expandir quando lhe é permitido o livre acesso à água e de se contrair quando perde umidade. O solo expansivo apresenta altos percentuais de finos, plasticidade elevada e possui em sua composição mineralógica argilominerais do tipo 2:1. De acordo com Presa (1982):

O termo "solo expansivo" deve ser utilizado para se referir àqueles solos cuja constituição de preferência tem minerais de argila com estrutura lamelar potencialmente instáveis, tais como montmorilonita, vermiculitas, clorita, e combinações de camadas mistas destes minerais ou deles com outros. (PRESA, 1982, p. 145).

Conforme Ferreira (2007), “o caráter expansivo de um solo depende primeiramente do tipo de argila existente”. Segundo o autor, a montmorilonita e a vermiculita, são os argilominerais mais representativos. No entanto, a expansão do solo não decorre apenas de fatores intrínsecos: as condições ambientais em que o solo se encontra e as condições antrópicas a que são submetidos também contribuem com o potencial de expansão do solo.

Os solos expansivos são derivados de rochas ígneas (basaltos, diabases e gabros), onde há a decomposição de feldspatos e piroxênios e formação de montmorilonita, e de rochas sedimentares (folhelhos e calcários) em cuja composição há a presença do argilomineral montmorilonita. A profundidade de suas camadas pode ultrapassar os seis metros. A ocorrência de solos expansivos é comum em regiões cuja evaporação excede a precipitação, como regiões áridas e semiáridas. Em lugares com estações bem definidas, alternadamente úmidas e secas, esses solos expandem e contraem em ciclos regulares (FERREIRA, 2007; MURTHY, 2010).

Segundo Basma *et al.* (1996), as construções e pavimentos assentados em solos expansivos estão sujeitos a ciclos periódicos de expansão e contração do solo, com o advento das chuvas e do período de estiagem respectivamente. Como resultado inevitável é comum que se apareçam patologias nas estruturas, em especial nas mais leves.

Os problemas relacionados a solos expansivos tendem a gerar um elevado custo material e financeiro. Murthy (2010) relata que o solo expansivo está listado em segundo lugar, empatado com furacões e tempestades, entre os ricos naturais mais destrutivos dos Estados Unidos, em termos de prejuízo financeiro. De acordo com autor, a estimativa de perdas devido ao solo expansivo supera a 4,5 bilhões de dólares anuais. Conforme Mijango (2006): “Os efeitos dos solos expansivos não são tão dramáticos quanto os dos furacões e terremotos, porque eles só causam danos às propriedades, sem perda de vidas humanas (...)”.

Rao e Rao (2010) relatam que o território da Índia possui um quinto de sua área ocupada por solos expansivos e dezenas de milhões de rupias são gastas em reparos de estruturas danificadas. Os autores afirmam que o custo relativo à ocorrência desses solos no Reino Unido gira em torno de 150 milhões de libras esterlinas.

Nelson *et al.* (2015) alegam que as estruturas que mais sofrem com os solos expansivos são os edifícios leves e os pavimentos. Isso porque, os valores de tensão de expansão desses solos são consideravelmente elevados, muita das vezes maiores do que a carga que a estrutura descarrega no solo através de seus elementos de fundação. A exemplo, tem-se os registros de Simões (1991), para amostras de massapês da Bahia, com tensões de expansão da ordem de 2 MPa.

A Tabela 2.1 apresenta os critérios de Jimenez (1980) que correlaciona as tensões de expansão do solo com os possíveis danos que uma estrutura apoiada sobre ele pode sofrer.

Tabela 2.1 – Critérios de Jimenez para os possíveis danos em estruturas.

Tensão de expansão (kPa)	Possíveis danos
> 200	demolição
100-200	danos graves
50-100	fissuras importantes
20-50	fissuras pequenas
< 20	sem danos

Fonte: Jimenez (1980).

Consoante Murthy (2010), o solo expansivo tem sido designado como um risco geológico. Segundo o autor, os custos para reparar os problemas causados por solos expansivos são muitas das vezes inviáveis, já que, frequentemente os custos de reparo excedem ao custo original da construção. A Figura 2.1 apresenta algumas manifestações patológicas decorrentes da expansão do solo de fundação.

Figura 2.1 – Patologias decorrentes da expansão do solo de fundação.



(a) Fissuras no pavimento da BR-364, Rio Branco-AC. Fonte: Barbosa, Guimarães e Marques (2021).



(b) Ruptura da BR-101, km 88, Nossa Senhor do Socorro-SE. Fonte: Cavalcante Jr. (2017).



(c) Ruptura de viga baldrame, Santa Maria-RS. Fonte: Soares (2013).



(d) Desaprumo de pilares, Santo Amaro-SE. Fonte: Cavalcante (2006).



(e) Fissura e esmagamento de pilar, Sertão de Pernambuco. Fonte: Burgos *et al.* (2019).

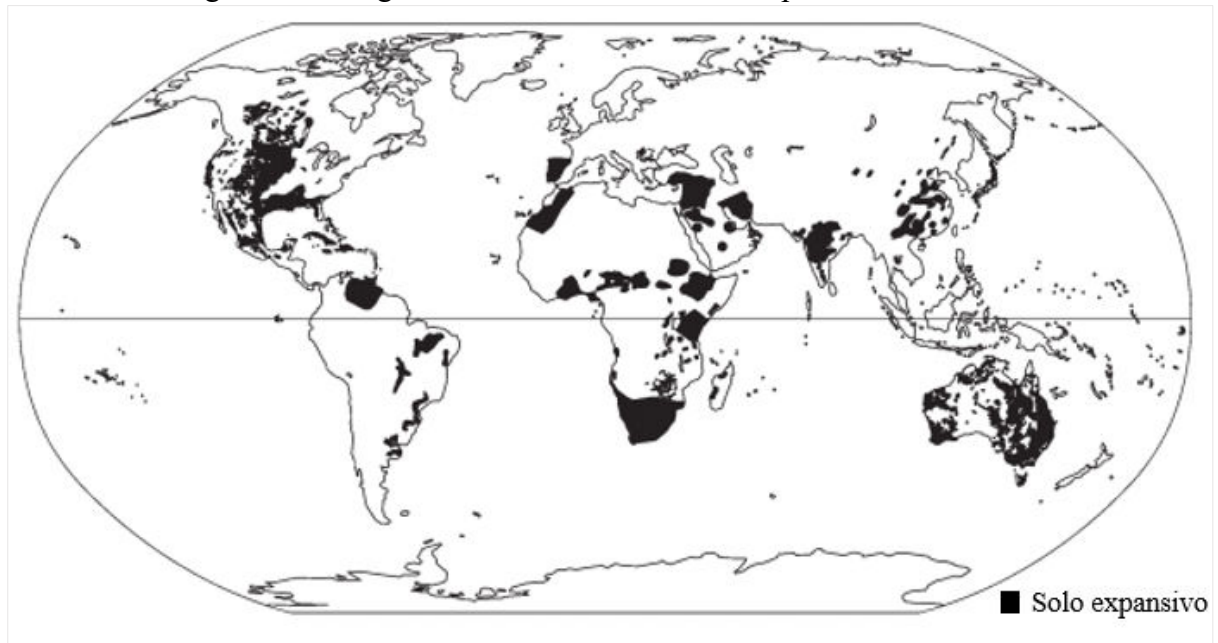


(f) Fissura em contrapiso, Tucano-BA. Fonte: Jesus e Pinto (2018).

2.3 Registros de Ocorrência

Devido aos danos que o fenômeno de contração e expansão acarreta nas estruturas, os solos expansíveis são tratados mundialmente como solos problemáticos. Nelson *et al.* (2015) afirmam que há relatos de solos expansivos nos seis continentes e em mais de 40 país em todo o mundo. A Figura 2.2 mostra a presença expressiva do solo expansivo no mapa mundial.

Figura 2.2 – Registro de ocorrência de solos expansivos no mundo.



Fonte: Nelson *et al.* (2015, p. 41).

Em termos de Brasil, há registros de ocorrência de solos expansivos em todas as suas cinco regiões. O Nordeste se destaca por apresentar incidência de solos expansivos em todos os seus estados. Pernambuco é o estado com o maior número de registros de locais de ocorrência de solos expansivos, seguido da Bahia e de Sergipe (SILVA *et al.*, 2020). O Quadro 2.1 mostra um vasto número de pesquisas correlacionadas com a identificação de solos expansivos no país.

Quadro 2.1 – Registros de ocorrências de solos expansivos no Brasil (continua).

Região	Estado	Local	Referência
Norte	AC	Rio Branco	Feres (1998), Barbosa, Guimarães e Marques (2021)
Nordeste	MA	Grajaú	Gusmão Filho <i>et al.</i> (2002)
		Paulo Dutra	Ferreira (1989)
	PI	Parnaíba	Riani e Barbara (1989)
		Picos	Silva <i>et al.</i> (2020)
		Teresina	Silva <i>et al.</i> (2020)
	CE	Icó	Chagas, Moura e Carneiro (2017)
		Juazeiro do Norte	Silva <i>et al.</i> (2020)
		Santana do Cariri	Batista (2021)
	RN	Natal	Santos Jr e Araújo (1999)
		Parelhas	Lins <i>Et al.</i> (1986)
	PB	Souza	Holanda (2019)
	PE	Afrânio	Ferreira (1989)
		Agrestina	Silva (2018)
		Bonito/	Silva (2019)
		Brejo da Madre de Deus	Bezerra (2019)

Quadro 2.1 – Registros de ocorrências de solos expansivos no Brasil (continua).

Região	Estado	Local	Referência
Nordeste	PE	Cabo de Santo Agostinho	Costa Nunes <i>et al.</i> (1982), Maia <i>et al.</i> (2018)
		Cabrobó	Ferreira (1989), Paiva e Ferreira (2011)
		Carnaíba	Ferreira (1988), Ferreira (1989)
		Cedro	Silva <i>et al.</i> (2020)
		Floresta	Gurgel e Santos Júnior (2016)
		Gravatá	Ferreira (1989)
		Ibimirim	Ferreira (1989)
		Igarassu	Silva <i>et al.</i> (2020)
		Inajá	Silva <i>et al.</i> (2020)
		Ipojuca	Paiva <i>et al.</i> (2016)
		Nova Cruz	Ferreira (1997)
		Olinda	Costa Nunes <i>et al.</i> (1982), Juca <i>et al.</i> (1992)
		Paulista	Ferreira (1989), Ferreira <i>et al.</i> (2017)
		Pesqueira	Silva e Ferreira (2007)
		Petrolândia	Aragão e Melo (1982), Ferreira e Ferreira (2009)
		Petrolina	Ferreira <i>et al.</i> (1989)
		Recife	Ferreira (1997)
		Reservatório de Itaparica	Signer <i>et al.</i> (1989), Vargas <i>et al.</i> (1989), Santos e Marinho (1990)
		Salgueiro	Ferreira (1989)
		Santa Maria da Boa Vista	Ferreira (1989), Marinho (2018)
		São Francisco	Leite e Ferreira (2012)
		Serra Talhada	Ferreira (1989)
		Suape	Ferreira <i>et al.</i> (2012), Oliveira e Ferreira (2012)
	AL	Maceió	Ferreira (1989)
	SE	Aracaju	Ferreira (1989), Cavalcante <i>et al.</i> (2006)
		Carmópolis	Cavalcante Jr <i>et al.</i> (2006)
		Laranjeiras	Gusmão Filho <i>et al.</i> (2002)
		Malhada dos Bois	Alves <i>et al.</i> (2015)
		Malhador	Silva <i>et al.</i> (2020)
		Nossa Senhora da Glória	Cavalcante Jr <i>et al.</i> (2006)
		Nossa Senhora do Socorro	Gusmão Filho <i>et al.</i> (2002), Alves <i>et al.</i> (2015)
		Poço Verde	Cavalcante <i>et al.</i> (2017)
		Propriá	Edificarse (2021)
		Rosário do Catete	Cavalcante Jr <i>et al.</i> (2006), Alves <i>et al.</i> (2015)
		Santo Amaro das Brotas	Cavalcante Jr <i>et al.</i> (2006), Cavalcante <i>et al.</i> (2017)
		São Cristóvão	Silva <i>et al.</i> (2020)
	BA	Amélia Rodrigues	Silva <i>et al.</i> (2020)
		Baía de Aratu	Barreto <i>et al.</i> (1982)
		Bom Jesus da Lapa	Ferreira (1990)
		BR 324: Feira de Santana-Salvador	Cabral <i>et al.</i> (2017), Oliveira <i>et al.</i> (2018)
		Camaçari	Silva <i>et al.</i> (2020)
		Candeias	Oliveira, Jesus e Miranda (2006)
		Feira de Santana	Presas (1986)
		Juazeiro	Ferreira (1989)

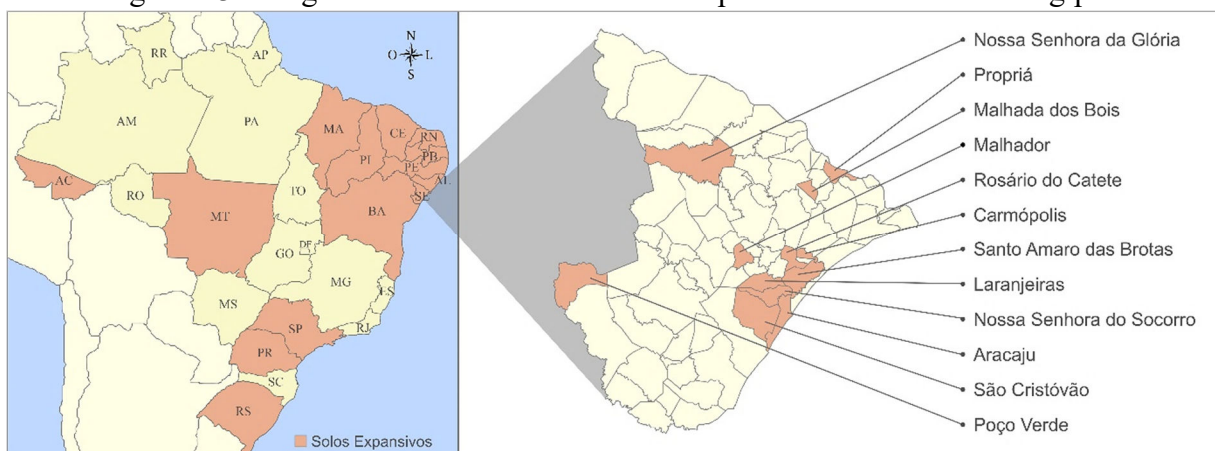
Quadro 2.1 – Registros de ocorrências de solos expansivos no Brasil (conclusão).

Região	Estado	Local	Referência
Nordeste	BA	Recôncavo Baiano	Simões e Costa Filho (1981), Simões (1986)
		Rodelas	Ferreira (1989)
		Salvador	Campos e Burgos (2004)
		Santo Amaro da Purificação	Oliveira, Jesus e Miranda (2006), Oliveira (2018)
		São Francisco do Conde	Oliveira, Jesus e Miranda (2006)
		São Sebastião do Passé	Silva <i>et al.</i> (2020)
		Simões Filho	Campos e Burgos (2004)
Centro-oeste	MT	Cuiabá	Ribeiro Júnior <i>et al.</i> (2006)
Sudeste	SP	Campinas	Samara (1981)
		São Paulo	Stankevicius (2019)
		Sudeste de São Paulo	Vargas <i>et al.</i> (1989)
Sul	PR	Campina Grande do Sul	Pereira e Pejon (2004)
		Colombo	Pereira e Pejon (2004)
		Curitiba	Pereira e Pejon (2004)
		Paraná	Vargas <i>et al.</i> (1989)
		Porto Alegre	Vargas <i>et al.</i> (1989)
		Quatro Barras	Pereira e Pejon (2004)
Sul	PR	Santa Maria	Maciel Filho e Osorio (1981), Soares, Pires e Conterato (2013)

Fonte: Adaptado de Ferreira (2007).

De acordo com Cavalcante Jr. (2017), Silva (2020) e EDIFICARSE (2021), o estado de Sergipe registra a presença de solos expansivos em 12 dos seus 75 municípios, como mostra a Figura 2.3. Com o avanço da construção civil no estado esse número tem crescido rapidamente e é de se esperar que novos locais sejam listados com a presença desse tipo de solo.

Figura 2.3 – Registros de ocorrência de solos expansivos no estado de Sergipe.



Fonte: Autora (2022).

2.4 Fatores Influenciadores

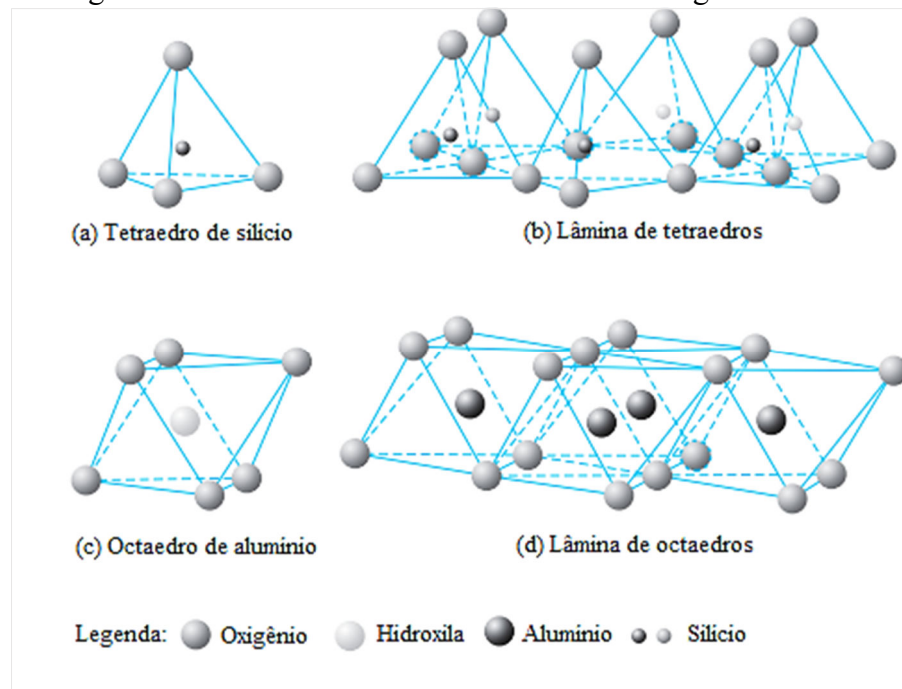
O mecanismo de expansão dos solos expansivos é complexo e influenciado por uma série de fatores. Nelson *et al.* (2015) dividem a análise dos aspectos do comportamento expansivo do solo em dois níveis: microescala e macroescala. Os fatores de microescala englobam a análise química, mineralógica e microestrutural do solo. Enquanto que a macroescala incluem as propriedades de engenharia, que por sua vez, são ditadas pelos fatores de microescala.

2.4.1 Fatores de Microescala

De acordo com Lambe (1969), a natureza e a disposição do arranjo estrutural das partículas do solo têm expressiva influência em suas propriedades de permeabilidade, compressibilidade, resistência e transmissão de tensões. Logo, a composição química das partículas individuais do solo revela-se uma característica de grande importância para compreensão do seu comportamento. Segundo o autor, o solo inorgânico é composto por diferentes minerais que podem ser agrupados em carbonatos, fosfatos, óxidos e silicatos. Todavia, para a engenharia civil, uma ênfase maior é dada ao grupo dos silicatos, uma vez que, este representa o grupo de minerais mais abundantes e importantes do planeta.

Os argilominerais são silicatos de alumínio hidratado mais íons metálicos. Sua estrutura é constituída por folhas de cristais que têm uma estrutura atômica repetitiva. Suas duas unidades elementares básicas são o tetraedro de silício e o octaedro de alumínio-magnésio. Eles são representados esquematicamente na Figura 2.4. A lâmina tetraédrica é basicamente uma combinação de unidades tetraédrica de silício que é composta por átomos de silício e oxigênio. O octaedro de alumínio-magnésio é formado por átomos de alumínio ou magnésio envoltos por hidroxilas. A sobreposição das unidades tetraédricas ou octaédricas forma dois tipos distintos de camadas, a 1:1 que resulta da sobreposição de uma lâmina tetraédrica com uma octaédrica e a 2:1 que consiste na justaposição de uma octaédrica com duas tetraédricas. As formas particulares de empilhamento destas unidades, com diferentes ligações e diferentes íons metálicos caracterizam os vários argilominerais existentes (HOLTZ; KOVACS; SHEAHAN, 2011; NELSON *et al.*, 2015).

Figura 2.4 – Unidades elementares básicas dos argilominerais.



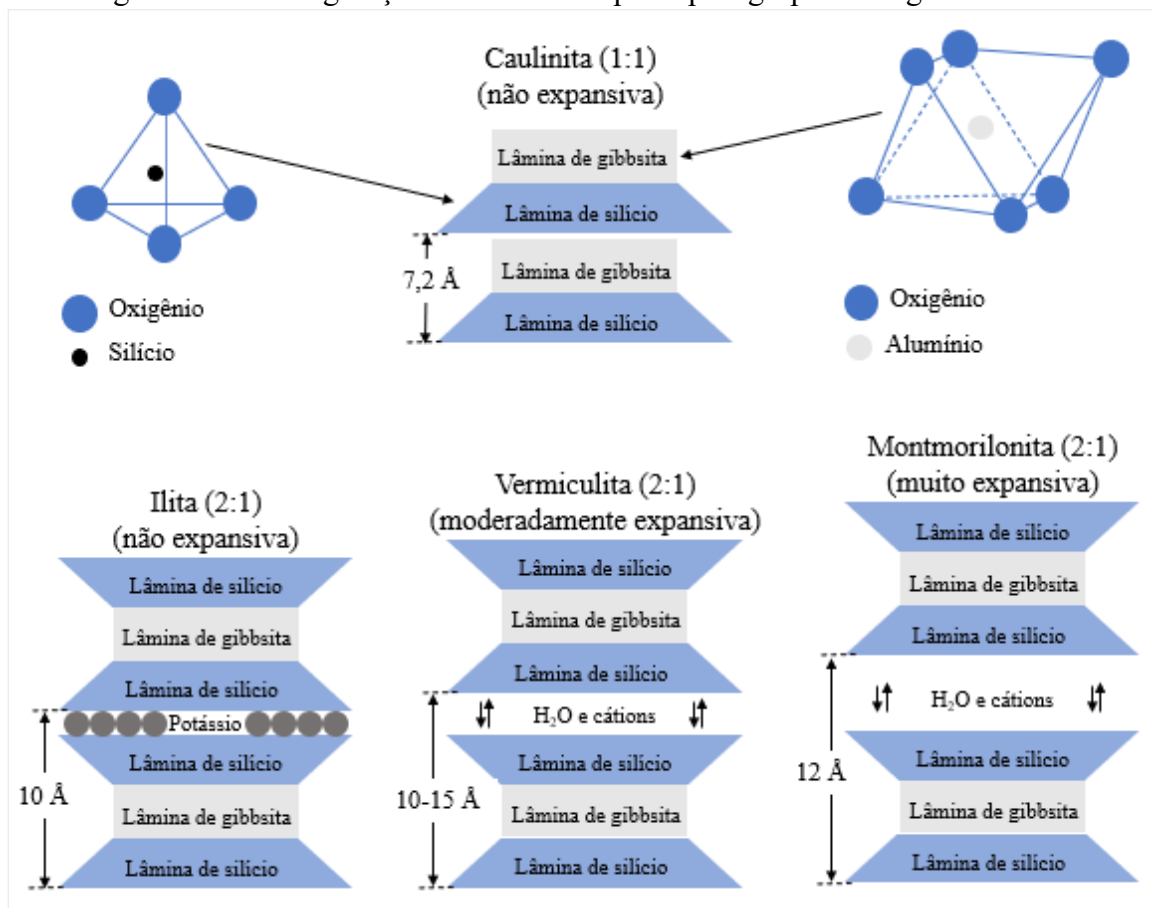
Fonte: Adaptado de Das e Sobhan (2014, p. 40).

De acordo com Santos (1975), Lepsch (2011) e Carvalho *et al.* (2015), os principais grupos de argilominerais existentes são:

- **Caulinita:** Argilominerais de estrutura 1:1, que em geral não são expansivos e que possuem baixa capacidade de troca de cátions.
- **Ilita:** Argilominerais de estrutura 2:1, com plasticidade intermediária, que podem ser expansivos, mas que geralmente não geram problemas significativos em estruturas.
- **Montmorilonita/esmectita:** Argilominerais de estrutura 2:1, dotados de elevada plasticidade, altamente expansivos e que exibem alta capacidade de troca de cátions. São os argilominerais mais ativos do solo e considerados os mais problemáticos.
- **Clorita:** Minerais primários tratados como argilominerais. Possuem estrutura 2:1, apesar de apresentarem características semelhantes a argilominerais do tipo 1:1.
- **Vermiculita:** Argilominerais, do tipo 2:1, semelhantes, em estrutura, à clorita e à montmorilonita. Apresentam expansão intermediária entre a ilita e a montmorilonita. Formam-se da alteração da mica e da clorita e são facilmente encontrados em vertissolos da região Nordeste.

O tamanho das partículas dos argilominerais é influenciado pela natureza de suas ligações entre o silício e as lâminas octaédricas. A Figura 2.5 apresenta um esquema da estrutura idealizada para caulinita, ilita, vermiculita e montmorilonita. De acordo com Lambe (1969), a caulinita é um argilomineral de duas camadas, de estrutura 1:1, enquanto que a ilita, a clorita, a vermiculita e a montmorilonita são composta por três camadas, sendo do tipo 2:1. O autor cita que a diferença da configuração da ilita para o montmorilonita está em que na ilita há uma carga líquida criada pelo processo de substituição isomórfica do átomo de silício pelo átomo de alumínio que é equilibrada pela presença de íons de potássio que atuam na ligação das três camadas.

Figura 2.5 – Configuração estrutural dos principais grupos de argilominerais.



Fonte: Adaptado de Lepsch (2011, p. 94).

A caulinita possui uma forte ligação entre o topo da lâmina de silício e a lâmina octaédrica gibbsita, o que a permite sustentar uma série de blocos de construção, e por isso, tende a ser relativamente grande. Em contraste, a montmorilonita apresenta ligações mais fracas, formadas por ligações de Van Der Waals. Em consequência, os cristais de montmorilonita podem ser muito pequenos, mas têm uma atração muito forte pela água. Os

solos que contêm montmorilonita são muito suscetíveis à expansão à medida que sua umidade aumenta e as tensões de expansão desenvolvidas podem facilmente danificar estruturas leves. A força da ligação da illita é resultado do compartilhamento dos cátions de potássio pelas lâminas adjacentes. Desta forma, a illita possui uma ligação mais forte que a montmorilonita e por isso, apresenta menos expansão (HOLTZ; KOVACS; SHEAHAN, 2011; NELSON *et al.*, 2015).

A configuração estrutural e o tipo de ligação química dos argilominerais contribuem diretamente com as propriedades de solos argilosos. As características das partículas e as propriedades de engenharia dos argilominerais pertencentes aos grupos caulinita, illita e montmorilonita são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características dos principais grupos de argilominerais.

Grupo	Partículas	Ligação entre camadas	Limites de Atterberg			S (m ² /g)	A _c
			LL (%)	LP (%)	LC (%)		
Caulinita	Flocos espessos e rígidos de 6 lados 0,1 a 4 x 0,05 a 2 µm	Ligações de hidrogénio	30-100	25-40	25-29	10-20	0,38
Illita	Placas finas, empilhadas 0,003 a 0,1 x 1,0 a 10 µm	Ligações de potássio	60-120	35-60	15-17	65-100	0,90
Montmorilonita	Fina, lamelar, flocos > 10 Å x 1,0 a 10 µm	Ligações de Van Der Waals	100-900	50-100	8,5-15	700-840	7,2

Fonte: Adaptado de Nelson e Miller (1992, p. 13).

2.4.2 Fatores de Macroescala

Os fatores de macroescala estão associados a eventos naturais e antrópicos. De acordo com Jaime e Ballinas (2010), clima, variação de umidade, massa específica, sobrecarga e atividade humana são fatores que afetam diretamente o potencial de expansão do solo. O clima está associado à variação sazonal de temperatura e umidade, o que justifica os maiores problemas de expansão estarem relacionados a climas áridos e semiáridos. A variação de umidade pode se dar de forma natural através da evaporação superficial e das precipitações, como também pode ser resultado da ação do homem, como por exemplo, a atividade de rebaixamento do lençol freático. Outras atividades humanas que afetam a expansão do solo é a realização de cortes que eliminam camadas superficiais protetoras ou desconfinam o solo. Um solo com massa específica aparente seca elevada e baixa umidade apresenta maior expansão do

que um solo com menor massa específica e com maior umidade. A sobrecarga das estruturas, por sua vez, pode restringir o potencial de expansão do solo, contudo, pavimentos e edificações leves transferem pequena sobrecarga ao solo, e por esse motivo estão mais suscetíveis a patologias estruturais.

2.5 Métodos de Identificação e Classificação

De acordo com Cavalcante *et al.* (2006) e Kalantari (2012), é relativamente fácil reconhecer os solos expansivos em campo, em especial durante os longos períodos de seca. Isto porque, eles apresentam elevada quantidade de fissuras em sua superfície, em decorrência da contração sofrida como consequência da perda de umidade. A Figura 2.6 exibe a aparência de solos expansivos nas estações secas.

Figura 2.6 – Fissuras de contração em solos expansivos.



a) Solo de Petrolina/PE.

Fonte: Ferreira e Ferreira (2009).



b) Solo de Aracaju/SE

Fonte: Cavalcante Jr. (2017).

A Tabela 2.3 apresenta os métodos usuais de identificação de solos expansivos apresentados por Vilar e Ferreira (2015). Eles são comumente separados em dois grupos: indiretos e diretos. No primeiro, como próprio nome sugere, encontram-se técnicas indiretas de investigação de propriedades e características comuns aos solos expansivos, tais como a presença de argilominerais com potencial de produzir expansão, índice de plasticidade (IP) e limite de liquidez (LL) elevados, atividade de argila (A_c) e capacidade de troca de cátions (CTC) altas, entre outros. Já o segundo grupo contempla ensaios que verificam diretamente a expansão do solo, bem como quantifica os percentuais e tensões de expansão.

Percebe-se que na primeira categoria muitos dos ensaios utilizados como critério de identificação não são familiares aos engenheiros geotécnicos, contudo, são rotineiramente utilizados por profissionais agrícolas e geólogos. Apesar deles não necessariamente serem

capazes de identificar se um solo é realmente expansivo, nem tão pouco quantificar a expansão do solo, eles atuam como indicadores bastante úteis, em especial quando correlacionados com cartas de suscetibilidade e redes neurais (SILVA, 2003; AQUINO, 2020; HOLANDA *et al.*, 2021). Desta forma, não devem ser desconsiderados pela comunidade geotécnica.

Tabela 2.3 – Métodos de identificação de solos expansivos.

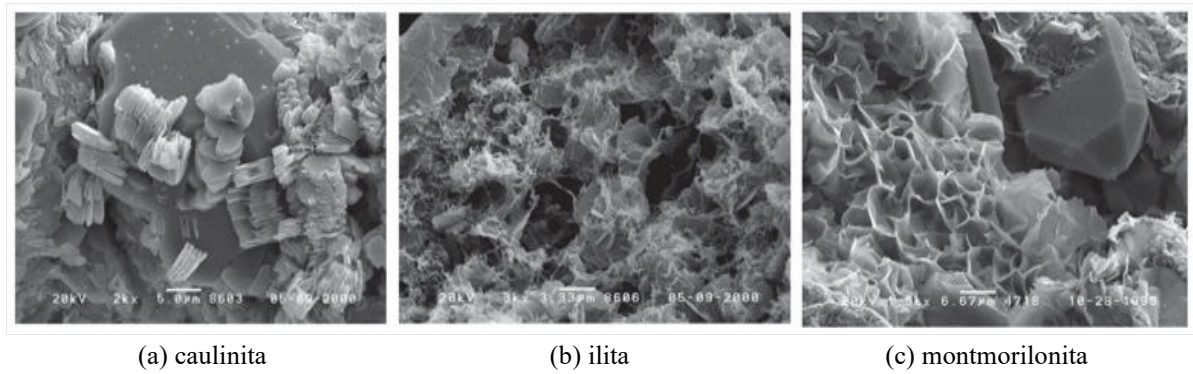
Método	Subdivisões	Critério
Indiretos	Indicativos	Difração de raios-X
		Microscopia eletrônica de varredura
		Análise termo diferencial
		Adsorção de etilenoglicol e glicerina
	Orientativos	Físico-químico
		Granulometria
		Consistência
		Índices físicos
	Qualitativos	Classificação geotécnica
		Geologia
		Geomorfologia
		Pedologia
Direto	Avaliativos	Identificação visual
	Quantitativos	Ensaio de expansão de Lambe
		Expansão livre
		Tensão de expansão
		Ensaio edométrico duplo e simples
		Ensaio de placa
		Expansocolapsômetro
		Ensaio edométrico de sucção controlada

Fonte: Schreiner, 1987; Ferreira, 1995 (*apud* VILAR e FERREIRA, 2015, p. 429).

2.5.1 Métodos Indicativos

A presença de argilominerais de estrutura 2:1, tais como os pertencentes aos grupos das montmorilonitas e vermiculitas, é um grande indicativo de que o solo é potencialmente expansivo. Os minerais do solo podem ser identificados através de análises químicas, microestruturais e mineralógicas. Entre os métodos químicos mais empregados encontram-se os ensaios de adsorção de azul de metileno, capacidade de troca catiônica, área de superfície específica (S) e potássio total (PT). Enquanto que a caracterização mineralógica e microestrutural é comumente realizada pelos ensaios de difração de raios-X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) respectivamente. A Figura 2.7 exibe eletromicrografias características dos argilominerais caulinita, illita e montmorilonita.

Figura 2.7 – Eletromicrografias dos principais grupos de argilominerais.



Fonte: Nelson *et al.* (2015).

2.5.2 Métodos Orientativos

Com base na caracterização física de amostras, os ensaios orientativos são amplamente utilizados para classificar os solos quanto ao seu potencial de expansão. Em sua maioria, os métodos utilizam os limites de Atterberg e/ou a percentagem da fração de argila para descrever qualitativamente o solo como possuindo grau de expansão baixo, médio, alto ou muito alto.

Como visto anteriormente, o argilomineral predominante influencia diretamente na plasticidade e expansividade do solo. Consequentemente, é de se esperar que exista uma correlação entre a plasticidade do solo com o seu potencial de expansão. Assim sendo, LL e IP elevados estão correlacionadas a altos potenciais de expansão.

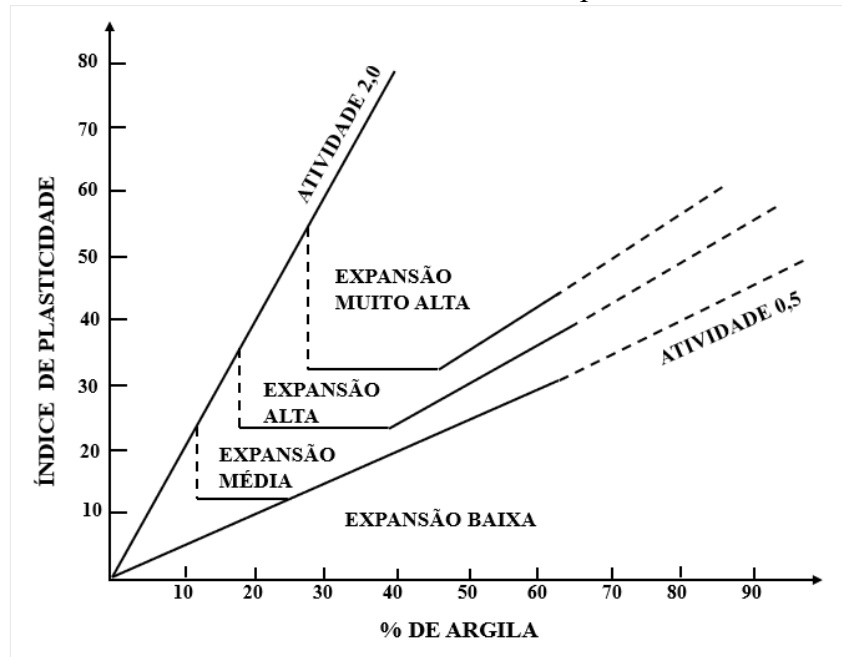
A Tabela 2.4 apresenta o grau de expansão atribuído por alguns autores com base no LL e IP do solo. A Figura 2.8 exhibe a carta de plasticidade de Van der Merwe modificada por Williams e Donaldson que trabalha com valores de IP e percentual da fração de argila para classificação do potencial de expansão do solo.

Tabela 2.4 – Classificação do grau de expansão relacionada ao LL e ao IP.

Grau de Expansão	Chen (1965)	Seed <i>et al.</i> (1962)	Dakshanamurthy e Raman (1973)	Kansas Highway Comission	Louisiana Departament of Transportation	
Muito alto	LL > 60	IP > 35	LL>70	*	LL > 70	IP > 46
Alto	$40 < LL \leq 60$	$20 < IP \leq 35$	$50 < LL \leq 70$	IP > 35	$50 \leq LL \leq 70$	$25 \leq IP \leq 46$
Médio	$30 \leq LL \leq 40$	$10 \leq IP \leq 20$	$35 < LL \leq 50$	$15 < IP < 35$	$20 \leq LL \leq 49$	$15 \leq IP \leq 24$
Baixo	LL < 30	< 10	$20 \leq LL \leq 35$	IP < 15 **		

*Não apresenta essa classificação. ** Onde se classifica como baixo, classifica-se como baixo à inexistente.
Fonte: Vilar; Ferreira (2015, p. 430) e Donald; Lawrence; David (1977, p. 8-9).

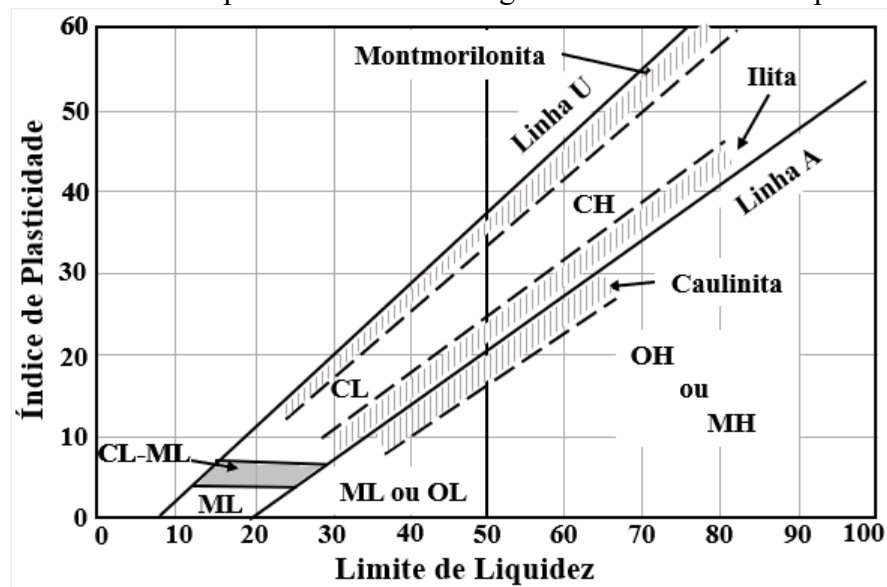
Figura 2.8 – Carta de Van der Merwe modificada por Williams e Donaldson.



Fonte: Pereira (2004).

Holtz, Kovcs e Sheahan (2011) apresentam na Figura 2.9 a carta de plasticidade sobreposta com zonas de predominância de grupos de argilominerais. A partir dela é possível perceber que o grupo da montmorilonita encontra-se próximo da linha U. Diante disso, presume-se que os solos expansivos apresentem a classificação CH (argila inorgânica de alta plasticidade), e quando classificados como CL (argila inorgânica de baixa plasticidade) seus valores de plasticidade encontram-se na vizinhança da linha U.

Figura 2.9 – Zonas de predominância dos argilominerais na carta de plasticidade.



Fonte: Adaptado de Holtz, Kovcs e Sheahan (2011).

A atividade de argila de Skempton (1953), descrita pela Equação 2.1, é um parâmetro amplamente empregado para avaliar a atividade da fração de argila presente em amostras de solo. Skempton dividiu as argilas em três classes de atividades: ativas ($A_c > 1,25$), normais ($0,75 < A_c < 1,25$) e inativas ($A_c < 0,75$). A Tabela 2.5 apresenta os valores típicos de atividade de argila dos principais grupos de argilominerais.

$$A_c = \frac{IP}{\% < 0,002} \quad (2.1)$$

Onde:

A_c = índice de atividade de argila de Skempton;

IP = índice de plasticidade;

$\% < 0,002$ = percentual da fração de solo menor que 0,002 mm.

Tabela 2.5 – Atividade de argila típicas dos principais grupos de argilominerais.

Argilomineral	A_c
Caulinita	0,33-0,46
Ilita	0,90
Montmorilonita (Ca)	1,5
Montmorilonita (Na)	7,2

Fonte: Skempton (1953).

Argilas ativas estão associadas a altos valores de potencial de expansão. Todavia, pesquisas (OLIVEIRA; COSTA, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2018; SILVA; FERREIRA, 2018; FERREIRA *et al.*, 2017; CAMPOS; BURGOS, 2004; OLIVEIRA; JESUS; MIRANDA, 2006) realizadas com solos altamente expansivos têm encontrado valores de A_c baixos, o que indica que a fórmula do índice de atividade de argila de Skempton muitas das vezes não retrata a real atividade da fração de argila do solo.

2.5.3 Métodos Quantitativos

O método usual para quantificar a expansão de uma amostra de solo é o ensaio de expansão livre e/ou potencial de expansão. Murthy (2010) define potencial de expansão como sendo o percentual de expansão obtido de uma amostra confinada lateralmente em um ensaio edométrico, saturada sob uma sobrecarga de 1 lb/in² (7 kPa). Por não possuir norma brasileira,

os laboratórios do país comumente utilizam as normas americanas ASTM D4829/2011 e ASTM D4546/2014.

O ensaio é basicamente um ensaio edométrico, onde uma amostra de solo é compactada ou esculpida em uma célula edométrica e levada à prensa. Sobre ela é aplicada uma sobrecarga mínima de ensaio (ensaio de expansão livre) ou sobrecarga de trabalho (ensaio de potencial de expansão) e instalado um extensômetro que aferirá sua expansão. As tensões de sobrecarga usuais são 1 kPa, 7 kPa e 10 kPa para amostras indeformadas e 50 kPa para amostras deformadas. A amostra é então saturada para que se estimule a expansão axial. Esta, por sua vez, é aferida até que se obtenha um valor constante em sucessivas leituras do extensômetro. O valor do índice de expansão é obtido por meio da relação entre a deformação vertical sofrida e altura inicial da amostra, como mostra a Equação 2.2.

$$IE = \frac{h - h_0}{h_0} \times 100\% \quad (2.2)$$

Onde:

IE = índice de expansão.

h = altura final do corpo de prova;

h₀ = altura inicial do corpo de prova.

O índice de expansão é utilizado pelo Uniform Building Code (1979) como critério de classificação do potencial de expansão do solo, conforme a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Potencial de expansão atribuído pelo Uniform Building Code (1979).

Índice de Expansão (%) Sobrecarga de 7 kPa	Potencial de Expansão
0-20	Muito baixo
21-50	Baixo
51-90	Médio
91-130	Alto
> 130	Muito alto

Fonte: Uniform Building Code (1979).

Seed *et al.* (1962), Chen (1965) e Vijayvergiya e Ghazzaly (1973) classificam o grau de expansividade do solo com base no IE e na tensão de expansão como mostra a Tabela 2.7.

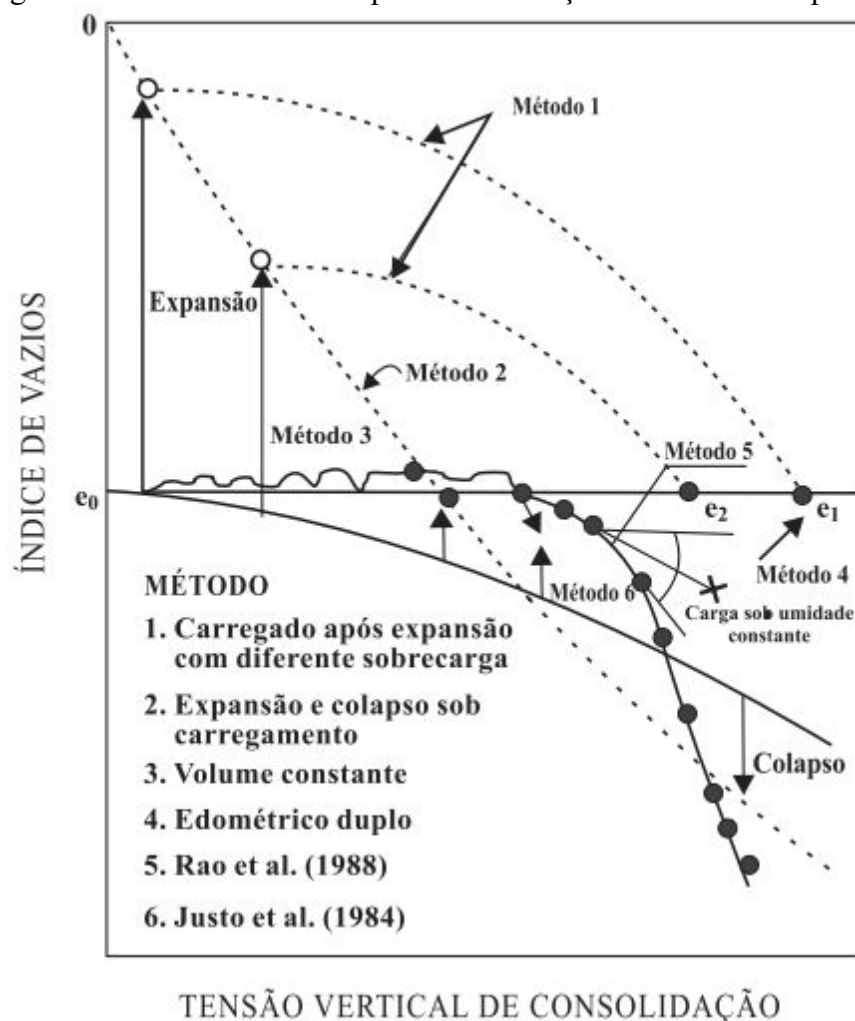
Tabela 2.7 – Grau de expansividade baseado no índice de expansão e na tensão de expansão.

Seed <i>et al.</i> (1962)	Vijayvergiya e Ghazzaly (1973)		Chen (1965)		Grau de expansividade
IE (%) 7 kPa	IE (%) 10 kPa	Tensão de expansão (kPa)	IE (%) 50 kPa	Tensão de expansão (kPa)	
0-1	< 1	< 30	< 1	< 50	Baixa
1-5	1-4	30-120	1-5	50-250	Média
5-25	4-10	120-300	5-10	250-1000	Alta
> 25	> 10	> 300	> 10	> 1000	Muito alta

Fonte: Vilar e Ferreira (2015, p. 430); Chen (1965).

Segundo Murthy (2010), o índice de expansão e a tensão de expansão medidas em laboratório diferem dos valores observados em campo. Os reais valores de campo são sempre menores do que os encontrados em laboratório. De acordo com Ferreira e Ferreira (2009) há diferentes métodos para avaliar em laboratório a tensão de expansão desenvolvida por um solo expansivo, sendo os mais aplicados apresentados na Figura 2.10 e descritos a seguir.

Figura 2.10 – Métodos usuais para determinação da tensão de expansão.



Fonte: Ferreira e Ferreira (2009).

Carregamento após expansão com diferentes sobrecargas

O método consiste em aplicar uma sobrecarga em uma amostra confinada lateralmente e submetê-la à expansão através da saturação do corpo de prova. A deformação vertical de expansão é medida até que seus valores se estabilizem. Em seguida, em intervalos de tempos predefinidos, são aplicadas novas sobrecargas à amostra até que esta retorne à sua altura inicial. A tensão de expansão do solo compreende ao somatório das cargas aplicadas dividido pela área da seção transversal do corpo de prova.

Expansão e colapso sob carregamento

Neste método são confeccionados no mínimo três corpos de prova que são submetidos à consolidação sob a aplicação de sobrecargas de valores diferentes, crescentes, pré-determinados. Após a consolidação, os corpos de prova são inundados e as deformações verticais observadas são medidas. Um gráfico em escala semi-log é confeccionado com a marcação dos pontos que corresponde à tensão aplicada (abscissa) e à deformação sofrida (ordenada). Sobre esses pontos é traçado uma reta. A tensão de expansão do solo é a tensão equivalente à deformação zero que é encontrada por meio de extrapolação gráfica.

Volume constante

No método de volume constante a amostra é posicionada na prensa edométrica e sobre ela é aplicada uma sobrecarga de trabalho. Em seguida, a amostra é inundada e à medida que ocorre a deformação vertical, incrementos de sobrecarga são aplicados para impedir a mudança de volume do solo. A tensão de expansão do solo é definida como a tensão necessária para manter a expansão em zero.

Ensaio edométrico duplo

Corresponde à realização do ensaio edométrico duplo e à obtenção de suas curvas. A tensão de expansão do solo é a tensão equivalente, no corpo de prova inundado, ao mesmo índice de vazios inicial do corpo de prova na umidade natural.

Rao *et al.* (1988)

O método apresentado por Rao *et al.* (1988) assemelha-se ao “volume constante”. Todavia, após atingir a tensão de expansão do solo continua a aplicação de novas sobrecargas como no ensaio edométrico convencional. A tensão de expansão do solo é encontrada por meio de procedimento gráfico similar à determinação da tensão de pré-adensamento de um solo saturado.

Justo *et al.* (1984)

Esse método determina a tensão de expansão do solo a partir de interseção das curvas de inundação sob tensão com a curva de umidade constante.

2.6 Influência dos Ciclos de Umedecimento e Secagem

As variações sazonais de precipitação e temperatura são consideradas fatores preponderantes para as constantes alternâncias de contração e expansão dos solos expansivos, em especial nas regiões áridas e semiáridas. Nessas áreas, durante o verão as altas temperaturas e a carência de chuva elevam os valores de sucção do solo, o que resulta em sua contração. Quanto mais longo for o período de seca, maior contração volumétrica será observada, o que acarreta em um emaranhado de fissuras na superfície do terreno.

Com elevado valor de sucção, o solo expansivo em contato com a água, quer seja pelo advento das estações chuvosas, quer seja por fatores antrópicos, tende a apresentar grandes valores de expansão. Esse comportamento de contração e expansão ocorre de forma cíclica e acompanha as variações locais de temperatura e umidade.

Medições *in situ* dos movimentos de expansão de solos devido às flutuações sazonais de umidade mostram que para uma determinada tensão de sobrecarga, a deformação que ocorre devido à expansão dos depósitos de argilas expansivas depende da temperatura ambiente e da exposição do solo a uma estação seca. Estudos indicam que o solo expansivo pode sofrer diferentes padrões de contração no campo. Estes podem mudar de uma contração menor para uma maior, isto é, dado um aumento da sucção do solo no fim do ciclo de contração ou de uma contração maior para uma menor, ou seja, uma diminuição da sucção do solo no final do ciclo de contração (HOLLAND *et al.*, 1980; ALLMAN *et al.*, 1998, *apud* TRIPATHY; RAO, 2009).

Em laboratório, pesquisadores têm buscado compreender as variações que ocorrem nas propriedades geotécnicas dos solos expansivos sob o efeito cíclico da variação de umidade. Por ciclo de umedecimento e secagem entende-se que a amostra de solo é umedecida e deixada livre para se expandir e depois é ressecada até seu teor de umidade inicial (ou valor menor) para que ocorra a contração. Em seguida, a mesma amostra é submetida a uma nova saturação e logo após atingir a expansão máxima ela é ressecada novamente. Esse processo se repete inúmeras vezes, sendo que a etapa de secagem pode ser realizada à temperatura ambiente ou à exposição direta ao sol ou até mesmo a uma temperatura controlada pré-determinada.

Al-Homoud *et al.* (1995) estudaram em laboratório o comportamento de seis amostras de solos expansivos da Jordânia sob o efeito de ciclos de umedecimento e secagem. Seus resultados indicaram que os consecutivos ciclos acarretam fadiga no solo. A expansão livre e a tensão de expansão diminuem com o aumento do número de ciclos. Para todos os solos, a redução mais acentuada das duas propriedades foi registrada após o primeiro ciclo. À medida que o número de ciclos aumenta, uma redução adicional é observada até que se constata um equilíbrio após cerca de 4 a 5 ciclos, onde os valores de expansão parecem se manter estáveis.

Basma *et al.* (1996) buscaram simular temperaturas de secagem típicas, tais quais *in situ*, para avaliar o comportamento de argilas expansivas sob sucessivos ciclos umedecimento e secagem. Para tal, adotaram dois esquemas de contração: parcial e total. O primeiro consiste em, após a expansão total, deixar a amostra secar ao ar até atingir a umidade inicial. O segundo esquema adota a secagem ao ar livre sob a luz solar para que o corpo de prova se contraía totalmente. Desta forma, a amostra tem a umidade reduzida ao seu limite de contração ou a valores abaixo dele. Como resultados, os autores relataram que os ensaios que adotaram a contração total resultaram em um aumento gradual do potencial de expansão (expansão livre e tensão de expansão) à medida que se aumentou o número de ciclos. Em contra partida, os ensaios com contração parcial revelaram uma redução no potencial de expansão com o avanço dos ciclos. Todavia, para ambos esquemas de contração, foi observado um valor de equilíbrio após o quinto ciclo.

Os resultados de Tripathy, Rao e Fredlund (2002) coincidem com os observados por Basma *et al.* (1996) ao identificar fadiga nas amostras submetidas a ciclos de expansão total-contratação parcial e acréscimo de deformações axiais nas amostras submetidas a ensaios cíclicos de expansão total-contratação total. Um equilíbrio também foi observado para ambos os casos após cerca de quatro ciclos.

A estabilização química com adição de cal, cimento e/ou cloretos são atualmente opções disponíveis para atenuar os potenciais de expansão de argilas expansivas. A durabilidade desses

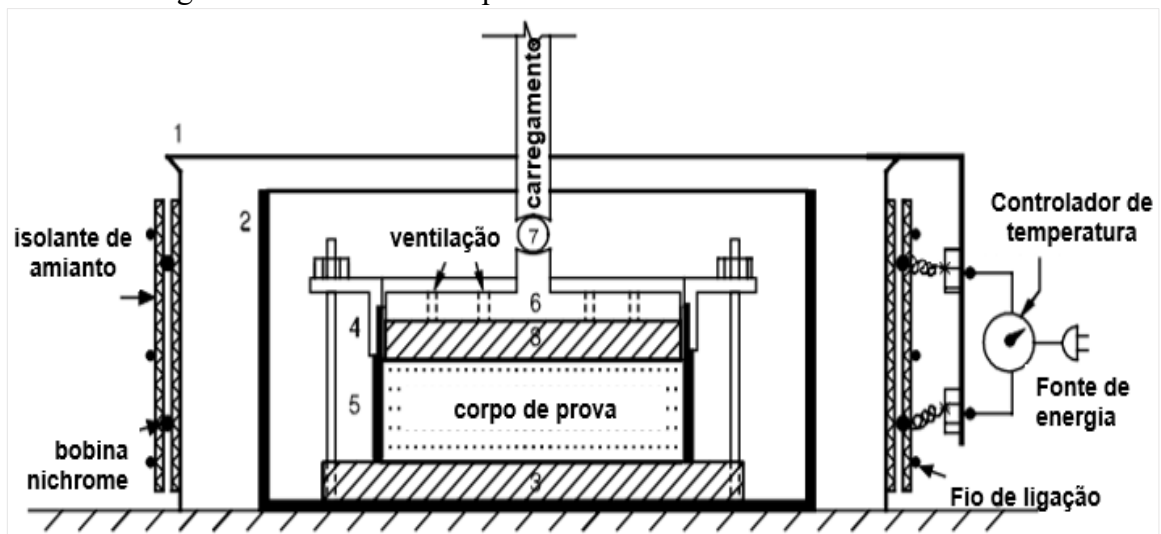
métodos, contudo, tem sido contestada contra ciclos de umedecimento e secagem. Al-Taie *et al.* (2020) identificaram que para solos expansivos estabilizados com cal na umidade ótima, massa específica aparente seca máxima e teor de cal inferior ao ideal (situação comum, dada a dificuldade de homogeneização da mistura em campo), a expansão máxima ocorre no segundo ciclo, convertendo a classificação de “argila expansiva moderada” para “argila muito expansiva”. O que sugere que é necessária uma revisão dos atuais procedimentos de projeto de pavimentação a fim de considerar os efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem nas propriedades de expansão e contração do solo, uma vez que eles podem estar subestimando grosseiramente o potencial de expansão-contração do solo.

Rao e Rao (2010), entretanto, observaram que o comportamento de expansão-contração de um solo expansivo estabilizado com cimento ou cal melhora a cada ciclo sucessivo de umedecimento e secagem. Al-Omari, Ibrahim e Al-Bayate (2010) certificam o mesmo com a adição de cloreto de potássio a argilas expansivas. De acordo com os autores, os ciclos de umedecimento e secagem não alteram a tendência natural do solo de diminuição do potencial de expansão a cada ciclo. O que sugere que os íons de potássio estão fortemente ligados à superfície das folhas minerais.

Os métodos empregados pelos autores para dessecar as amostras de solos nos ensaios de expansão livre e tensão de expansão foram diversos. Al-Homoud *et al.* (1995) fizeram o uso da secagem ao ar, Basma *et al.* (1996) adotaram secagem ao ar em ambiente fechado e ao ar livre sob à incidência de luz solar, enquanto que Rao e Rao (2010) optaram pela construção de uma câmara de secagem que tivesse sua temperatura controlada termostaticamente. Para ambas técnicas, entretanto, é necessário a retirada do corpo de prova do aparelho edométrico. Tripathy, Rao e Fredlund (2002) e Tripathy e Rao (2009), todavia, conseguiram manter o corpo de prova no aparelho edométrico durante a secagem a partir de uma adaptação da célula convencional. A configuração adotada por eles é apresentada na Figura 2.11.

A adaptação consiste em uma célula edométrica de anel fixo colocada dentro de um recipiente de aço inoxidável (camisa externa). A face externa da camisa contém uma bobina de 1 kW de capacidade colada entre duas folhas de amianto flexível que servem como isolante. As duas extremidades da bobina são conectas a conectores de porcelana, aos quais é fornecida energia através de um termostato que controla a temperatura desejada.

Figura 2.11 – Modelo adaptado da célula edométrica convencional.



1 - Camisa externa de aço inoxidável; 2 - camisa de água; 3 - pedra porosa inferior; 4 - anel exterior; 5 - anel de amostra; 6 - disco de pressão; 7- bola de pressão; 8- pedra porosa superior. Fonte: Tripathy, Rao e Fredlund (2002).

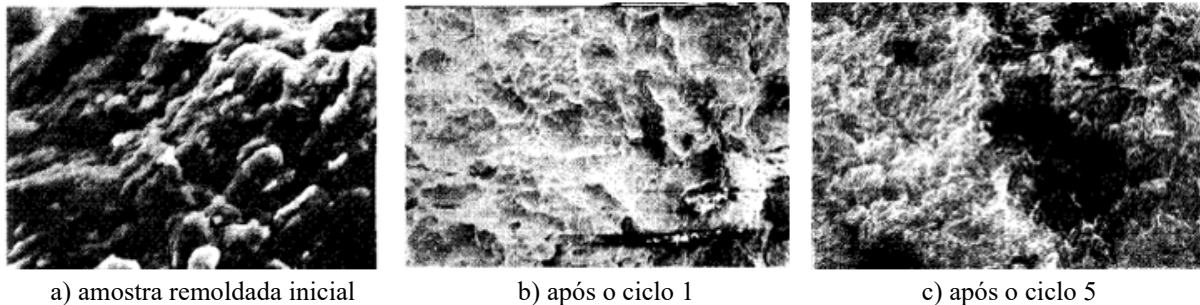
Tripathy, Rao e Fredlund (2002) analisaram curvas de expansão-contração de solos expansivos compactados. Seus resultados indicaram que a trajetória de expansão e contração de corpos de prova submetidos à contração total trata-se de uma curva em forma de “S” (três fases: duas porções curvilíneas e uma porção linear). Porém, corpos de prova submetidos à contração parcial apresentaram a trajetória de expansão e contração com apenas duas fases (uma curvilínea e outra linear). Os autores relatam que a curva de expansão e contração é reversível em termos de umidade e índice de vazios. Isso se dá quando o corpo de prova atinge uma condição de equilíbrio, onde deformações verticais durante a expansão e a contração são as mesmas.

Basma *et al.* (1996) avaliaram as mudanças na microestrutura da argila sob a luz da microscopia eletrônica de varredura, antes e após os ciclos de umedecimento e secagem. Foi observado que os sucessivos ciclos de umedecimento e secagem levam a uma destruição gradual dos contatos da estrutura da argila, ao passo que proporciona uma reconstrução e reorientação da estrutura dos microagregados. Em amostras em regime de contração parcial, observou-se uma tendência de formação de um sistema floculado turbulento, que diminui a capacidade de absorção de água e consequentemente o comportamento expansivo do solo. No regime de contração total, todavia, foi observado uma orientação horizontal das partículas de argila, que proporciona maiores forças de repulsão entre as partículas no processo de umedecimento e como resultado o comportamento de expansão aumenta.

As eletromicrografias obtidas por Al-Homoud *et al.* (1995), apresentadas na Figura 2.12, entre os sucessivos ciclos de umedecimento e secagem, também exibiram um rearranjo

contínuo das partículas de argila. Onde foi observado uma menor orientação dos elementos estruturais, com diminuição dos números de vazios e agregação de partículas de argila. O que, segundo os autores contribuiu para a diminuição do teor de argila e da plasticidade (LL e IP) das amostras entres os ciclos iniciais e finais. Sendo, portanto, a justificativa para redução das características de expansão.

Figura 2.12 – Eletromicrografias do solo estudado por Al-Homould *et al.* (1995).



Fonte: Al-Homould *et al.* (1995).

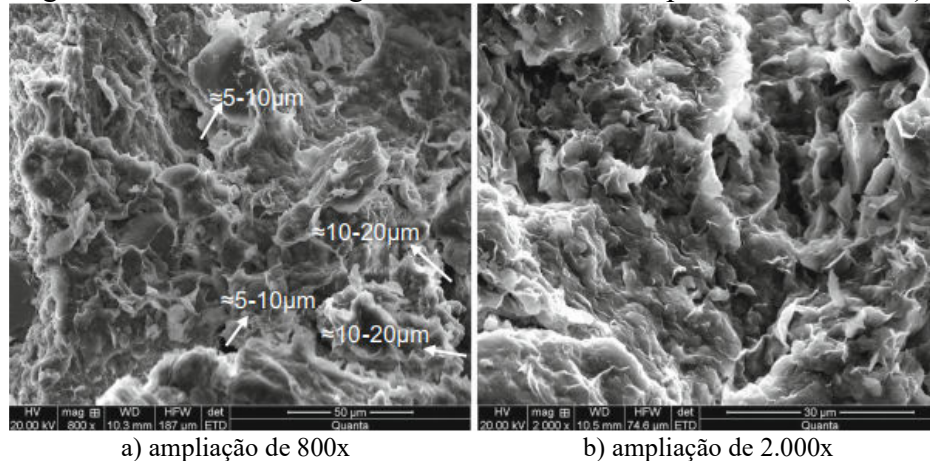
A investigação ultrassônica realizada por Basma *et al.* (1996), para solos submetidos a ciclos de umedecimento e secagem, sob ciclos de contração parcial e total, indicaram que a velocidade da onda que passa através da amostra que se contrai parcialmente aumenta com o número de ciclos e diminui quando é transmitida através de uma amostra que é levada à contração total. Esse resultado é associado respectivamente à diminuição e ao aumento dos vazios aparentes nos solos devido à contração parcial e total.

Wei e Dong (2020) examinaram em microescala a influência dos ciclos de umedecimentos e secagem na propriedade de expansão livre de uma amostra deformada de solo expansivo pelo emprego de ressonância magnética nuclear. Foi observado que os ciclos de umedecimento e secagem aumentam o volume dos macroporos e exerce pouca influência sobre os microporos. Os microporos são convertidos em macroporos devido à perda de partículas finas e de partículas cimentantes solúveis em água. À medida que os macroporos aumentam, a expansão livre do solo diminui.

Ma *et al.* (2020) estudaram as evoluções microestruturais de uma argila expansiva em ciclos de umedecimento e secagem. Foi avaliada a distribuição do tamanho dos poros via porosimetria de intrusão de mercúrio, com auxílio de imagens de MEV. Segundo os autores, o solo é constituído de microporos e macroporos, como mostra a Figura 2.13. Quando o solo entra em estado saturado, há um aumento da macroporosidade com a diminuição da microporidade. O inverso ocorre quando o solo é levado a secar: os macroporos reduzem consideravelmente, sendo compensado por um aumento da microporosidade. Isto se dá pela agregação de

partículas, onde macroporos são transformados em microporos. Segundo os autores, contudo, com a diminuição da sucção do solo, a mudança da estrutura dos poros torna-se irreversível, incluindo os microporos que apresentaram deformações permanentes.

Figura 2.13 – Eletromicrografias do solo estudado por Ma *et al.* (2020).



a) ampliação de 800x

b) ampliação de 2.000x

Fonte: Ma *et al.* (2020).

Silva (2019) trabalhou com ciclos de umedecimento e secagem para avaliação do processo de propagação de fissuras de solos expansivos. A pesquisa constou de três etapas de secagem e duas de umedecimento. Foram utilizados corpos de prova moldados em placas de Petri, com diâmetros de 140 mm e 70 mm e altura de 20 mm. De acordo com a autora, as etapas de secagem são responsáveis por formação de fissuras no solo, enquanto que o processo de umedecimento favorece a redução dessas fissuras. Foi constatado, porém, que uma vez formada as fissuras, independentemente de suas reduções, com a etapa de umedecimento, não há a recuperação total do solo.

Araújo (2020) também estudou o processo de propagação de fissuras em solo expansivo sob a influência de ciclos de molhagem e secagem. O autor, contudo, trabalhou com ensaios de laboratório e de campo. Em sua pesquisa, verificou-se que no período de secagem há o aparecimento de fissuras, que tem seus índices geométricos aumentados com o avanço da dessecação até atingir a estabilização. Na etapa de umedecimento, entretanto, essas fissuras tendem a se fechar, com fechamento parcial das fissuras principais e fechamento completo de algumas fissuras secundárias. Porém, a cada novo ciclo de secagem, novas microfissuras se formam a partir das fissuras pré-existentes, interligando umas às outras, o que diminui o fator de intensidade de fissura.

Outra análise feita por Araújo (2020), em modelo reduzido em laboratório, foi o estudo do comportamento de estacas granulares ancoradas submetidas a ensaios de arrancamento

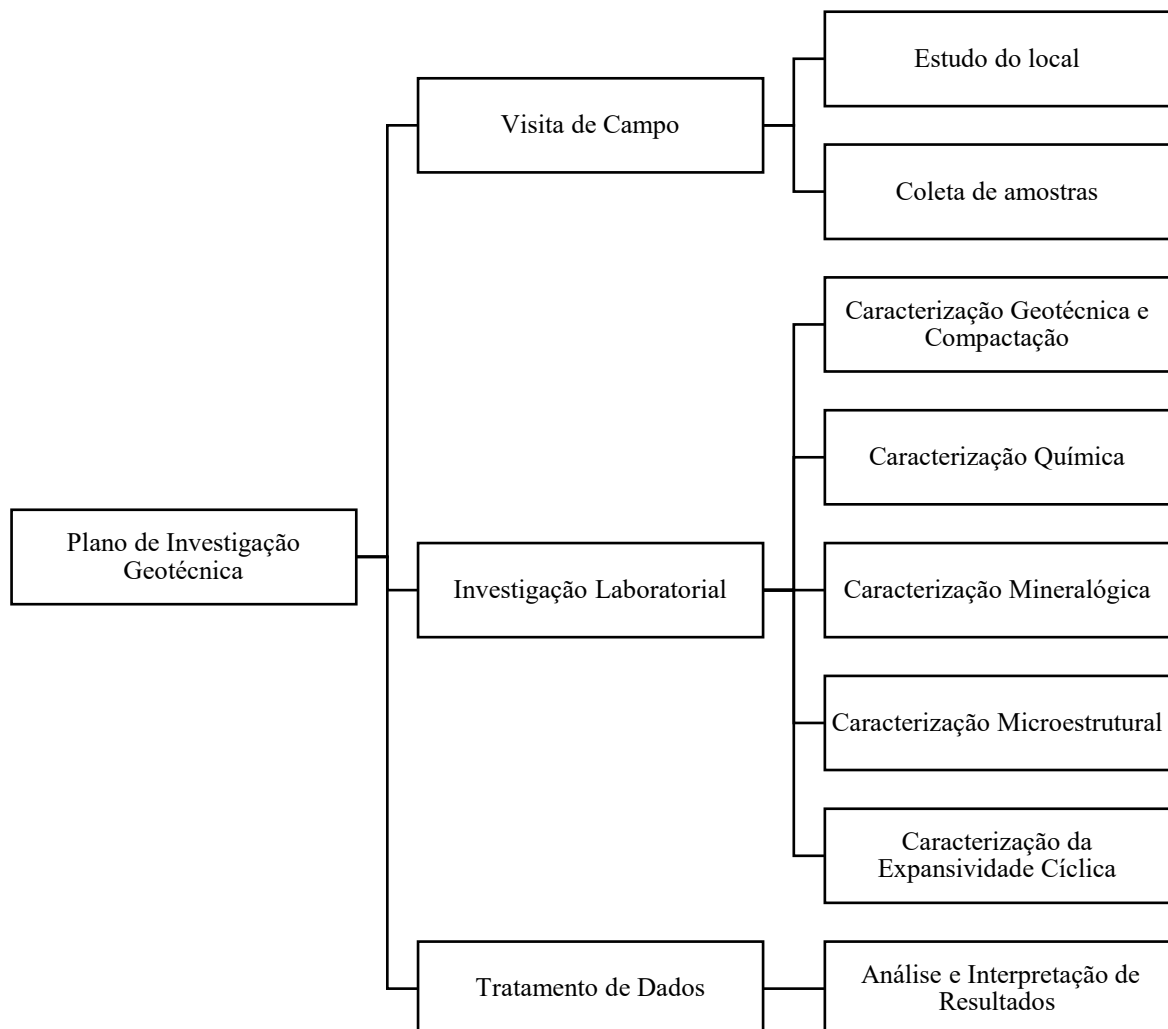
durante ciclos de umedecimento e secagem. De acordo com o autor, a inundação do solo resulta em diminuição da capacidade de carga ao arrancamento. Em contrapartida, durante a secagem, para umidades acima do LC a carga de arrancamento cresce e diminui para umidades menores que o valor de LC da amostra. Além do que, o desenvolvimento da sucção em torno da estaca, na fase de secagem, agrava o surgimento de fissuras e com isso há uma redução do atrito lateral entre o solo e a estaca, o que causa a redução da capacidade de carga.

Após as referências supracitadas, pode-se concluir, portanto, que os ciclos de umedecimento e secagem exercem importantes influências nas propriedades e comportamento dos solos expansivos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O plano de investigação geotécnica, que contempla os materiais e métodos empregados na realização da presente pesquisa, é apresentado no fluxograma da Figura 3.1. A pesquisa está composta por três fases essenciais: 1) visita de campo, 2) investigação laboratorial, e 3) tratamento de dados. Os itens que compõem as duas primeiras fases são detalhados nos subtópicos a seguir, enquanto que, a fase de tratamento de dados será apresentada e discutida no Capítulo 4.

Figura 3.1 – Plano de investigação geotécnica.



Fonte: Autora (2022).

3.1 Visita de Campo

A fase de investigação de campo foi iniciada pelo grupo de pesquisa do laboratório de geotecnia e pavimentos (GeoPav) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), no ano de 2018, e complementada pela presente pesquisa. Inicialmente foram investigados terrenos pertencentes à região metropolitana de Aracaju-SE, cujo perfil geotécnico indicava a presença de camada com características predominantes de solo potencialmente expansivo. Após consultas às construtoras da região e análises visuais *in situ*, um loteamento pertencente ao município de Nossa Senhora do Socorro-SE foi escolhido para se coletar as amostras, objeto de estudo dessa pesquisa.

3.1.1 Estudo do Local

O município de Nossa Senhora do Socorro localiza-se no centro-leste do estado de Sergipe e compõe o território da Grande Aracaju, conforme mostrado na Figura 3.2. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2022), é a segunda cidade mais populosa do estado, com aproximadamente 188 mil habitantes e possui um território de 155.018 km². Seus municípios limítrofes são: Laranjeiras, Santo Amaro das Brotas, Aracaju e São Cristóvão.

Figura 3.2 – Localização de Nossa Senhora do Socorro-SE.



Fonte: Autora (2022).

Nossa Senhora do Socorro encontra-se a três metros de altitude e faz parte da bacia hidrográfica do rio Sergipe e sub-bacia hidrográfica do rio Cotinguiba-SE. Possui um clima tropical, quente e úmido, com período de seca de três meses – durante o verão – seguido de estação chuvosa entre os meses de março a agosto. Sua temperatura anual média é 25,2 °C, com

precipitação pluviométrica média anual de aproximadamente 1689 mm. Seu bioma é a Mata Atlântica e pertence ao sistema costeiro-marinho, com uma vegetação composta por coqueiros, vegetação rasteira e mata de restingas. O solo predominante em seu território é o podzólico vermelho amarelo, que deriva dos sedimentos da formação Barreiras. (PREFEITURA, 2022; MELO NETO *et al.*, 2009; SANTOS; ARAÚJO, 2013; EMBRAPA, 1975).

3.1.2 Coleta de Amostras

Esta etapa contemplou a coleta das amostras deformadas e indeformadas utilizadas na presente pesquisa. O local de coleta está localizado na Avenida Dr. Lauro Porto, no bairro Sobrado, município de Nossa Senhora do Socorro-SE (Figura 3.3), coordenadas geográficas 10°53'26.7"S, 37°07'01.5"W. No local onde foi feita a coleta estava em construção o complexo de apartamentos do Residencial Vida Nova Sobrado.

Figura 3.3 – Local de coleta.



Fonte: Autora (2022).

A extração das amostras foi realizada pela empresa Jotanunes Construtora, com auxílio da Sonda Engenharia e Construções LTDA, no ano de 2018, na fase de terraplenagem da construção do empreendimento. Para a escavação do maciço foi empregado uma retroescavadeira, que coletou aproximadamente 500 kg de material, em uma extensão horizontal de aproximadamente 10 metros, a menos de um metro da superfície do terreno. A

Figura 3.4 exibe as condições do solo, *in situ*, no dia da coleta, onde é possível observar a existência de fissuras de contração, característica comum a solos expansivos.

Figura 3.4 – Condições do solo no dia da coleta.



(a) Perfil vertical

(b) Fundo da vala

(c) Escavação

Fonte: Grupo de Pesquisa, GeoPav (2018).

Realizada a coleta, as amostras foram encaminhadas para o GeoPav, onde foram dispostas em bandejas metálicas e postas para secar ao ar livre até atingirem a umidade higroscópica. Percebe-se pela imagem da Figura 3.5 que o material coletado, apesar de ser do tipo deformado, preservou torrões de dimensões significativas, razão pela qual foi considerado também como amostra indeformada.

Figura 3.5 – Amostras dispostas em bandejas metálicas.



Fonte: Grupo de Pesquisa, GeoPav (2018).

Para o processo de destorroamento da amostra – dada a rigidez em que se encontrava o solo – utilizou-se um britador de mandíbulas (Figura 3.6), cedido pelo Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas (LACEM/UFS), para reduzir o tamanho dos torrões e permitir o destorroamento completo com a utilização de mão de gral e almofariz. Durante o emprego do britador, teve-se a cautela de retirar as partículas de pedregulho existentes, para que estas não viessem a sofrer variações de tamanho e alterar a granulometria da amostra. Após o material ser completamente destorroadado, ele foi homogeneizado com o emprego de um repartidor de amostra de 2” (≈ 50 mm).

Figura 3.6 – Britador de mandíbula utilizado para o destorroamento primário da amostra.



Fonte: Grupo de Pesquisa, GeoPav (2018).

3.2 Investigação Laboratorial

A fase de investigação laboratorial contemplou ensaios de caracterização geotécnica e compactação, caracterização química, mineralógica, microestrutural e de expansividade. Os ensaios realizados, as normas e métodos adotados são listados nos tópicos que se seguem.

3.2.1 Caracterização Geotécnica e Compactação

A caracterização geotécnica e a compactação do solo foram realizados no GeoPav, mediante a execução dos ensaios listados na Tabela 3.1, de acordo com as normas brasileiras pertinentes.

Tabela 3.1 – Ensaio de caracterização geotécnica e compactação.

Ensaio	Norma
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181/2016
Densidade real dos grãos	DNER-ME 093/1994
Limite de liquidez	ABNT NBR 6459/2016
Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180/2016
Limite de contração	DNER-ME 087/1994
Compactação (Proctor normal)	ABNT NBR 7182/2016

Fonte: Autora (2020).

Por se tratar de um solo fino, o ensaio de análise granulométrica contemplou as etapas de peneiramento e sedimentação. A etapa de sedimentação foi realizada em duplicata: na primeira foi empregado o defloculante hexametáfosfato de sódio, na concentração de 45,7 g/L, com pH de 8,5, para auxiliar na dispersão das partículas de solo, e na segunda foi utilizado apenas água destilada.

Após a caracterização geotécnica, o solo foi classificado pelo Sistema Universal de Classificação de Solos (SUCS) e pelo *Transportation Research Board* (TRB). O índice de atividade de argila de Skempton (1953) e o grau de expansão [CHEN, (1965); Seed *et al.* (1962); Dakshanamurthy e Raman (1973); Kansas Highway Comissão; Louisiana Department of Transportation e Carta de Van der Merwe] também foram determinados.

3.2.2 Caracterização Química

A caracterização química do solo foi realizada mediante as análises que se seguem:

3.2.2.1 Potencial de Hidrogênio

O potencial de hidrogênio (pH) do solo quantifica a concentração de íons de H^+ presentes na solução solo:líquido. O pH da amostra foi obtido pelos métodos de eletrodo combinado imerso em suspensão solo:água, solo:SMP e solo:KCl, descritos no Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2009). As duas primeiras análises foram realizadas no Laboratório de Química Agrícola do Instituto Tecnológico e de Pesquisa do Estado de Sergipe (ITPS) e a última no Laboratório de Saneamento e Meio Ambiente (SAMA) do Departamento de Engenharia Civil da UFS.

3.2.2.2 Teor de Matéria Orgânica

O procedimento de quantificação do teor de matéria orgânica (MO) do solo foi realizado no Laboratório de Química Agrícola do ITPS. O MO foi avaliado pela análise do teor de carbono orgânico presente resultante apenas da matéria orgânica facilmente oxidável ou passível de decomposição. O ensaio seguiu o método de combustão por via úmida com dicromato de potássio, aquecimento por cinco minutos e determinação por titulometria, método Walkley & Black (WB), presente no Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes da Embrapa (2009).

3.2.2.3 Complexo Sortivo do Solo

O complexo sortivo do solo compreende o conjunto de partículas trocadoras de íons no solo (EMBRAPA, 2017). A partir de sua análise são obtidos os valores de soma de bases trocáveis (Valor S), capacidade de troca de cátions (CTC) e percentagem de saturação por bases (Valor V), e ainda é possível avaliar a atividade de argila (T_{argila}). O complexo sortivo do solo foi avaliado no Laboratório de Química Agrícola do ITPS, onde foram realizados os ensaios listados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Análise dos íons do solo.

Ensaio	Método
Cálcio	MAQS-EMBRAPA (2009), CKI
Magnésio	MAQS-EMBRAPA (2009), CKI
Sódio	MAQS-EMBRAPA (2009), Mehlich-1
Potássio	MAQS-EMBRAPA (2009), Mehlich-1
Alumínio	MAQS-EMBRAPA (2009), CKI
Hidrogênio + Alumínio	SMP

Legenda: MAQS: Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes, Embrapa (2009). SMP: solução tampão Shoe-Maker, Mclean e Patt.

Fonte: Autora (2022).

O Valor S é definido como o somatório dos teores de cátions permutáveis do solo: cálcio, magnésio, sódio e potássio (eq. 3.1). É desprezado em seu cálculo os micronutrientes.

$$Valor\ S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+} \quad (3.1)$$

A CTC é medida de forma efetiva e de forma total. A CTC efetiva equivale a soma dos teores de cátions trocáveis no solo mais o teor de alumínio trocável (eq. 3.2). Sua determinação é realizada ao pH natural do solo e não inclui os cátions de hidrogênio, que apesar de compartilhar seus elétrons com as cargas do solo, não são de fácil permutação.

$$CTC \text{ Efetiva} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+} + Al^{3+} \quad (3.2)$$

A CTC total mede o valor total de cátions permutáveis que o solo pode adsorver. Isto é, quanto maior a CTC total, maior a quantidade de cátions que o solo pode reter. Ela é definida como a soma do Valor S mais a acidez potencial do solo ($H^{+} + Al^{3+}$). Ou seja, é a CTC efetiva mais os cátions de hidrogênio (eq. 3.3).

$$CTC \text{ Total} = Valor \ S + (H^{+} + Al^{3+}) \quad (3.3)$$

O Valor V indica o percentual dos pontos de troca de cátions que estão sendo ocupados pelas bases trocáveis (Ca, Mg, Na e K) a um pH de 7,0 (eq. 3.4).

$$Valor \ V = \frac{100\% \times Valor \ S}{CTC \ Total} \quad (3.4)$$

A atividade da argila refere-se à CTC total correspondente ao percentual de fração de argila presente na amostra de solo (eq. 3.5). A atividade recebe classificação alta quando maior ou igual a 27 cmolc/kg de argila e baixa quando possui valor inferior a este.

$$T_{argila} = \frac{CTC \ Total \times 100}{\% \ argila} \quad (3.5)$$

3.2.2.4 Óxidos do Solo

A composição quantitativa dos óxidos presente na amostra de solo foi obtida pelo emprego da espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). O ensaio foi executado no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Departamento de Geologia do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). A amostra necessária foi encaminhada em forma de pó (material passante na peneira de nº 200) e lá foi

submetida à secagem em estufa, à temperatura de 110 °C. Após a secagem, o material foi prensado em cápsulas de alumínio com aplicação de 30 toneladas de força. As pastilhas prensadas foram analisadas em espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku, modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores. Os resultados da varredura semiquantitativa foram recalculados para 100 % após a incorporação do valor da perda ao fogo (P.F).

3.2.2.5 Adsorção de Azul de Metileno

O ensaio de adsorção de azul de metileno foi empregado para determinar a superfície específica (S), o coeficiente de atividade (CA) e o grau de atividade da fração fina do solo. Para essa análise aplicou-se o método da mancha, desenvolvido por Jones (1964) e descrito por Fabbri (1994) – com as necessárias adaptações. A Figura 3.7 exhibe os materiais empregados no ensaio.

Figura 3.7 – Materiais utilizados no ensaio de adsorção de azul de metileno.



Legenda: 1: bastão de vidro, 2: pipeta graduada acoplada com pera de sucção, 3: becker de vidro, 4: água destilada, 5: solução padrão de azul de metileno (1g/L), 6: cronômetro, 7: agitador magnético, 8: papel filtro tipo Whatman 42, 9: amostra de solo passada na peneira de nº 200.

Fonte: Autora (2021).

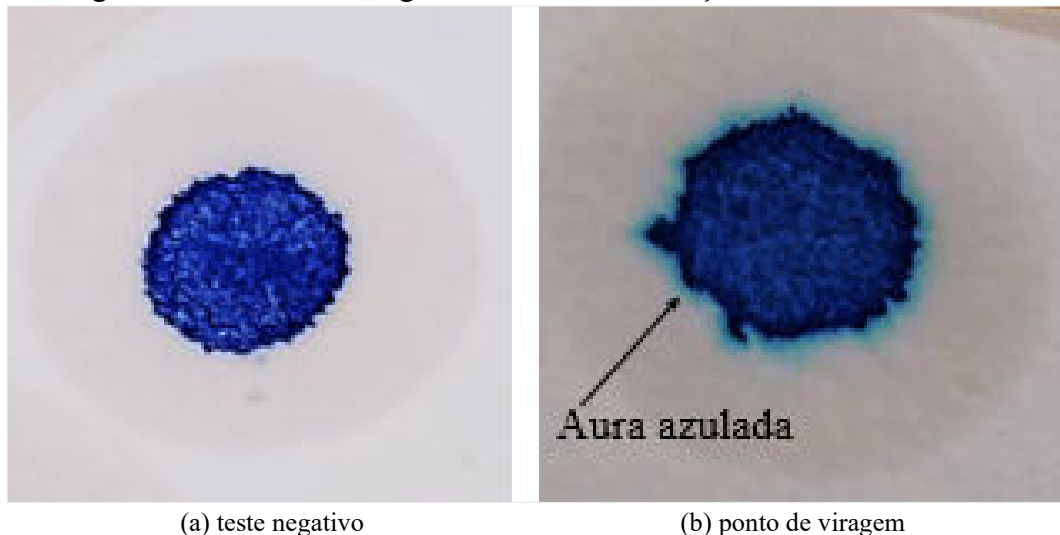
Em resumo, o ensaio limita-se a realizar uma titulação, com adição da solução padrão de azul de metileno a uma suspensão formada por solo e água destilada. Seu objetivo equivale a determinar o volume máximo da solução de azul de metileno consumido na titulação. A Figura 3.8 apresenta as etapas sequenciais do ensaio e a Figura 3.9-b exibe a áurea azulada encontrada no ponto de viragem.

Figura 3.8 – Sequência do ensaio de adsorção de azul de metileno.



Fonte: Autora (2021).

Figura 3.9 – Ponto de viragem do ensaio de adsorção de azul de metileno.



Fonte: Autora (2021).

Superfície Específica

De acordo com Hang e Brindley (1970 apud BONINI, 2005), a molécula de azul de metileno possui a forma de um paralelogramo de dimensões equivalente a $17,0 \times 7,6 \times 3,5 \text{ \AA}$ e a face que é adsorvida pelo solo possui uma área de 130 \AA^2 . A partir desses dados Bonini (2005)

correlacionou os valores de azul com superfícies específicas de argilominerais existentes, com o uso da Equação 3.6. Desta expressão a autora conclui que cada 1 ml de solução padrão de azul de metileno consumida pela amostra de solo equivale a uma superfície específica de 2,45 m².

$$S = \frac{ANC}{1000M} \quad (3.6)$$

Onde:

S: superfície específica do argilomineral (m²/g);

A: área da face do azul de metileno que é adsorvido pelo argilomineral (130 Å²);

N: constante de Avogadro (6,022 x 10²³);

C: concentração da solução padrão de azul de metileno (1 g/l);

M: massa molecular do azul de metileno (319,9 g/mol).

Valor de Azul

Para o cálculo do valor de azul foi empregado a Equação 3.7. A porcentagem da fração de solo passante na peneira de nº 200 foi obtida do ensaio de granulometria.

$$V_a = V \times \frac{P_{200}}{100} \times \left(1 + \frac{w}{100}\right) \quad (3.7)$$

Onde:

V_a: valor de azul (ml/g de solo ou 10⁻³ g/g de solo);

V: volume total de solução padrão de solução de azul de metileno utilizado (ml);

P₂₀₀: porcentagem da fração de solo passante na peneira de nº 200 (%);

w: umidade gravimétrica da fração de solo ensaiada (%).

Coefficiente de Atividade

O coeficiente de atividade da fração fina do solo corresponde a razão entre o volume de azul de metileno consumido em 1 g de solo e o percentual da fração fina deste solo (eq. 3.8).

$$CA = 100 \times \frac{V_a}{P_F} \quad (3.8)$$

Onde:

CA: coeficiente de atividade (10^{-3} g/g/%);

V_a : valor de azul (10^{-3} g/g);

P_F : porcentagem dos grãos do solo < 0,005 mm.

Grau de Atividade

O grau de atividade da fração fina do solo é obtido em relação ao seu coeficiente de atividade, como mostra a Tabela 3.3. Quanto maior o CA, maior é a atividade apresentada pela fração fina do solo.

Tabela 3.3 – Grau de atividade em função do coeficiente de atividade.

Coeficiente de atividade (10^{-3} g/g/%)	Grau de atividade
CA < 11	Pouco ativo
11 < CA < 80	Ativo
CA > 80	Muito ativo

Fonte: Fabbri (1994).

3.2.3 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica se deu mediante a realização do ensaio de difração de raios-X (DRX), realizado no Laboratório do Núcleo de Estudos Geoquímicos (NEG) da UFPE. A análise foi feita na argila total (fração de solo < 0,002 mm), que foi separada por sedimentação. Três lâminas foram preparadas para execução do ensaio, de acordo com o procedimento descrito por Jackson (1979), no laboratório de química da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). As duas primeiras lâminas foram saturadas com potássio, uma à temperatura de 25 °C e a outra aquecida à 550 °C por 2 h. A terceira lâmina foi saturada com magnésio e impregnada com glicerol à 10 %.

O aparelho empregado no ensaio foi o um difratômetro MiniFlex-600 da Rigaku, Modelo A-26L com radiação Cu K (alfa), tensão de 60 kV e 1,5 kW, tamanho do passo de 0,020 2U e tempo por passo de 1,000 s, com velocidade de varredura de 2° (2U)/min, com ângulo 2U percorrido de 2 a 42°. A Tabela 3.4 foi utilizada para apoio na interpretação dos resultados.

Tabela 3.4 – Picos de intensidade dos principais grupos de argilominerais.

Grupo de Argila	K ⁺ à 25 °C	Mg+2+glicerol	K ⁺ à 550 °C
Caulinita	7,2 Å	7,2 Å	-
Mica	10 Å	10 Å	10 Å
Montmorilonita	10 Å	18 Å	9 – 11 Å
Vermiculita	10 – 14 Å	14 Å	9 – 11 Å
Clorita	14 Å	14 Å	14 Å

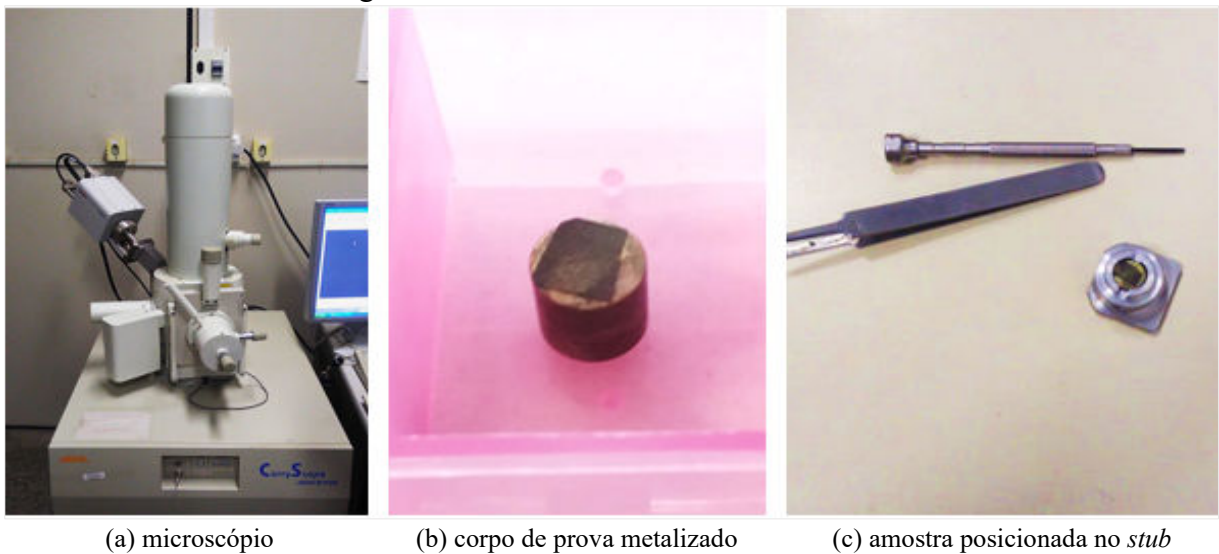
Fonte: Jackson (1979).

3.2.4 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural do solo correspondeu à realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com emprego do sistema de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS), realizado no Laboratório Multiusuário do Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (LMDCEM) da UFS. O microscópio eletrônico empregado foi o modelo JEOL JCM – 5700.

Para esse ensaio utilizou-se os torrões de solo, secos ao ar, para confecção dos corpos de prova. Estes foram submetidos à metalização com ouro em máquina à vácuo e em seguida fixados nos *stubs* com fita adesiva a base de carbono. As superfícies das amostras foram observadas e fotografadas com quatro diferentes ampliações: 500, 1000, 2000 e 5000 vezes. A Figura 3.10 apresenta detalhes do ensaio.

Figura 3.10 – Detalhes do ensaio de MEV.



Fonte: Grupo de Pesquisa, GeoPav (2019).

3.2.5 Caracterização da Expansividade Cíclica

A caracterização da expansividade se deu pela realização dos ensaios de expansão livre e tensão de expansão, mediante consecutivos ciclos de umedecimento e secagem. Os ensaios foram realizados no GeoPav e seguiram os procedimentos descritos na ASTM D 4546/2014. Dada a dificuldade de manter a aplicação de sobrecargas no estágio de secagem, ambos ensaios foram realizados apenas com a sobrecarga proveniente do cabeçote da célula de adensamento, que corresponde a 0,5 kPa.

3.2.5.1 Confeção dos Corpos de Prova

Os corpos de provas utilizados nos ensaios de expansão livre e tensão de expansão foram moldados em anéis metálicos a partir dos torrões de solo reservados na fase de secagem e destorroamento da amostra. Para o ensaio de expansão livre utilizou-se anéis de 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Já para o ensaio de tensão de expansão, foram utilizados anéis de 70 mm de diâmetro e 20 mm de altura. A Figura 3.11 exibe alguns dos torrões utilizados nessa etapa.

Figura 3.11 – Torrões utilizados na confecção dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2021).

Para confecção dos corpos de prova foram escolhidos os torrões com o menor número de macro fissuras possíveis. Houve um esforço em retirar do mesmo torrão mais de um corpo de prova. Dada a baixa umidade em que se encontrava os torrões e sua elevada rigidez, essa etapa foi extremamente árdua. A moldagem de forma manual foi impraticável, desta forma

recorreu-se ao uso de serras elétricas. Empregou-se primeiramente uma serra mármore para o corte dos torrões (Figura 3.12-a). Logo após, foi utilizada uma esmerilhadeira para reduzir o torrão ao tamanho do anel (Figura 3.12-b). Em seguida, o processo final de cravação do anel, acabamento e regularização da superfície foram realizados com emprego de facas e lâminas de serras (Figura 3.12-c).

Figura 3.12 – Confeção dos corpos de prova.



Fonte: Autora (2021).

Os torrões se mostraram de difícil moldagem em todas as etapas de confecção dos corpos de prova. A rigidez da amostra inviabilizou o trabalho manual e a presença de fissuras dificultou o emprego da serra mármore. Durante todo o processo de confecção, vários corpos de prova foram perdidos e grande quantidade de amostra teve de ser descartada.

3.2.5.2 Ensaio de Expansão Livre Cíclico

Para o ensaio de expansão livre cíclico foi utilizado um corpo de prova de 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura, confeccionado conforme descrito no tópico 3.2.5.1. O ensaio teve como objetivo medir as expansões livres em consecutivos ciclos de umedecimento e secagem.

Inicialmente o corpo de prova foi posicionado em uma cápsula metálica, sobre um disco de papel filtro e uma pedra porosa. Na parte superior do corpo de prova foi colocado um disco de papel filtro e um cabeçote acoplado com pedra porosa. Sobre o cabeçote foi posicionado um deflectômetro para aferir as leituras de variação de altura do corpo de prova durante o ensaio.

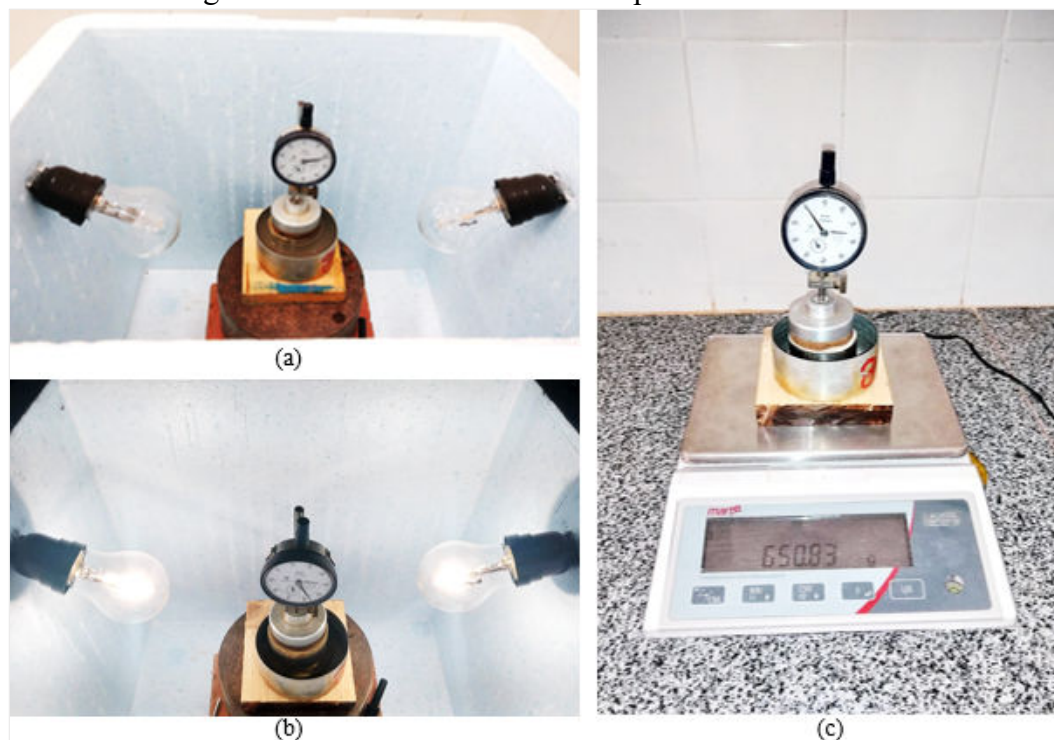
Em seguida, todo o conjunto foi pesado, transferido e acomodado dentro da câmara de secagem, que se encontrava desligada. Com o deflectômetro ajustado na leitura inicial de 1,00 mm, o corpo de prova foi completamente submerso em água destilada, com auxílio de

seringas. No instante em que o corpo de prova entrou em contato com a água destilada, o cronômetro foi acionado e leituras da variação de altura do corpo de prova foram realizadas nos intervalos de tempo de $\frac{1}{4}$ min, $\frac{1}{2}$ min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 24 h. Após 24 h, novas leituras foram tomadas uma vez ao dia, sempre respeitando o intervalo mínimo de 24 h, até que foi observado a estabilização das leituras de expansão secundária. Essa etapa foi denominada de estágio de umedecimento e teve a duração de aproximadamente nove dias.

Estabilizadas as leituras de expansão secundária, com auxílio de seringas, a água destilada foi removida da cápsula metálica e a câmara de secagem foi ligada. Iniciou-se então a etapa denominada de estágio de secagem, que durou aproximadamente 14 dias. Após o primeiro indicativo de estabilização das leituras de contração, o conjunto foi cuidadosamente removido da câmara de secagem e posicionando sobre a balança para aferição de massa e novamente devolvido à câmara de secagem. O fim do ciclo de secagem foi marcado pela estabilização das leituras de contração e pelo retorno à massa inicial de ensaio respectivamente.

Um ciclo de umedecimento e secagem é definido como a realização completa dos estágios de umedecimento e de secagem. Ao todo oito ciclos foram realizados em um mesmo corpo de prova. A Figura 3.13 exibe as fases do ensaio de expansão livre cíclico.

Figura 3.13 – Fases do ensaio de expansão livre cíclico.



Legenda: (a) estágio de umedecimento; (b) estágio de secagem; (c) aferição de massa do conjunto.

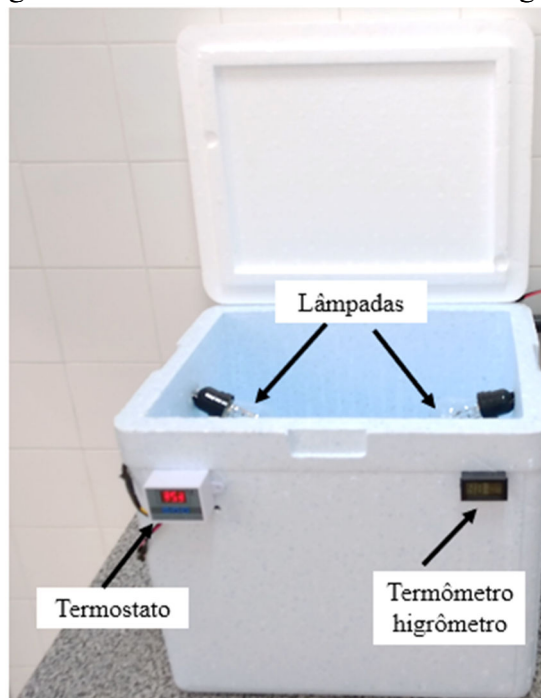
Fonte: Autora (2022).

Confecção da Câmara de Secagem

Para confecção da câmara de secagem, empregou-se uma caixa térmica de poliestireno expandido, de 37 litros, de dimensões equivalentes a 40,0 x 30,5 x 33,0 cm. Acoplou-se à cada extremidade lateral interna da caixa uma lâmpada halógena incandescente de 70 W de potência. Ligado às lâmpadas, foi instalado um termostato digital para controle da temperatura interna da caixa, que funcionava mediante o acionamento e desligamento das lâmpadas. À caixa também foi instalado um termômetro higrômetro que monitorou a temperatura e umidade relativa do ar no interior da caixa.

A câmara de secagem foi programada para reproduzir as temperaturas típicas de secagem da região metropolitana de Aracaju-SE. A variação de temperatura adotada foi de 35 °C a 45 °C. A Figura 3.14 exibe a câmara de secagem.

Figura 3.14 – Estrutura da câmara de secagem.



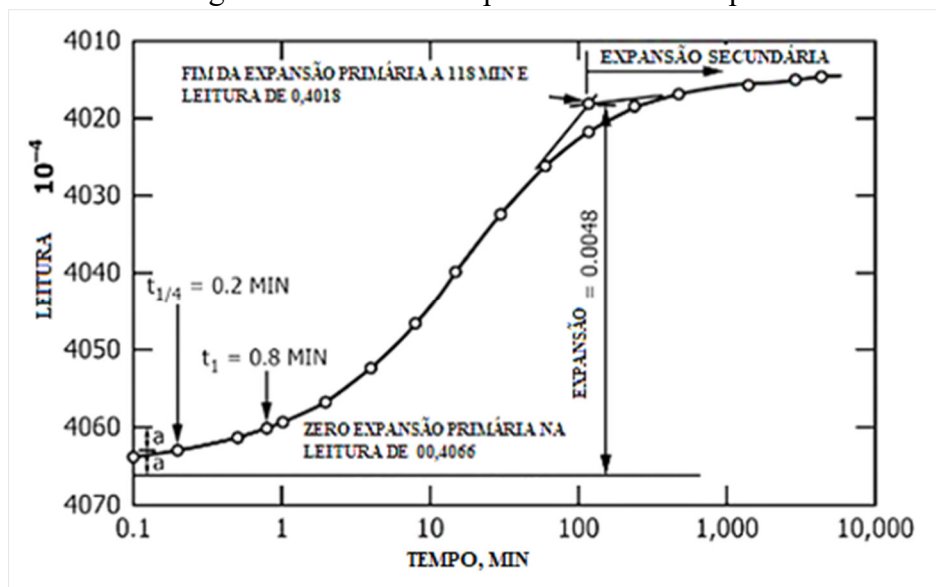
Fonte: Autora (2021).

3.2.5.3 Ensaio de Tensão de Expansão Cíclico

Para o ensaio de tensão de expansão foram moldados quatro corpos de provas. O método utilizado na análise foi o de carregamento após expansão, que foi realizado de acordo com o procedimento descrito no método B da ASTM D 4546/2014. O aparelho utilizado para o sistema de aplicação de carga foi a prensa de adensamento.

Inicialmente foram pesados todos os componentes da célula de adensamento. Em seguida, a célula foi montada e levada à prensa. O deflectômetro, de resolução de 0,01 mm, foi fixado sobre o cabeçote e posicionado na leitura inicial de 1,00 mm. Logo após, com auxílio de seringas, a célula foi inundada com água destilada e o cronômetro foi acionado. Leituras no deflectômetro, da variação de altura do corpo de prova, foram realizadas nos intervalos de tempo de $\frac{1}{4}$ min, $\frac{1}{2}$ min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 24x h. As leituras continuaram durante os x dias necessários para se completar a expansão primária. O indicativo de conclusão da expansão primária, que marca o início da expansão secundária é a inclinação da curva expansão *versus* tempo vista na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Curva Expansão *versus* Tempo.



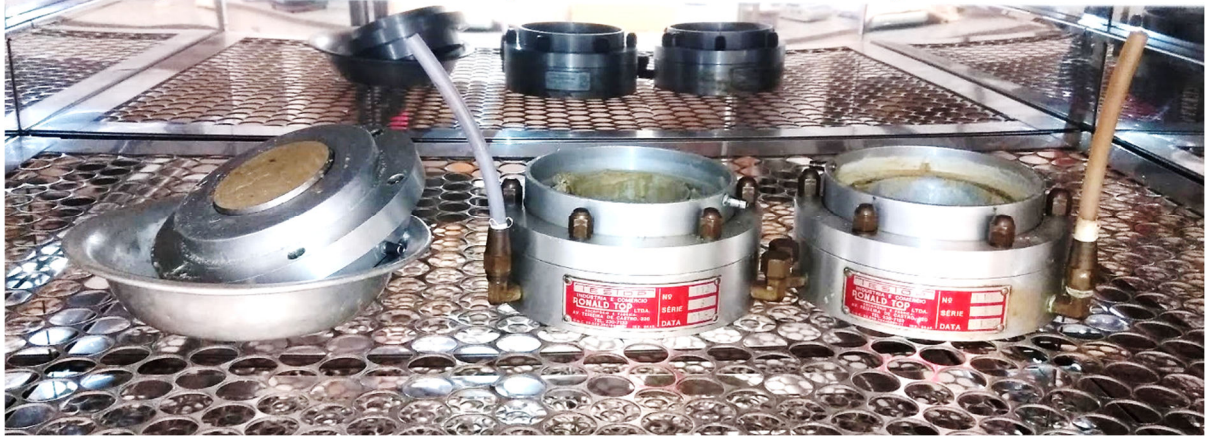
Fonte: Adaptado da ASTM D 4546 (2014).

Após findada a expansão primária, o corpo de prova foi submetido a diferentes tensões verticais (25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa), aplicadas em estágios de 15 min. A cada tensão aplicada, leituras da variação da altura do corpo de prova eram realizadas nos intervalos de tempo de $\frac{1}{4}$ min, $\frac{1}{2}$ min, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min e 15 min. Em seguida, novo incremento de tensão era adicionado e novas leituras eram tomadas até que o corpo de prova expulsasse a água de seus vazios e retornasse à sua altura inicial. Após o retorno do corpo de prova à sua altura inicial, aguardou-se mais 15 min e uma nova leitura foi realizada. Posteriormente a prensa foi descarregada e a célula retirada. Essa etapa configurou o estágio de umedecimento e teve a duração média de seis dias.

Após a retirada da célula da prensa de adensamento, esta foi levada a uma estufa à 45 °C para o estágio de secagem. Dos quatro corpos de prova ensaiados, dois foram levados à estufa

dentro da célula de adensamento fechada (sem o cabeçote) e os outros dois dentro da célula de adensamento parcialmente desmontada, como mostra a Figura 3.16.

Figura 3.16 – Estágio de secagem do ensaio de tensão de expansão cíclico.



Fonte: Autora (2021).

O corpo de prova permaneceu na estufa em processo de secagem até que a massa inicial do conjunto fosse atingida. Essa fase teve a duração de aproximadamente 14 dias. A verificação da massa era realizada diariamente com auxílio de uma balança de 0,01 g de precisão (Figura 3.17-c). Dada a contração, os corpos de prova das células parcialmente abertas se desprenderam do anel e foi possível realizar a verificação de suas massas individualmente (Figura 3.17-d). Atingida a massa inicial, a célula era recolocada na prensa de adensamento e um novo ciclo de umedecimento e secagem era iniciado. Ao todo, para cada corpo de prova, foram realizados oito ciclos completos de umedecimento e secagem. A Figura 3.17 exibe as etapas do ensaio de tensão de expansão cíclico.

Figura 3.17 – Etapas do ensaio de tensão de expansão cíclico.



(a) estágio de expansão



(b) estágio de carregamento



(c) verificação da massa do conjunto



(d) verificação da massa do corpo de prova

Fonte: Autora (2021).

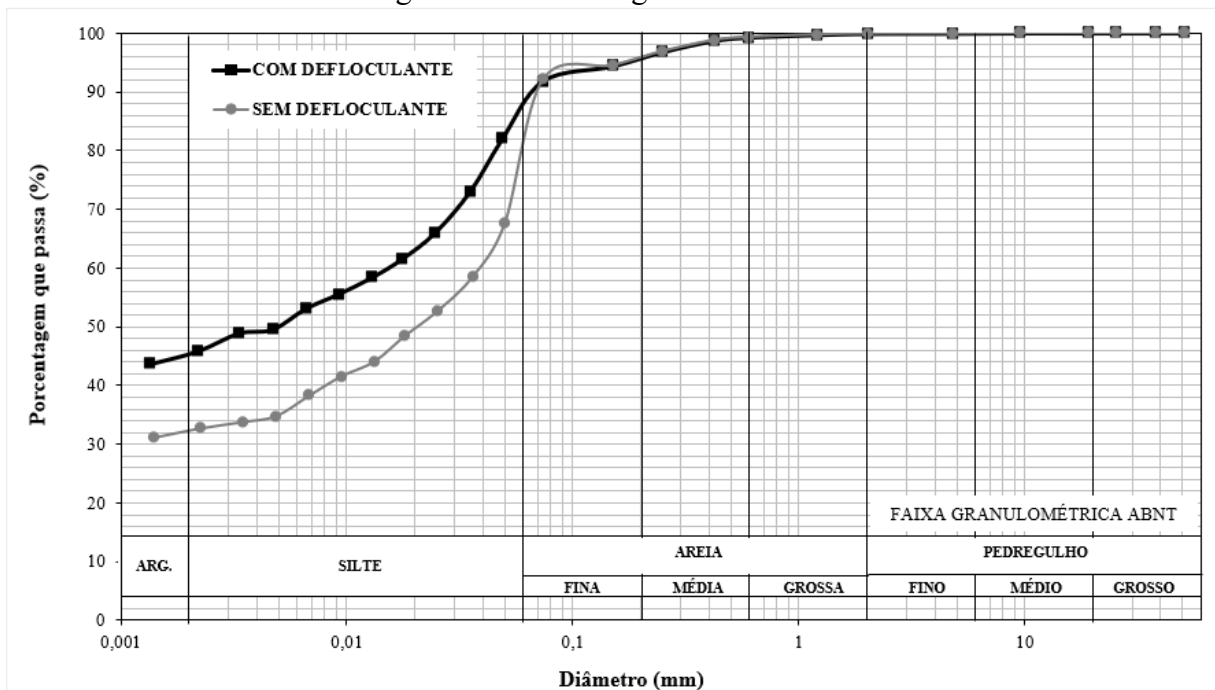
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados no desenvolvimento do programa de investigação geotécnica desta pesquisa e suas respectivas discussões. Os resultados encontram-se agrupados em tópicos para melhor compreensão do assunto.

4.1 Caracterização Geotécnica e Compactação

A Figura 4.1 mostra as curvas granulométricas obtidas dos ensaios de análise granulométrica realizados com sedimentação (com e sem defloculante). Da Figura 4.1 se pode observar que a amostra é proveniente de um solo fino, visto que é superior a 90 % os grãos que passam na peneira de nº 200 (0,074 mm), para ambas as curvas.

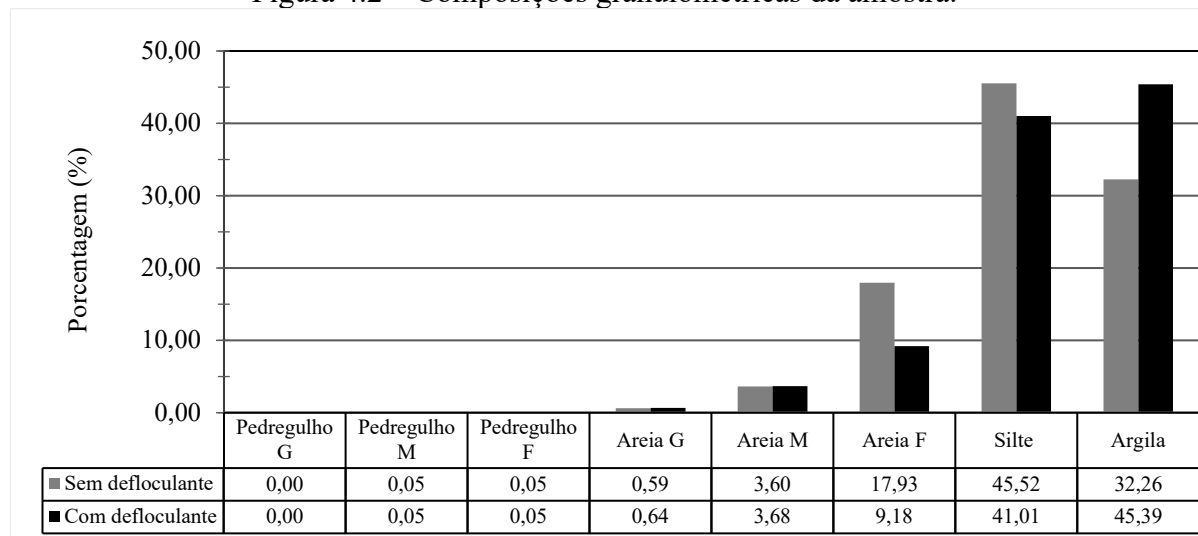
Figura 4.1 – Curvas granulométricas.



Fonte: Autora (2021).

A Figura 4.2 apresenta um gráfico comparativo das composições granulométricas da amostra de acordo com as faixas granulométricas definidas pela ABNT NBR 6502 (2022).

Figura 4.2 – Composições granulométricas da amostra.



Fonte: Autora (2021).

Verifica-se que com o uso de defloculante a amostra apresentou 45,39 % de argila, 41,01 % de silte, 9,18 % de areia fina, 3,68 % de areia média, 0,64 % de areia grossa, 0,05 % de pedregulho fino e 0,05 % de pedregulho médio. O solo foi classificado, portanto, como uma argila siltosa com pouca areia. A composição resultante da sedimentação sem o uso do defloculante, por sua vez, mostrou um solo com menor percentual de argila e maiores percentuais de silte e areia fina, o que acarretou uma mudança na nomenclatura para silte argiloso com presença de areia. Esse comportamento deve-se a não dispersão da fração de argila na etapa de sedimentação sem o uso de defloculante. Desta forma, as partículas de argilas, inicialmente agrupadas em pequenos torrões, comportaram-se como silte e/ou areia. Como consequência, sedimentaram mais rápido e inferiu em aparente redução da fração mais fina e elevação das frações mais grossas. A comparação das duas composições granulométricas é crucial na análise das discrepâncias entre o estado do solo em campo e em laboratório.

A Tabela 4.1 mostra os demais resultados dos ensaios de caracterização geotécnica e de compactação do solo. Da Tabela 4.1, observa-se que os limites de Atterberg possuem valores elevados, o que caracteriza o solo como altamente plástico. O valor do índice de consistência (IC) obtido foi de 1,45, cujo parâmetro permite classificar o solo como uma argila de consistência dura. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos, o solo recebeu a classificação de argila inorgânica de alta plasticidade (CH), enquanto que segundo o sistema de classificação tipicamente aplicado no meio rodoviário, o TRB, o solo recebeu a nomenclatura de A-7-6, com índice de grupo (IG) igual a 20.

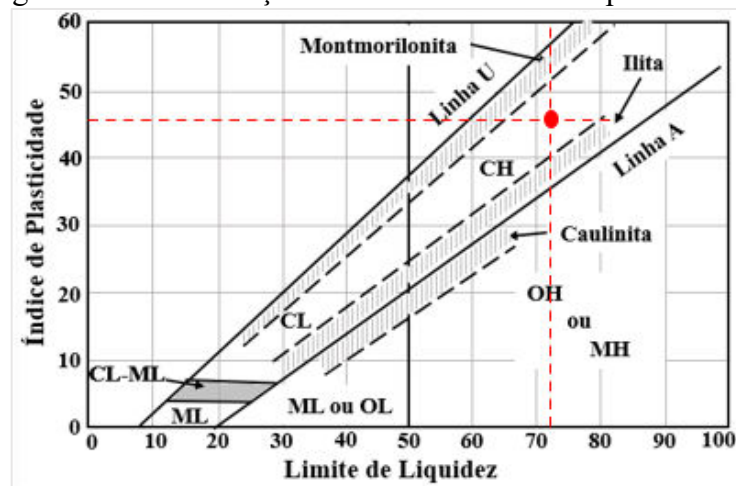
Tabela 4.1 – Características geotécnicas e de compactação do solo.

Parâmetro	Valor
Densidade real (D_{20})	2,679
Umidade higroscópica (w)	5,26 %
Limite de liquidez (LL)	72 %
Limite de plasticidade (LP)	26 %
Limite de contração (LC)	14 %
Índice de plasticidade (IP)	46 %
Índice de consistência (IC)	1,45
Massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d,m\acute{a}x}$)	1,696 g/cm ³
Umidade ótima (w_{ot})	18,1 %

Fonte: Grupo de Pesquisa, GeoPav (2019).

A Figura 4.3 apresenta a localização da amostra estudada na carta de plasticidade com zonas de predominância de grupos de argilominerais. A partir da Figura 4.3 verifica-se que o solo estudado se encontra abaixo da linha U e acima da linha A, entre as zonas de predominância da montmorilonita e da illita. Este resultado infere a predominância de argilominerais do tipo 2:1 na composição da amostra e indica a presença de argilominerais expansivos.

Figura 4.3 – Localização da amostra na carta de plasticidade.



Fonte: Autora (2021).

O grau de expansão da amostra atribuído a partir das propostas dos autores Chen (1965), Seed *et al.* (1962), Dakshanamurthy e Raman (1973), Kansas Highway Commission e Louisiana Department of Transportation é apresentado na Tabela 4.2. De acordo com todos os parâmetros de classificação adotados, o solo foi classificado com potencial de expansão muito alto, com exceção da atribuição da Kansas Highway Commission, uma vez que esta não possui em seu método de classificação a classe “muito alto”, sendo “alto” sua máxima classificação atribuída ao potencial de expansão de um solo.

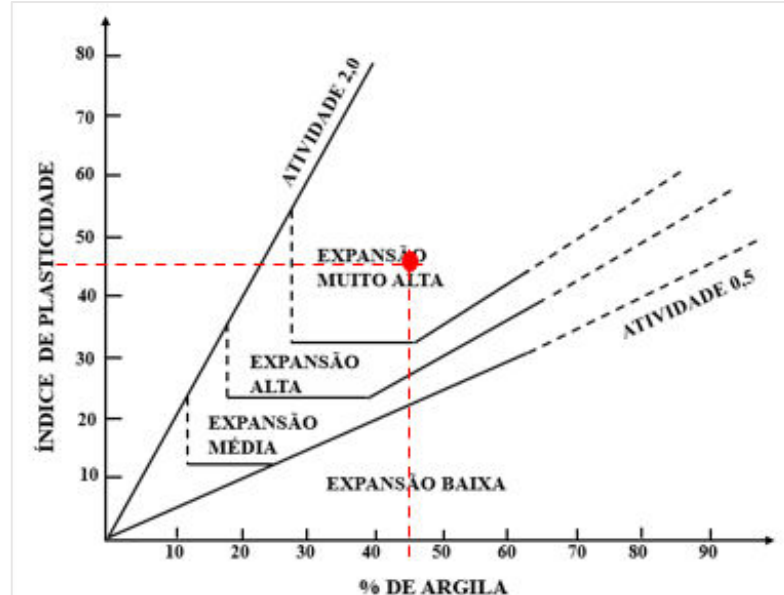
Tabela 4.2 – Potencial de expansão da amostra.

Critério	Potencial de Expansão
Chen (1965)	Muito alto
Seed <i>et al.</i> (1962)	Muito alto
Dakshanamurthy e Raman (1973)	Muito alto
Kansas Highway Comission	Alto
Louisiana Departament of Transportation	Muito alto

Fonte: Autora (2020).

A Figura 4.4 exibe a localização da amostra na Carta de Van der Merwe modificada por Williams e Donaldson. A amostra encontra-se na zona de potencial de expansão muito alta, o que corrobora com o que foi verificado pelos demais critérios de classificação empregados.

Figura 4.4 – Localização da amostra na Carta de Van der Merwe.



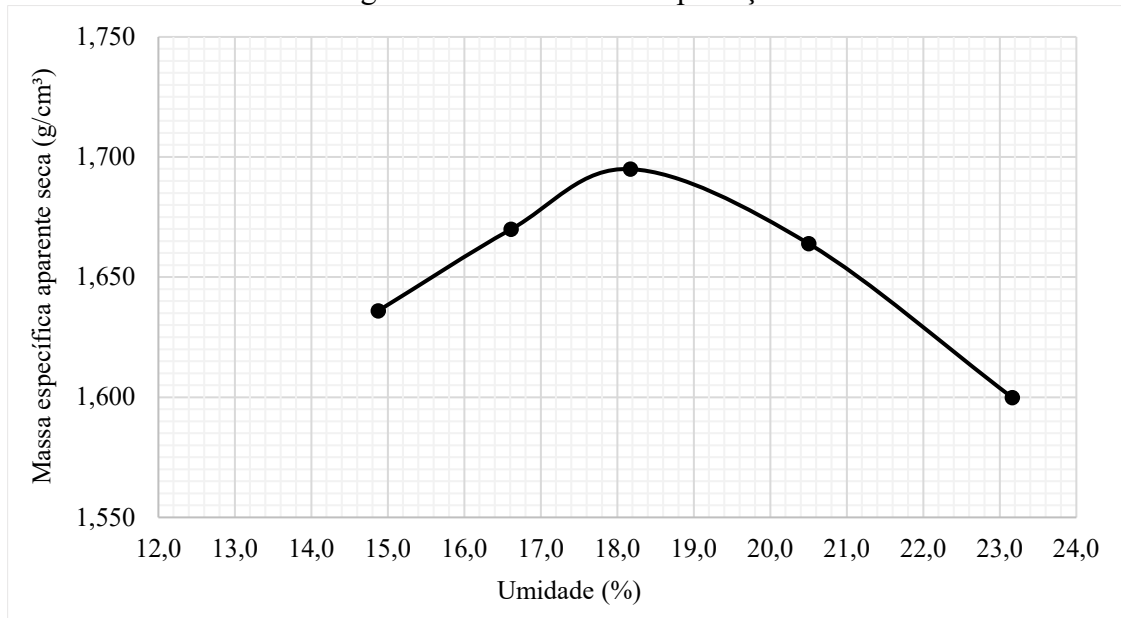
Fonte: Autora (2021).

O índice de atividade de argila de Skempton obtido para o solo em estudo foi igual a 1,0, o que indica uma atividade normal da fração de argila. O valor obtido designa a presença de argilominerais de estrutura 2:1, do grupo das ilitas. Esperava-se, contudo, uma atividade maior, que apontasse para a existência de argilominerais expansivos, que por natureza são ativos, visto que o solo foi classificado com alto grau de expansão. Entretanto, o valor obtido para o índice de atividade pode ser decorrente das limitações dos ensaios de limites de Atterberg, uma vez que estes são realizados com a fração de solo passante na peneira de nº 40 (0,42 mm), na qual é comum encontrar material inerte.

O ensaio de compactação foi realizado sob a energia do Proctor Normal. Optou-se por trabalhar com o reuso do material. A curva de compactação é apresentada na Figura 4.5, da qual

se observa o formato de sino, típico de solos argilosos. A massa específica aparente seca máxima obtida foi $1,696 \text{ g/cm}^3$, enquanto que a umidade ótima correspondente é igual a 18,1 %.

Figura 4.5 – Curva de compactação.



Fonte: Autora (2021).

4.2 Caracterização Química

Os resultados da análise de pH, teor de matéria orgânica e complexo sortivo do solo são apresentados na Tabela 4.3. De acordo com Guimarães (2002), quanto ao pH, a amostra foi classificada como ácida em KCl e como neutra em água e em SMP. A variação de pH [$\Delta\text{pH} = \text{pH (KCl)} - \text{pH (água)}$] exibiu um valor negativo de -1,3, o que pressupõe a presença de argilas silicatadas e elevada capacidade de reter cátions, o que foi comprovado pela análise química de CTC.

O teor de matéria orgânica encontrado na amostra foi inferior a 5 g/dm^3 , o que caracteriza o solo como pobre em relação a esse parâmetro. Observa-se elevados valores de bases trocáveis, com Valor S igual a $33,7 \text{ cmolc/dm}^3$. Segundo a Embrapa (2015), a quantidade de bases trocáveis, tais como cálcio, magnésio, sódio e potássio da indicação do grau de intemperismo do solo. E como constatado na amostra em questão, valores elevados indicam se tratar de um solo jovem, com a presença de minerais primários, comum em regiões mais secas.

O teor de alumínio trocável foi inferior a $0,08 \text{ cmolc/dm}^3$. Desta forma, a CTC efetiva obtida foi igual ao Valor S. A acidez potencial do solo foi $0,857 \text{ cmolc/dm}^3$, enquanto que a CTC total ficou na casa dos $34,6 \text{ cmolc/dm}^3$. Ainda de acordo com Embrapa (2015), valores de

CTC total maiores que 15 cmolc/dm^3 são considerados altos e sugerem a presença de argilominerais de estrutura 2:1. Em conformidade com Ronquim (2010), o valor de CTC total observado é comum aos argilominerais do grupo da ilita.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios químicos.

Parâmetro	Resultado	Unidade
pH em água	6,72	---
pH em KCl	5,42	---
pH em SMP	7,20	---
$\Delta\text{pH} = \text{pH (KCl)} - \text{pH (água)}$	-1,3	---
Teor de matéria orgânica (MO)	3,56	g/dm^3
Cálcio	11,5	cmolc/dm^3
Magnésio	11,8	cmolc/dm^3
Sódio	9,78	cmolc/dm^3
Potássio	0,57	cmolc/dm^3
Alumínio	< 0,08	cmolc/dm^3
Hidrogênio + Alumínio	0,857	cmolc/dm^3
Valor S	33,7	cmolc/dm^3
CTC efetiva	33,7	cmolc/dm^3
CTC total	34,6	cmolc/dm^3
Valor V	97,4	%
Atividade de argila	76	cmolc/dm^3

Fonte: Autora (2021).

A atividade de argila encontrada foi classificada como alta, superior a 27 cmolc/kg . Segundo AGEITEC (2022), a atividade de argila exerce influência significativa nas propriedades de retenção de água do solo e de nutrientes. Ela também influencia na coesão e adesão das partículas do solo. Consoante com o que foi observado na caracterização da expansividade, solo com atividade alta apresenta grande contração quando secos e elevada expansão quando úmidos.

A percentagem de saturação por bases foi de 97,4 %, o que classificou o solo como eutrófico. Esta denominação caracteriza solos com Valor V maiores que 50 % e indica elevada fertilidade natural.

A composição quantitativa dos óxidos presentes na amostra de solo, obtida do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X, encontra-se na Tabela 4.4. Os dados são apresentados em percentuais. Nota-se que o óxido de silício (quartzo) prevalece sobre os demais, com um valor de 63,45 %, seguido do óxido de alumínio com 20,25 % e do óxido de ferro com 5,45 %.

Tabela 4.4 – Resultado dos percentuais de óxidos no solo.

Óxido	(%)	Óxido	(%)
SiO ₂	63,45	V ₂ O ₅	0,03
Al ₂ O ₃	20,25	MnO	0,01
Fe ₂ O _{3t}	5,45	ZnO	0,01
P.F	4,98	Rb ₂ O	0,01
K ₂ O	2,18	SrO	0,01
MgO	1,26	CuO	0,00
TiO ₂	0,93	Cr ₂ O ₃	nd
Na ₂ O	0,55	NiO	tr
CaO	0,39	Ga ₂ O ₃	tr
Cl	0,19	PbO	nd
SO ₃	0,13	ThO ₂	nd
ZrO ₂	0,06	Total	100 %
P ₂ O ₅	0,05		

Legenda: P.F: perda ao fogo; nd: não detectado; tr: traços.

Fonte: Autora (2020).

Segundo Uehara (1988, apud CALEGARI; MACHADO, 2008), solos em estado avançado de intemperismo apresentam acentuada dessilicização, isto é, perda de sílica. O resultado é o acúmulo de óxidos de ferro e alumínio. Da análise dos percentuais de óxidos do solo em questão, pode-se concluir, portanto, que se trata de um solo pouco intemperizado, relativamente jovem. O teor de óxido de ferro inferior a 8 % classifica o solo como hipoférrico, o que justifica sua alta capacidade de troca de cátions e indica uma baixa capacidade cimentante (EMBRAPA, 2018).

Os resultados oriundos do ensaio de adsorção de azul de metileno estão apresentados na Tabela 4.5. O ponto de viragem correspondeu ao volume de 80 ml da solução padrão de azul de metileno. O coeficiente de atividade encontrado foi maior que $50 \times 10^{-3} \text{ g/g}$, o que resultou em um grau de atividade muito ativo. O valor da superfície específica encontrada aproxima-se do comum ao grupo dos argilominerais da vermiculita, que também apresenta CA elevado e grau de atividade considerado muito ativo.

Tabela 4.5 – Resultado do ensaio de adsorção de azul de metileno.

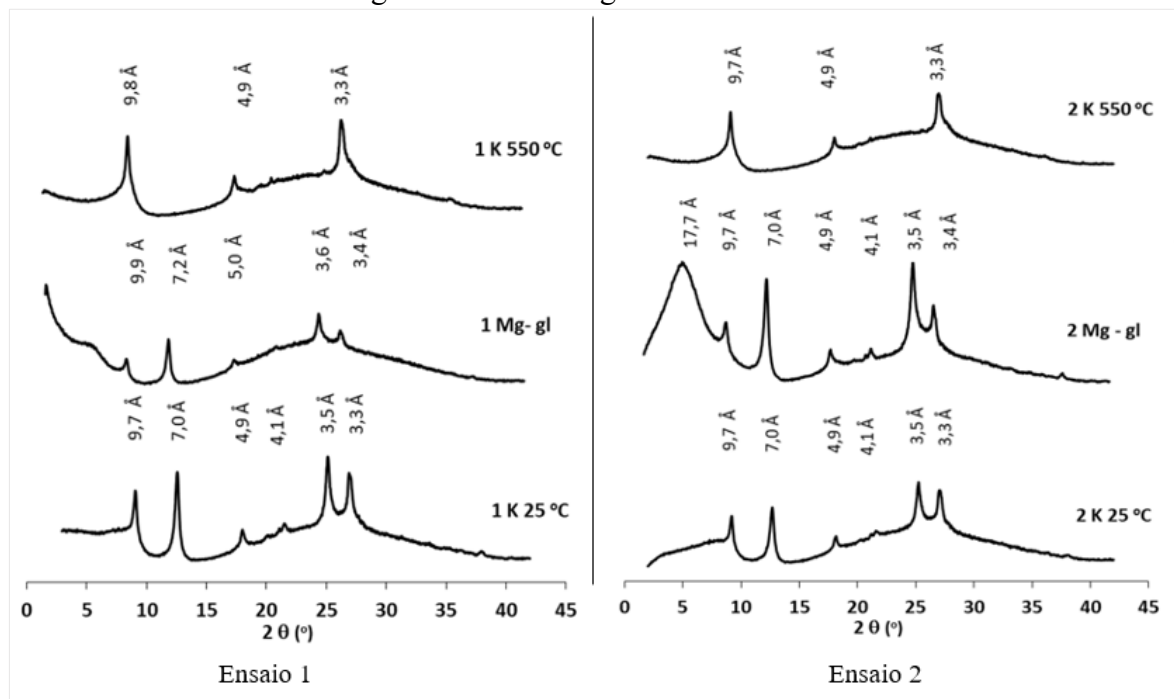
Parâmetro	Resultado	Unidade
Volume de azul (V)	80	ml
Valor de azul (V_a)	77,0	10^{-3} g/g
Superfície específica (S)	196	m^2/g
Coeficiente de atividade (CA)	153,5	10^{-3} g/g
Grau de atividade	muito ativo	-

Fonte: Autora (2022).

4.3 Caracterização Mineralógica

O ensaio de difração de raios-X foi realizado em duplicata. Os difratogramas obtidos são apresentados na Figuras 4.6.

Figura 4.6 – Difratogramas de raios-X.



Fonte: Autora (2021).

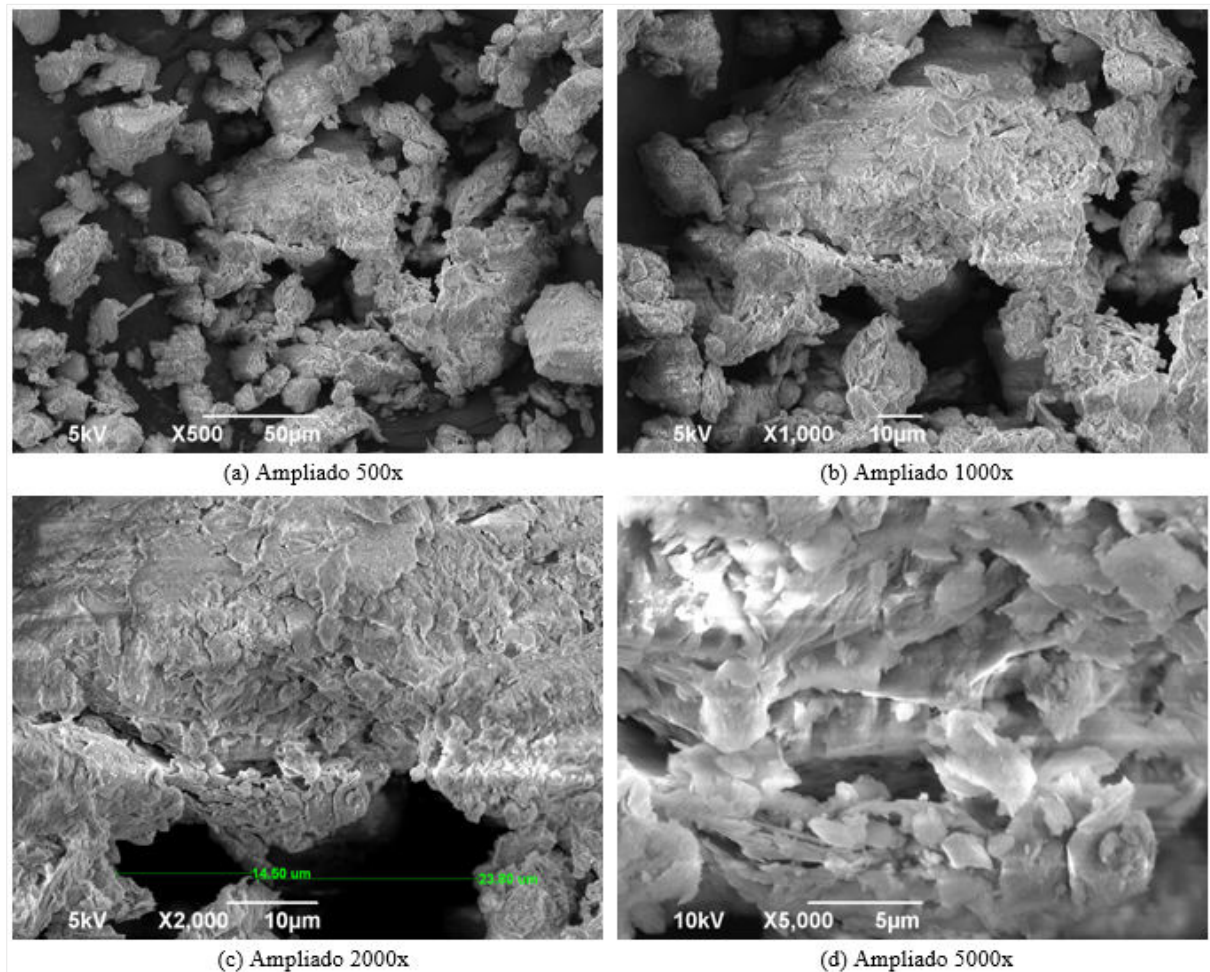
Os difratogramas de raios-X do ensaio 1 indicaram interestratificação irregular envolvendo argilominerais de estrutura do tipo 2:1, como mica e expansivos (esmectitas), além de apontar a presença de caulinita. As distâncias basais do ensaio 2 mostraram a presença dos argilominerais do grupo da montmorilonita, mica expansiva e da caulinita.

Observa-se que a existência de argilominerais do tipo 2:1, indicado na análise de CTC, foi confirmado pelos difratogramas. A presença de montmorilonita, esmectita e mica expansiva na composição do solo justificou o elevado grau de atividade observado no ensaio de adsorção de azul de metileno, bem como, o comportamento altamente expansivo da amostra. As diferenças de argilominerais encontrados nos dois ensaios deve-se a natureza heterogeneia do solo e explica a diferença de valores de tensão de expansão observada em corpos de prova extraídos de uma mesma amostra indeformada.

4.4 Caracterização Microestrutural

Do ensaio de microscopia eletrônica de varredura obteve-se as eletromicrografias apresentadas na Figura 4.7. O resultado da espectroscopia de energia dispersiva correspondente à área analisada é exibido na Figura 4.8.

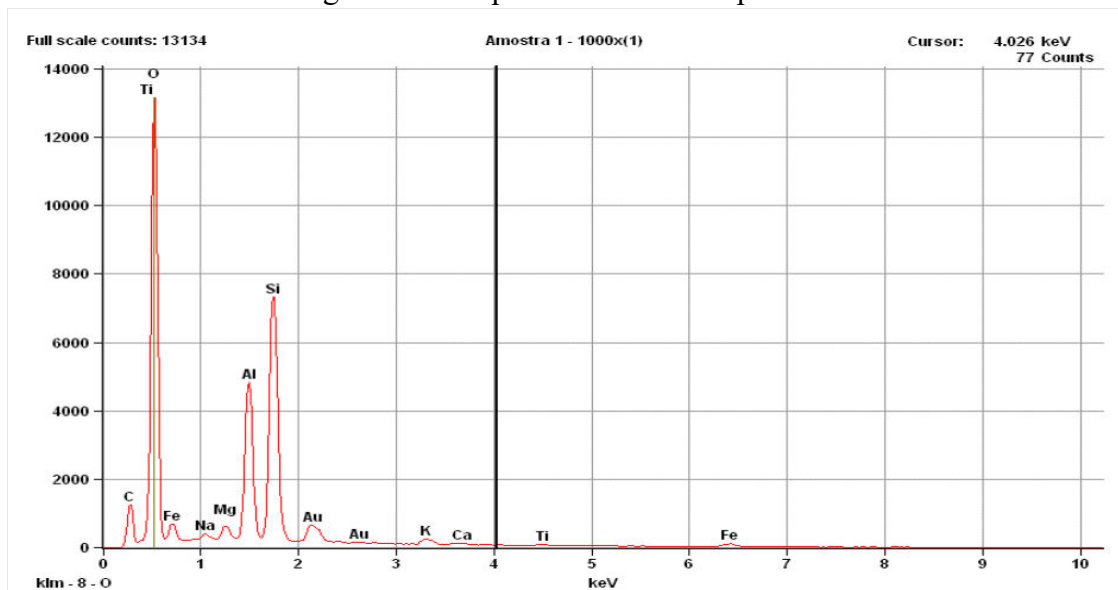
Figura 4.7 – Eletromicrografias da amostra.



Fonte: Grupo de Pesquisa, GeoPav (2019).

As Figuras 4.7-a e 4.7-b exibem agregados de partículas em formas de blocos angulares e vazios de grandes dimensões. Na Figura 4.7-c é possível notar a presença de alguns microporos na estrutura. A Figura 4.7-d mostra lâminas finas, de perfil irregular e contornos mal definidos, com comprimentos próximos a 5 µm, características comuns aos argilominerais do grupo das micas e das vermiculitas. Nota-se ainda que as lâminas parecem não apresentar uma orientação preferencial. A análise qualitativa da composição química do material, apresentada na Figura 4.8, exibiu picos de titânio, silício e alumínio, o que, de acordo com Heidemann (2015), indica que a matiz deste solo é marcada por caulinitas em profusão.

Figura 4.8 – Espectrometria de dispersão.



Fonte: Grupo de Pesquisa, GeoPav (2019).

4.5 Caracterização da Expansividade Cíclica

Os índices físicos iniciais do corpo de prova utilizado no ensaio de expansão livre cíclico são exibidos na Tabela 4.6. A umidade foi obtida através das aparas do torrão utilizado na confecção do corpo de prova e os demais índices foram calculados por correlações entre massa, volume, umidade e fator de correção de umidade do solo.

Tabela 4.6 – Índices físicos iniciais do ensaio de expansão livre cíclico.

Sobrecarga (kPa)	w ₀ (%)	ρ_{nat} (g/cm ³)	ρ_{seco} (g/cm ³)	e ₀	S _{r0} (%)
0,5	5,76	2,185	2,066	0,297	52,0

Legenda: w: umidade inicial, ρ_{nat} : massa específica natural, ρ_{seco} : massa específica seca, e: índice de vazios inicial, S_{r0}: grau de saturação inicial.

Fonte: Autora (2022).

A umidade inicial do corpo de prova foi de 5,76 %, valor bem próximo da umidade higroscópica e 58,8 % abaixo do limite de contração do solo. A massa específica natural foi de 2,185 g/cm³ e a massa específica seca de 2,066 g/cm³. O grau de saturação e o índice de vazios iniciais foram respectivamente de 52,0 % e 0,297.

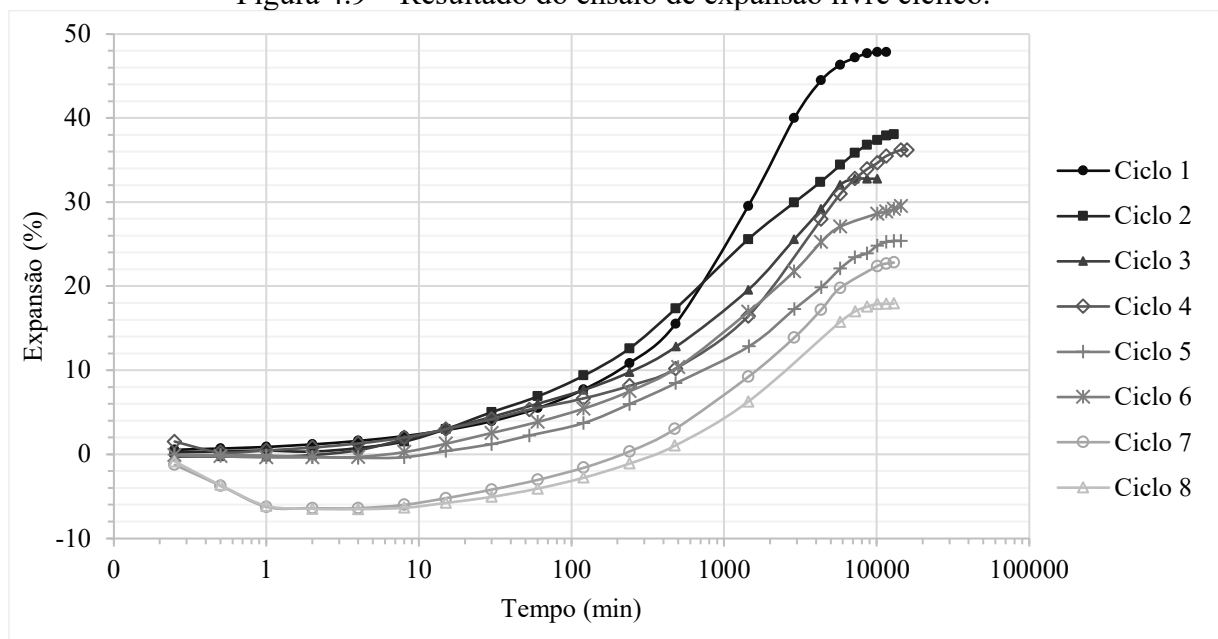
Constatou-se com esse resultado que a massa específica seca dos torrões (situação de campo) é superior à massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação. A justificativa para isso está no fato de que em campo e durante o período de secagem em laboratório os torrões de solo sofreram contração e suas partículas ficaram mais próximas umas das outras, em decorrência do aumento da sucção. Como resultado, os torrões de solo

apresentaram maior densificação que o solo compactado à energia Proctor Normal. Outro fator preponderante para essa situação é que para atingir a massa específica aparente seca máxima foi necessário aumentar a umidade para 18,1 %. E visto que a amostra estudada consiste em um solo altamente expansivo, essa variação de umidade desencadeou a expansão do solo e consequentemente o afastamento de suas partículas ao longo do ensaio de compactação.

Durante todo o ensaio de expansão livre cíclico, o corpo de prova foi submetido a uma sobrecarga, proveniente do cabeçote, de 0,5 kPa. Na etapa de umedecimento foi permitido que o solo saturasse e expandisse até que se observasse a estabilização das leituras de expansão secundária. A etapa de secagem se deu até o corpo de prova retornar à umidade inicial, sendo o controle realizado por meio de aferição de massa.

A Figura 4.9 mostra o gráfico de expansão *versus* tempo obtido para o ensaio de expansão livre cíclico. Observa-se que as curvas de expansão crescem rapidamente com o aumento do intervalo de tempo e depois diminuem a velocidade de crescimento até se estabilizarem. Verifica-se, ainda, valores negativos de expansão nos primeiros 110 minutos dos ciclos 7 e 8. Esse evento condiz com a redução da altura do corpo de prova por desintegração de partículas, dado seu elevado grau de fissuração após diversas contrações. Valores negativos de expansão também foram observados nos primeiros minutos de ensaio dos ciclos 2 ao 6, todavia, irrisórios e imperceptíveis ao gráfico.

Figura 4.9 – Resultado do ensaio de expansão livre cíclico.



Fonte: Autora (2022).

As curvas de expansão livre possuem um formato típico de “s”, e para a amostra estudada, levaram em média 10.080 minutos (7 dias) para se caracterizarem. Com base no ciclo 1, a curva de expansão livre foi dividida em três trechos, como mostra a Figura 4.10. Os dois primeiros trechos compreendem a expansão primária que vão de 0 min a 480 min (8 horas) e de 480 min a 2880 min (2 dias) respectivamente. O último trecho representa a expansão secundária que vai de 2880 min até 10080 minutos (7 dias). Uma análise, em percentuais, de como se desenvolveu a expansão livre nesses intervalos de tempo, em cada ciclo, é apresentada na Figura 4.11. Vale ressaltar que nem para todo o ciclo a separação entre expansão primária e secundária ocorre nesses mesmos intervalos de tempo.

Figura 4.10 – Fases da curva de expansão livre.

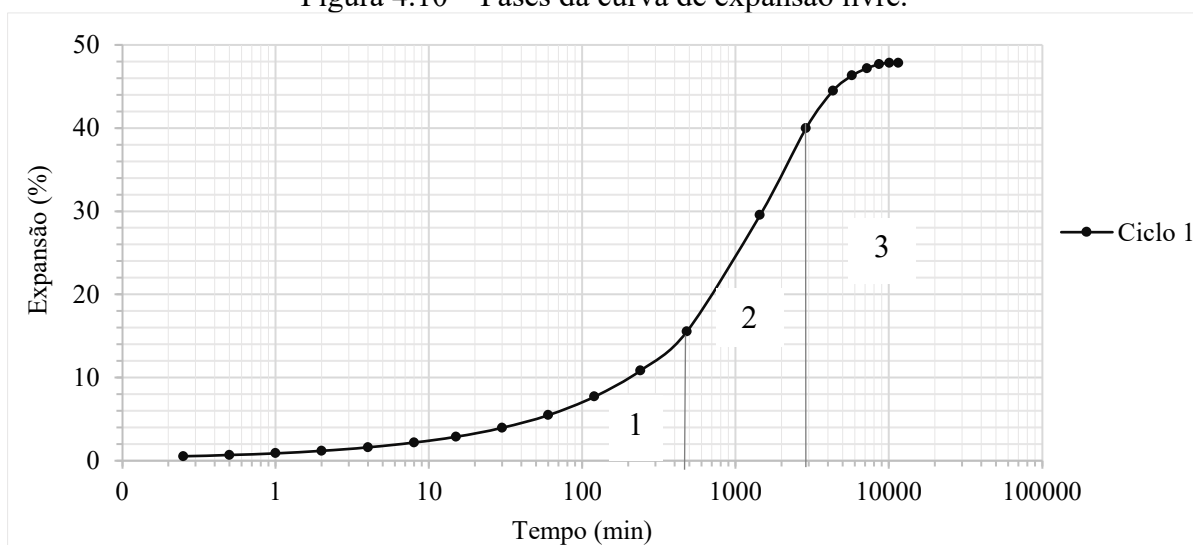
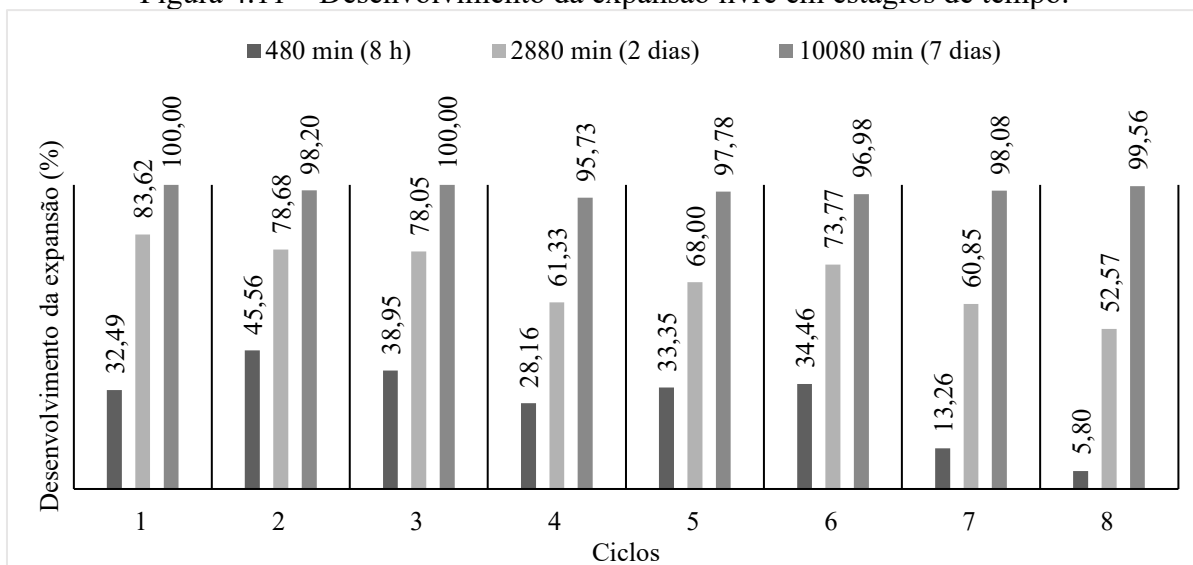


Figura 4.11 – Desenvolvimento da expansão livre em estágios de tempo.



Da Figura 4.11 verifica-se que para o intervalo de tempo de 480 minutos, correspondente a 8 horas, o corpo de prova desenvolveu 32 % de sua expansão total no ciclo 1. Nota-se, contudo, que no ciclo 2 o solo apresentou um percentual maior, enquanto que nos próximos ciclos ocorreram consideráveis reduções. A justificativa para tal acontecimento pode estar baseada no fato de que durante o processo de secagem o corpo de prova estaria suscetível a desenvolver fissuras devidas aos efeitos da contração, que, por sua vez, facilitam a percolação da água na amostra e acelera a expansão. Por outro lado, o aumento de ciclos de umedecimento e secagem promovem perdas de partículas finas e agentes cimentantes da amostra, o que resulta em degradação do corpo de prova e perda de potencial expansivo. O ciclo 8, por exemplo, apresentou grande perda de partículas ao ser inundado, o que resultou em variações negativas de altura e apenas 5,8 % de expansão livre ao final das primeiras 8 horas. A ausência de um anel guia para restringir a expansão à direção vertical também contribuiu com a perda de material e diminuição da expansão, visto que, nas extremidades do corpo de prova a expansão aconteceu de forma volumétrica.

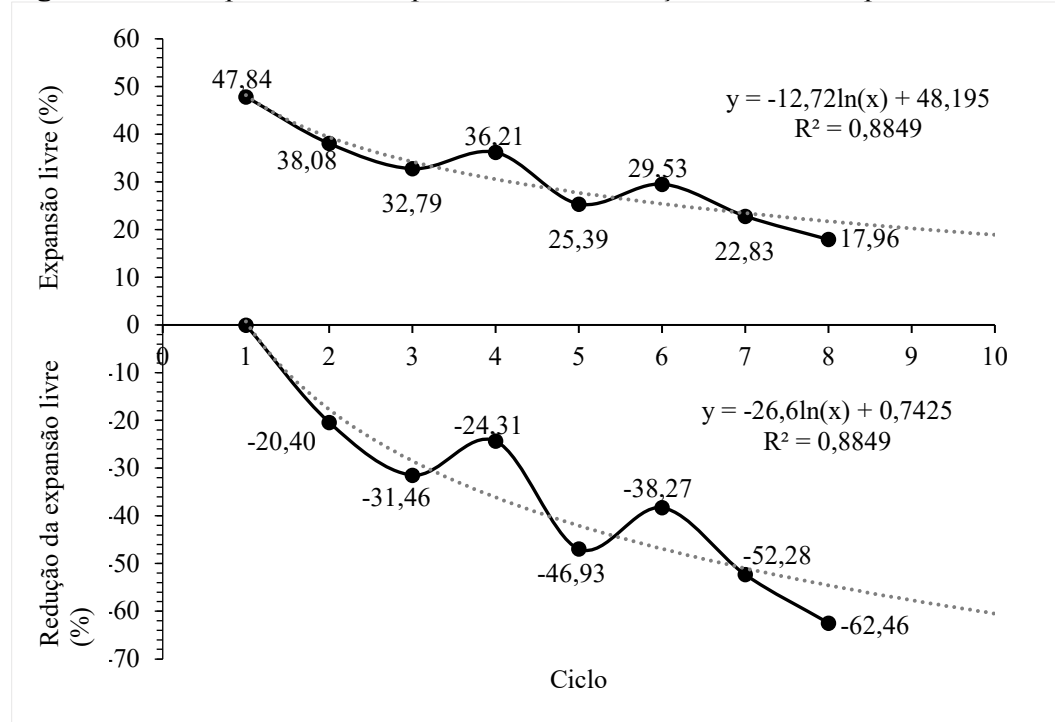
É importante destacar que o corpo de prova atingiu 84 % de sua expansão livre total em 2 dias e 100 % ao final de 7 dias, durante o ciclo 1. Nos demais ciclos, porém, o corpo de prova demandou mais tempo para alcançar essas porcentagens. Isso mostra que os ciclos de umedecimento e secagem não alteram apenas a propriedade de expansão livre do solo, mas também a sua relação com o tempo.

A Figura 4.12 apresenta os percentuais de expansão livre e de reduções observados para cada ciclo. Conforme se pode notar, o maior valor de expansão livre foi encontrado no ciclo 1, que é da ordem de 47,8 %. No ciclo 2 verificou-se uma diminuição no percentual de expansão livre de mais de 20 %. Em comparação ao ciclo 1, todos os ciclos apresentaram reduções significativas no valor de expansão livre, sendo que a maior diferença percentual se deu no último ciclo, para o qual a redução foi cerca de 62 %, o que mostra a influência dos efeitos da secagem e umedecimento nas propriedades expansivas desse tipo de solo, comprovante a hipótese posta nesta pesquisa.

Observa-se, todavia, que a redução não se dá de forma gradual com o aumento do número de ciclos, pois os ciclos 4 e 6 exibiram valores maiores de expansão livre que os seus ciclos anteriores, o que pode estar atrelado ao novo estado de sucção do solo naquele ciclo. Apesar disto, a tendência constatada é de diminuição do percentual de expansão livre com avanço dos ciclos de umedecimento e secagem. O modelo de previsão de valores que melhor se ajusta a esse comportamento é a linha de tendência logarítmica, exibida na Figura 4.12, que possui um coeficiente de determinação de 0,88 e prevê novas reduções nos valores de expansão

livre para próximos ciclos. Entende-se, contudo, que essa previsão de reduções está baseada na condição da amostra, após umedecida, ser dessecada até seu estágio inicial de umidade. É de se esperar, entretanto, que se a amostra for dessecada a uma umidade inferior à inicial e com isso induzida a uma sucção maior que ela já tinha, a expansão do solo aumente.

Figura 4.12 – Expansão livre e percentuais de redução observados para cada ciclo.



Fonte: Autora (2022).

Resultados semelhantes aos encontrados nessa pesquisa foram descritos por Al-Homoud *et al.* (1995), Basma *et al.* (1996), Tripathy, Rao e Fredlund (2002), Rao e Rao (2010) e Al-Omari, Ibrahim e Al-Bayati (2010), que relataram encontrar o maior percentual de expansão livre no ciclo 1. Entretanto, os autores mencionaram uma redução gradual nos valores de expansão livre com o aumento do número de ciclos, sendo que a maior redução se deu do ciclo 1 para o ciclo 2.

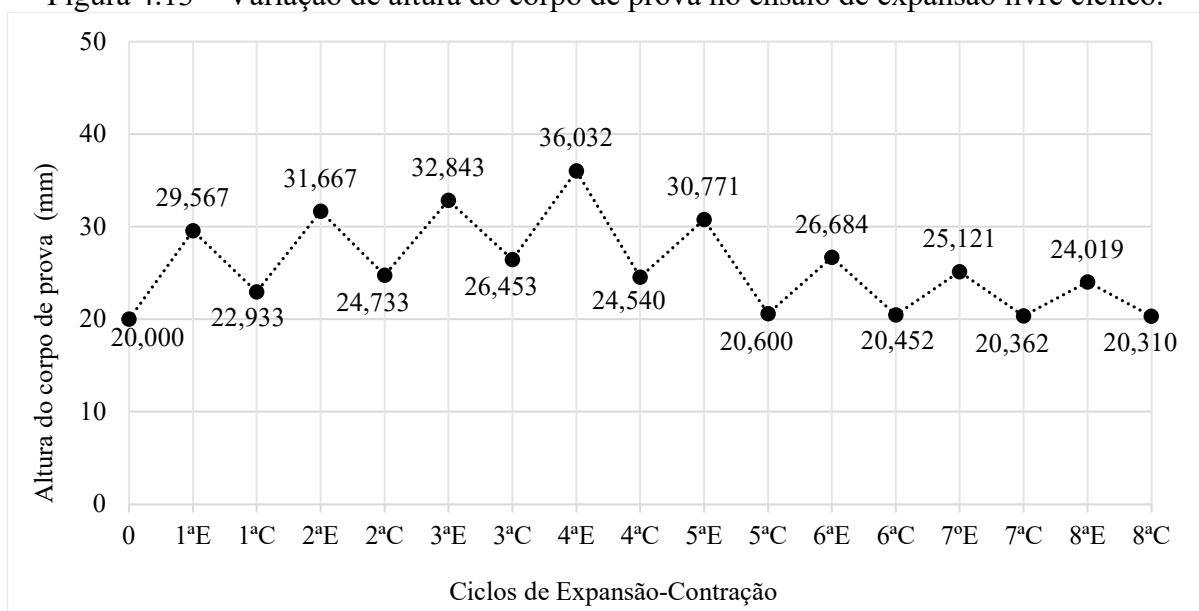
Basma *et al.* (1996) correlacionaram o comportamento de diminuição gradativa da expansão livre com o tipo de contração adotada (contração parcial) e observaram que o oposto ocorre se a contração total for aplicada. Em seus ensaios eles utilizaram, porém, corpos de prova moldados em uma umidade média de 22 % e uma sobrecarga de aproximadamente 10 kPa. Para o trabalho de Tripathy, Rao e Fredlund (2002), contudo, a diminuição progressiva dos valores de expansão livre só sucedeu para valores de sobrecargas iguais ou maiores que 50 kPa. Os

autores trabalharam com corpos de prova moldados na umidade ótima e com diferentes sobrecargas.

Resultados diferentes dessa pesquisa foram encontrados nos trabalhos desenvolvidos por Tripathy e Rao (2009), Al-Taie *et al.* (2016) e Wei e Dong (2020), onde foi observado que o percentual de expansão livre sofre um aumento considerável no ciclo 2 e depois diminui gradualmente com o aumento dos ciclos de umedecimento e secagem. Sendo que, de acordo com Tripathy e Rao (2009) e Wei e Dong (2020), os valores de expansão livre encontrados para o último ciclo são inferiores ao obtido no ciclo 1 e que segundo com Al-Taie *et al.* (2016), apesar da gradual redução, o valor de expansão livre do último ciclo ainda é consideravelmente maior do que o encontrado no ciclo 1. Tripathy e Rao (2009), Al-Taie *et al.* (2016) e Wei e Dong (2020) utilizaram corpos de prova moldados na condição ótima de compactação e adotaram sobrecargas de 50 kPa, 25 kPa, 0 kPa respectivamente.

A Figura 4.13 apresenta a variação da altura do corpo de prova em cada ciclo. Evidencia-se um crescente aumento da altura do corpo de prova do ciclo 1 ao 4, com expansões maiores que contrações. Visualmente foi notado que a amostra durante o processo de secagem apresentou contrações radiais maiores que contrações verticais. Isso provavelmente deve-se ao raio do corpo de prova ser maior que sua altura. Desta forma, foi observado nos processos de secagem que a altura do corpo de prova sempre permanecia superior a 20 mm e o diâmetro inferior a 50 mm. Wei e Dong (2020) também relataram essa mesma situação utilizando corpos de prova de 20 mm de altura e diâmetro de 61,8 mm.

Figura 4.13 – Variação de altura do corpo de prova no ensaio de expansão livre cíclico.

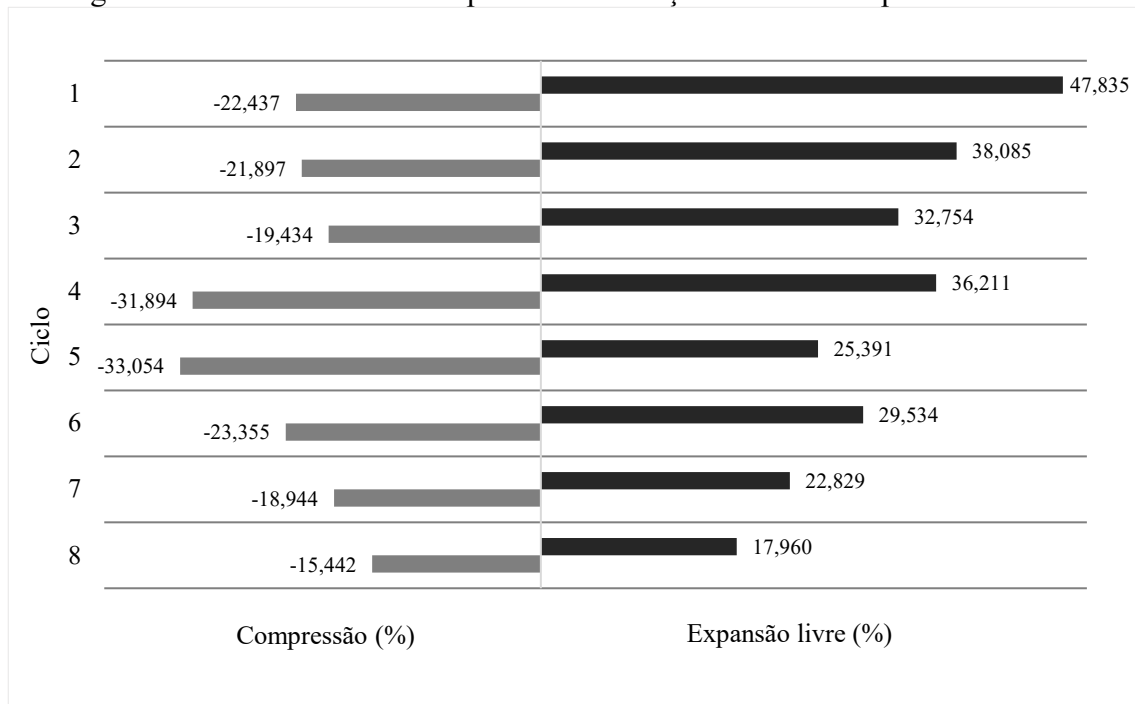


Fonte: Autora (2022).

No ciclo 5, na fase de compressão, é constatada uma redução maior da altura do corpo de prova, como consequência da desagregação de partículas da amostra. O estado estável de equilíbrio, onde, segundo Tripathy, Rao e Fredlund (2002), as deformações verticais se mantem constantes, não é encontrado. Contudo nota-se que nos últimos quatro ciclos o corpo de prova retornou a uma altura muito próxima.

A Figura 4.14 mostra os percentuais de expansão e contração obtidos para cada ciclo de umedecimento e secagem. Percebe-se o que também corrobora os autores Al-Omari, Ibrahim e Al-Bayati (2010), que para um mesmo ciclo os valores de expansão são consideravelmente maiores que os valores de contração e que em nenhum ciclo a amostra se contrai até a altura inicial de ensaio ou valor inferior a este.

Figura 4.14 – Percentuais de expansão e contração encontrados para cada ciclo.



Fonte: Autora (2022).

A Figura 4.15 apresenta o estado do corpo de prova após o término do ensaio de expansão livre cíclico. Nota-se que os consecutivos ciclos de umedecimento e secagem geraram alterações consideráveis na estrutura da amostra. Como consequência das várias contrações sofridas, verifica-se a redução da seção transversal do corpo de prova e a presença de fissuras de grandes espessura e profundidade. Na Figura 4.15 ainda se pode notar a fragmentação parcial da amostra, o que pode indicar que o solo além de expansivo, seja dispersivo.

Figura 4.15 – Corpo de prova após o término do ensaio de expansão livre cíclico.



Fonte: Autora (2022).

No ensaio de tensão de expansão cíclico quatro corpos de prova foram ensaiados e serão aqui denominados de CP1, CP2, CP3 e CP4. A sobrecarga atuante na fase de umedecimento corresponde apenas à tensão aplicada pelo cabeçote da célula de adensamento. Na etapa de umedecimento, foi permitido que o corpo de prova expandisse até o término da expansão primária, que corresponde a deformação de expansão. Na fase de secagem houve um controle de massa para iniciar um novo ciclo de umedecimento e secagem assim que o corpo de prova retornasse à umidade inicial.

Os índices físicos iniciais da amostra, as deformações de expansão e as tensões de expansão obtidas para o primeiro ciclo de umedecimento são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Índices físicos e resultados do ensaio de tensão de expansão.

CP	Sobrecarga (kPa)	w (%)	ρ_{nat} (g/cm ³)	ρ_{seco} (g/cm ³)	e_0	S_r (%)	δ_{exp} (%)	σ_{exp} (kPa)
1	0,5	6,00	2,243	2,116	0,266	60,40	35,16	1107,20
2	0,5	5,86	2,234	2,110	0,270	58,20	45,76	477,15
3	0,5	6,00	2,236	2,110	0,270	59,50	39,43	452,72
4	0,5	5,72	2,299	2,174	0,232	66,00	48,56	628,77

Legenda: w: umidade inicial, ρ_{nat} : massa específica natural, ρ_{seco} : massa específica seca, e: índice de vazios inicial, S_{r0} : grau de saturação inicial, δ_{exp} : deformação de expansão, e σ_{exp} : tensão de expansão. Fonte: Autora (2022).

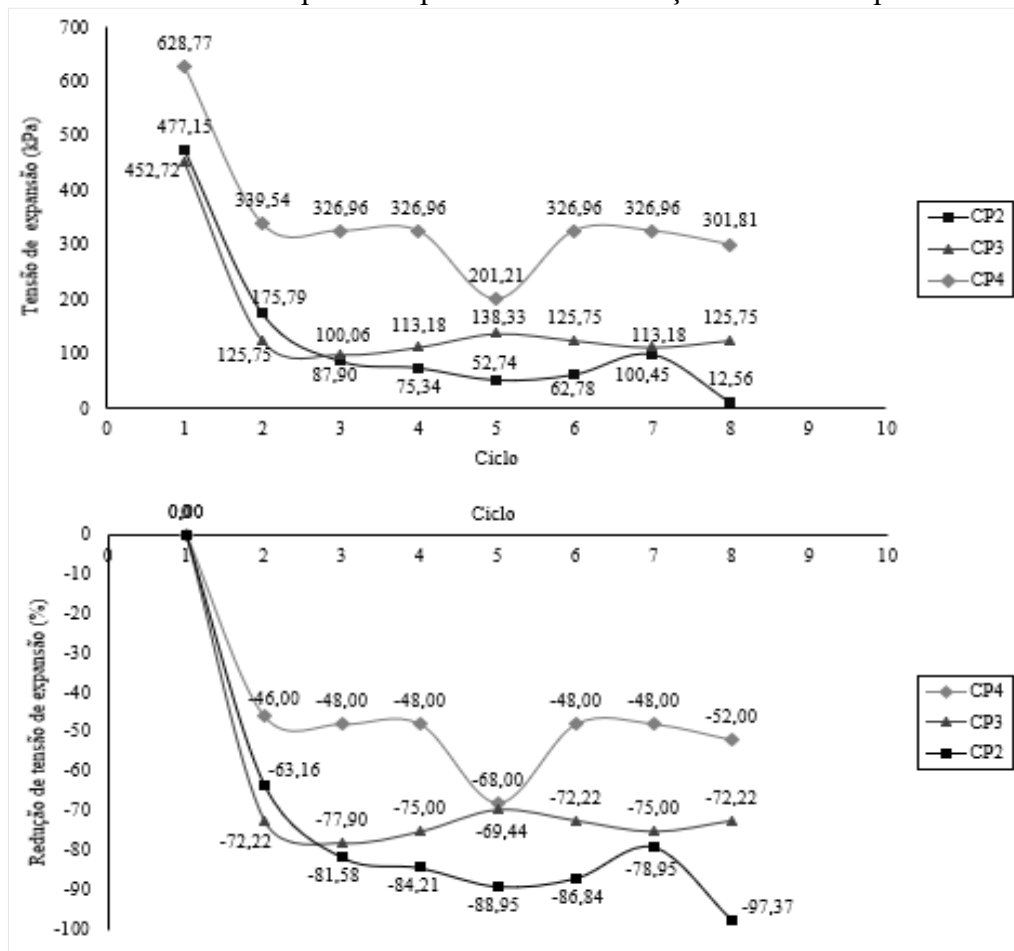
Como observado para o ensaio de expansão livre, os corpos de prova exibiram umidades iniciais inferiores ao limite de contração do solo e massas específicas secas superiores à massa específica aparente seca máxima encontrada no ensaio de compactação. As deformações de expansão e as tensões de expansão obtidas foram de grande magnitude. De acordo com o

critério de Jimenez (1980), estruturas apoiadas nesse solo, com esses níveis de tensão de expansão, podem apresentar danos estruturais severos, que culmine na sua demolição.

No ensaio realizado em CP1, durante a fase de carregamento após a expansão, observou-se uma significativa inclinação do cabeçote para um dos lados. Fato que provavelmente desencadeou uma excentricidade de aplicação de carga e notoriamente resultou em uma redução assimétrica da altura do corpo de prova. Possivelmente a inclinação do cabeçote sobre a amostra fez com que o CP1 tenha apresentado o maior valor de tensão de expansão, em que pese o fato de solo expansivo com nível de expansão dessa magnitude ser relativamente comum em Sergipe. Desta forma, optou-se por seguir com os demais ciclos de umedecimento e secagem apenas com CP2, CP3 e CP4.

Na Figura 4.16 são apresentados os valores de tensão de expansão e os percentuais de redução de tensão de expansão observados para cada um dos oito ciclos de umedecimento e secagem.

Figura 4.16 – Tensão de expansão e percentuais de redução observados para cada ciclo.



Fonte: Autora (2022).

Em concordância com o relatado por Al-Homoud *et al.* (1995) e Basma *et al.* (1996), para todos os corpos de prova, o maior valor de tensão de expansão foi registrado no ciclo 1, assim como aconteceu com o resultado do ensaio de expansão livre cíclico. Os percentuais de redução de tensão de expansão observados no ciclo 2 para CP2, CP3 e CP4 são respectivamente 63 %, 72 % e 46 %. A diminuição da tensão de expansão entre os ciclos 1 e 2 é consideravelmente maior do que as observadas entres os demais ciclos subsequentes. Com relação ao ciclo 1, todos os ciclos exibiram reduções de tensão expansão. Isto é, no ciclo 1 uma tensão maior do que nos ciclos subsequentes é necessária para remover a água dos vazios do solo. Diferente do que foi observado no ensaio de expansão livre cíclico, porém, as reduções apresentadas no ensaio de tensão de expansão cíclico são mais próximas umas das outras. Diante disso e do que já foi observado no ensaio de expansão livre cíclico, é evidente que os ciclos de umedecimento e secagem possuem influência marcante nas propriedades de expansão dessa tipologia de solo.

A Tabela 4.8 exhibe as deformações verticais e as tensões de expansão correspondente de cada corpo de prova, para cada ciclo de umedecimento e secagem.

Tabela 4.8 – Deformações verticais e tensões de expansão correspondentes.

Ciclo	CP2		CP3		CP4	
	Δh (mm)	σ_{exp} (kPa)	Δh (mm)	σ_{exp} (kPa)	Δh (mm)	σ_{exp} (kPa)
1	9,262	477,15	7,878	452,72	9,780	628,77
2	3,471	175,79	4,342	125,75	5,231	339,54
3	3,853	87,90	5,367	100,06	6,808	326,96
4	5,511	75,34	5,710	113,18	5,802	326,96
5	1,038	52,74	6,829	138,33	3,318	201,21
6	2,146	62,78	5,742	125,75	6,557	326,96
7	5,038	100,45	5,399	113,18	6,546	326,96
8	0,931	12,56	5,241	125,75	5,899	301,81

Legenda: Δh : deformação vertical, σ_{exp} : tensão de expansão.

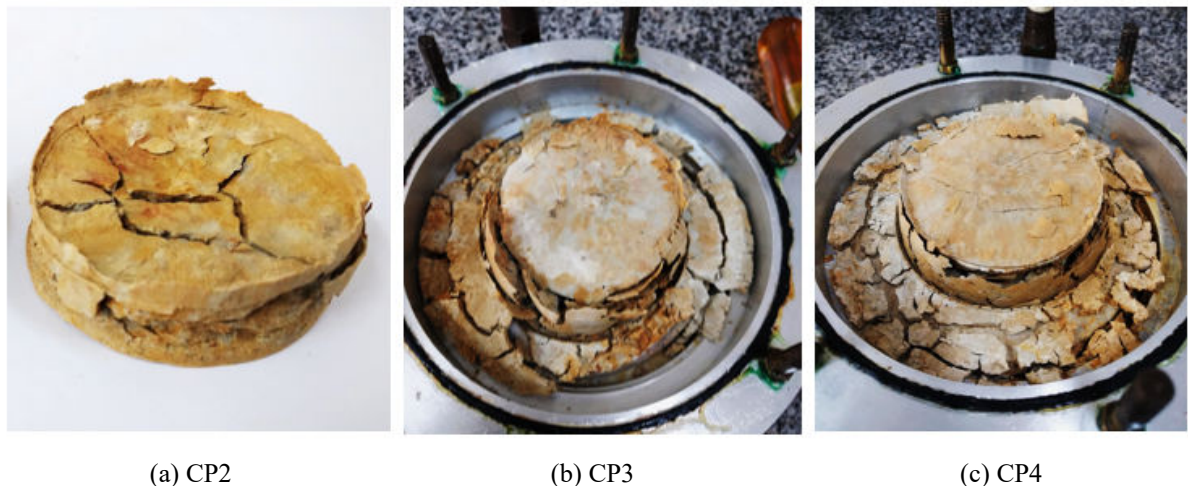
Fonte: Autora (2022).

Verifica-se que CP3, após a redução do primeiro ciclo, apresentou deformações verticais e tensões de expansão bem próximas umas das outras. As tensões de expansão variaram entre 100 kPa e 138 kPa, que equivalem a 78 % e 69 % de redução em comparação à tensão do ciclo 1. CP4 foi a amostra que exibiu os menores valores de redução de tensão de expansão. Em comparação ao ciclo 1, a maior redução foi observada no ciclo 5 de 68 %. Esse valor está relacionado com a baixa deformação vertical observada. Esta, por sua vez, pode estar relacionada com a fragmentação da amostra ou com erro do operador ao identificar o término

da expansão primária. CP2 foi o corpo de prova que mais teve oscilações nos valores de deformações verticais e consequentemente nas tensões de expansão. A baixa deformação de expansão de CP2, no ciclo 8, foi a responsável por encerrar os ensaios no oitavo ciclo. A amostra sofreu grande deterioração de sua estrutura durante os consecutivos ciclos de umedecimento e secagem: as fissuras de contração evoluíram para trincas e uma grande perda de massa foi observada. Como consequência, o potencial expansivo de CP2 ficou comprometido e no ciclo 8 a deformação vertical foi de apenas 0,931 mm, o que refletiu em uma redução de 97 % da tensão de expansão da amostra.

A Figura 4.17 apresenta os corpos de prova após o término do ensaio de tensão de expansão cíclico. A etapa de secagem de CP2 foi realizada com a célula de adensamento aberta, igual ao realizado por Basma *et al.* (1996) e Al-Homoud et al (1995). Desta maneira foi possibilitado à amostra de solo se desprender do anel facilmente a cada etapa de contração. Por outro lado, as amostras CP3 e CP4 foram secas dentro da célula de adensamento completamente fechada, como praticado por Tripathy, Rao e Fredlund (2002) e Tripathy e Rao (2009). A abertura das células de CP3 e CP4 ocorreu apenas após o término do ensaio, isto é, ao final da contração do ciclo 8.

Figura 4.17 – Corpos de prova após o término do ensaio de tensão de expansão cíclico.



Fonte: Autora (2022).

Em todos os corpos de prova foi observada considerável perda de massa pelas laterais de sua circunferência, em virtude da fragmentação da amostra em pedaços menores. Durante a fase de carregamento após a expansão, também foi verificada perda de massa, como mostrado nas Figuras 4.18-a e 4.18-b. Outro fenômeno contemplado foi o surgimento de fungos nas superfícies da pedra porosa e do papel filtro superior (Figura 4.18-c).

Figura 4.18 – Eventos observados no ensaio de tensão de expansão cíclico.



(a) perda de massa

(b) perda de massa

(c) presença de fungos

Fonte: Autora (2022).

Ao que se percebe, o processo cíclico de umedecimento e secagem provoca significativas alterações na estrutura do solo. A etapa de saturação proporciona um aumento de volume do corpo de prova e de seu índice de vazios, ao passo que a água é adsorvida entre as camadas cristalinas dos argilominerais do tipo 2:1. Durante a fase de secagem, os poros do solo se contraem e é observada uma deformação não recuperável, visto que, após o ciclo 1, a expansão livre e a tensão de expansão observadas são menores. A contração dos poros do solo proporciona o aumento de macroporos e o surgimento de fissuras que se desenvolvem na direção vertical e favorece a desagregação da amostra. A adição de novos ciclos de umedecimento e secagem acarreta acúmulo de deformações não recuperáveis que, por sua vez, são responsáveis pelas graduais reduções da capacidade de expansão do solo. Os autores Al-Omari, Ibrahim e Al-Bayate (2010) e Al-Homoud *et al.* (1995) nomeiam esse fenômeno como fadiga de expansão e o correlaciona com as deformações remanescentes irreversíveis oriundas de cada ciclo de expansão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas desta pesquisa, bem como são elencadas sugestões indicadas para possíveis trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

A amostra de solo expansivo analisada trata-se de um solo fino. De acordo com o SUCS, a amostra recebeu a classificação de argila inorgânica de alta plasticidade (CH). Conforme o sistema TRB, encontra-se na classe A-7-6. Os valores dos limites de consistência obtidos para a amostra foram relativamente elevados. A amostra é caracterizada como uma argila dura e altamente plástica.

O solo apresentou atividade da fração argila considerada normal, de acordo com o critério de Skempton. Todavia, a classificação atribuída ao potencial expansivo da amostra foi de alto a muito alto, a depender do critério aplicado. Formado exposto, conclui-se que neste trabalho verificou-se que o índice de atividade de argila de Skempton não é um bom parâmetro para avaliação do potencial expansivo do solo.

Do ensaio de compactação, energia do Proctor Normal, foi obtida massa específica aparente seca máxima inferior à massa específica seca calculada para os corpos de prova moldados a partir da amostra indeformada (torrões de solo). Infere-se a isso a elevação do valor de sucção da amostra durante o período de secagem em laboratório. Entende-se que nesse período de dessecação a amostra sofreu contrações que aproximaram suas partículas umas das outras, o que resultou em uma maior densificação do solo.

Da caracterização química concluiu-se que a amostra consiste em um solo jovem, pouco intemperizado, com a presença de minerais primários e argilas silicatadas do tipo 2:1. A amostra possui elevada capacidade de reter cátions, com valor de CTC comum ao grupo das ilitas, tendo sido classificada como hipoférrica, pobre em matéria orgânica, porém, eutrófica.

Do ensaio de adsorção de azul de metileno, obteve-se o grau de atividade muito ativo. Os valores de coeficiente de atividade e superfície específica encontrados assemelham-se aos dos argilominerais do grupo da vermiculita, ou seja, o que justifica o seu comportamento expansivo.

A análise mineralógica de DRX indicou interestratificação irregular envolvendo argilominerais de estrutura 2:1, com a presença de mica, esmectita, montmorilonita e caulinita. A análise microestrutural realizada pelo ensaio de MEV evidenciou a presença de lâminas finas, de perfil irregular e contornos mal definidos característicos aos argilominerais dos grupos mica e vermiculitas. A EDS apontou a presença de caulinita.

Com base na avaliação quantitativa da expansividade, a amostra se mostrou altamente expansiva. No ciclo inicial do ensaio de expansão livre a amostra praticamente dobrou de tamanho. Ainda assim, a ausência de anel guia e a consequente expansão volumétrica da amostra nas extremidades do anel podem ter minimizado esse valor de expansão. As tensões de expansão também foram de grande magnitude. Segundo Jimenez (1980), as tensões de expansão observadas podem gerar danos estruturais severos às estruturas que vierem a ser apoiadas sobre esse solo, o que possivelmente demandaria as suas demolições.

Com relação aos ciclos de umedecimento e secagem, os maiores valores de expansão livre e tensão de expansão foram registrados no ciclo 1. O comportamento expansivo do solo diminuiu com o aumento do número de ciclos de umedecimento e secagem. A maior redução nos valores de expansão livre e tensão de expansão foi registrada do ciclo 1 para o 2. A adição de novos ciclos implicaram em novas reduções, de forma que entre o primeiro e o oitavo ciclo a expansão livre diminuiu em 63 %, enquanto que a tensão de expansão sofreu uma queda média de aproximadamente 74 %, neste mesmo intervalo. Ainda cabe ressaltar que as reduções percebidas estão associadas à secagem da amostra ao valor inicial de umidade. Desta forma, não se espera que o mesmo comportamento seja evidenciado em amostras dessecadas a umidade inferior e sucção superior às iniciais. Assim, à vista do exposto, comprova-se que os ciclos de umedecimento e secagem são responsáveis por influenciar nos parâmetros de tensão de expansão e expansão livre do solo expansivo.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como forma de complementar a presente pesquisa, sugere-se para trabalhos futuros:

- Estudar o solo com dispersivo;
- Realizar ensaios cíclicos de tensão de expansão com sucção controlada;
- Confeccionar a curva característica de retenção de água do solo para cada ciclo de umedecimento e secagem e analisar seu comportamento;

- Avaliar o melhoramento deste solo com adição de cal (ou outro aditivo) e verificar como a tensão de expansão e a expansão livre se desenvolvem a cada ciclo de umedecimento e secagem;
- Investigar se as propriedades de permeabilidade e plasticidade do solo também são afetadas pelos ciclos de umedecimento e secagem;
- Estudar a evolução dos tamanhos dos poros da amostra a cada ciclo de umedecimento e secagem, via porosimetria por intrusão de mercúrio;
- Estudar a distribuição de água nos poros da amostra a cada ciclo de umedecimento e secagem mediante ensaios de ressonância magnética nuclear.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA EMBRAPA DE INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA (AGEITEC). **Atividade da argila.** Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_2_2212200611536.html>. Acesso em 10 abr. 2022.

AL-HOMOULD, A. S. *et al.* **Cyclics welling behavior of clays.** Journal of Geotechnical Enginnering, v. 121, p. 562-565, 1995.

AL-OMARI, R. R; IBRAHIM, S. F; AL-BAYATE, I. K. **Effect of potassium chloride on cyclic behavior of expansive clays.** International Journal of Geotechnical Engineering. v. 4:2, p. 231-239, 2010.

AL-TAIE, A. *et al.* **Effect of Expansão-contração Cycleson Volumetric Behavior of Compacted Expansive Clay Stabilized Using Lime.** Int. J. Geomech, 20(11):04020212, 2020.

AL-TAIE, A. *et al.* **Swell-Shrink Cycles of Lime Stabilized Expansive Subgrade.** Procedia Engineering, v. 143, p. 615-622, 2016.

ALVES, A. W. B. C.; CAVALCANTE, E. H. C.; FREITAS NETO, O.; CARDOSO JR., C. R. **Análise de Banco de Dados com Solos Expansivos de Sergipe.** In: VIII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Fortaleza, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 4546: Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils.** 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D 4829:Standard Test Method for Expansion Index of Soils.** 2011.

AQUINO, A. E. B. **Contribuição à cartografia geotécnica no município de Teresina-PI:** cartas de suscetibilidade à ocorrência de solos problemáticos e prática de fundação com uso de Geoprocessamento. 2020. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, 2020.

ARAÚJO, A. G. D. de. **Análise do processo de fissuras e do comportamento de estacas granulares ancoradas submetidas a secagem e umedecimento em solo expansivo.** 2020. 331 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 6502: Rochas e solos – Terminologia.** 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459: Determinação do limite de liquidez.** 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade.** 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação**. 2016.

BARBOSA, V. H. R.; GUIMARÃES, A. C. R.; MARQUES, M. E. S. **Aspectos gerais da geotecnia do estado do Acre com ênfase em pavimentação rodoviária**. Revista Pavimentação, p. 45-46, 2021.

BASMA, A. A. *et al.* **Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays**. Applied Clay Science, v. 11, p. 211-227, 1996.

BONINI, A. O. **Proposta de um método de ensaio para determinação do volume de azul de metileno adsorvido pela fração fina de solos tropicais**. 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Infraestrutura de Transportes) – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

BURGOS, R. D. F. *et al.* **Foundations Pathology: A case study about a school constructed on expansive soil**. In: Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto, 2019.

CALEGARI, J.; MACHADO, R. **Análises químicas e físicas do solo após as culturas da soja (Glycine max) e do milho (Zea mays)**. Cultivando o Saber. Cascavel: v.1, n.1, p.171-184, 2008. Disponível em: <https://www.fag.edu.br/upload/revista/cultivando_o_saber/58fe72d8590dc.pdf>. Acesso em 13 abr. 2022.

CAMPOS, L. E. P.; BURGOS, P. C. **Determinação do potencial de expansão de dois massapês da região metropolitana da cidade de Salvador-BA**. In: 5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, São Carlos, 2004.

CARVALHO, J. C. *et al.* **Propriedades químicas, mineralógicas e estruturais de solos naturais e compactados**. CARVALHO, J. C. *et al.* (Org.). Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: ABMS, p 39-78, 2015.

CAVALCANTE JR., D. A. **Ocorrência de Solos Expansivos no Estado de Sergipe**. In: 1º Seminário Geotécnico Bahia/Sergipe. Notas de apresentação, 2017.

CAVALCANTE, E. H. *et al.* **Propriedades geotécnicas de um solo expansivo de Sergipe**. In: Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos, Nova Friburgo, 2006. Disponível em: <<https://www.abms.com.br/anaiscobramsegsbmrgeojovem/>>. Acesso em: 03 nov. de 2020.

CHEN, F. H. **The Use of Piers to Prevent the Uplifting of Lightly Loaded Structures Founded on Expansive Soils**. Proceedings, First International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils, Texas A&M University, College Station, Tex. p. 152-171, 1965.

DAKSHANAMURTHY, V.; RAMAN, V. **A Simple Method of Identifying an Expansive Soil**. Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 13, n. 1, p. 97-104, 1973.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Principles of Geotechnical Engineering**. 8th ed. Cengage Learning, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS (DNER). **DNER-ME 087: Solos - determinação dos fatores de contração**. 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGENS (DNER). **DNER-ME 093: Solos - determinação da densidade real**. 1994.

DONALD, S. R; LAWRENCE, J. D; DAVID, P. M. **An evaluation of expediente methodology for identification of potentially expansive soils**. United States. Federal Highway Administration. Springfield, VA: N.T.I.S, 1977.

EDIFICARSE EMPRESA JÚNIOR DE ENGENHARIA CIVIL. **Parecer Técnico Nº 001/2021**. São Cristóvão, SE. 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042994/1/Doc206.pdf>>. Acesso em: 13 abr. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamento Exploratório** – Reconhecimento de Solos do Estado de Sergipe. Boletim Técnico nº 36. Recife, PE: Embrapa, Centro de Pesquisas Pedológicas, 1975.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FABBRI, G. T. P. **Caracterização da fração fina de solos tropicais através da adsorção de azul de metileno**. 1994. 176 f. Tese (Doutorado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1994.

FERREIRA, S. R. M. *et al.* **Avaliação da expansão de um solo do município de Paulista – PE melhorado com cal**. Revista Matéria. Artigo e-11930, 2017.

FERREIRA, S. R. M. **Solos colapsíveis e expansivos: uma visão panorâmica no Brasil**. In: VI Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados. Salvador, 2006.

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

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H.; FREDLUND, M. D. **Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2012.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal - Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 2^a ed. Recife: Editora Universitária da UFPE. p. 341, 2002.

GURGEL, J. G. B.; SANTOS JUNIOR, O. F. **Avaliação do Potencial Expansivo de Sedimentos da Bacia do Jatobá Localizados no Município de Floresta/PE**. In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Belo Horizonte, 2006.

HEIDEMANN, M. **Estudo dos solos de uma encosta instável em São José-SC: intemperismo e comportamento geotécnico**. 2015. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

HOLANDA, M. J. O. *et al.* **Identificação de solos expansivos e colapsíveis no Nordeste brasileiro a partir de Rede Neurais Artificiais geradas em Pernambuco**. Research, Society and Development, v. 10, n. 15, 2021.

HOLTZ, R. D; KOVACS, W. D; SHEAHAN, T. C. **An Introduction to Geotechnical Engineering**. 2th ed. Pearson, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Brasil/Sergipe/Nossa Senhora do Socorro**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/se/nossa-senhora-do-socorro/panorama>>. Acesso em: 21 mar. 2022.

JACKSON, M. L. **Soil Chemical Analysis** - Advanced course. Madison, Prentice-Hall, 1979.

JAIME, A. P; BALLINAS, R. J. M. **Suelos expansivos**. In: XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Acapulco, Gro., 2010.

JESUS, A. J. S.; PINTO, S. A. **Análise da expansibilidade de um solo argiloso – estudo de caso**. In: IV International Symposium on Innovation and Technology and VIII Research and Innovation Workshop. Salvador, 2018. Disponível em: <https://doity.com.br/media/doity/submissoes/artigo-2c62c8ebf7fffb100bfcea70407ca1f7b1c7020e-arquivo_revisado.pdf>. Acesso em 02 jun. 2022.

JIMENEZ, S. J. A. **Cimentaciones em terrenos expansivos a cola sables**. In: Geotecnia Y Cimentos 111, v. 1, ED. Rueda, Madrid. p. 533-650, 1980.

JONES, F. O. **New Fast, Accurate Test Measures Bentonite in Drilling Mud**. Oil Gas Journal, v. 62, p. 76-78, 1964.

JUSTO, J. L. A.; DELGADO, A.; RUIZ, J. **The influence of stress-path in the collapse-swelling of soils at the laboratory**. In: International Conference on Expansive Soils, 5, Adelaide, 1984. Proceedings, 1984. P.67-71.

KALANTARI, B. **Foundations on expansive soils: A review**. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, v. 4, n. 18, p. 3231–3237, 2012.

LAMBE, T. W; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, INC, 1969.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LOUISIANA DEPARTMENT OF-TRANSPORTATION. **Volume Changes in Embankments**. Training Handout prepared by Research and Development, Baton Rouge, La.

MA, T. *et al.* **Microstructural Evolution of expansive clay during drying-wetting cycle**. In: Acta Geotechnica, v. 15, p. 2355-2366, 2020.

MELO NETO, J. O. *et al.* **Espacialização da chuva diária na bacia do rio Sergipe**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

MIJANGOS, R. J. B. **Suelos Expansivos**. 2006. 165 f. Tesis (Maestría em Ingeniería Civil) – Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2006.

MORAIS, J. J. O. **Caracterização Geotécnica da Expansividade de um Solo Argiloso do Município de Paulista-PE**. 2017. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

MURTHY, V. N. S. **Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering**. New York: Marcel Dekker, INC, 2010.

NELSON, J. D. *et al.* **Foundation Engineering for Expansive Soils**. 3th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, INC, 2015.

NELSON, J. D; MILLER, D. J. **Expansive soils: problems and practice in foundation and pavement engineering**. 1th ed. New York: John Wiley & Sons, INC, 1992.

OLIVEIRA *et al.* **Potencial Expansivo de Solos da rodovia BR 324 no Trecho Entre feira de Santana e Salvador – Uma Análise Experimental**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, 2018.

OLIVEIRA, L. S.; COSTA, S. C. F. E. **Caracterização de um solo tipo Massapê para verificação do seu potencial expansivo**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, 2018.

OLIVEIRA, A. G. S; JESUS, A. C; MIRANDA, S. B. **Estudo Geológico – Geotécnico dos Solos Expansivos da Região do Recôncavo Baiano**. In: II Simpósio Brasileiro de Jovens Geotécnicos – II GEOJOVEM, Nova Friburgo, 2006.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. 253 f. Tese (Doutorado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PREFEITURA MUNICIPAL DE NOSSA SENHORA DO SOCORRO. **Dados Municipais**. Disponível em: <<http://socorro.se.gov.br/dados-municipais/>>. Acesso em 21 mar. 2022.

PRESA, E. P. **Deformabilidade de lasarcillas expansivas bajo succión controlada**. 1982. Tesis (Doctoral) - Escuela T. Superior De Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 1982.

RAO, R. R. *et al.* **Close from heave solutions for expansive soils**. J. Geotechnol. Eng. A.S.C.E., v. 114, n. 5 p. 573-588, 1988.

RAO, A; RAO, M. **Behavior of expansive soils under stabilized fly ash cushions during cyclic wetting and drying**. International Journal of Geotechnical Engineering, v. 4:1, p. 111-118, 2010.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de Argilas**. v. 1. USP Edgard Blucher, 1975.

SANTOS, W. A.; ARAÚJO, H. M. **Clima e condições meteorológicas da sub-bacia hidrográfica do rio Cotinguiba-SE**. Boletim de Geografia, Universidade Estadual de Maringá, v. 31, n. 1, p. 41-52, 2013.

SEED, H. B.; MITCHELL, J. K.; CHAN, C. K. **Study of Swell and Swell Pressure Characteristics of Compacted Clays**. Highway Research Board Bulletin, n. 313, p.12-39, 1962.

SILVA, A. C. *et al.* **Avaliação do potencial expansivo e colapsível de solos do Nordeste brasileiro por meio de métodos diretos e indiretos**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, n. 20, Campinas, Anais. Campinas: ABMS, 2020. No prelo. (2020).

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 – UFPE, Recife, PE, 2003.

SILVA, T. C. R. **Avaliação do comportamento hidromecânico e do processo de propagação de fissura de solo expansivo do município de Bonito-PE**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SILVA, T. C. R; FERREIRA, S. R. M. **Avaliação da Expansividade de Solos Argilosos do Município de Bonito/PE por meio de Métodos Qualitativos e Quantitativos**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, 2018.

SIMÕES, P. R. M. **Mecanismos de Instabilidade dos Taludes Naturais das Formações Expansivas da Bacia Sedimentar do Recôncavo Baiano**. 1991. 296 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

SKEMPTON, A. W. **The Colloidal “Activity” of Clays**. In: Proceedings of the third international conference on soil mechanics and foundation engineering. Zurich, Switzerland, ICOSOMEF, p. 57-61, 1953.

SOARES, J. M. D.; PIRES, G. M.; CONTERATO, T. M. **Solos Expansivos: Estudo de Caso em Santa Maria/RS**. In: VII Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, Santa Maria, 2013.

SOBRAL, H. S. **Contribuição ao Estudo dos Massapés como Solos para Construção**. 1956. Tese (Cátedra de Matérias de Construção) – Escola de Belas Artes, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1956.

TRIPATHY, S.; RAO K. S. S. **Cyclic Swell–Shrink Behaviour of a Compacted Expansive Soil**. Geotech Geol Eng, v. 27, p. 89-103, 2009.

TRIPATHY, S; RAO, K. S. S; FREDLUND, D. G. **Water content – void ratio swell–shrink paths of compacted expansive soils**. Can. Geotech. J, v. 39, p. 938-959, 2002.

UNIFORM BUILDING CODE (UBC). **International Conference of Building Officials**. California, 1979.

VAN DER MERVE, D. H. **The Prediction of heave from the plasticity index and percentagem clay fraction of soils**: The Civil Engineer. South African Institute of Civil Engineers, v. 6, p. 103-107, 1964.

VIJAYVERGIYA, V. N.; GHAZZALY, O. I. **Prediction of Swelling Potencial for Natural Clays**. In: 3rd International Conference on Expansive Soils, Hayfa, v. I, p. 227-236, 1973.

VILAR, O. M; FERREIRA, S. R. M. **Solos colapsíveis e expansivos**. In: CARVALHO, J. C. *et al.* (Org.). Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: ABMS, p. 415-436, 2015.

WEI, G. F.; DONG, J. G. **Swelling Research of Expansive Soil Under Drying-Wetting Cycles: A NMR Method**. Soils and Rocks, São Paulo, v. 43, p. 21-30, jan-mar, 2020.