UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

THALITA CRISTINA RODRIGUES SILVA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÔMECANICO E DO PROCESSO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS DE SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE BONITO/PE

Recife
2019

THALITA CRISTINA RODRIGUES SILVA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÔMECANICO E DO PROCESSO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS DE SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE BONITO/PE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira

Recife

2019

Catalogação na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

S586a Silva, Thalita Cristina Rodrigues.
Avaliação do comportamento hidromecânico e do processo de propagação de fissuras de solo expansivo do município de Bonito/PE / Thalita Cristina Rodrigues – Recife, 2019.
163 f.: figs., tabs., equações., abrev. e siglas., símbolos.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2019.
Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Solos expansivos. 3. Argilominerais. 4. Tensão de expansão. 5. Fissuras. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG / 2020-84

THALITA CRISTINA RODRIGUES SILVA

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIDRÔMECANICO E DO PROCESSO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS DE SOLO EXPANSIVO DO MUNICÍPIO DE BONITO/PE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 26/08/2019.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. Dr. Alexandre Duarte Gusmão (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

_____

Profª. Dra. Kátia Vanessa Bicalho (Examinadora Externa)
Universidade Federal do Espírito Santo

A toda minha família, em especial ao meu filho Miguel Rodrigues Bôto.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos, primeiramente, a Deus, por sempre iluminar minha trajetória de vida e mostrar o caminho a seguir.

A toda minha família, pelo incentivo e apoio em todas as minhas decisões. Agradeço imensamente aos meus pais Inaldo e Vana, ao meu filho Miguel, ao meu esposo Raimundo e irmã Thaís, pela compreensão nos momentos de ausência e por todo amor dedicado.

Agradeço aos amigos de longas datas por sempre estarem presentes e aos colegas geotécnicos que o mestrado proporcionou pela troca de experiência e apoio para essa conquista. Grata aos colegas Arthur, Felipe, Ilton, Mateus e Rafaela pela parceria nas atividades de laboratório em várias ocasiões.

Ao prof. Dr. Silvio Romero de Melo Ferreira pela orientação, ensinamentos, confiança durante o desenvolvimento da pesquisa, e por ter dado a oportunidade de participar do Grupo de Solos Não Saturados da UFPE.

Aos professores da área de Geotecnia do programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFPE pelas experiências e conhecimentos compartilhados.

Aos laboratoristas do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE (LSI – UFPE), Gutemberg e Antônio Brito, pela atenção e colaboração durante a fase de desenvolvimento do programa experimental.

Agradeço ao prof. Dr. Sérgio Carvalho de Paiva da Universidade Católica de Pernambuco e a profª. Drª Valderez P. Ferreira da Universidade Federal de Pernambuco pelo tempo disponibilizado para realização dos ensaios químicos e dos ensaios de espectrometria de fluorescência de Raio-X, respectivamente.

Ao prof. Dr. Antônio Antonino pela abertura do laboratório de Tomografia Computadorizada do Departamento de Energia Nuclear para realização dos ensaios de tomografia de Raio-X e ao técnico Daniel pela dedicação na realização desses ensaios.

Grata à equipe do laboratório do Centro de Tecnologias Estratégicas de Pernambuco (CETENE) pelo auxílio na realização dos ensaios de difração de Raio-X e à equipe do laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) da UFPE pela ajuda nos ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes pelo apoio financeiro e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo suporte na pesquisa.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Solos expansivos são solos não saturados que apresentam em sua composição argilominerais responsáveis por proporcionar ao solo instabilidade volumétrica ao serem submetidos à variação de umidade e sucção, provocando danos às edificações, estradas, e construções diversas. Quando em período chuvoso, tais solos aumentam de volume e quando em período seco apresentam contração com formação de fissuras. Em Pernambuco/Brasil esse tipo de solo já foi registrado em diferentes cidades como Paulista, Olinda, Ipojuca, Petrolândia, entre outras. São diversos os métodos de ensaios de campo e laboratório que permitem identificar a presença de argilominerais e a taxa de expansão de um solo. O presente trabalho tem o objetivo de avaliar o comportamento hidromecânico e processo de propagação de fissuras de solos expansivos da cidade de Bonito por meio de ensaios laboratoriais de caracterização Física, Química, micro e macroestrutural, de expansão e de sucção de três amostras indeformadas e deformadas coletadas na localidade. Verificou-se que as amostras de solos ensaiadas são argilas de alta compressibilidade, com baixo teor de matéria orgânica e elevada capacidade de troca catiônica. Por meio do ensaio de Difração de Raios X registrou-se a presença do argilomineral montmorilonita para as três amostras. A expansão livre para as Amostras 01 e 02 correspondeu a aproximadamente 2%, enquanto a Amostra 03 apresentou expansão livre em torno de 9,9%. Quanto à tensão de expansão a volume constante, as Amostras 01 e 02 apresentaram valor de 10,62 kPa e 8,98 kPa, respectivamente, e a Amostra 03 de 371,02 kPa. Registrou-se ainda o aumento da tensão de expansão com a elevação da sucção, bem como a redução da macroporisodade do solo após aumento de volume. Somado a isso, foi ainda avaliado o comportamento de fissuração do solo expansivo de Bonito durante processo de ressecamento. Observou-se que o aumento da espessura da amostra ensaiada proporciona inicialmente contração do solo antes do aparecimento das fissuras, e posterior formação de células com maiores dimensões quando comparadas a amostra de menor espessura. O ensaio com ciclo de secagem e umedecimento demonstrou que na primeira etapa de secagem foram formadas células maiores com fissuras largas, na segunda fase de secagem houve início da formação de fissuras menores e na terceira etapa de secagem tais fissuras formaram-se em maior quantitativo. Para todos os ensaios foi registrado Fator de Intensidade de Fissuras superior a 30%. Nas etapas de umedecimento ocorreu a redução das fissuras devido à expansão.

Palavras-chave: Solos Expansivos. Argilominerais. Tensão de expansão. Fissuras.

ABSTRACT

Expansive soils are unsaturated soils that have in their composition clay minerals responsible for providing volumetric instability into the soil when subjected to changes in moisture and suction, causing damage to buildings, roads, and several constructions. When in rainy season, these soils increase volume; when in dry season these soils present contraction and cracks appear. In Pernambuco/Brazil, this type of soil has been found in different cities such as Paulista, Olinda, Ipojuca, Petrolândia, among others. There are several field and laboratory testing methods to identify the presence of clay minerals and the soil´s rate swelling. This study aims to evaluate the hydromechanical behavior and the crack propagation process of Bonito´s expansive soils by physical, chemical, micro and macro-structural characterization, expansion and suction tests of three disturbed and undisturbed samples collected in the locality. The soil samples are high compressible clays with low organic matter content and high cation exchange capacity. Through the X-Ray Diffraction test, the presence of montmorillonite for the three samples was recorded. Free swelling index for Samples 01 and 02 corresponds to approximately 2%, while Sample 03 presented around 9.9 %. The swelling pressure, by constant volume, of the Samples 01 and 02 were 10,62 kPa e 8,98 kPa, respectively, and of the Sample 03 was 371,02 kPa. It was also found the increase of the swelling pressure with the suction increase, as well as the decrease of the soil macroporosis after volume increase. In addition, the cracking behavior of Bonito's expansive soil during the drying process was also evaluated. It was observed that increasing the thickness of the tested sample initially provides soil contraction before the appearance of cracks, and later formation of larger cells when compared to the smaller sample. The test with drying and wetting cycle showed that in the first drying step larger cells with large cracks were formed, in the second drying step the formation of smaller cracks began and in the third drying step such cracks formed in larger amount. For all testes, a CIF above 30% was registered. During moistening, there was crack reduction due to swelling.

Keywords: Expansive Soils. Clay Mineral. Swelling Pressure. Cracking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Unidade estrutural tetraédrica 25
Figura 2 – Unidade estrutural octaédrica 25
Figura 3 – Ocorrência de Solos Expansivos 27
Figura 4 – Carta de Van Der Merwe (1964) 35
Figura 5 – Técnica de medição de sucção por papel filtro 40
Figura 6 – Elementos da curva característica de retenção de água 42
Figura 7 – Curva característica de retenção de água típica de Solos Expansivos 43
Figura 8 – Curva característica de retenção de água de solo expansivo de origem Guabirotuba 44
Figura 9 – Comportamento histerético de solo expansivo de Paulista/PE 45
Figura 10 – Curva característica de retenção de solo expansivo de Cabrobó .. 45
Figura 11 – Sistema de funcionamento do tomógrafo e subsequente reconstrução de imagens 47
Figura 12 – Artefatos em forma de anel 48
Figura 13 – Processo de fissuração em argilas 50
Figura 14 – Registros de fissuras em solos expansivos em campo 50
Figura 15 – Registros de fissuração em laboratório 52
Figura 16 – Localização do município de Bonito/PE 53
Figura 17 – Média Pluviométrica de Bonito/PE 54
Figura 18 – Mapa Geológico do Município de Bonito/PE 56
Figura 19 – Carta interpretativa de suscetibilidade à expansão do Estado de Pernambuco 57
Figura 20 – Fluxograma de atividades do programa experimental realizado nesta dissertação 58
Figura 21 – Amostras indeformadas de solo de Bonito/PE investigadas nesta dissertação 59
Figura 22 – Locação dos pontos de coleta das amostras sobrepostas sobre a obra já em andamento 60
Figura 23 – Mapa pedológico da cidade de Bonito, com identificação dos pontos de coleta das amostras 60
Figura 24 – Preparação das Amostras 01, 02 e 03 62
Figura 25 – Ensaio de Caracterização Granulométrica 64

Figura 26 – Equipamentos utilizados para o ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X 66
Figura 27 – Lâminas de vidro para ensaio de Difração de Raios X 67
Figura 28 – Etapas do Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura 70
Figura 29 – Ensaio de tensão de expansão em prensa edométrica convencional 70
Figura 30 – Ensaio de expansão livre sem aplicação de tensão de consolidação 71
Figura 31 – Ensaio de sucção pelo método do dessecador de vidro 74
Figura 32 – Sequência do ensaio de tomografia computadorizada de Raios X 76
Figura 33 – Comparativo do escaneamento para redução de artefatos de anéis 77
Figura 34 – Fluxograma do Processo de análise de vazios 78
Figura 35 – Curva Granulométrica das Amostras de Bonito/PE 79
Figura 36 – Classificação das amostras investigadas segundo Carta de Atividade e Carta de Plasticidade 81
Figura 37 – Curva de compactação (Proctor Normal) das Amostras 01, 02 e 03 83
Figura 38 – Difratogramas de Raios X da Amostra 01 88
Figura 39 – Difratogramas de Raios X da Amostra 02 88
Figura 40 – Difratogramas de Raios X da Amostra 03 89
Figura 41 – Eletromicrografias da Amostra 01 90
Figura 42 – Eletromicrografias da Amostra 02 91
Figura 43 – Eletromicrografias da Amostra 03 92
Figura 44 – Curva deformação de expansão versus tempo das Amostras 01, 02 e 03 94
Figura 45 – Curva deformação de expansão versus tempo da Amostra 03 (sem aplicação de tensão de consolidação) 96
Figura 46 – Resultado do Ensaio Edométrico Duplo da Amostra 01 97
Figura 47 – Resultado do Ensaio Edométrico Duplo da Amostra 02 97
Figura 48 – Resultado do Ensaio Edométrico Duplo da Amostra 03 97
Figura 49 – Tensão de Expansão pelo método Carregamento após Expansão da Amostra 03 98
Figura 50 – Tensão de Expansão pelo método Expansão e Colapso da Amostra 03 99
Figura 51 – Relação entre umidade volumérica (θ), grau de saturação (Sr), índice de vazios (e) e sucção total (ψ) para a Amostra 03 102

Figura 52 – Curva Característica de retenção de água da Amostra 03 (Resultados experimentais e ajuste da equação de Van Genuchten, 1980) 103
Figura 53 – Relação sucção com as fases constituintes da Amostra 03 104
Figura 54 – Relação entre a tensão de expansão e sucção para a Amostra 03 104
Figura 55 – Expansão livre do Corpo de Prova indeformado moldado no molde de PVC 105
Figura 56 – Comparativo do escaneamento da Amostra 03 de Bonito na condição Indeformada Natural (BIN) e Expandida (BIE) 106
Figura 57 – Expansão livre do Corpo de Prova Compactado moldado no molde de PVC 108
Figura 58 – Comparativo do escaneamento da Amostra 03 de Bonito na condição Compactada na umidade ótima (BCO) e expandida (BCE) 109
Figura 59 – Processamento de imagem de uma placa de 5mm para extrair vários parâmetros de fissuras 114
Figura 60 – Exemplo de propagação de fissuras como resultado de mecanismo misto de abertura e deslizamento 115
Figura 61 – Formação e coalescência de fissuras em solos argilosos 115
Figura 62 – Evolução do CIF, sucção e umidade com o tempo 116
Figura 63 – Correlação de parâmetros de fissuração com ciclos de ressecamento e umedecimento 117
Figura 64 – Modelos de montagem de ensaios de fissuras 118
Figura 65 – Projeto Aparato para ensaio de Fissuras 119
Figura 66 – Equipamentos utilizados para o ensaio de propagação de fissuras 120
Figura 67 – Monitoramento do ensaio de propagação de fissuras 124
Figura 68 – Ensaio com ciclo de secagem e umedecimento 125
Figura 69 – Etapas de análise e processamento das imagens do ensaio de fissuras 126
Figura 70 – Fluxograma do ensaio de propagação de fissuras 127
Figura 71 – Evolução das fissuras no Ensaio 1 128
Figura 72 – Resultados do Ensaio 1: Secagem por 2 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 15 mm..... 129
Figura 73 – Evolução das fissuras no Ensaio 2 131
Figura 74 – Resultados do Ensaio 2: Secagem por 4 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 15 mm 133
Figura 75 – Evolução das fissuras no Ensaio 3 134
Figura 76 – Resultados do Ensaio 3: Secagem por 4 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 20 mm 136

Figura 77 – Evolução das fissuras no Ensaio 4 138
Figura 78 – Fissuras de solo expansivo após secagem e após saturação 141
Figura 79 – Cálculo do CIF para fissuras de campo 142
Figura 80 – Resultados do Ensaio 4 de propagação de fissuras com ciclo de secagem e umedecimento 142
Figura 81 – Correlação entre CIF, Umidade Gravimétrica e Sucção na etapa 1 de secagem 144
Figura 82 – Processo de expansão e contração de solo expansivo 145
Figura 83 – Comparativo dos Ensaios 1, 2, 3 e 4 de propagação de fissuras ... 146
Figura 84 – Comparativo do aspecto das células formadas nos Ensaios 2 e 3 149
Figura 85 – Padrão de fissuração para amostras de diferentes alturas 149
Figura 86 – Fissura não ortogonal 150
Figura 87 – Aplicação do modelo de Trabelsi et al. (2018) aos ensaios de fissuras 151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Solos Expansivos em Pernambuco	28
Tabela 2 –	Métodos de identificação de solos expansivos	33
Tabela 3 –	Potencial de Expansão de um solo segundo critério de Skempton	34
Tabela 4 –	Classificação do grau de expansão de solos segundo Seed et. Al (1962), Chen (1965) e Daksanamurthy e Raman (1973)	35
Tabela 5 –	Critérios de Cuellar para classificação do grau de expansão de um solo	35
Tabela 6 –	Grau de Expansão de argilas pela metodologia de Ranganathan e Satyanarayana	36
Tabela 7 –	Critérios de grau de expansividade de Seed et al. (1962)	37
Tabela 8 –	Critério de classificação de solos expansivos por Vijayverviya e Ghazzaly (1973)	37
Tabela 9 –	Possíveis danos à estrutura pelo critério de Jimenez Salas (1980)	38
Tabela 10 –	Técnicas de medição de sucção	40
Tabela 11 –	Informações geográficas de Bonito/PE	53
Tabela 12 –	Amostras de Solo de Bonito/PE	59
Tabela 13 –	Resumo dos ensaios realizados e respectivo quantitativo	61
Tabela 14 –	Ensaios para caracterização física do solo investigado neste estudo	63
Tabela 15 –	Posições referentes aos picos de intensidade principais dos argilominerais	68
Tabela 16 –	Solução concentrada utilizada nos dessecadores de vidro	73
Tabela 17 –	Participação da Argila, Silte, Areia na composição granulométrica das amostras	80
Tabela 18 –	Densidade real dos grãos das amostras de Bonito	81
Tabela 19 –	Limites de Consistência das amostras estudadas	81
Tabela 20 –	Potencial de expansão das amostras investigadas segundo critérios indiretos de classificação de solos expansivos	82
Tabela 21 –	Resultados do Ensaio de Compactação (Proctor Normal)	83
Tabela 22 –	Resultados dos Ensaios Químicos nas amostras investigadas de Bonito/PE	84
Tabela 23 –	Resumo das características das amostras de Bonito referente aos ensaios químicos	86
Tabela 24 –	Dados das análises químicas quantitativas para as Amostras 01, 02 e 03	87

Tabela 25 – Distâncias basais obtidas pelo ensaio de Difração de Raios X 79
Tabela 26 – Dados de ajuste da curva de expansão livre 93
Tabela 27 – Índice físicos dos ensaios de expansão livre 94
Tabela 28 – Comparativo da Expansão Livre de Solos de Pernambuco 95
Tabela 29 – Resumo do ensaio de tensão de Expansão das amostras investigadas 96
Tabela 30 – Comparativo da Tensão de Expansão de Solos de Pernambuco (Brasil) e Sevilha (Espanha) 99
Tabela 31 – Comparativo do potencial de expansão segundo os métodos de classificação Diretos e Indiretos 100
Tabela 32 – Parâmetros do solo obtidos no ensaio de sucção 101
Tabela 33 – Macroporosidade resultante das imagens tomográficas 110
Tabela 34 – Etapas de procedimentos para o primeiro bloco de ensaios de fissuras 121
Tabela 35 – Etapas de procedimentos para o segundo bloco de ensaios de fissuras 123
Tabela 36 – Exemplo de planilha utilizada para registro dos dados do ensaio de fissuras 125
Tabela 37 – Resumo dos principais aspectos dos ensaios de secagem 147

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação do Índice de Atividade 34

Equação 2 – Equação do Índice de Contração 36

Equação 3 – Equação da Expansão Livre 36

Equação 4 – Equação de Van Genuchten 42

Equação 5 – Equação da Lei de Bragg 67

Equação 6 – Equação da sucção do solo pelo método do Papel Filtro para wp > 47% 72

Equação 7 – Equação da sucção do solo pelo método do Papel Filtro para wp > 47% 72

Equação 8 – Equação da macroporosidade 78

Equação 9 – Equação hiperbólica para expansão livre Daksanamurthy 93

Equação 10 – Equação do Fator de Intensidade de Fissuração 113

Equação 11 – Equação do modelo analítico de variação de umidade 150

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Climas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIN	Amostra de Bonito Indeformada na umidade Natural
BIE	Amostra de Bonito Indeformada Expandida
BCO	Amostra de Bonito Compactada na umidade Ótima
BCE	Amostra de Bonito Compactada Expandida
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCA	Cinza de Casca de Arroz
CETENE	Centro de Tecnologias Estratégicas de Pernambuco
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COMPESA	Companhia de Água e Esgoto de Pernambuco
CV	Coeficiente de Variação
DEN	Departamento de Energia Nuclear
DRX	Difração de Raios X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FRX	Espectrometria de Fluorescência de Raios X
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LDN	Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas
LSI	Laboratório de Solos e Instrumentação
LTC-RX	Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios X
LÑSat	Laboratório de Solos Não Saturados
NEG	Laboratório de Núcleo de Estudos Geoquímicos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
QR-COD	Código de Resposta Rápida
UNICAP	Universidade Católica de Pernambuco
URA	Umidade Relativa do Ar
RCD	Resíduo da Construção e Demolição
TCX	Tomografia Computadorizada de Raios X
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

CE	Condutividade Elétrica
CIF	Fator de Intensidade de Fissuras
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
e	Índice de Vazios
E_l	Expansão livre
Ia	Índice de Atividade
IP	Índice de Plasticidade
IC	Índice de Contração
LC	Limite de Contração
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
n	Porosidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
Sr	Grau de Saturação
Ta	Alta Atividade
Tb	Baixa Atividade
w	Umidade Gravimétrica
w_{ot}	Umidade Ótima
wp	Umidade do Papel Filtro
θ	Umidade Volumétrica
ψ	Sucção
γg	Peso Específico das partículas sólidas
γh	Peso Específico solo úmido
γs	Peso Específico do solo seco
$\gamma\alpha$	Peso Específico da água
γ_{dmax}	Peso Específico Aparente Seco Máximo
λ	Comprimento de Onda de Raios X
α	Ângulo de Difração
η	Macroporosidade
σe	Tensão de Expansão

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**19**
1.1	OBJETIVO	22
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2	**REVISÃO DE LITERATURA**	**24**
2.1	ARGILOMINERAIS	24
2.2	LOCAIS DE OCORRÊNCIA DE SOLOS EXPANSIVOS	27
2.3	MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS	32
2.4	SUCÇÃO NOS SOLOS	38
2.5	CURVAS DE RETENÇÃO DE SOLO	41
2.6	TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X	46
2.7	FISSURAÇÃO DE SOLOS	49
2.8	ÁREA DE ESTUDO	52
3	**PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO**	58
3.1	INVESTIGAÇÃO DE CAMPO	58
3.2	INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL	61
3.2.1	Preparação das Amostras	62
3.2.2	Caracterização Física	63
3.2.3	Caracterização Química	65
3.2.3.1	*Ensaios Químicos*	65
3.2.3.2	*Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)*	65
3.2.4	Caracterização Mineralógica	67
3.2.5	Caracterização Microestrutural	68
3.2.6	Caracterização da expansividade	70
3.2.7	Ensaio de Sucção – Curva Característica	71
3.2.8	Caracterização Macroestrutural	75
4	**RESULTADOS E DISCUSSÕES DA CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS**	**79**
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	79
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	84
4.2.1	Ensaios Químicos	84

4.2.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios X 86
4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA 87
4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL 89
4.5 CARACTERIZAÇÃO DA EXPANSIVIDADE 92
4.5.1 Expansão Livre 92
4.5.2 Tensão de Expansão 96
4.5.3 Comparativo dos Métodos Indiretos e Diretos 100
4.6 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA .. 101
4.7 CARACTERIZAÇÃO MACROESTRUTURAL 105
5 ANÁLISE DO PROCESSO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS 112
5.1 ESTUDOS PRELIMINARES 112
5.2 MONTAGEM DO APARATO 118
5.3 METODOLOGIA DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS 120
5.4 RESULTADOS E ANÁLISE DO PROCESSO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS 127
5.4.1 Resultados do Ensaio 1 – Secagem por 2 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 15 mm 127
5.4.2 Resultados do Ensaio 2 – Secagem por 4 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 15 mm 131
5.4.3 Resultados do Ensaio 3 – Secagem por 4 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 20 mm 134
5.4.4 Resultados do Ensaio 4 – Ciclo de secagem e umedecimento 138
5.4.5 Processo de expansão e contração de solo expansivo 144
5.4.6 Comparativo dos Ensaios 1, 2, 3 e 4 146
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 152
6.1 CONCLUSÕES 152
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 155
REFERÊNCIAS 156

1 INTRODUÇÃO

No estudo da Mecânica dos Solos tradicional é possível distinguir comportamentos diferenciados do solo a partir da relação entre os vazios, a água e o ar. A estrutura do solo não é maciça e os vazios formados entre os grãos podem ser preenchidos por água e ar. Quando a água ocupa totalmente os vazios do solo, diz-se que o solo está saturado. Por sua vez, quando os vazios estão preenchidos completamente por ar, ou seja solo seco, ou quando por ar e água conjuntamente, o solo torna-se não saturado.

Observa-se o registro de diversos autores acerca da constituição dos solos não saturados em três fases: a fase sólida, constituída por partículas sólidas e água adsorvida; a fase líquida, pela água livre, ar e sais dissolvidos e, por último, a fase gasosa, composta por ar livre e vapor d'água. Há, ainda, a proposta por Fredlund & Morgenstern (1977) de uma quarta fase, a qual corresponde à interface entre o ar livre e a água livre, denominada pelos autores de membrana contráctil.

Para os engenheiros geotécnicos, a importância do conhecimento dos solos não saturados se dá em função dos aspectos especiais de alguns tipos desses solos: os solos colapsíveis e os solos expansivos, sendo esse último foco dessa dissertação.

Para que um solo seja potencialmente expansivo é necessário que esteja na condição de solo não saturado. Dessa forma, a umidade estará em equilíbrio com as tensões aplicadas, a evapotranspiração na superfície do terreno e a ascensão capilar da água. Quando este equilíbrio é temporariamente rompido, quer por fatores humanos quer por fatores naturais, com aumento da umidade, há manifestação da atividade expansiva do solo (FERREIRA, 1988).

Segundo Pereira (2004), um solo é considerado expansivo quando apresenta variação de volume superior a 1%, resultante da mudança de umidade ou sucção. Esse aumento é ocasionado apenas pela alteração da umidade, sem qualquer variação nas cargas aplicadas nesse solo.

Para Ayala et al. (1986), o mecanismo de variação de volume dos solos expansivos é complexo e está relacionado a dois fatores: intrínseco e extrínseco. Os autores mencionam que o fator intrínseco depende da textura, da composição mineralógica e da estrutura que deve existir no solo, em nível microescalar.

Já o requisito extrínseco está relacionado com a climatologia, a hidrogeologia, a vegetação e a ocupação antrópica, que devem estar presentes na região onde o solo está inserido, de modo que sejam capazes de transferir a umidade de um ponto a outro do solo.

De modo geral, os primeiros metros de um perfil de solo estão sujeitos à maior variação de umidade devido aos fatores extrínsecos, sendo este segmento do perfil denominado de zona ativa.

Obras apoiadas sobre solos expansivos podem ser submetidas ao movimento de levantamento ou recalque de suas fundações em função da instabilidade volumétrica que esse tipo de solo apresenta ao sofrer variação de umidade e sucção. Contudo, destaca-se que tal movimento não ocorre de maneira uniforme, e, por isso, provoca movimento diferencial na estrutura, com o aparecimento de trincas diagonais nas edificações ou ondulações e fissuras longitudinais nas rodovias.

Para as fundações, o desempenho sobre solos expansivos requer que o projeto considere a interação solo-estrutura correspondente às condições que prevalecem no terreno, devendo-se avaliar as características geológico-geotécnicas do terreno, mecanismos de variação volumétrica nas condições que prevalecem no terreno, forças atuantes nos elementos estruturais que estão em contato com o solo, entre outros (Silva, 2005).

De modo geral, a variação de volume nos solos expansivos se dá em função dos processos de infiltração de água no solo (aumento de volume) ou sua evaporação (redução de volume e surgimento de fissuras). Justino da Silva (2005) relata ainda uma forma de movimento diferencial ao se construir uma edificação, a qual cobre o terreno e impede a evaporação, induzindo um aumento da umidade abaixo da mesma, maior no centro que nas bordas. Este aumento de umidade é lento, levando, às vezes, vários anos.

Kormann (2002) informa que solos expansivos quando escavados podem tornar-se potencialmente instáveis, não sendo incomuns acidentes. Em obras subterrâneas, o autor cita que se deve ter cuidados especiais para evitar desmoronamentos. Já quando presentes em taludes, os solos expansivos se mostram instáveis, mesmo com inclinações reduzidas, como 1:3 ou 1:4.

A utilização desse solo em diversos tipos de obras torna-se problemática quando não se tem conhecimento prévio de suas características geotécnicas e hidromecânicas, uma vez que tal instabilidade volumétrica é transferida às obras sobre eles assentadas. É comum identificar registros do aparecimento de fissuras e trincas em pequenas construções, como casas habitacionais de baixa renda ou, até mesmo, em rodovias de grandes extensões.

Ferreira (1988) relata que solos expansivos podem ser identificados em campo por meio do fissuramento ou fendilhamento característico das estações secas. Já em obras,

o autor cita o surgimento de fissuras diagonais embaixo de janelas e acima das portas, ou ainda em estradas, por meio de ondulações em pavimentos, fissuras geralmente longitudinais e transversais junto dos bueiros e roturas localizadas no pavimento.

De acordo com Justino da Silva (2005), o tipo de dano ocasionado por esta variação volumétrica do solo pode mudar segundo o clima, a construção e outros fatores, porém, nesse aspecto, o fator climático é preponderante. O autor acrescenta que em zonas de clima árido e semiárido, a evaporação supera a precipitação praticamente todo o ano e, nesse período, o terreno se encontra ressecado. Já em climas com alternância de estações secas e úmidas, produz-se no solo um movimento sazonal.

Diante dessas informações, observa-se a importância do reconhecimento do terreno para identificação e avaliação do comportamento dos solos preliminarmente à execução de qualquer obra, com o objetivo de permitir, assim, o bom desempenho geotécnico do projeto.

A não identificação dos solos potencialmente expansivos existentes no local e, consequentemente, a ausência de solução técnica apropriada ao mesmo poderá provocar a necessidade de atividades de reparo nas obras devido ao aparecimento de fissuras ou até mesmo levar a obra à ruína, com riscos à vida humana.

Este trabalho visa dar continuidade à avaliação dos solos potencialmente expansivos do estado de Pernambuco, com pesquisas iniciadas desde o ano de 1982, na cidade de Olinda, por Costa Nunes. Após essa data, diferentes trabalhos foram realizados pelo grupo de pesquisas de Solos Não Saturados da Universidade Federal de Pernambuco para investigação de solos expansivos em vários municípios pernambucanos. Contudo, não foram encontrados na literatura dados referentes ao solo de Bonito/PE, cidade localizada a 136 km da capital pernambucana.

Nesse cenário, de maneira a permitir o desenvolvimento do presente trabalho, foram investigados solos coletados na área destinada à construção do novo Fórum do supracitado município, avaliando-se o potencial de expansão das amostras.

Somado a isso, o trabalho também contribuiu para os estudos sobre o aparecimento e propagação de fissuras em solos expansivos, tema ainda em desenvolvimento na literatura.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar a expansividade e o processo de fissuração de três amostras coletadas do município de Bonito/PE, por meio de ensaios laboratoriais. Os objetivos específicos consistem em:

1. Caracterizar física, química, mineralógica e estruturalmente solos potencialmente expansivos de Bonito/PE;
2. Aferir a expansividade de três solos de Bonito/PE quanto à expansão livre e à tensão de expansão;
3. Obter a curva característica de retenção de água dos solos investigados de Bonito/PE;
4. Analisar a tensão de expansão no solo de Bonito/PE submetidos a diferentes sucções;
5. Desenvolver aparato para monitoramento do processo de formação de fissuras dos solos expansivos em laboratório;
6. Avaliar a formação e propagação das fissuras nos solos expansivos de Bonito/PE.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos descritos a seguir.

No Capítulo 1, é apresentada introdução acerca da temática de solo expansivo, com breve contextualização sobre o tema e problemas relacionados, seguida dos objetivos da pesquisa.

No Capítulo 2, é realizada revisão bibliográfica sobre argilominerais, indicação de ocorrências dos solos expansivos e métodos de identificação. É ainda realizado descritivo acerca de sucção nos solos e curvas característica de retenção de água de solos expansivos. São apresentadas também referências da literatura acerca de tomografia computadorizada de Raios X e processo de fissuração em solos. Ao final do capítulo, são relatadas tanto uma descrição sumária da área de estudo quanto as características do solo da localidade.

O programa de investigação realizado nesta dissertação está relatado no Capítulo 3, o qual descreve desde a etapa de campo (coleta das amostras) até a fase laboratorial. Todos os métodos utilizados nos ensaios para realizar a caracterização física, química, microestrutural, mineralógica, bem como as normas técnicas vigentes tomadas como referência para execução dos ensaios são descritas neste capítulo.

A apresentação e análise dos resultados obtidos por meio dos ensaios desenvolvidos ao longo do período de pesquisa são expostas no Capítulo 4, assim como as discussões comparativas com os dados da literatura.

O Capítulo 5 exibe maior ênfase na temática de fissuras, abordando desde trabalhos existentes sobre o tema, a metodologia empregada para os ensaios de fissuras, com a montagem do aparato para realização do ensaio, e os resultados alcançados.

No Capítulo 6, são descritas as principais conclusões obtidas a partir dos resultados discutidos nos capítulos anteriores e sugeridas as recomendações para pesquisas futuras sobre o tema.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura contempla oito tópicos principais, dos quais os três primeiros envolvem a temática dos solos expansivos, envolvendo uma breve descrição de argilominerais, principais locais de ocorrência e métodos de identificação. Em seguida, é feita uma abordagem acerca da sucção nos solos, com descrição da curva característica de retenção de água. Ainda neste capítulo, é apresentada revisão da literatura acerca de ensaio de tomografia computadorizada de Raios X em solos, bem como introdução sobre o processo de fissuração provocado por ressecamento dos solos, tópico esse complementado no Capítulo 5. No Capítulo 2, é também apresentada descrição do local de coleta da amostra e características da região.

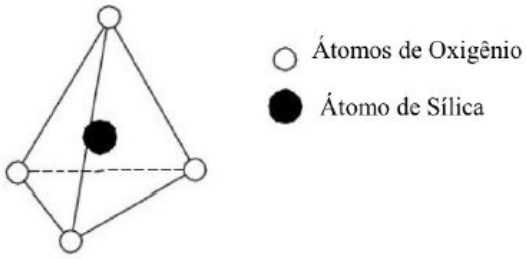
2.1 ARGILOMINERAIS

De acordo com Santos (1989), os argilominerais são basicamente silicatos hidratados de Al e/ou Fe e Mg, podendo conter, ainda, como componentes essenciais, um certo teor de elementos alcalinos ou alcalinos-terrosos. Silva (2010) acrescenta que esses elementos são dispostos estruturalmente em camadas e folhas, ou mais raramente, em cadeias e fitas.

A maior parte dos argilominerais encontrados na natureza é de estrutura lamelar. Esses podem ser divididos em grupos ou famílias: camadas 1:1; camadas 2:1; camadas 2:2; ou 2:2:1. Tal nomenclatura refere-se ao número de camadas de tetraedros de SiO_4 e de octaedros de $Al_2(OH)_6$, respectivamente, que entram na constituição da cela unitária da estrutura cristalina do argilomineral (SANTOS, 1989).

A unidade estrutural tetraédrica (Figura 1) é constituída por quatro átomos de oxigênio, O^{2-}, equidistante de um átomo de sílicio, Si^{4+} formando um tetraedro. Os átomos de oxigênio posicionam-se nos vértices do tetraedro e o de silício ocupa o seu centro. Os tetraedros dispõem-se hexagonalmente, de modo que as suas bases são complanares e os topos apontam todos para a mesma direção (MITCHELL, 1993).

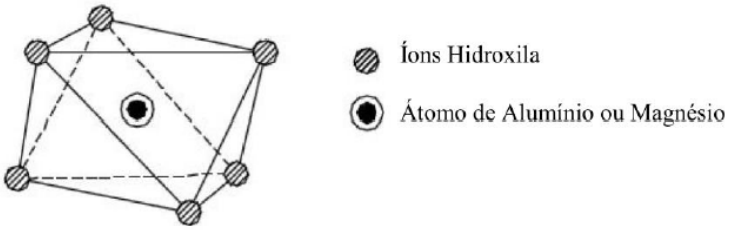
Figura 1 – Unidade estrutural tetraédrica.



Fonte: CRISTELO, 2001.

Já a unidade estrutural octaédrica (Figura 2), é constituída por seis átomos de oxigênio, O^{2-}, ou hidróxilo, OH^{-}, que se dispõem segundo os vértices de um octaedro, estando igualmente espaçados de um átomo de alumínio, Al^{3+}, ou de magnésio, Mg^{2+}. Estas unidades básicas dispõem-se hexagonalmente por meio da partilha de hidróxilos ou oxigênios por octaedros vizinhos, e, assim, dão origem a folhas estruturais octaédricas (MITCHELL, 1993).

Figura 2 – Unidade estrutural octaédrica.



Fonte: CRISTELO, 2001.

A combinação das folhas tetraédricas com as folhas octaédricas é que determina a unidade estrutural do argilomineral e consequentemente o grupo do mineral argiloso a que pertence.

Estruturas com duas camadas são constituídas de uma tetraédrica e uma octaédrica, servindo como base para a formação dos minerais de camada dupla, com uma ligação de hidrogênio entre as estruturas para unir, como a Caulinita. Essa ligação apresenta uma distância basal entre as placas de 7 Å (1 Angstrom (Å) = 10^{-10} m), com ligações entre as placas com hidrogênio, que são ligações mais fortes, tornando a estrutura mais estável e mais próxima uma da outra, evitando, assim, a entrada de água entre as estruturas (LAMBE & WHITMAN1969, apud PINTO 2013).

Estruturas com uma camada octaédrica entre duas camadas tetraédricas apresentam um comportamento diferente, pois, dessa vez, as ligações são feitas pelos íons O^{2-} e O^{2+} das estruturas tetraédricas desses minerais argilosos, como as montmorilonitas.

A distância entre os conjuntos de placas é maior que 10 Å, tornando uma ligação mais fraca, o que facilita a entrada de água entre as camadas (PAIVA,2016).

A ligação entre unidades estruturais vizinhas é feita por forças de Van der Waals e cátions, que podem estar presentes para balancear a deficiência de cargas na estrutura. Mitchell (1976) afirma que estas ligações são fracas e facilmente separadas por clivagem decorrente da adsorção de água ou de outro líquido polar, permitindo a variação da distância basal até a completa separação.

A variação na espessura da água adsorvida representa a expansibilidade dos argilominerais, sendo um dos fatores mais importantes que influenciam no comportamento de expansão e contração dos materiais argilosos.

Sendo assim, observa-se que fenômeno de expansão não ocorre em todos os solos argilosos não saturados, mas, sim, naqueles que apresentam em sua composição minerais de argila de estrutura laminar do tipo 2:1 do grupo das Ermiculitas e Esmectitas, em destaque as Montmorilonitas.

Montmorilonita é o nome de uma vila onde esse mineral foi descrito pela primeira vez, na França. Mais tarde, foi descoberto que a composição química de argilas expansivas varia bastante, de modo que as argilas expansivas foram referidas coletivamente como minerais do grupo motmorilonitas. Esmectitas hoje são usadas para estes minerais. Este é um nome muito antigo que Pliny usou com referência à limpeza, provavelmente porque a argila expansiva é altamente absortiva e é usada para remover lanolina de lã. Argilas esmectitas têm uso semelhante na engenharia geotécnica (HANDY & SPANGLER, 1976).

Silva (2010) cita que as argilas montmoriloníticas são as que apresentam maior expansibilidade. Isto pode ser explicado pelo fato de que, quando uma partícula de montmorilonita contacta com água, as moléculas de água penetram entre as camadas estruturais, fazendo aumentar o espaçamento basal de tal modo que o volume da partícula pode duplicar.

Paiva (2016) acrescenta que as montmorilonitas são pequenos cristais com grandes capacidades de reter íons, sendo encontradas em regiões temperadas e áridas, em solos pouco intemperizados, que apresentam elevado poder de contração e expansão, quando secos, consistência dura e fendilhada e, quando úmidos, alta pegajosidade e plasticidade.

2.2 LOCAIS DE OCORRÊNCIA DE SOLOS EXPANSIVOS

Donaldson (1969) *apud* Chen (1988) relata a ocorrência de solos expansivos em todo o mundo, com situações confirmadas nos seguintes países: Argentina, Irã, Austrália, México, Marrocos, Canadá, Cuba, África do Sul, Etiópia, Espanha, Gana, Turquia, Índia, EUA, Israel e Venezuela. Em 1994, Mahler atualizou a lista, incluindo Arábia Saudita, Brasil, Chile, China, França, Nigéria e Zimbabwe.

A Figura 3 (SANTOS, 2015) ilustra tal ocorrência no mapa do mundo.

Figura 3 – Ocorrência de Solos Expansivos.

Fonte: SANTOS, 2015.

Embora o fenômeno da expansão do solo seja conhecido há bastante tempo, só após o crescimento das construções nas regiões áridas, como o oeste dos Estados Unidos e Canadá, a Austrália e África, é que os problemas associados com a expansão e a contração do solo passaram a receber maior atenção (SANTOS, 2008).

No Brasil, Ferreira et al. (2012) relacionam a existência de solos expansivos nos estados de Pernambuco, Rio Grande do Norte, Bahia, Maranhão, Alagoas, Sergipe, São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Mato Grosso e Rio Grande do Sul.

Em Pernambuco, solos expansivos foram identificados desde a região do sertão até o litoral. A Tabela 1 revela relação de municípios onde tais tipos de solos foram investigados, o clima da região e respectivos pesquisadores.

Tabela 1 – Solos Expansivos em Pernambuco.

Munícipio	Clima	Clima Köppen e geiger	Pesquisador
Carnaíba	Tropical	Aw	FERREIRA, 1988
Afrânio	Semiárido	Bsh	FERREIRA, 1989
Petrolina	Semiárido	Bsh	FERREIRA, 1989
Cabrobó	Semiárido	Bsh	FERREIRA, 1989 BARBOSA, 2013 PAIVA,2016 LACERDA, 2019
Salgueiro	Semiárido	Bsh	FERREIRA, 1989
Serra Talhada	Tropical	Aw	FERREIRA, 1989
Petrolândia	Semiárido	Bsh	FERREIRA, 1989
Ibimirim	Semiárido	Bsh	FERREIRA, 1989
Pesqueira	Tropical	Aw	SILVA e FERREIRA, 2007
Nova Cruz	Tropical	Am	FERREIRA, 1997
Paulista	Tropical	Am	COSTA NUNES et al.,1982 JUCÁ et al., 1992 BASTOS, 1994 JUSTINO DA SILVA, 2001 SANTOS, 2008 PAIVA, 2009 PAIVA, 2016 MORAIS, 2017 CONSTANTINO, 2018
Olinda	Tropical	Am	COSTA NUNES et al.,1982 JUCÁ et al., 1992
Cabo de Santo Agostinho	Tropical	Am	COSTA NUNES et al.,1982
Ipojuca.	Tropical	Am	PAIVA,2016 ATAÍDE, 2017.
Floresta	Semiárido	Bsh	GURGEL & SANTOS JÚNIOR, 2016.
Santa Maria da Boa vista	Semiárido	Bsh	MARINHO,2018
Agrestina	Tropical	Am	SILVA, 2018

Tabela 1 – Solos Expansivos em Pernambuco (Continuação).

Munícipio	Clima	Clima Köppen e geiger	Pesquisador
Santa Maria da Boa vista	Semiárido	Bsh	MARINHO,2018
Agrestina	Tropical	Am	SILVA, 2018
Brejo da Madre de Deus	Tropical	Am	BEZERRA, 2019

* Classificação Köppen e Geiger:
Bsh – Clima seco, com chuvas de inverno e temperatura quente.
Am – Clima tropical úmido, monçônico.
Aw – Clima tropical úmido, com chuvas de verão.

Fonte: A Autora, 2019.

No relatório anual do CNPQ de 1988, Ferreira apresentou investigação laboratorial realizada em solos expansivos do Nordeste – entre os quais constam os solos de Serra Talhada e Petrolina –, com o objetivo de fornecer informações para formação de banco de dados de propriedades geotécnicas de solos especiais (colapsíveis, dispersivos e expansivos) da região. Foram desenvolvidos ensaios de caracterização, índices físicos, expansão livre, pressão de expansão e edométricos duplos. Os solos de Serra Talhada apresentaram percentagem de argila superior a 20% e porcentagem de expansão livre entre 14 e 24%. Para o solo de Petrolina, foi identificada expansão livre em torno de 6,43%.

Para o município de Cabrobó, Barbosa (2013) e Paiva (2016) investigaram solo expansivo da localidade por meio de ensaios de caracterização física, caracterização química e potencial de expansão, obtendo resultados em torno de 95 kPa para a tensão de expansão média e 3,2% para expansão livre (aplicada tensão de 10 kPa). Barbosa e Paiva ainda identificaram que o referido solo apresentava estabilização quanto à expansão livre e à tensão de expansão para uma adição de teor de cal de 3%. Em continuidade ao estudo do solo da região, em 2019, Lacerda apresentou pesquisa em um solo com média expansividade melhorado com cinza de Casca de Arroz (CCA), obtendo resultados de redução da expansão "livre" e da tensão de expansão a valores que não causam danos às construções para adição de 10% sem tempo de cura, assim como expansividade nula para misturas ensaiadas com tempo de cura de 28 dias.

No caso do munícipio de Paulista, vários pesquisadores produziram trabalhos de dissertação de mestrado e tese de doutorado em um campo experimental localizado em uma estação de tratamento de esgoto da Companhia de Água e Esgoto de Pernambuco – COMPESA (ETE – JANGA). Os primeiros trabalhos, Jucá et al. (1992), revelaram o

comportamento de movimentação do solo, bem como o perfil de umidade e sucção do solo ao longo da profundidade durante o período de quatro anos de acompanhamento. Em seguida, Bastos (1994) e Justino da Silva (2001) por meio de instrumentação de campo, avaliaram o deslocamento vertical do maciço quando submetido a diferentes condições climáticas, tendo-se caracterizado a camada ativa do solo até uma profundidade em torno de 3,0 a 3,5m.

Santos (2008) determinou a variação da histerese, em relação à profundidade, do solo da localidade por meio de medição da sucção através da técnica do papel filtro, em que constatou um aumento da área de histerese em função da granulometria do solo analisado, o qual variou de argila arenosa (menor área) para argila siltosa (maior área).

Em sua tese de doutorado, Paiva (2009) fez uma análise estatística da mudança de umidade, sucção e da variação volumétrica da argila expansiva de Paulista em 3 diferentes condições de cobertura, sendo a primeira sem vegetação, a segunda com coberta em placa impermeável de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) e a terceira com vegetação de pequeno porte. Paiva observou para a sucção matricial menores valores abaixo da placa de CBUQ, maiores valores absolutos e maiores dispersões na região com vegetação e valores intermediários para a área sem vegetação.

Dando andamento às investigações do solo expansivo de Paulista, nos últimos três anos (2016 a 2018), Paiva, Morais e Constantino complementaram o programa experimental por meio de ensaios laboratoriais de caracterização física, química, mecânica e mineralógica. Paiva e Constantino realizaram ainda experimentos para tratamento do solo por meio de adições de cal hidratada e Cinza de Casca de Arroz (CCA), obtendo redução da expansão acima de 90% para adição de 5% e 10%, respectivamente.

Atualmente, estão em fase de conclusão pesquisas de mestrado (BARBOSA) e doutorado (ARAÚJO) na Universidade Federal de Pernambuco que irão apresentar a resistência mecânica do solo ao longo da profundidade em período chuvoso e período seco por meio do ensaio de penetrômetro, bem como avaliação do comportamento de estacas granulares ancoradas submetidas à secagem e ao umedecimento em argila expansiva de Paulista.

Para Ipojuca, cidade do litoral pernambucano, Paiva (2016) caracterizou um solo expansivo no estado natural e com adição de cal hidratada nas proporções de 1%, 3%, 5% e 7%. Ataíde (2017) também desenvolveu pesquisa com solo dessa localidade e constatou que a mistura com areia fornece estabilização mecânica ao solo, reduzindo a

expansividade do solo através da redução da concentração de argilominerais expansivos presentes na amostra.

Gurgel & Santos Júnior (2016) avaliaram o potencial expansivo dos sedimentos da Bacia do Jatobá, no município de Floresta, Semiárido de Pernambuco. A área estudada por Gurgel & Santos Júnior é constituída predominantemente pelos Planossolos e Solonetz Solodizados. Por meio de ensaios edométricos em dez amostras, constatou-se que a área apresenta solos expansivos, seja em baixas tensões de inundação (5 e 12,5 kPa) ou mesmo em tensões de inundação mais elevadas (100 kPa).

Marinho (2018) identificou a presença de solo expansivo no Município de Santa Maria da Boa Vista/PE por meio de ensaios de tensão de expansão obtendo resultados médios de 181,38 kPa e expansão livre de 8,58 %. O trabalho apresentou a estabilização do solo de Santa Maria da Boa Vista/PE por meio da compactação e substituição com RCD (Resíduo de Construção e Demolição) beneficiado, obtendo resultados de redução em torno de 92,77 % da expansão livre para adição de 30% de RCD.

Por sua vez, Silva (2018) estudou o comportamento geotécnico de um solo expansivo encontrado em Agrestina/PE, assim como a sua estabilização, aplicando cinza de casca de arroz e cal hidratada como aditivos. A pesquisa apontou que as adições ao solo reduziram significativamente a expansão, influenciando nas características físicas e químicas do solo natural. Para as misturas com CCA, houve redução da densidade à medida que foi aumentado o porcentual de adição, pois a CCA apresenta baixa densidade, diminuindo a massa da mistura. Foi identificado ainda que as adições de CCA e cal provocaram aumento na umidade ótima e diminuição da densidade seca máxima quando comparada à amostra natural.

Ainda no tocante a solos expansivos de Pernambuco, em 2019, Bezerra avaliou uma argila de alta plasticidade e alta capacidade de troca catiônica do município de Brejo da Madre de Deus. Foi identificada tensão de expansão entre 163 a 380 kPa, com elevada capacidade de provocar fissuras importantes em edificações assentes sobre esse solo. O autor observou que a adição de 20% de CCA ao solo reduz o valor de expansão livre para próximo a 1,0% e reduz a tensão de expansão para valores inferiores a 10 kPa.

Tais estudos auxiliam a identificação das características dos solos expansivos no estado de Pernambuco, além de permitir melhor entendimento do comportamento de expansão e contração desses solos. Contudo, há ainda muitas áreas e solos a serem investigados.

É importante alertar que apesar da existência dessas pesquisas, não é recomendada a utilização de tais dados para o desenvolvimento de projetos em localidades próximas ou em outras regiões. É de extrema relevância a investigação criteriosa do solo local para o bom desempenho de projetos geotécnicos de engenharia.

2.3 MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS EXPANSIVOS

A identificação da expansividade de um solo pode ser avaliada de duas formas: a primeira é uma pesquisa no local, verificando vários fatores como topografia, vegetação, sinais de contração no solo, fissuras nas edificações e dados com os moradores da região (PAIVA, 2009).

No campo, solos expansivos argilosos podem ser facilmente reconhecidos em estações secas do ano através de profundas rachaduras em formas geralmente poligonais, na superfície dos terrenos. A zona que contém flutuação de umidade sazonal pode ser estendida de aproximadamente 0,90 m até 12,19 m de profundidade. Isso cria um comportamento em um processo cíclico de encolher/estender na porção superior da coluna do solo e rachaduras podem ser estendidas em profundidades muito maiores do que a maioria das previstas pelos engenheiros (ROGERS et al., 2014).

A segunda forma é interpretar os ensaios de laboratório dos métodos de identificação, que pode ser na forma de ensaios mineralógicos, métodos diretos e indiretos (PAIVA, 2009).

Em resumo, os ensaios mineralógicos consistem na investigação do argilomineral presente na composição do solo em estudo, compreendendo os ensaios de Difração de Raios-X, análise termodiferencial, análise química e microscopia eletrônica de varredura.

Para Ferreira (1995), estes ensaios se enquadram entre os métodos indiretos de identificação. Além destes, o autor lista ainda como métodos indiretos os que utilizam para identificação de solos expansivos os índices físicos, limite de consistência, parâmetros ligados à textura, à composição e ao comportamento do solo.

Já para os métodos diretos, Ferreira (1995) considera os métodos que se baseiam na medida de expansão que é induzida ao solo ou da tensão fornecida ao solo para impedir a expansão por meio de ensaios edométricos.

Tabela 2 – Métodos de identificação de solos expansivos.

Métodos	Subdivisões	Critério	Referência
INDIRETOS	Identificativos	Difração de raio X, Microscopia eletrônica de varredura, Análise termodiferencial e Adsorção de etilenoglicol e glicerina.	AYALA et al., 1986
		Físico-químico	FINK et al., 1971
INDIRETOS	Qualitativos	Granulometria, Consistência e Índices físicos e Classificação Geotécnica	PRIKLONSKIJ, 1952; SKEMPTON, 1953; SEED et al.,1962; VAN DER MERWE, 1964; CHEN, 1965; VIJAYVERVIA e GHAZZALY, 1973; RODRIGUEZ ORTIZ, 1975; CUELLAR, 1978; DAKSANAMURTHY e RAMAN, 1973.
	Orientativos	Geologia, Geomorfologia, Pedologia e Identificação visual.	PATRICK e SNETHEN, 1976; AYALA et al., 1986; FERREIRA,1990c e 1993a.
DIRETOS	Avaliativos	Ensaio de Expansão de Lambe	LAMBE, 1960.

Tabela 2 – Métodos de identificação de solos expansivos (Continuação).

Métodos	Subdivisões	Critério	Referência
DIRETOS	Quantitativos	Expansão Livre e Tensão de Expansão, Ensaios Edométricos Duplos e Simples.	SEED et al., 1962; CHEN,1965; IJAYVERVIYA e GHAZZALY, 1973; RODRIGUEZ ORTIZ, 1975; CUELLAR, 1978; JIMENEZ SALAS,1980.
		Ensaios Edométricos de Sucção controlada	ESCARIO, 1967 e 1969; AITCHISON et al., 1973; JOHNSON, 1978; McKEEN, 1980.

Fonte: SCHREINER, 1987 apud FERREIRA, 1995.

Entre os métodos indiretos qualitativos está o de Skempton (1953), o qual definiu a atividade coloidal de uma argila com o Índice de Atividade (Ia). O autor considera que quanto maior a quantidade de argila mais alto é o potencial de expansão do material (Tabela 3).

$$Ia = \frac{IP}{\%<0{,}002mm} \quad (1)$$

IP – Índice de Plasticidade = LL - LP
LL – Limite de Liquidez
LP – Limite de plasticidade
% < 0,002mm – Porcentagem de material com diâmetro das partículas inferior a 0,002mm.

Tabela 3 – Potencial de Expansão de um solo segundo critério de Skempton.

Ia	Atividade	Potencial de Expansão
Ia > 1,25	Ativo	Muito Alto
0,75 < Ia < 1,25	Normal	Pouco Ativo
Ia < 0,75	Inativo	Inativo

Fonte: SKEMPTON, 1953.

Seed et al. (1962) apresentaram proposta de classificação do grau de expansão de solos com base no índice de plasticidade (IP), enquantoque Chen (1965) e

Daksanamurthy & Raman (1973) consideraram o limite de liquidez para tal finalidade, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação do grau de expansão de solos segundo Seed et. Al (1962), Chen (1965) e Daksanamurthy & Raman (1973).

Grau expansão	Seed et.al. (1962)	Chen (1965)	Daksanamurthy e Raman (1973)
Baixo	IP < 10	LL < 30	20 ≤LL≤ 35
Médio	10 ≤IP ≤ 20	30 ≤LL≤ 40	35 <LL≤ 50
Alto	20 < IP ≤ 35	40 <LL< 60	50 <LL ≤ 70
Muito alto	IP > 35	LL > 60	LL > 70

Fonte: SEED ET AL., 1962; CHEN,1965; e DAKSANAMURTHY & RAMAN, 1973.

Tem-se ainda o Critério de Cuellar (1978), que recorre ao limite de contração (LC) e ao índice de plasticidade (IP) para agrupar solos em diferentes graus de expansão (Tabela 5).

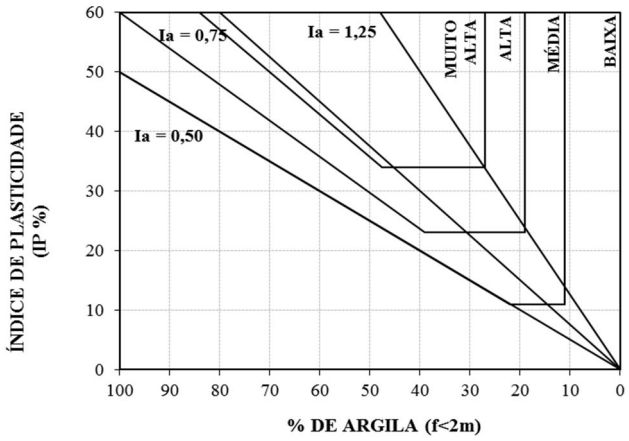
Tabela 5 – Critérios de Cuellar para classificação do grau de expansão de um solo.

Limite de Contração (LC)	Índice de Plasticidade (IP)	Grau de expansão
LC < 10	IP >35	Muito Alta
8 < LC < 11	25 < IP < 35	Alta
11 < LC < 15	15 < IP < 25	Média
LC > 15	IP < 15	Baixa

Fonte: CUELLAR, 1978.

Van Der Merwe (1964), posteriormente modificado por Williams, também considerou quatro graus de classificação do potencial de expansão de solos argilosos, conforme carta da Figura 4.

Figura 4 - Carta de Van Der Merwe (1964).



Fonte: VAN DER MERWE, 1964.

Pela metodologia de Ranganathan & Satyanarayana (1965) é possível classificar o grau de expansividade de uma argila (Tabela 6) em função do índice de contração (IC) do material, sendo:

$$IC = LL - LC \quad (2)$$

Tabela 6 – Grau de Expansão de argilas pela metodologia de Ranganathan & Satyanarayana.

IC (%)	Grau de Expansão
IC > 60	Muito Alta
30 < IC < 60	Alta
20 < IC < 30	Média
IC < 20	Baixa

Fonte: RANGANATHAN & SATYANARAYANA, 1965.

Para os métodos diretos, entre os principais ensaios com resultados divulgados na literatura para solos expansivos estão os ensaios de expansão livre e tensão de expansão.

O ensaio de expansão livre mede a variação da espessura do corpo de prova em função do tempo, em relação a sua altura inicial, após inundado. Para medir o incremento da espessura, coloca-se um relógio comparador, ou extensômetro, no topo do corpo de prova e leituras são realizadas, posteriormente à adição de água destilada, em intervalos de tempo de progressão geométrica de razão dois. A expansão livre pode ser determinada pela fórmula seguinte:

$$\mathrm{E}(\%) = \left(\frac{\Delta \mathrm{H}}{\mathrm{H}}\right) * 100 \quad (3)$$

EP – Expansão livre em percentual;
ΔH – Máximo acréscimo da altura após inundação;
H – Altura inicial do corpo de prova antes da inundação

Conforme Tabela 7, um dos métodos de classificação dos solos quanto à expansão que utiliza os dados da expansão livre é o de SEED et al. (1962). Os autores correlacionam a expansão livre, referente à amostra compactada à densidade máxima e umidade ótima, com uma tensão vertical aplicada de 7 kPa, com o grau de expansividade do solo.

Tabela 7 – Critérios de grau de expansividade de SEED et al. (1962).

Expansão livre para tensão de sobrecarga de 7 kPa (%)	Grau de expansividade
>25	Muito Alta
5 – 25	Alta
1 – 5	Média
0 – 1	Baixa

Fonte: SEED et al., 1962.

Há, ainda, o critério de Vijayverviya & Ghazzaly (1973) que considera valores de expansão livre para uma sobrecarga aplicada de 10 kPa ao solo (Tabela 8).

Tabela 8 - Critério de classificação de solos expansivos por Vijayverviya & Ghazzaly (1973).

Expansão livre para tensão de sobrecarga de 10 kPa (%)	Tensão de expansão (kPa)	Grau de expansão
< 1	< 30	Baixo
1 - 4	30 – 120	Médio
4 - 10	120 – 300	Alto
> 10	> 300	Muito Alto

Fonte: VIJAYVERVIYA & GHAZZALY, 1973.

Para avaliar a tensão de expansão, existem diversos métodos de realização do ensaio, os quais variam, de modo geral, entre a ordem de aplicação de tensão e a inundação. Para cada trajetória de tensão aplicada ao solo, há valores distintos de tensão de expansão. Entre os principais métodos, pode-se citar: (1) a volume constante, (2) carregamento após expansão com diferença de sobrecarga, (3) expansão e colapso sobre carregamento, (4) Rao et al. (1988), (5) Justo et al. (1984) e (6) ensaio edométrico duplo.

1 - O método a volume constante consiste em medir no edômetro, posicionado no topo do corpo de prova, a tensão necessária para impedir a mudança de volume de uma amostra de solo após submetida à inundação.

2 - No método de carregamento após expansão com diferença de sobrecarga, aplica-se uma tensão na amostra confinada lateralmente, induzindo-a a expandir pela inundação. Mede-se, então, a expansão em intervalos de tempo até a completa estabilização. Posteriormente, a amostra é consolidada com aumento da tensão aplicada até que se alcance a altura inicial, sendo assim determinada a tensão de expansão da amostra como a máxima tensão obtida.

3 - Já para o método de expansão e colapso sobre carregamento, uma tensão é imposta na amostra de solo, e, após a consolidação, este solo é inundado e se faz a medição da deformação ocorrida. Por meio de um papel semilogarítmo, é feita a marcação do ponto correspondente à tensão aplicada e à deformação ocorrida. Com estes pontos, traça-se uma reta e a tensão de expansão é obtida por extrapolação correspondente à deformação zero.

4 - O método de Rao et al. (1988) consiste na aplicação de sucessivas pequenas tensões quando o corpo de prova é inundado, procurando impedir a expansão de volume. Semelhante ao ensaio de adensamento, continua-se a aplicar tensões, sendo a tensão de expansão obtida por procedimento gráfico.

5 - No método Justo et al. (1984), a atenção de expansão é determinada pela interseção da curva de inundação sob tensão com a curva de umidade constante.

6 - Por fim, o método denominado como "edométrico duplo" consiste em utilizar as curvas do ensaio edométrico duplo para determinar a tensão de expansão da amostra, a qual corresponde à tensão, no corpo de prova inundado, ao mesmo índice de vazios inicial do corpo de prova na umidade natural.

Jimenez Salas (1980) faz uma correlação entre a tensão de expansão do solo e os possíveis danos a estruturas (Tabela 9).

Tabela 9 - Possíveis danos à estrutura pelo critério de Jimenez Salas (1980).

Tensão de expansão (kPa)	Grau de danos
< 20	Sem danos
20 – 50	Fissuras pequenas
50 – 100	Fissuras importantes
100 - 200	Danos graves
> 200	Demolição

Fonte: JIMENEZ SALAS, 1980.

2.4 SUCÇÃO NOS SOLOS

Segundo Marinho (1998), a sucção pode ser descrita como a força que um elemento poroso absorve água quando está livre para se mover. O autor informa que essa avidez por água de um solo é função basicamente da mineralogia, densidade e umidade dele.

Ao se estudar o comportamento de solos expansivos não saturados, a variação na sucção torna-se também um fator de grande relevância, uma vez que a sucção está relacionada com a quantidade e distribuição de água nos vazios dos solos.

Chenggang et al. (1988) reforçam tal consideração ao afirmar que a sucção é admitida como um dos principais fatores condicionantes no comportamento hidráulico e mecânico dos solos expansivos.

A sucção total nos solos corresponde à soma da sucção osmótica e sucção matricial, e sua magnitude equivale ao trabalho total das forças de osmose, capilaridade e absorção.

A parcela de sucção decorrente de efeitos osmóticos está associada à presença de sais na água existente nos vazios do solo. Quando o solo está na condição saturada, a sucção osmótica equivale à sucção total, ou seja, não ocorre a sucção matricial, restando apenas o efeito da concentração de solutos (MENEGOTTO, 2004).

Frequentemente, a sucção osmótica é considerada constante quando envolve problemas com pequena amplitude de variação de teor de umidade. Sob esse argumento, a sucção osmótica é tratada como de pequena relevância em problemas práticos. Contudo, deve-se atentar para o fato de que, em problemas que envolvam contaminação de solos ou que envolvam variações significativas de teor de umidade por evaporação de água, pode-se ter variação da sucção osmótica (GITIRANA JUNIOR et al., 2015)

A sucção matricial é igual à sucção total quando a água do solo é idêntica à água padrão (água pura ou água com a mesma composição da água do solo), restando apenas o efeito da matriz do solo (capilaridade e adsorção) (SOTO, 2004). É expressa pela diferença entre a pressão no ar e a pressão na água presentes nos vazios do solo (MENEGOTTO, 2004).

Nos solos, a sucção pode variar dentro de uma extensa faixa de valores, dependendo do tipo de solo, estrutura, grau de saturação e percolante. Para aferição, existem atualmente diversos métodos de ensaios que permitem medir com maior ou menor precisão tais valores, sendo alguns métodos indicados para medição de intervalos específicos de sucção ou recomendados para aferição de sucção mátrica ou total. A escolha do método dependerá da magnitude da sucção a ser medida, sendo às vezes necessária a adoção de mais de um método para cobrir todo o intervalo de sucção desde o solo saturado até o estado seco. A Tabela 10 relaciona alguns desses métodos.

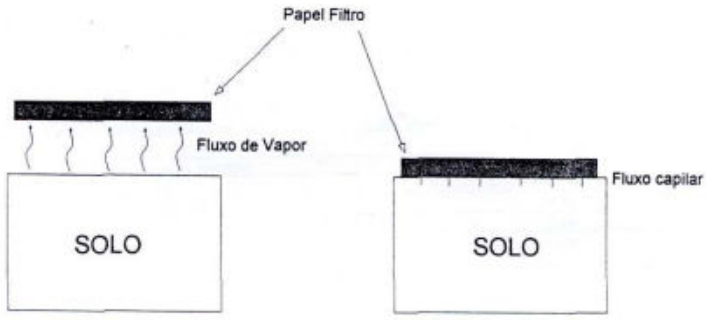
Tabela 10 – Técnicas de medição de sucção.

Técnica	Medida de Sucção	Intervalo (kPa)	Tempo de Equilíbrio
Psicrômetro	Total/Osmótica	100 a 8.000	minutos
Papel filtro (sem contato)	total	400 a 30.000	7-14dias
Papel filtro (com contato)	mátrica	30 a 30.000	7 dias
Bloco poroso	mátrica	10 a 1.000	Semanas
Sensor de condutividade térmica	Osmótica	Todos os valores	Minutos
Câmara de Richards	mátrica	0 a 1.500	Horas
Membrana de pressão	Mátrica / Total	Até 10.000	Dias
Tensiômetro	mátrica	0 a 70	Minutos
Funil de Placa Porosa	mátrica	0 a 70	Horas
Princípios Osmóticos	mátrica	200 a 1.600	Horas

Fonte: VILLAR, 2002.

Entre as técnicas de medição de sucção, foi adotada nesta pesquisa a do papel filtro, a qual pode ser realizada sem e com contato com o solo (Figura 5), para medição da sucção total e mátrica, respectivamente.

Figura 5 – Técnica de medição de sucção por papel filtro.



a) Sem contato b) Com contato

Fonte: MARINHO, 1995.

Também foi realizado o ensaio de sucção por meio de dessacador de vácuo de vidro onde foi colocado previamente solução com concentração adequada de Nacl (Cloreto de Sódio) e H_2S0_4 (ácido sulfuríco) de maneira a impor um ambiente de sucção conhecida às amostras de solo até estabiliazação do seu peso e umidade, determinando-se assim a relação entre sucção e a umidade do solo.

Os procedimentos e etapalização dos ensaios citados serão mais detalhados no Capítulo 3, referente ao programa experimental.

2.5 CURVAS DE RETENÇÃO DE SOLO

Curva de retenção do solo, curva característica do solo ou, ainda, curva característica de retenção de água corresponde à curva que representa a relação entre a quantidade de água (umidade gravimétrica, umidade volumétrica ou grau de saturação) versus a sucção no solo. Tal relação é fundamental para a caracterização hidráulica dos materiais porosos.

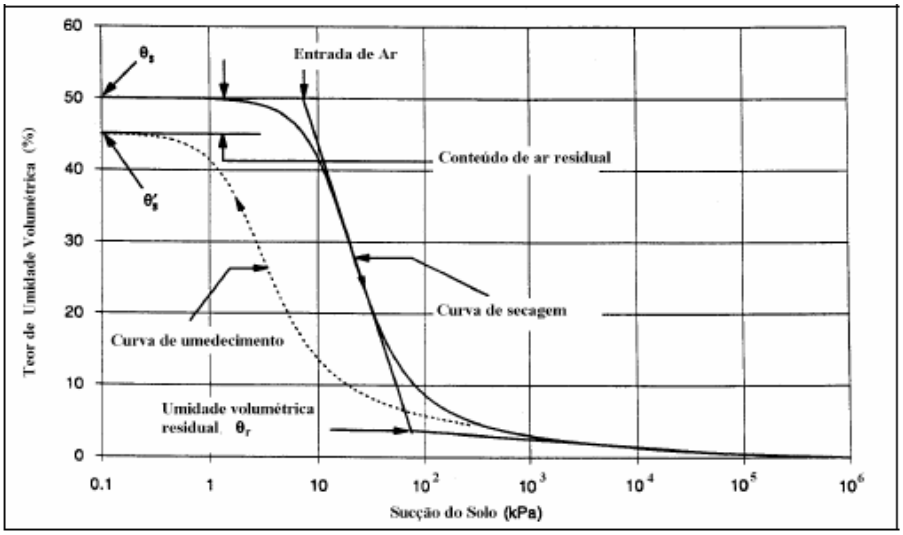
Marinho (2005) cita que esta relação sempre foi considerada nos estudos realizados pela ciência do solo, com aplicações na agronomia. Por sua vez, o comportamento de retenção de água fornecido pela curva de retenção é fundamental para a compreensão dos fenômenos relacionados com o fluxo, a resistência e a compressibilidade dos solos não saturados na engenharia geotécnica.

Miguel & Vilar (2009) mencionam que a retenção de água por parte do solo depende de muitos aspectos, tais quais: quantidade, tamanho e distribuição dos poros, textura do solo e mineralogia.

O comportamento da curva característica de retenção de água é diferente para solos argilosos, siltosos e arenosos. No caso do primeiro, são necessários maiores teores de umidade para que ocorra a redução da sucção matricial, o que é explicado pelo fato de o solo argiloso possuir poros menores quando comparados ao solo arenoso, ocorrendo a formação de finíssimos capilares, os quais induzem o aparecimento de meniscos com curvaturas acentuadas, quando o solo entra em contato com a água. Assim, quanto mais acentuada for a curvatura, maior será a diferença de pressão na interface líquido-ar e, consequentemente, maior deverá ser umidade para reduzi-la (PEREIRA, 2004).

Por meio da representação gráfica da curva característica de retenção de água, é possível obter algumas características do solo referente à sucção e umidade, conforme pode ser observado na Figura 6: ponto de entrada de ar; teor de umidade residual; conteúdo de ar residual; umidade de saturação.

Figura 6 – Elementos da curva característica de retenção de água.



Fonte: FREDLUND et al.,1994, apud SOTO , 2004.

A curva de retenção de solo não é exclusiva para um solo, sua forma e posição não são as mesmas para trajetórias de umedecimento e secagem do solo, sendo a diferença entre elas denominada de histerese.

A fenômeno de histerese pode ocorrer nos solos devido a diversos fatores, dentre os quais: desuniformidade geométrica de cada poro (efeito “ink botlle”); diferença do ângulo de contato na fase de umedecimento e secagem; bolhas de ar nos vazios do solo durante o umedecimento; alteração da estrutura do solo decorrentes da expansão ou contração.

Alguns modelos têm sido aplicados na literatura para definição da curva de retenção de um solo, entre os quais cita-se: Gardner, 1956; Farrel & Larson, 1972; Simmons et al., 1979; Van Genuchten, 1980; Mualem, 1976; e Fredlund & Xing, 1994. Neste trabalho, será adotado o modelo de Van Genuchten, 1980 em função da boa aplicabilidade e, de certa forma, dos bons resultados alcançados em diversos estudos, Equação 4.

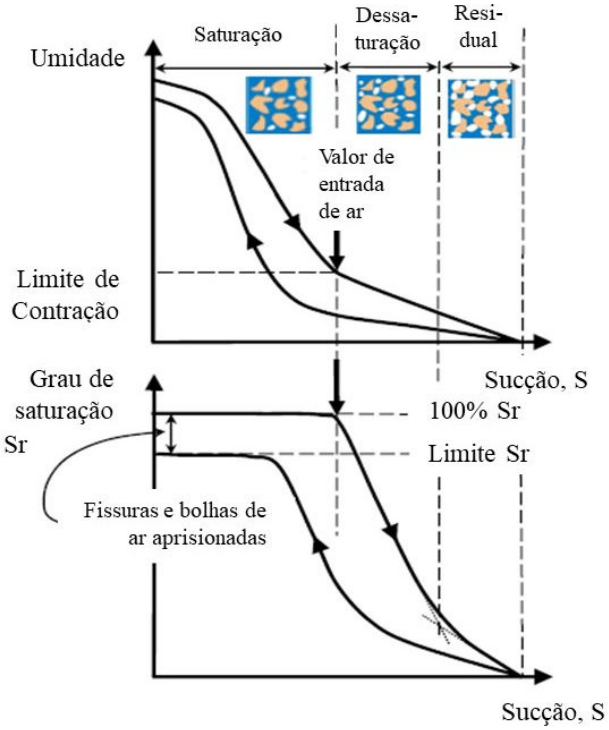
$$\theta = \theta r + \frac{(\theta s - \theta r)}{[1+ (a\psi^n)^m]} \quad (4)$$

Onde:
θ: é a quantidade de água expressa em umidade volumétrica em %;
θr: é teor de umidade volumétrica residual em % obtido experimentalmente;
θs: é o teor de umidade volumétrica de saturação em % obtido experimentalmente;
ψ: Sucção em kPa;
a e n: são parâmetros de ajuste da curva.
m:$1 - \frac{1}{n}$

No caso dos solos argilosos expansivos, que apresentam argilominerais com elevada superfície específica, torna-se necessário o aumento do teor de umidade para reduzir as forças de adsorção, e consequentemente, redução da sucção matricial.

De acordo com Samingan (2005), o comportamento da curva característica de retenção de água em solos expansivos é alterado em função da mudança da taxa de vazios durante o processo de secagem e molhagem. A quantidade de água drenada da amostra durante a secagem a partir de condições saturadas é acompanhada por uma redução na taxa de vazios do solo. Portanto, embora ocorra uma redução significativa na quantidade de água na amostra, o solo permanece saturado até um grande valor de sucção devido aos efeitos físico-químicos dominantes do sistema de argila-água no nível microscópico. Tal fato é melhor visualizado na Figura 7, em que uma curva característica de retenção de água típica dos solos expansivos é representada por Samingan, sendo o ponto de entrada de ar localizado próximo à sucção correspondente ao limite de contração do solo.

Figura 7 – Curva característica de retenção de água típica de Solos Expansivos.



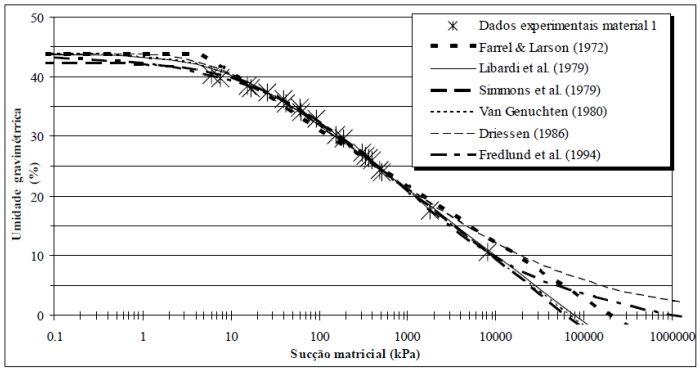
Fonte: SAMINGAN, 2005.

Em trabalho desenvolvido em 2004, Pereira apresentou as curvas características de retenção de água de cinco solos expansivos sedimentares da Formação Guabirotuba, aflorantes na região Metropolitana de Curitiba/PR. Pereira (2004) usou a técnica do papel filtro para determinação das sucções total e mátrica e adotou diferentes modelos

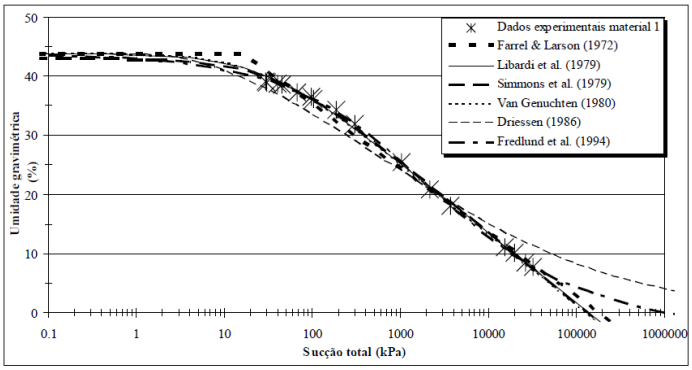
matemáticos para ajuste das curvas. A Figura 8 exemplifica a curva característica de retenção de um dos materiais investigados por Pereira, em que é possível identificar sucção total com valores superiores ao da sucção matricial, o que revela a coerência dos resultados, visto que na primeira está incorporada a parcela de sucção osmótica.

.

Figura 8 – Curva característica de retenção de água de solo expansivo de origem Guabirotuba.



a) Sucção Matricial x Umidade gravimétrica.

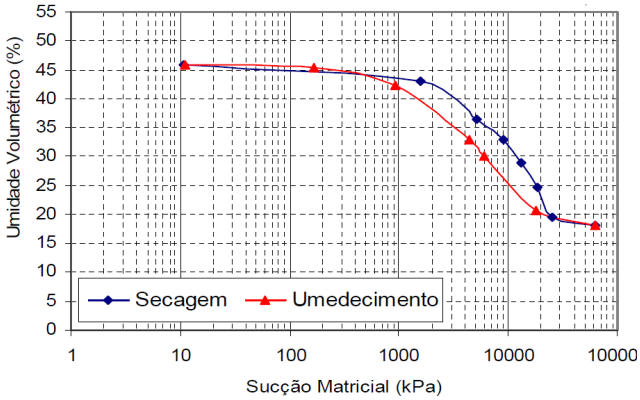


b) Sucção Total x Umidade gravimétrica.

Fonte: PEREIRA, 2004.

Na análise do comportamento histerético de uma argila expansiva de Paulista, SANTOS (2008) observou que para sucções menores a histerese ocorre com menor intensidade. Ao se ter o aumento da sucção, em geral acima de 500 KPa, foi registrado o aumento do efeito de histerese (Figura 9) em função dos espaços vazios menores permanecerem preenchidos por água na fase de secagem, porém secos no umedecimento.

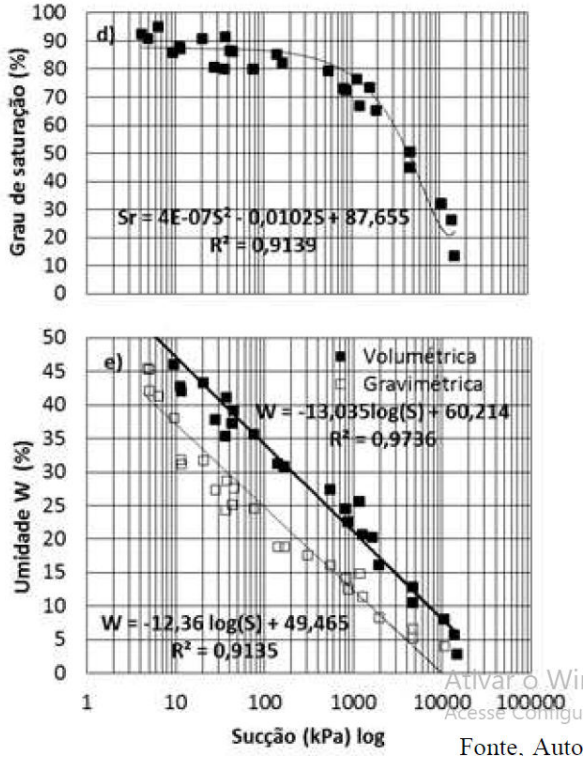
Figura 9 – Comportamento histerético de solo expansivo de Paulista/PE.



Fonte: SANTOS, 2008.

Já PAIVA (2016) elaborou gráficos que correlacionam os resultados de umidade, grau de saturação e sucção mátrica de um solo expansivo compactado no Município de Cabrobó/PE. Por meio dos dados representados na Figura 10, é possível verificar o ponto de entrada generalizada de ar em torno de 10 MPa.

Figura 10 – Curva característica de retenção de água de solo expansivo de Cabrobó.



Fonte: PAIVA, 2016.

2.6 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

De acordo com Costa (2017), a Tomografia Computadorizada de Raios X (TCX) foi utilizada inicialmente para fins médicos. Contudo, Crestana (1985) afirma que o procedimento de tomografia é o resultado do esforço de vários pesquisadores que atuaram em diferentes épocas, tendo trabalhado na maioria dos casos de forma independente e em campos distintos da ciência, não somente na área de aplicações médicas em que a tomografia é indiscutivelmente mais usada e conhecida.

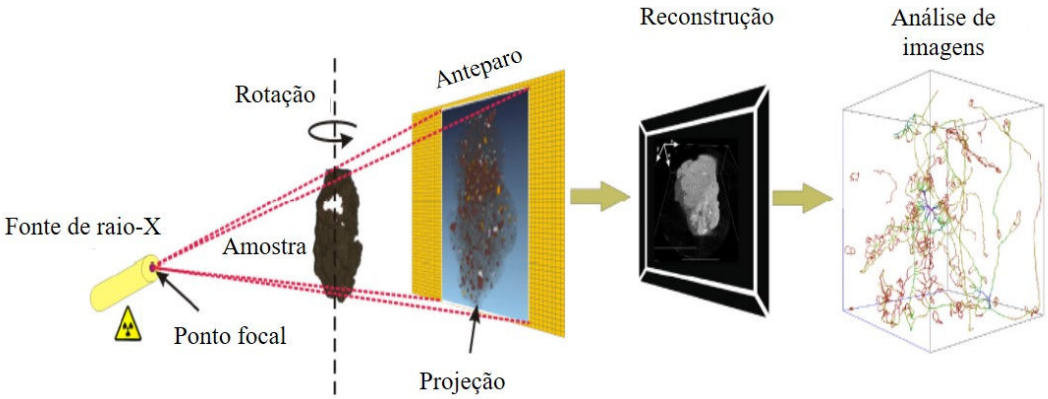
Apenas na década de 1980, a tomografia de Raios X foi inserida no estudo das Ciências do Solo por Petrovic et al. (1982), Hainsworth & Aylmore (1983) e Crestana et al. (1985), que utilizaram tal tecnologia na determinação da densidade do solo, distribuição espacial do conteúdo de água, retenção e movimento da água no solo (COSTA, 2017).

A técnica do ensaio de tomografia computadorizada de Raios X consiste em posicionar a amostra em um suporte onde incidirá uma fonte de Raios X. Durante o procedimento, a amostra é rotacionada em diferentes ângulos, sendo as radiografias de absorção desses ângulos projetadas em um anteparo e as imagens capturadas em computador.

Crestana (1985) cita que a reconstrução de um objeto a partir do conhecimento de suas projeções em diversas direções é um problema matemático complexo e por essa razão é importante o uso do computador.

Sendo assim, por meio do uso de programas de tratamento de imagens, é feita a reconstrução do volume escaneado que permite a análise das imagens e a obtenção das características internas do objeto de forma quantitativa e qualitativa, não destrutiva e em três dimensões (3D). A Figura 11 resume tal descrição.

Figura 11 – Sistema de funcionamento do tomógrafo e subsequente reconstrução de imagens.



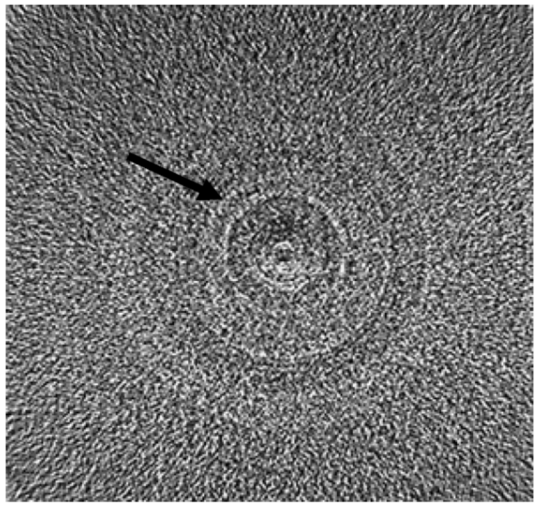
Fonte: PETH et al., 2010.

Atualmente, a técnica tem sido aplicada no meio acadêmico da Ciência dos Solos para avaliação de modo não destrutivo do arranjo, da orientação, da organização dos grãos, da porosidade e da distribuição de água no interior dos poros de solos de origens diversas voltado para aplicação agrícola ou, ainda, análise da qualidade ambiental do solo.

Entretanto, a utilização de tal método não destrutivo tem também se aproximando de certas limitações físicas, tais como, citado por Cnudde & Boone (2013), a dependência do operador para a análise das imagens 3D a partir da reconstrução de dados, os efeitos de discretizações e possíveis artefatos de imagem.

Um dos tipos de artefatos que normalmente ocorrem na visualização junto com a imagem do objeto são os artefatos em anel. Correspondem a distorções circulares que ocorrem na projeção dos Raios X formando círculos centrados em torno da localização do eixo principal de rotação sobre as imagens gerados em decorrência do funcionamento inadequado ou não calibração dos sensores do detector, o que a depender do nível dos artefatos, podem comprometer a análise das imagens e o resultado que se deseja obter (Figura 12). Beledelli (2012) cita outros tipos de artefatos que podem surgir nas imagens obtidas no ensaio de tomografia de Raios X, tais como: artefatos de movimento; artefatos gerados por materiais muito densos; artefato de ruído; artefato de dispersão e artefato de extinção.

Figura 12 – Artefatos em forma de anel.



Fonte: BELEDELLI, 2012.

COSTA et al. (2016) realizaram o procedimento de tomografia computadorizada de Raios X em Neossolo Regolítico Eutrófico (NRe), tipo de solo encontrado no agreste pernambucano, em que através de reconstrução das imagens obtidas no processo de escaneamento das amostras foi possível identificar 28% de porosidade, da qual 27% são vazios interagregados, ou seja, são poros com grande conectividade, responsáveis pelo fluxo rápido de água no solo; e 1% de vazios intra-agregados, que são poros menores, com pequena conectividade ou isolados, responsáveis por um fluxo mais lento de água e pelo seu armazenamento.

Tem-se registro também de pesquisas que buscam o uso de tal técnica para avaliação do comportamento do solo sob diferentes condições de umidade, foi o caso do trabalho desenvolvido em 2010, por PETH et al., os quais estudaram uma amostra de solo preparada em laboratório. Um cilindro plástico (Plexiglas) de 5cm de diâmetro foi preenchido com o material e as amostras foram escaneadas em três diferentes condições: i) condição inicial de homogeneidade, ii) após saturação e iii) após subsequente secagem. PETH et al. (2010) observaram um rearranjo de partículas acompanhado por uma reestruturação do espaço poroso quando alteradas as tensões hidráulicas. Tal fato ficou aparente a partir do fechamento de poros relacionados à estrutura do solo e à formação de novos poros.

Já Ling (2013) avaliou a qualidade física de recuperação de áreas degradadas com o auxílio de microtomógrafo não médico em amostras de solos coletadas no entorno da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira (SP) e pastagens do MS. Foram considerados seis tipos de técnicas como tratamento, sendo identificadas diferenças qualitativas e quantitativas

entre elas por meio da análise das imagens obtidas com microtomógrafo e dos atributos físicos, como densidade, tamanho dos grãos e porosidade obtidos. Ling (2013) constatou que a média de volume dos poros do solo de cerrado, solo recuperado e de pastagem recuperada possuem maior valor de espaço poroso quando comparadas com o solo tratado com Astronium fraxinifolium + Brachiaria decumbens + Lodo de esgoto, pastagem degradada e solo degradado.

Já em 2019, Machado (2019) analisou a microestrutura de perfis de solo Neossolo Regolítico Distrófico do Munícipio de São João/PE em quatro diferentes profundidades, tendo constatado, em geral, maior porosidade para as camadas da superfície, além de ter observado que a porosidade diminui inicialmente a partir da superfície e aumenta com a profundidade do perfil.

Neste trabalho, será adotado o ensaio de tomografia computadorizada de Raios X para avaliação da porosidade do solo potencialmente expansivo de Bonito/PE, com objetivo de buscar a identificação da variação dos espaços vazios quando o solo apresenta ganho de umidade e, consequentemente, mudança de volume.

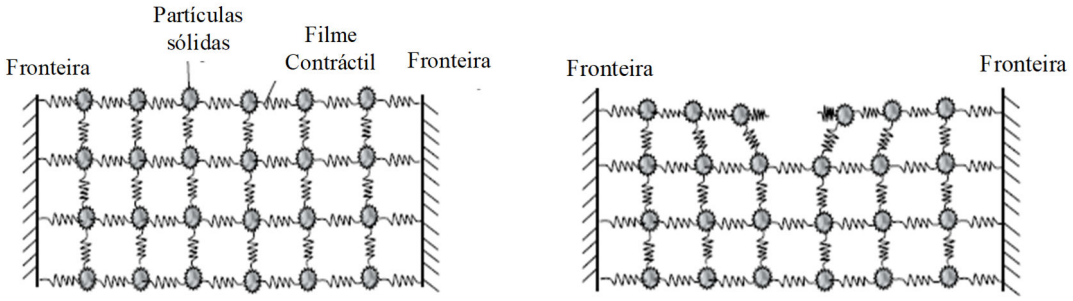
2.7 FISSURAÇÃO DE SOLOS

O mecanismo causal da fissuração por ressecamento em materiais argilosos está geralmente associado ao ressecamento e à sucção mátrica que fissura a superfície do material argiloso, onde há a maior taxa de perda de água (LI et al., 2012).

Em um solo submetido a condições de ressecamento, a resistência à tração determina o início da fissuração. Desta forma, quando as forças de tensão excedem a resistência à tração do solo, a propagação das fissuras é regida por sua capacidade de dissipar as energias e pelo estado de tensão existente no interior do solo. Essa resistência depende da umidade do solo e das condições de sucção (LAKSHMIKANTHA, 2009).

Em resumo, O´Dowd (2003) afirma que as fissuras são rupturas localizadas dentro de materiais submetidos a esforços cisalhante ou de tração, representando a modificação da geometria do material para adequar-se a um estado de tensões diferente do original. Tal situação é bem representada por Yan et al. (2014), no esquema da Figura 13. Na imagem observa-se que o solo resseca, a sucção mátrica e a tensão do filme contráctil aumentam. Posteriormente, tracionando o solo adjacente até a ruptura do filme contráctil e, então, a fissura ocorre.

Figura 13 – Processo de fissuração em argilas.

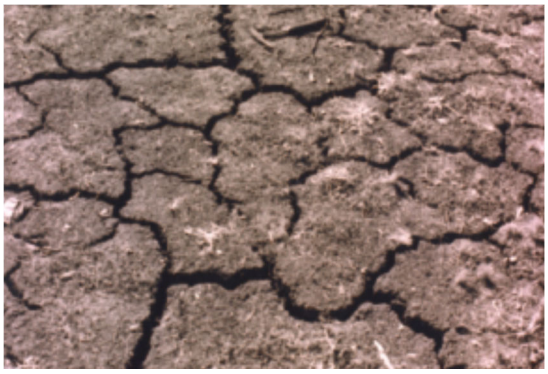


a) Interação entre o filme contráctil. b) Ruptura do filme contráctil.
Fonte: YAN et al., 2012.

Fissuras em campo formando microrelevos foram registradas em solos expansivos por Ferreira & Ferreira (2009) em Vertissolo de Petrolândia/PE; por Rogers et al. (2014), em solo dos Estados Unidos; por Silva (2018), em solo de Agrestina/PE e por Bezerra (2019), em Brejo da Madre de Deus/PE (Figura 14).

Figura 14 – Registros de fissuras em solos expansivos em campo em diferentes locais.

a) Vertissolo de Petrolândia/PE.
Fonte: FERREIRA & FERREIRA, 2009.



b) Solo dos Estados Unidos.
Fonte: ROGERS et al., 2014.

c) Solo de Brejo da Madre de Deus
Fonte: BEZERRA, 2019.

d) Solo de Agrestina/PE.
Fonte: SILVA, 2018.

Por sua vez, em laboratório há registros de pesquisas para acompanhamento da fissuração sendo desenvolvidas desde a década de 60 por Corte & Higashi (1960), e ao longo dos anos 80 e 90, por Allam & Sridharan (1981), por Lloret et al. (1998) e Day (1994).

Corte & Higashi (1960) propuseram uma teoria simples para a formação de fissuras por dessecação do solo, indicando que o padrão das fissuras é mais dependente da espessura da amostra do que da umidade ou temperatura.

Allam & Sridharan (1981) observaram o comportamento de contração e expansão de argila compactada quando submetida a ciclos de umedecimento e secagem, avaliando também o efeito sobre a resistência ao cisalhamento.

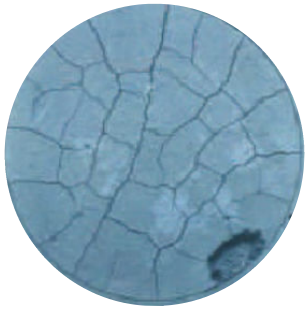
Lloret et al. (1998) apresentaram uma abordagem experimental e numérica sobre o problema de fissuração em solos ressecados, em que obtiveram resultados consistentes de modelagem da evolução de perda de água e tensão horizontal de um solo durante um processo de secagem quando comparado aos resultados experimentais.

Já Day (1994) estudou o aparecimento de fissuras em amostra de argila siltosa compactada submetidas a ciclos de umedecimento e secagem após processo de cura.

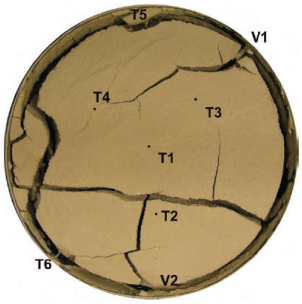
De lá para cá, pesquisas estão em desenvolvimento com o objetivo de permitir um melhor entendimento acerca da contração do solo e da evolução do processo das fissuras, como por exemplo trabalhos apresentados por Rodríguez (2006) em restos de mineração de Cuba, Lakshmikantha (2009) em solo de Barcelona, Atique & Sánchez (2011) em Solo da Indonésia, Ammour & Bouhanna (2016) em solo da Argélia (Figura 15), Chaduvula et al. (2016) em Solo da Índia, Silva (2018) em mistura de bentonita e areia.

Tais registros, em nível macroescalar em campo, assim como em nível microescalar em laboratório, revelam que diversos fatores influenciam na morfologia e na propagação das fissuras em solos, o que exibe a complexidade do tema e a necessidade de continuidade dos trabalhos de pesquisas para uma melhor compreensão do fenômeno.

Figura 15 – Registros de fissuração em laboratório.



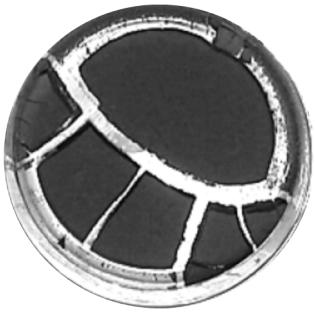
a) Resto de mineração de Cuba.
Fonte: RODRÍGUEZ, 2006.



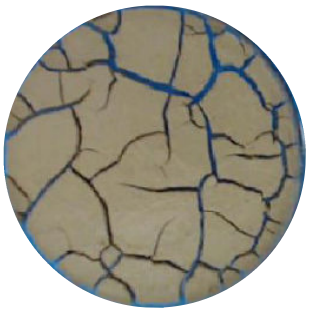
b) Solo de Barcelona.
Fonte: LAKSHMIKANTHA, 2009.

c) Solo da Indonésia.
Fonte: ATIQUE & SÁNCHEZ, 2011.

d) Solo de Argélia.
Fonte: AMMOUR&BOUHANNA, 2016.



e) Solo da Índia.
Fonte: CHADUVULA et al., 2016.



f) Mistura de Bentonita e Areia.
Fonte: SILVA, 2018.

2.8 ÁREA DE ESTUDO

O município de Bonito situa-se na porção nordeste do Estado de Pernambuco, entre o Agreste Meridional e a Zona da Mata do Estado, na microrregião do Brejo Pernambucano. Faz limites com as municipalidades de Camocim de São Félix, Sairé, Barra de Guabiraba, Cortês, Joaquim Nabuco, Palmares, Catende, Belém de Maria e São Joaquim do Monte (BELTRÃO, 2005). A Figura 16 destaca o munícipio no mapa de Pernambuco e a Tabela 11 apresenta as principais informações geográficas da localidade.

Figura 16 – Localização do município de Bonito/PE.

Fonte: Google Maps, 2018, modificado pela autora.

Tabela 11 – Informações geográficas de Bonito/PE.

Área (km²)	Distância da sede em relação à capital (km)	Coordenadas geográficas		Altitude média (m)
		Latitude	Longitude	
395,61	136	08º 28’ 13” S	35º 43’ 35” O	423

Fonte: Cidade-Brasil, 2019.

Bonito, denominada popularmente como a “Cidade das águas”, é considerada uma atração turística em função das paisagens naturais, além de cachoeiras de tamanhos e intensidades variadas, onde está presente a Cachoeira Véu da Noiva, eleita, em 2007, por votação popular e divulgada pelo Sistema Jornal do Commercio de Comunicação, uma das “Sete maravilhas de Pernambuco”.

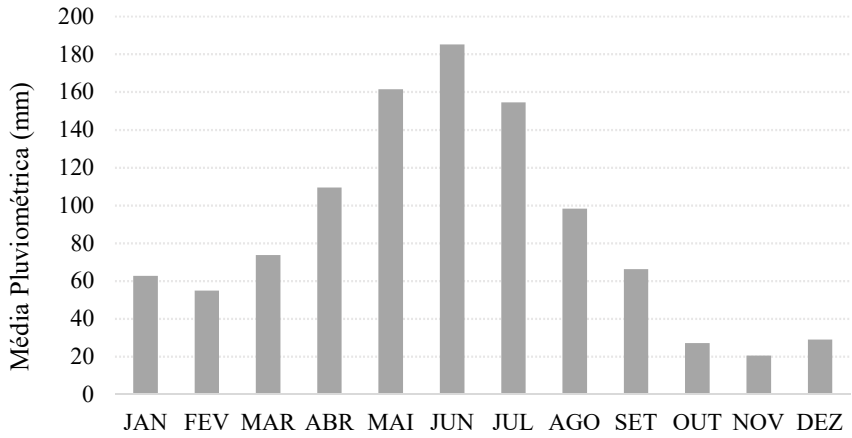
De acordo com o IBGE (2019), o atual território de Bonito era, até o fim do século XVIII, coberto de vastas florestas e situava-se na antiga área do Quilombo dos Palmares. Tais condições eram motivo de atração e favorecimento à caça e à pesca, por isso, alguns habitantes das margens do Rio Ipojuca, principalmente do povoado de São José dos Bezerros, deslocavam-se para buscar as florestas densas, onde caçavam animais silvestres.

O IBGE (2019) menciona ainda que pouco se sabe sobre a fundação e consequente evolução do povoado de Bonito, em razão da inexistência de documentação que comprove a presença do primeiro núcleo populacional (fazenda, sítio,etc), nem de um primeiro proprietário. Estima-se que, no final do século XVIII, os primeiros povoadores do local estabeleceram-se próximo do rio que deu nome à cidade, permanecendo na região devido à presença de terras férteis e condições climáticas favoráveis.

Dados do censo de 2010 (IBGE) registram que a população de Bonito corresponde a 37.566 habitantes, sendo 26.208 na zona urbana (69,77%) e 11.358 (30,23) na zona rural, com densidade demográfica em torno de 94,96 hab/km^2.

O clima da cidade caracteriza-se por apresentar estação mais seca no verão, com precipitação média anual de 1.042,57 mm, e, conforme classificação climática de Köppen-Geiger, enquadra-se no grupo As, ou seja, clima tropical com estação seca. O período chuvoso tem início em torno de janeiro e término por volta do mês de setembro, como se pode observar na Figura 17, a partir de uma série de dados (2003 a 2018) da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC) – posto Bonito (Fazenda Vila Bela).

Figura 17 – Média Pluviométrica de Bonito/PE.



Fonte: A Autora, 2019. * Dados extraídos da APAC.

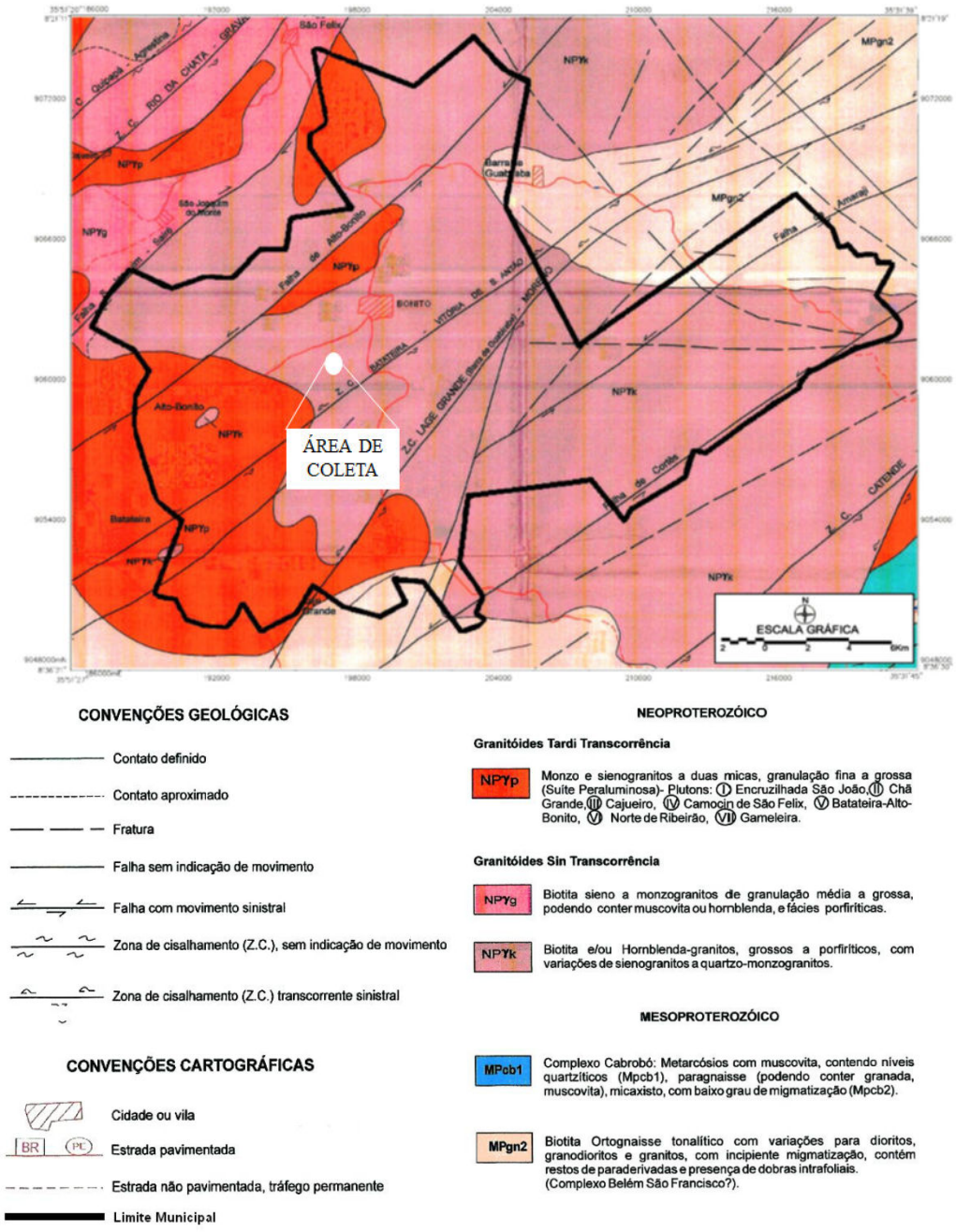
Quanto à Hidrografia, o município encontra-se localizado nas Bacias Hidrográficas dos Rios Una e Sirinhaém, cujos principais tributários são o Rio da Prata e o Riacho Mulambo. Os cursos d'água principais existentes na região são perenes e apresentam padrão de drenagem dentrítico, com desníveis topográficos decorrentes da ação geológica, o que proporcionou a formação das famosas cachoeiras e corredeiras. O

município possui, ainda, 135 açudes, sendo o açude do Prata o principal corpo de acumulação de água da região, com capacidade para 40.000.000 m³ (BELTRÃO, 2005).

Por meio do mapa geológico do municipio, Figura 18, Santos (2012) revela que a formação litologica da região é composta por rochas de idade neoproterozóica: predominantemente, biotita e/ou hornblenda-granitos, grossos a porfiríticos com variações de sienogranitos a quartzo-monzogranitos (*NPyk*). Na porção Sudoeste do município e em alguns pontos a Noroeste, há presença de monzo a sieno-granitos a duas micas de granulação fina a grossa (NPyp). Adicionalmente, Santos relata a presença de importantes indícios tectônicos, a exemplo das falhas de Alto Bonito, Amaraji e Cortês (todas em sentido sinistral, paralelas e com direção Nordeste-Sudoeste) e as zonas de cisalhamento Lage Grande-Moreno e Batateira-Vitória de Santo Antão.

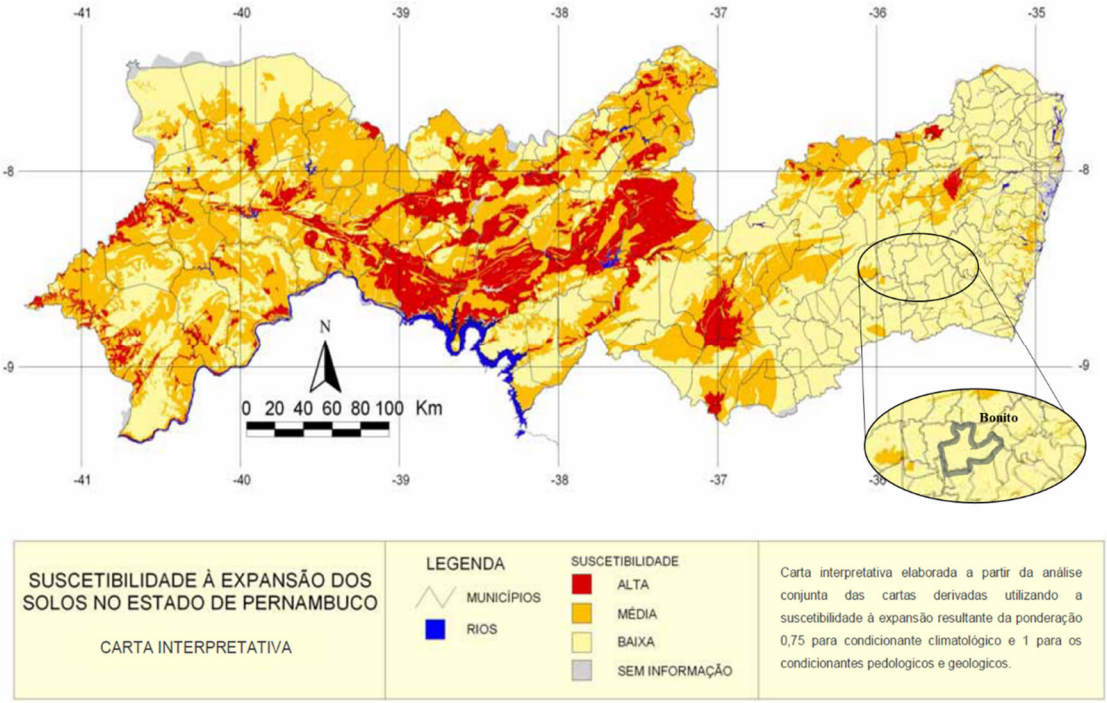
Amorim, em sua dissertação, em 2004, realizou estudo para desenvolver carta interpretativa de suscetibilidade à expansão dos solos de Pernambuco com base em condicionantes climáticos (ponderação 0,75), pedológicos (ponderação 1) e geológicos (ponderação 1) do Estado. Diante do exposto pelo autor, o Munícipio de Bonito caracteriza-se por apresentar baixa suscetibilidade à ocorrência de solos expansivos, conforme destaque na Figura 19.

Figura 18 – Mapa Geológico do Município de Bonito/PE.



Fonte: Gomes, 2007, adaptado por Santos, 2012.

Figura 19 – Carta interpretativa de suscetibilidade à expansão do Estado de Pernambuco.

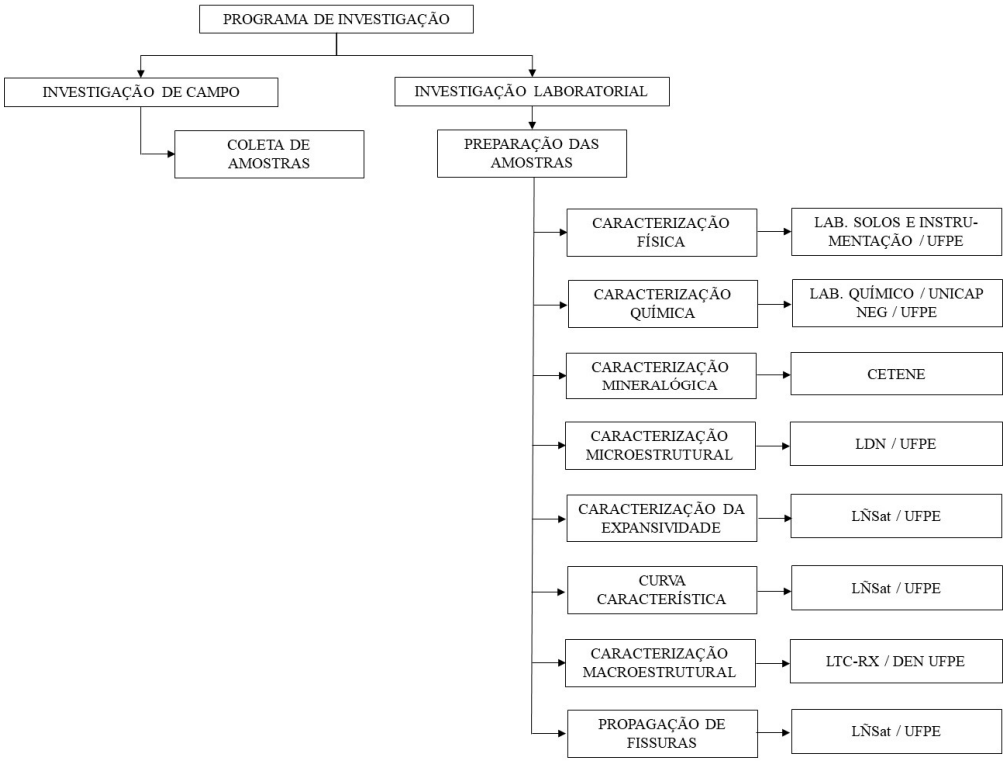


Fonte: AMORIM, 2004 - Adaptado pela Autora.

3 PROGRAMA DE INVESTIGAÇÃO

O programa de investigação consistiu em duas etapas: investigação de campo e investigação laboratorial, representadas por meio do fluxograma (Figura 20). A primeira etapa abrangeu a atividade desenvolvida na localidade do terreno de construção do novo Fórum da cidade de Bonito/PE e a segunda ocorreu em diferentes laboratórios de instituições da UFPE, UNICAP e CETENE, que serviram de apoio para a realização dos ensaios.

Figura 20 – Fluxograma de atividades do programa experimental realizado nesta dissertação.



Fonte: A Autora, 2019.

3.1 INVESTIGAÇÃO DE CAMPO

Para este projeto, foram utilizadas três amostras de solos do município de Bonito/PE, coletadas no terreno onde foram executadas as obras do Fórum da cidade, pela Construtora HARPIA CONSTRUÇÕES. Para cada solo, foram coletadas amostras deformadas, as quais foram armazenadas e transportadas em sacos de rafia; e amostras indeformadas, coletadas em formato de bloco cúbico (Figura 21), com dimensões de 30 cm x 30 cm x 30 cm, sendo o solo envolvido em papel filme, tecido, parafina e papel

alumínio, para preservar a umidade natural do material, seguindo as recomendações da ABNT - NBR 9604:2016.

Figura 21 – Amostras indeformadas de solo de Bonito/PE investigadas nesta dissertação.

a) Coleta de amostra indeformada.

b) Bloco 0,30 x 0,30 de amostra indeformada.

Fonte: A Autora, 2019.

O material dessa localidade foi adotado devido à elevada expansão livre, identificada em ensaios realizados preliminarmente no laboratório de solos e instrumentação da UFPE.

Cada amostra de solo foi nomeada em função da nomenclatura do furo de amostragem. A Tabela 12 revela a identificação das amostras, as respectivas coordenadas geográficas, a profundidade e a data de coleta (período de baixo índice pluviométrico). Já a Figura 22, apresenta a localização das amostras no mapa da região em estudo.

Tabela 12 – Amostras de Solo de Bonito/PE.

Furo	Amostra	Coordenadas Geográficas UTM (m)	Profundidade de coleta (m)	Data de coleta
Furo 1	Amostra 01 (A1)	E: 197.129 N:9060.998	0,90 a 1,90	18/10/2017
Furo 2	Amostra 02 (A2)	E: 197.153 N:9060.996	0,70 a 1,90	17/10/2017
Furo 3	Amostra 03 (A3)	E:197.142 N: 9061.016	1,10 a 1,90	18/10/2017

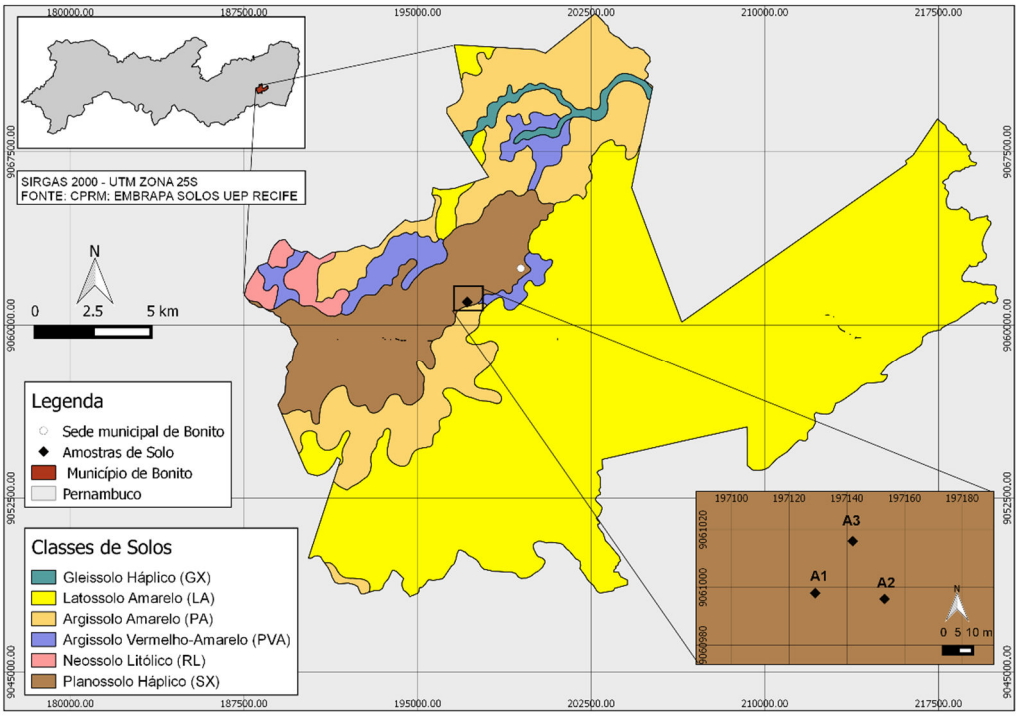
Fonte: A Autora, 2019.

Figura 22 – Locação dos pontos de coleta das amostras sobrepostas sobre a obra já em andamento.

Fonte: A autora, 2019.

As coordenadas dos pontos de coleta das amostras foram lançadas no mapa de avaliação pedológica da EMBRAPA (2018), ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Mapa Pedológico da cidade de Bonito, com identificação dos pontos de coleta das amostras.



Fonte: EMBRAPA, 2018 - Adaptado pela Autora.

De acordo com o mapa, as três amostras coletadas caracterizam-se como Planossolo Háplico (SX), que tem possibilidade de apresentar argila expansiva, alta capacidade de troca de cátions, baixa capacidade de suporte e compressíveis quando saturados, característica essa de solos expansivos. Contudo, os resultados apresentados nos Capítulos 4 e 5 revelam que as Amostras 01 (A1) e 02 (A2) apresentam características e comportamento diferenciados em relação à Amostra 03. Tal fato pode ser justificado em função da escala de elaboração dos mapas de referência da EMBRAPA (1:100 000), que podem provocar pequenas variações nas regiões limites, como exemplo, regiões de transição, como o Planossolo Háplico (no mapa, em coloração marrom) e o Argissolo Amarelo (no mapa, em coloração laranja). Em função das características de potencial de expansão baixo apresentadas pelas Amostras 01 e 02, neste trabalho, tais solos são considerados como Argissolo Amarelo (Tb).

Após a extração, as amostras deformadas e indeformadas foram identificadas e encaminhadas ao Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) para posterior realização da investigação laboratorial.

3.2 INVESTIGAÇÃO LABORATORIAL

A investigação em laboratório dos solos foi composta de caracterização física, química, mineralógica, da micro e macroestrutura, expansividade dos solos e determinação da curva característica de retenção de água no solo. Além desses, foi realizado também ensaio para avaliação do processo de formação de fissuras nos solos expansivos, descrito no Capítulo 5.

A Tabela 13 apresenta um resumo dos ensaios realizados ao longo do programa experimental e seus quantitativos.

Tabela 13 – Resumo dos ensaios realizados e respectivo quantitativo.

Investigação Laboratorial	**Ensaio**	**Quantitativo de ensaio**
Caracterização Física	Granulometria por peneiramento	6
	Granulometria por sedimentação	6
	Densidade real dos grãos	3
	Limites de Consistência	9
	Compactação (Proctor Normal)	3

Tabela 13 – Resumo dos ensaios realizados e respectivo quantitativo (continuação).

Investigação Laboratorial	Ensaio	Quantitativo de ensaio
Caracterização Química	Ensaios Químicos	36
	Espectrometria de Fluorescência de Raios X	3
Caracterização Mineralógica	Difração de Raio-X	9
Caracterização Microestrutural	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	3
Caracterização da expansividade	Expansão livre	4
	Tensão de Expansão	16
Curva Característica	Papel Filtro	6
	Dessecador	20
Caracterização Macroestrutural	Tomografia de Raios X	4
Propagação de Fissuras	Ensaio de secagem	3
	Ensaio de secagem e Umedecimento	1

Fonte: A autora, 2019.

3.2.1 Preparação das Amostras

De maneira a permitir a caracterização dos três solos, as amostras deformadas foram secas ao ar e, posteriormente, destorroadas com auxílio de almofariz e mão de grão (Figura 24), seguindo o procedimento da norma da ABNT- NBR 6457:2016.

Figura 24 – Preparação das Amostras 01, 02 e 03.

a) Amostra 3 – Seca ao ar.

b) Processo de destorroamento.

Figura 24 – Preparação das Amostras 01, 02 e 03 (continuação).

c) Amostras destorroadas.

Fonte: A Autora, 2019.

3.2.2 Caracterização Física

As três amostras de solo do município de Bonito/PE foram ensaiadas no Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) para obtenção das propriedades e índices físicos do material, seguindo os procedimentos listados na Tabela 14.

Tabela 14 - Ensaios para Caracterização Física do solo investigado neste estudo.

Ensaio	Norma de Referência
Análise Granulométrica	ABNT NBR 7181:2016
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459:2016
Limite de Plasticidade	ABNT NBR 7180:2016
Limite de Contração	ABNT NBR 7183:1982
Massa Específica dos grãos	ABNT NBR 6508:2016
Compactação (Proctor Normal)	ABNT- NBR 7182:2016

Fonte: A Autora, 2019.

Os ensaios de análise granulométrica (Figura 25) permitiram avaliar a composição das amostras de solos segundo os diâmetros das partículas por meio do ensaio de peneiramento e sedimentação. Para a fração fina, o ensaio de sedimentação foi executado com e sem defloculante (Hexametafosfato de sódio).

Figura 25 – Ensaio de Caracterização Granulométrica.

a) Ensaio de peneiramento.

b) Ensaio de sedimentação.

Fonte: A Autora, 2019.

Para os ensaios de limites de consistência foi utilizado o material passante na peneira Nº 40 (0,42 mm). Com os ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade e limite de contração, buscou-se obter a umidade para qual os solos em estudo apresentavam ausência de resistência ao cisalhamento e aparência de um líquido; deformam-se com variação volumétrica apresentando comportamento plástico e não mais apresentam mudança de volume ao perder umidade, respectivamente.

Já o ensaio de densidade real dos grãos, adotou o material passante na peneira Nº 10 (2 mm) para determinação da relação entre peso específico das partículas sólidas (γg) e o peso específico de igual volume de água pura a 4º C (γa). Durante o ensaio, utilizou-se a bomba de vácuo para retirar o ar existente entre os grãos do solo investigado.

Para análise dos parâmetros de compactação dos solos investigados, foram utilizados um total de 3,0 kg de massa para cada amostra. O ensaio de compactação foi realizado com aplicação de energia de compactação Proctor normal, ou seja, 26 golpes por camada, em cilindro de 997 cm³, adotando-se o reuso do material. O ensaio teve o intuito de determinar a umidade ótima (w_{ot}) e peso específico aparente seco máximo (γ_{dmax}) das três amostras investigadas.

3.2.3 Caracterização Química

Tanto os ensaios químicos quanto os ensaios de Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) foram integrantes da Caracterização Química das amostras de solos investigadas.

3.2.3.1 Ensaios Químicos

Os ensaios químicos das Amostras 01, 02 e 03 foram realizados no laboratório de análises químicas da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), os quais consistirem em: Potencial Hidrogeniônico em água (pH H_2O), Potencial Hidrogeniônico em cloreto de potássio (pH KCl) , Potencial Hidrogeniônico em cloreto de Cálcio (pH $CaCl_2$), Carbono Orgânico (g Kg^{-1}), Matéria Orgânica (g Kg^{-1}), Alumínio extraível ($cmol_c$ kg^{-1}), Cálcio trocável ($cmol_c$ kg^{-1}), Magnésio trocável ($cmol_c$ kg^{-1}), Potássio trocável ($cmol_c$ kg^{-1}), Sódio trocável ($cmol_c$ kg^{-1}), Acidez extraível ($cmol_c$ kg^{-1}), Soma de cátions (S) ($cmol_c$ kg^{-1}), Capacidade de troca de cátions (CTC) ($cmol_c$ kg^{-1}), Porcentagem de saturação de bases (V) (% V), Percentagem de água na pasta saturada e no extrato de saturação (% H_2O), e Condutividade elétrica no extrato de saturação (µS/cm/25ºC).

Todas as caracterizações seguiram a metodologia do Manual de Métodos de Análise de Solos (TEIXEIRA et al., 2017), tendo como objetivo avaliar a qualidade do solo e à suscetibilidade à expansão.

Os resultados dos ensaios expostos no Capítulo 4 foram alcançados em função de três repetições, tendo-se considerado que a diferença entre uma determinação e a outra não poderia ultrapassar 0,1 % do valor em relação às titulações. Durante a realização dos ensaios, em que se observaram valores superiores a essa diferença, foram realizadas repetições até que fosse possível obter resultados dentro da margem de tolerância estabelecida pelo referido manual.

3.2.3.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

O ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X foi realizado com o objetivo de avaliar quantitativamente a composição química dos óxidos presentes nas três amostras do solo de Bonito. O ensaio foi realizado no Laboratório de Núcleo de Estudos Geoquímicos (NEG) da UFPE.

Inicialmente, foram quarteados cerca de 100 g de solos de cada amostra e destorroados até granulometria semelhante a pó, ainda no Laboratório de Solos e Instrumentação (LSI) da UFPE.

Em seguida, já no laboratório NEG, para cada amostra de solo, uma porção de material foi seca em estufa a 110ºC e levadas a uma mufla, a 1.000º C, por duas horas, para a determinação de perda ao fogo (Figuras 26.a e 26.b).

Outra porção de amostra seca foi prensada em cápsulas de alumínio com 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 (Figura 26.c).

Os resultados da varredura semi-quantitativa apresentados no Capítulo 4, expressos em peso%, foram recalculados para 100% após a incorporação do valor da perda ao fogo.

Figura 26 – Equipamentos utilizados para o ensaio de Espectrometria de Fluorescência de Raios X.

a) Estufa, a 110ºC.

b) Mufla, a 1.000 ºC

c) Espectrômetro de fluorescência de Raios X Rigaku modelo ZSX Primus II

Fonte: A Autora, 2019.

3.2.4 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica ocorreu no Centro de Tecnologias Estratégicas de Pernambuco (CETENE) e consistiu na realização de ensaio de Difração de Raios X.

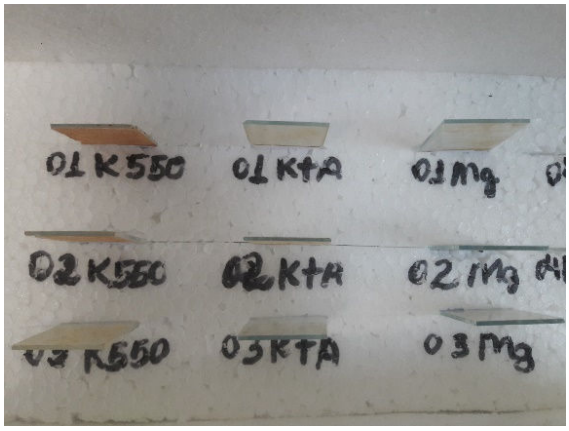
De acordo com Ferreira et al. (2015), o ensaio consiste em utilizar um aparelho denominado difratômetro, o qual incide um feixe de Raios X monocromático sobre o cristal de elétron. Esse aparelho se baseia na Lei de Bragg, a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originam, característicos para cada fase cristalina, sendo dada pela Equação 5.

$$n\lambda=2d\text{sen}\alpha \qquad (5)$$

Em que:
d – Distância interplanar;
α – Ângulo de difração;
λ- comprimento de onda dos Raios X incidentes;
n – número inteiro

Foram preparadas lâminas para realização dos ensaios no laboratório de química da UNICAP, com magnésio glicol; com potássio na temperatura de 25 ºC e com potássio a 550 ºC (Figura 27), de maneira a permitir a correta identificação dos argilominerais existentes nas amostras de solo, através das distâncias interplanares, uma vez que tais distâncias de uma substância cristalina qualquer são características da mesma.

Figura 27 – Lâminas de vidro para ensaio de Difração de Raios X.



Fonte: A Autora, 2019.

Considerando os principais argilominerais encontrados nas argilas nacionais brasileiras, são apresentados, na Tabela 15 (ALBERS et al., 2002), os picos de maior intensidade de cada fase para as diferentes solvatações a serem utilizadas.

Tabela 15 – Posições referentes aos picos de intensidade dos principais dos argilominerais.

Distância Interplanar (Å) (K 550 ºC)	Distância Interplanar (Å) (K 25 ºC)	Distância Interplanar (Å) (Mg-Gl)	Argilomineral
9 - 11	10 - 15	17,5 - 18	Montmorilonita
9 - 11	10 - 14	14	Vermiculita
-	7	7	Caulinita
10	10	10	Ilita
14	14	14	Clorita
14	14	17	Clorita expansível

Fonte: ALBERS, et al., 2002 – Adaptado pela Autora.

Para a presente pesquisa, foi utilizado o equipamento de Difratômetro de Raios – X Bruker D8 Advance Davinci, com radiação Tubo de Cu K (alfa), tensão de 40 KV, corrente de 40 mA, com passo de 0,020U, com incremento a cada 1 s e velocidade de varredura de 2º/min, varrendo o intervalo da angulação de 2º a 42º.

3.2.5 Caracterização Microestrutural

A caracterização microestrutural das três amostras investigadas correspondeu à realização de ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas (LDN) da UFPE. As amostras indeformadas secas ao ar foram moldadas em formato prismático, em que se obtiveram corpos de prova nas dimensões aproximadas de 7 a 10 mm, com uso de luvas e sem que nenhum instrumento cortante ou pontiagudo tocasse na superfície de observação.

Em seguida, tais corpos de provas foram dispostos numa placa plana metálica circular, com 75 mm de diâmetro e 10 mm de altura, sendo fixados à placa por meio de fita de carbono dupla face (Figura 28.a). O conjunto foi transferido para uma campânula de vácuo do tipo Cressington Carbon Coater 108 Carbon/A, onde o material passou por processo de metalização com aplicação de uma película fina de grafite de maneira a permitir uma boa condução do feixe de elétrons em função do carregamento eletrostático (Figura 28.b).

Para o início do ensaio propriamente dito, a placa com os corpos de prova foi transferida ao microscópio eletrônico (Figura 28.c), modelo JSM 6460 Scanning Electron Microscope (SEM), fabricação Jeol, 30 Kv, com display digital, o qual possui capacidade de ampliação de até 40.000 vezes.

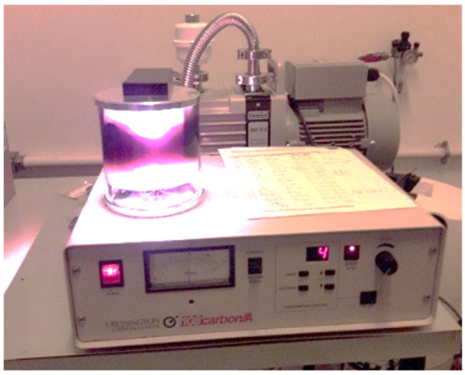
O modelo de microscópio em referência é dotado de um canhão de elétrons cuja finalidade é a produção de elétrons emitidos em um feixe sobre as amostras. Como resultado da interação do feixe com a superfície da amostra, são emitidos elétrons secundários, os quais fornecem a imagem da topografia da superfície ensaiada. São emitidos, ainda, elétrons retroespalhados que permitem a visualização da imagem característica de variação de composição.

Por fim, de maneira a permitir a análise da microsestrutura dos solos em estudo, as imagens captadas após a incidência dos elétrons foram projetadas em um monitor, quando foi realizado tratamento individual para cada amostra, com ajustes das características, como foco, brilho e contraste, de modo a melhorar a qualidade do resultado final.

A escala projetada na tela era da ordem de 10μm, tendo-se realizada ampliação de cerca de 10 000, 5 000, 2 000, 1 000, 500, 100 e 50 vezes.

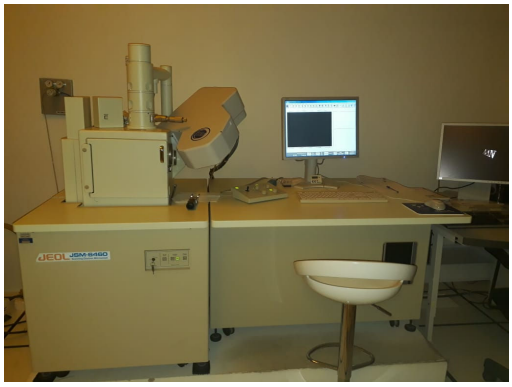
Figura 28 – Etapas do Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura.

a) Disposição dos corpos de provas prismáticos em placa metálica.



b) Equipamento utilizado para metalização dos corpos de provas.

Figura 28 – Etapas do Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (continuação).



c) Microscópio modelo JSM 6460 adotado para captação das imagens.
Fonte: A Autora, 2019.

3.2.6 Caracterização da expansividade

A caracterização da expansividade dos solos de Bonito/PE consistiu na determinação da expansão livre e tensão de expansão por meio da realização de ensaios em corpos de prova extraídos a partir das amostras indeformadas em anéis biselados com diâmetro de 87 mm (60 mm^2) e altura de 20 mm.

Os ensaios de expansão livre e tensão de expansão foram executados no laboratório de solos e instrumentação da UFPE em células edométricas convencionais (Figura 29).

Figura 29 – Ensaio de tensão de expansão em prensa edométrica convencional.

a) Conjunto anel + Célula edométrica.

b) Aplicação de carregamento.
Fonte: A Autora, 2019.

Para o ensaio de expansão livre, de maneira a permitir a análise dos resultados por meio do método de Vijayverviya & Ghazzaly (1973), o anel de cada uma das amostras investigadas foi submetido a inundação com uma tensão aplicada de 10 kPa. No que se refere aos ensaios de tensão de expansão, foram aplicados inicialmente os métodos a volume constante e edométrico duplo para as 03 amostras.

Em função dos resultados de baixo potencial de expansão, apresentados no Capítulo 4, para as Amostras 01 e 02 não foram realizados os ensaios de tensão de expansão pelo método carregamento após expansão com diferença de sobrecarga, restringindo-se tais ensaios à Amostra 03, a qual apresentou elevada expansão. Para a Amostra 03 também se procedeu ao ensaio de expansão livre sem aplicação de tensão de consolidação antes da inundação, tendo-se fixado deflectomêtro em suporte metálico sob tampa acrílica (material leve – 2,48 g) acima da amostra em anel de 20 mm^2 de área (Figura 30).

Figura 30 – Ensaio de expansão livre sem aplicação de tensão de consolidação

a) Montagem do ensaio.

b) Corpo de prova expandido após inundação.

Fonte: A Autora, 2019.

3.2.7 Ensaio de Sucção – Curva Característica

Com base nos resultados da avaliação da expansão das amostras, optou-se por seguir com o programa experimental apenas na Amostra 03 de Bonito, a qual apresentou expansão considerada expressiva e de risco a edificações assentes sob este tipo de solo.

A determinação da sucção do solo foi importante para definição da curva característica de retenção de água. Para tanto, foi adotado o método do papel filtro Whatman Nº 42 e do dessecador. Tais ensaios foram realizados no Laboratório de Solos não Saturados – LÑSat da Universidade Federal de Pernambuco.

Inicialmente, foram moldados corpos de prova em anéis metálicos com diâmetro de 60 mm, e altura 20 mm. Contudo, de maneira a avaliar a alteração de volume do solo ao ganhar umidade, os corpos de prova foram conformados com 6 mm abaixo da borda superior do anel. Antes de qualquer etapa, todos os corpos de prova foram pesados e tiveram suas dimensões verificadas.

Para o ensaio do papel filtro, os corpos de prova foram submetidos a vapor de água com auxílio de um umidificador acoplado em um recipiente cúbico de vidro, onde as amostras foram posicionadas com o objetivo de auxiliar no ganho de umidade até um valor tal que desejava conhecer a sucção correspondente. A partir desse ponto, os corpos de prova tinham suas dimensões aferidas novamente e eram pesados, sendo posteriormente posicionado papel filtro Whatman Nº 42 sem contato por meio de tela plástica.

O conjunto foi protegido com papel filme e papel alumínio e armazenado durante período de 7 dias dentro de uma caixa de isopor para permitir a equalização de umidade entre a amostra e o papel filtro. Em seguida, o papel filtro era extraído com auxílio de uma pinça metálica e pesado em balança analítica com capacidade de 220 g e sensibilidade de 0,0001g, de fabricação Marte, modelo AY220, com tempo de pesagem inferir a 15 segundos. Posteriormente, os papéis filtros foram colocados em cápsulas e levados à secagem, em estufa, a 100°C, durante 24 horas, com subsequente pesagem na mesma balança de precisão mencionada anteriormente.

Por meio das umidades gravimétricas de equilíbrio do papel filtro sem contato com a amostra de solo e com a ajuda da curva de calibração, específica do papel filtro Whatman Nº 42 (equações propostas por Chandler et al. 1992), foi obtida a sucção total do solo.

$$\psi = 10^{6,05-2,48.\log(wp)},\ wp > 47\% \quad (6)$$

$$\psi = 10^{4,84-0,0622.wp},\ wp \leq 47\% \quad (7)$$

Em que:
wp: é a umidade gravimétrica do papel filtro em percentagem;
ψ: é a sucção em kPa.

Para os ensaios com dessecadores a vácuo de vidro (Figuras 31.a e c), foram utilizadas soluções concentradas de NaCl (Cloreto de Sódio) e H_2SO_4 (ácido sulfúrico) de maneira a permitir a imposição de sucções conhecidas aos corpos de prova, seguindo a Tabela 16, com valores extraídos de JUCÁ (1990).

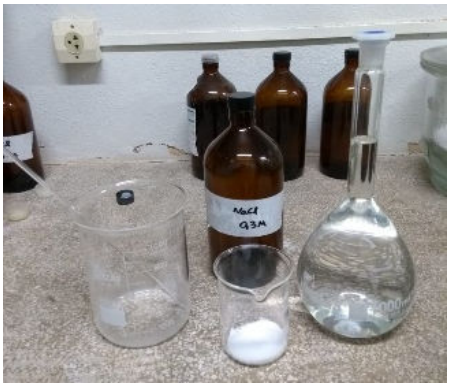
Tabela 16 – Solução concentrada utilizada nos dessecadores de vidro.

Solução		**Sucção MPa (20ºC)**
NaCl (Cloreto de Sódio)	0,3 Mol	1,37
	0,8 Mol	3,68
	1,3 Mol	6,11
	1,8 Mol	8,69
H_2SO_4 (ácido sulfúrico)	d = 1,070 g/ml	8,11
	d = 1,145 g/ml	19,91
	d = 1,195 g/ml	33,16
	d = 1,305 g/ml	81,07

Fonte: Jucá, 1990 – Adaptado pela Autora.

Após estabilização da umidade dentro do dessecador, ou seja, variação da umidade inferior a 1% após duas pesagens consecutivas com intervalos de 15 dias, os corpos de prova foram novamente medidos com auxílio de extensômetro ou paquímetro e pesados (Figuras 31.b e d). Em seguida, foi selecionado um corpo de prova de cada dessecador e moldado em anel com área de 20 mm^2, de maneira a permitir a acoplagem em célula edométrica. Esses corpos de prova foram transferidos para a prensa edométrica, onde se realizou o ensaio de tensão de expansão a volume constante (Figura 31.e). Tal processo permitiu correlacionar a tensão de expansão do solo com a sucção ao qual está submetido inicialmente. Ao todo, foram avaliadas as tensões de expansão para sete diferentes sucções conferidas ao solo, pois ao tentar moldar o solo submetido à sucção de 81,07 MPa no anel de 20mm^2, o solo se desfragmentou, o que impossibilitou a continuidade do ensaio.

Figura 31 – Ensaio de sucção pelo método do dessecador de vidro.



a) Preparação de solução de NaCl.

b) Pesagem dos corpos de prova.

c) Dessecador de vidro com solução.

d) Medida da altura do corpo de prova.

e) Ensaio de tensão de expansão em amostra submetida a sucção conhecida.

Fonte: A Autora, 2019.

3.2.8 Caracterização Macroestrutural

A caracterização Macroestrutural ocorreu de forma não destrutiva por meio do ensaio de escaneamento em equipamento de tomografia de Raios X da Amostra 03, a qual apresentou maior potencial de expansão.

Os ensaios de tomografia de Raios X foram realizados no Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios X (LTC-RX) do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE), com amostra na condição indeformada e amostra compactada para a densidade seca máxima.

De maneira a possibilitar a efetivação do referido ensaio, para a primeira condição, o solo foi moldado em anel de PVC com aproximadamente 66 mm de diâmetro e 75 mm de altura diretamente do bloco (Figura 32.a). Já para a segunda condição, o solo foi compactado em um cilindro de Proctor com aplicação de energia normal para a umidade ótima e em seguida foi realizada a moldagem em anel de PVC (Figura 32.b) de dimensões semelhantes às do primeiro. Os corpos de prova foram pesados e tiveram altura aferida. Tal etapa preliminar de preparação dos corpos de prova foi executada no laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE.

Posteriormente, os corpos de prova foram transportados para o Laboratório LTC-RX, onde foram posicionados em peça de suporte apropriada para acoplamento no microtomógrafo, onde sofreram marcação a fim de facilitar posterior reposicionamento (Figura 32.c).

O escaneamento dos corpos de prova ocorreu com auxílio de microtomógrafo de Raios X de terceira geração, modelo NIKON XT H 225 ST, cuja geração de Raios x ocorre entre um filamento de tungstênio (cátodo) e um alvo de tungstênio (ânodo), em voltagens de até 225kV e correntes de até 2 mA. O detector desse dispositivo possui 1918 x 1534 sensores (Figura 32.d).

Passada essa primeira etapa, os corpos de prova foram inundados em recipiente com água destilada durante 30 dias de maneira a permitir a expansão do solo investigado, tendo-se acoplado no topo superior das amostras um anel extensômetro que permitiu avaliar a expansão do material durante o período de ganho umidade (Figura 32.e,f).

Em seguida, os corpos de prova foram extraídos do recipiente com água, embalados e protegidos com papel filme e papel alumínio, e, posteriormente, foram armazenados em isopor durante 24h para permitir a uniformização da umidade ao longo de toda a amostra. Então, novo escaneamento foi realizado nos corpos de prova na

condição expandida, com o cuidado de reposicionar o anel de PVC para a situação mais próxima ao primeiro ensaio.

Figura 32 – Sequência do ensaio de tomografia computadorizada de Raios X.

a) Corpo de Prova moldado a partir de amostra indeformada.

b) Corpo de Prova moldado após compactação com energia de proctor normal.

c) Identificação do posicionamento do anel no suporte

d) Ensaio propriamente dito de tomografia de raio-X.

e) Corpo de prova inundado após 1ª ensaio de tomografia de Raios X para permitir a expansão.

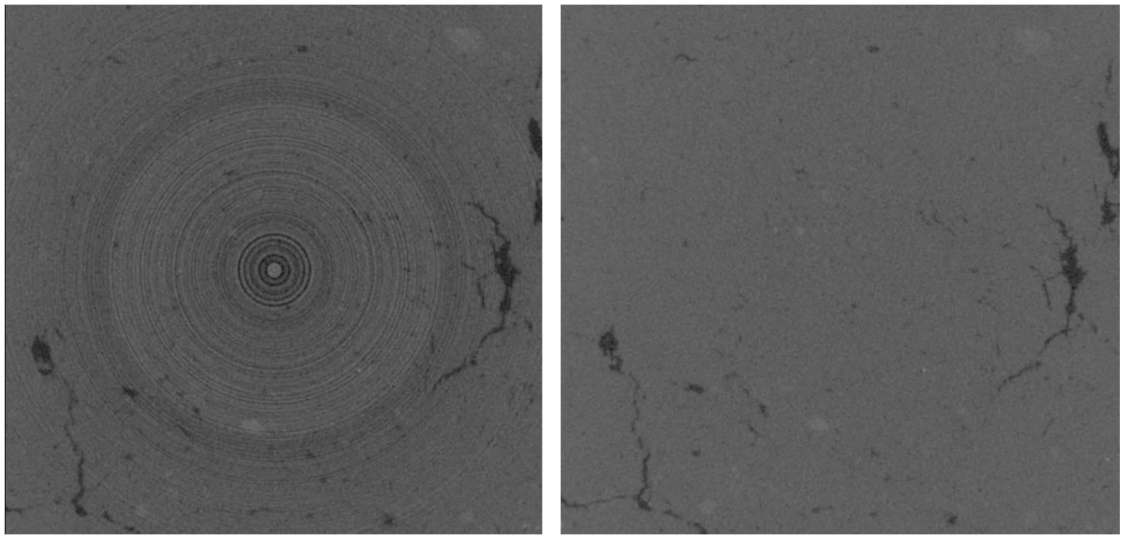
f) Corpo de prova expandido.

Fonte: A autora, 2019.

Para todo os escaneamentos, foram utilizados como parâmetros no processo de aquisição da amostra a tensão de 160kV, a corrente 180 µA e o tempo de exposição de 1.500 ms por imagem. A resolução espacial das imagens foi 50 µm (50 x 50 µm²). Foi utilizado também filtro de cobre com espessura 0,5 mm para minimizar os fótons de baixa intensidade.

A duração dos escaneamentos foi de 100 min, tendo-se utilizado o "Minimise Ring Artefacts" de maneira a reduzir o aparecimento de artefatos de anéis nas imagens obtidas durante o procedimento (Figura 33).

Figura 33 – Comparativo do escaneamento para redução de artefatos de anéis.



a) Sem uso do "Minimise Ring Artefacts". b) Com uso do "Minimise Ring Artefacts".

Fonte: A autora, 2019.

O subvolume de interesse de 840 x 840 x 840 voxels foi reconstruído em 3D, utilizando o CTPro 3D XT 3.0.3 (Nikon Metrology NV) e a resolução espacial das imagens permaneceu com 50 µm (50x50x50 µm³).

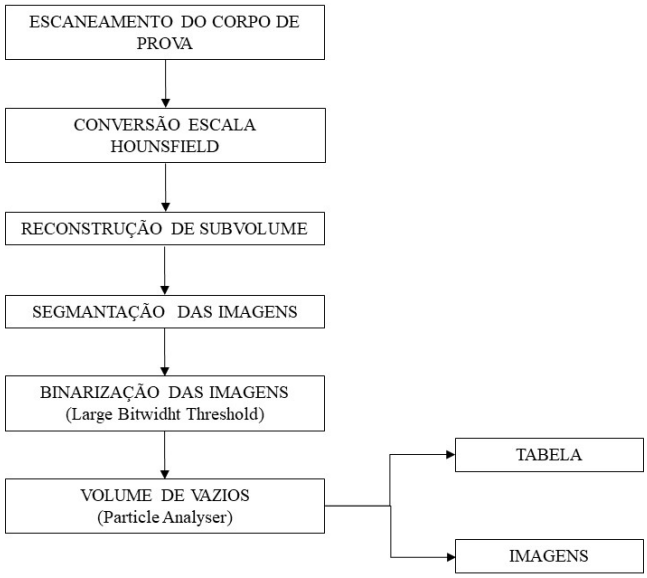
No software VGStudio MAX 2.2 (Volumegraphics, Heidelberg, Alemanha), as imagens foram convertidas para a escala de Hounsfield, na qual a radiodensidade do ar equivale a 0 e a da água a 1000, e foi utilizado o filtro de Gauss para a minimização de ruídos. O subvolume foi reconstruído em 840 fatias axiais.

De posse do conjunto de imagens fornecido pelo microtomógrafo, foi realizado inicialmente processo de segmentação de maneira a distinguir as fases de interesse dentro de cada imagem, dividindo-a em regiões distintas, cada uma com voxels de características

semelhantes. Com uso do software livre ImageJ 1.51h. e uma rotina do MatLab com interface gráfica (Rheck), foi realizada a segmentação dos vazios e não vazios.

Depois de segmentadas, as imagens foram binarizadas no Image J com o plugin "Large Bitwidht Threshold". Em sequência, foi avaliada a macroporosidade para o primeiro escaneamento, e após expansão, para os corpos de prova na condição indeformada e compactada por meio da obtenção dos volumes de vazios com uso do plugin "Particle Analyser", do programa Image J. As etapas seguiram o fluxograma de atividades descritas na Figura 34.

Figura 34 – Fluxograma do Processo de análise de vazios.



Fonte: A autora, 2019.

Com os dados na planilha, foi calculada a macroporosidade como sendo a razão entre o volume total dos poros acima de $1{,}25x10^{-4}$ mm^3 e o volume total do subvolume reconstruído (Equação 8) dos corpos de prova, que nesse trabalho correspondeu a 840 x 840 x 840 voxels.

Para se obter os volumes em $mm^{3,}$ foi realizada a multiplicação dos valores encontrados em voxels pela resolução da imagem (tamanho do voxel), equivalente a 50 µm.

$$\eta\ (\%) = \frac{Vporototal}{Vtotalsubvolume}\ x\ 100 \qquad (8)$$

Sendo:

$V_{porototal}$ = Σ Vporo (voxel)* ($voxel^3$)

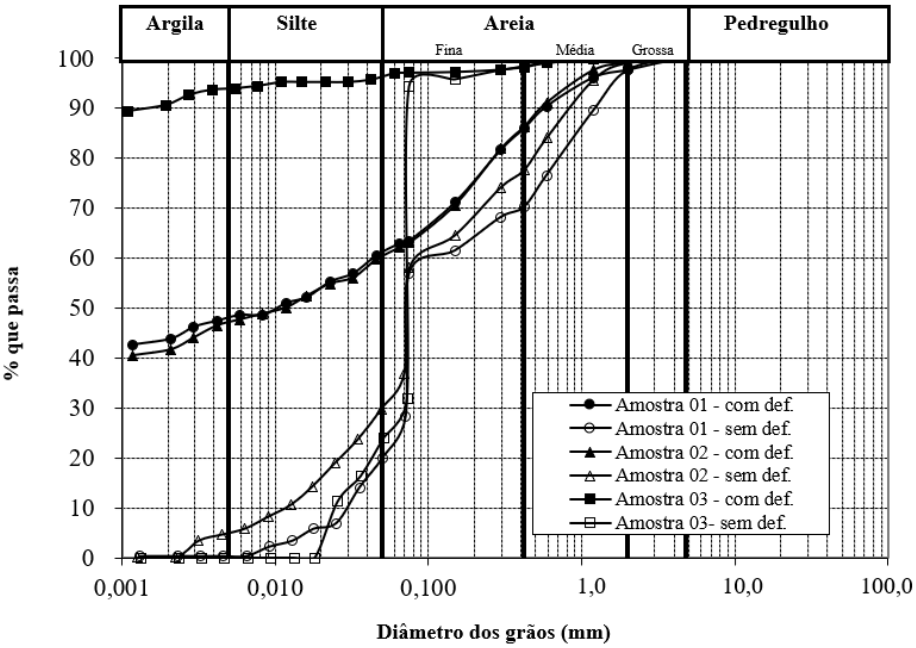
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES DA CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS

São apresentados a seguir os resultados do programa de investigação desenvolvido nessa pesquisa em três amostras de solo potencialmente expansivos no Município de Bonito/PE. Os resultados referentes aos ensaios de propagação de fissuras serão apresentados no Capítulo 5.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A partir dos dados obtidos nos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação (com e sem adição de defloculante Hexametafosfato de Sódio), foram elaboradas as curvas granulométricas das amostras investigadas (Figura 35).

Figura 35 – Curva Granulométrica das Amostras de Bonito/PE.



Fonte: A autora, 2019.

A Tabela 17 mostra as percentagens de material com diâmetro das partículas correspondentes à argila, silte, areia fina, areia média e areia grossa para as amostras estudadas, considerando a adição (com def.) ou não de defloculante (sem def.) no ensaio de sedimentação.

Tabela 17 – Participação da Argila, Silte, Areia na composição granulométrica das amostras.

Constituintes	Amostra 01		Amostra 02		Amostra 03	
	(Com def.)	(Sem def.)	(Com def.)	(Sem def.)	(Com def.)	(Sem def.)
Argila (%)	48	0	47	5	94	0
Silte (%)	13	20	13	25	2	24
Areia Fina (%)	25	50	26	48	2	74
Areia Média (%)	12	27	13	21	2	2
Areia Grossa (%)	2	2	1	1	0	0

Fonte: A autora, 2019.

Com uso de defloculante, as Amostras 01 e 02 são constituídas de aproximadamente 47 – 48% de argila, 13% de silte, 25 – 26% de areia fina, 12 – 13% de areia média e 1 – 2% de areia grossa. Já a Amostra 03, apresentou textura fina com mais de 50% em massa das partículas passando na peneira nº 200 (ASTM), contendo 94% de argila, 2% de silte e 4% de areia. A fração areia é constituída de 2% de areia fina, 2% de areia média, sem presença de areia grossa.

Nos ensaios realizados sem o uso do defloculante, observa-se aumento no percentual de silte e areia fina para as três amostras e, como era de se esperar, redução significativa no percentual de argila. Tais resultados se devem ao fato de que, ao se realizar o ensaio de sedimentação sem adição de defloculante, não ocorre a dispersão da fração fina de argila, ou seja, as partículas agrupadas na forma de flocos sedimentam mais rapidamente, e, consequentemente, levam à aparente elevação da fração mais grossa.

Os resultados obtidos para a densidade real dos grãos encontram-se na Tabela 18. São reveladas as médias de resultados alcançados de duas determinações para cada amostra ensaiada. Como é possível observar, a Amostra 03 apresentou valor inferir ao das outras duas amostras, característico de solos com baixo teor de óxido de ferro.

A densidade real dos grãos das Amostras 01 e 02 estão próximas aos valores encontrados por Constantino (2018), para o solo de Paulista (2,660), e por Silva (2018), para o solo de Agrestina (2,680). Já a densidade real dos grãos da Amostra 03 se assemelha ao valor identificado por Lacerda (2019) para o solo de Cabrobó (2,592).

Tabela 18 – Densidade real dos grãos das amostras de Bonito.

Ensaio	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Densidade Real	2,658	2,674	2,584

Fonte: A autora, 2019.

Os limites de consistência obtidos para as três amostras de Bonito são apresentados na Tabela 19, assim como o Índice de Plasticidade (IP) e o respectivo Índice de Atividade (Ia). Os resultados dos ensaios de Limite de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP) indicam que as Amostras 01 e 02 apresentam Limite de Plasticidade em torno de 24 - 26% e Limite de Liquidez com valor de 62 - 68 %. Já para a Amostra 03, registrou-se LP de 33% e LL de 91%.

Todas as amostras apresentaram Índice de Atividade inferior a 0,75, o que, segundo critério Skempton (1953), caracteriza os materiais como inativos.

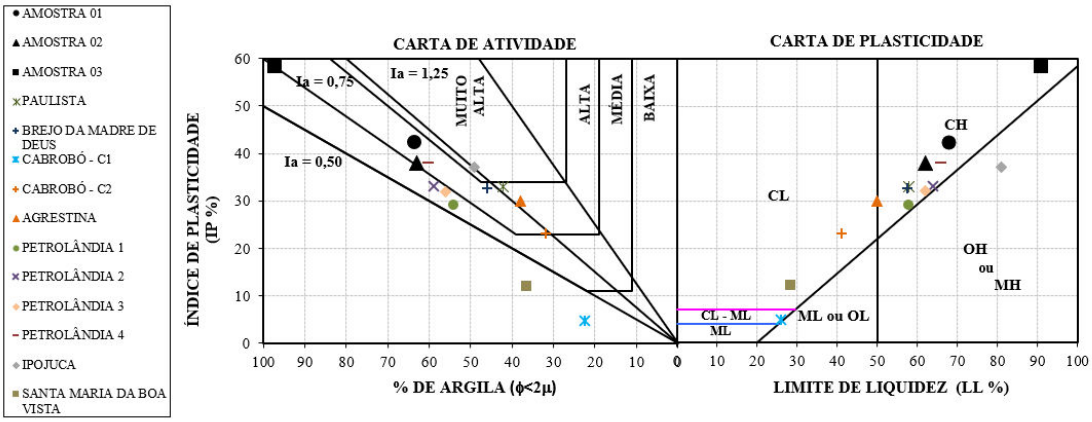
Tabela 19 – Limites de Consistência das amostras estudadas.

Ensaios	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
LP (%)	26	24	33
LL (%)	68	62	91
IP (%)	42	38	58
LC (%)	14	15	17
IC (%)	54	47	74
Ia	0,67	0,60	0,60

Fonte: A autora, 2019.

De acordo com a carta de plasticidade (Casagrande ou S.U.C.S), a relação entre o Limite de Liquidez e o Índice de Plasticidade localizou-se acima da Linha A para as três amostras investigadas, sugerindo que os solos se classificam como argila de alta compressibilidade (CH). Pela classificação T.R.B, as três amostras enquadram-se como A-7-6. Somado a isso, segundo carta de Van Der Merwe (1964), posteriormente modificado por Williams, tais amostras são classificadas como de alto potencial de expansão (Figura 36), juntamente com os solos de Brejo da Madre de Deus (BEZERRA, 2019), Agrestina (SILVA, 2018), Paulista (CONSTANTINO, 2018), Cabrobó C2 (LACERDA, 2019) e Petrolândia (FERREIRA, 1995).

Figura 36 – Classificação das amostras investigadas segundo Carta de Atividade e Carta de Plasticidade.



Fonte: A autora, 2019.

Com base nos resultados de caracterização expostos anteriormente, ainda foi possível aplicar os métodos de identificação indireta de solos expansivos publicados por Seed et. Al (1962), Chen (1965), Daksanamurthy e Raman (1973), Cuellar (1978), Ranganathan e Satyanarayana (1965), conforme Tabela 20. Percebe-se uma variação na avaliação do potencial de expansão das amostras, conforme critério aplicado entre alto a muito alto.

Tabela 20 – Potencial de expansão das amostras investigadas segundo critérios indiretos de classificação de solos expansivos.

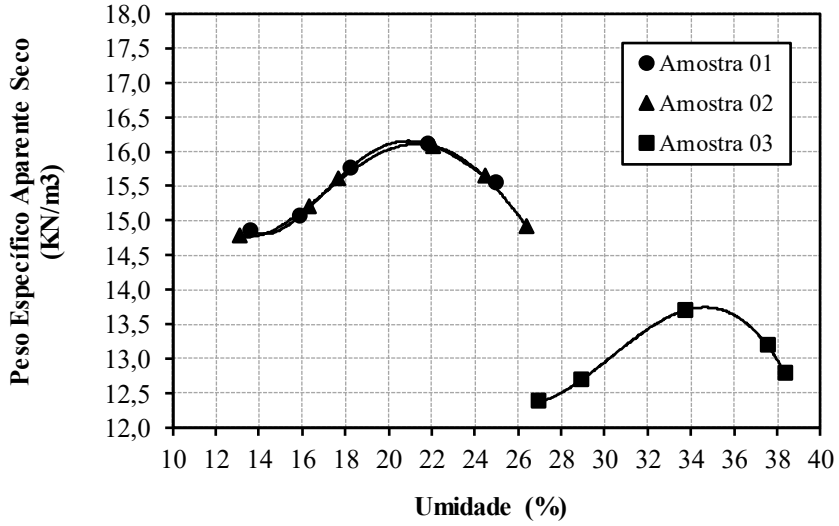
Método Indireto de Classificação	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Seed et al. (1962)	Muito Alto	Muito Alto	Muito Alto
Chen (1965)	Muito Alto	Muito Alto	Muito Alto
Daksanamurthy e Raman (1973)	Alto	Alto	Muito Alto
Cuellar (1978)	NA	NA	NA
Ranganathan e Satyanarayana (1965)	Alto	Alto	Muito Alto

* Não se aplica.

Fonte: A autora, 2019.

A Figura 37 exibe as curvas de compactação com aplicação de energia de Proctor Normal. Os respectivos valores de umidade ótima e peso específico seco máximo são apresentados na Tabela 21.

Figura 37 – Curva de compactação (Proctor Normal) das Amostras 01, 02 e 03.



Fonte: A Autora, 2019.

Tabela 21 – Resultados do Ensaio de Compactação (Proctor Normal).

Compactação	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Umidade Ótima (%)	21,0	21,5	35,0
Peso Específico Seco Máximo (kN/m^3)	16,16	16,10	13,75

Fonte: A Autora, 2019.

A Amostra 01 exibe curva de compactação semelhante a Amostra 02, com valores equiparados de umidade ótima e peso específico seco máximo em torno de 21% e 16 KN/m^3, respectivamente. Valores semelhantes para solos expansivos de Pernambuco foram registrados por Constantino (2018), em solo da cidade de Paulista (20,7% de umidade ótima e 16,66 KN/m^3), e por Bezerra, em solo de Brejo da Madre de Deus (20% e 17,30 KN/m^3).

Na Amostra 03, o valor de umidade ótima é superior às das outras amostras estudadas, bem como peso específico seco máximo inferior, motivado pelo elevado percentual de argila presente na amostra (94%, já registrado anteriormente), que proporciona grande absorção de água. Valores elevados de umidade ótima também foram identificados por Ataíde (2017) em amostras de solo de Ipojuca/PE (umidade ótima = 33 %).

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Como já mencionado no Capítulo 3, a caracterização química das amostras de Bonito envolveu a realização de ensaios químicos propriamente ditos e ensaio de espectrometria de fluorescência de Raios X.

4.2.1 Ensaios Químicos

Os resultados dos ensaios Químicos dos solos são mostrados na Tabela 22, em que são apresentados os valores do pH, carbono e matéria orgânica, condutividade elétrica no extrato de saturação, a soma dos cátions (S), a capacidade de troca catiônica (CTC), o grau de saturação por bases (V), a saturação por alumínio (m), a saturação por sódio ($100Na^{+}/T$), as bases Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+} e Mg^{2+} e os ácidos Al^{3+} e H^{+}.

Tabela 22 – Resultados dos Ensaios Químicos nas amostras investigadas de Bonito/PE.

Determinação	**Amostra 01**	**Amostra 02**	**Amostra 03**
pH em água	7,74	7,51	4,84
pH em KCl	4,19	4,31	3,70
pH em $CaCl_2$	5,12	5,14	4,30
Matéria Orgânica (g kg^{-1})	0,66	0,69	1,29
Alumínio trocável (Al^{+3}) ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,10	0,05	0,25
Ca^{+2} trocável ($cmol_c\ kg^{-1}$)	6,40	5,60	6,50
Mg^{+2} trocável ($cmol_c\ kg^{-1}$)	9,00	12,90	29,50
Na^{+} trocável ($cmol_c\ kg^{-1}$)	3,4	3,7	4,4
K^{+} trocável ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,0	0,0	0,0
Saturação de Sódio **(%)**	9,93	9,06	5,87
$H^{+} + Al^{+3}$ extraível ($cmol_c\ kg^{-1}$)	15,40	18,80	34,70
Valor de S (soma de cátions) ($cmol_c\ kg^{-1}$)	18,85	22,27	40,44
Hidrogênio extraível (H^{+}) ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,00	0,00	1,30
Valor de CTC (Cap. Troca Cátions) ($cmol_c\ kg^{-1}$)	34,25	41,07	75,14
Valor de V (% Sat. de Base) (%)	55,04	54,23	53,82
Saturação de Alumínio (%)	0,01	0,00	0,01
% Al_2O_3 no Ext. Sulfúrico (g kg^{-1})	3,20	2,00	6,00
Água no extrato saturação (%)	113,2	153,4	104,6
Cond. Elétrica no extrato de saturação mS cm^{-1} (25°C)	792,0	616,0	2210,0

Fonte: A Autora, 2019.

As Amostras 01 e 02 apresentaram pH em água com valores entre 7,74 e 7,51, característicos de solos alcalinos (7,4 < pH < 8,0), segundo classificação de Guimarães (2002). Já a Amostra 03, classifica-se como solo ácido (4,5 < pH < 5,4), com pH de 4,84. O pH não é uma característica do solo, pode assumir valor variável a depender da técnica empregada na determinação, como está mostrado na Tabela 22. As mudanças podem ocorrer no próprio solo, o conhecimento de suas características fornece importantes indicadores à Pedologia, Agronomia e a Mecânica dos Solos. A diferença entre o pH em H_2O e em KCl é negativa. De acordo com Kiehl (1979) apud Jacintho (2005), o valor de ΔpH negativo indica a predominância de argilas silicatadas no solo, enquanto um ΔpH positivo está relacionado com a predominância de óxidos de ferro e de alumínio. Para as amostras de solos ensaiadas, verificou-se resultado de ΔpH negativo, indicando ser um solo com argilas silicatas e com alumínios trocáveis.

O percentual de matéria orgânica das três amostras investigadas revelou baixo teor, com valores equivalentes a 0,66 e 0,69 g kg^{-1} (0,066 e 0,0695 %) para as Amostras 01 e 02, respectivamente, e valor de 1,29 g kg^{-1} (0,129 %) para a Amostra 03. Tais resultados enquadram as três amostras como solos pobres em matéria orgânica, visto que, segundo Teixeira et. al. (2017), os solos são considerados ricos em matéria orgânica quando apresentam taxa acima de 5%.

A soma dos cátions trocáveis (Na^+, K^+, Ca^{+2} e Mg^2) é representada pelo valor de S, com valores próximos para as Amostras 01 e 02 (18,85 e 22,27 $cmol_c\ kg^{-1}$) e superior para a Amostra 03 (40,44 $cmol_c\ kg^{-1}$). Tais resultados, somados aos valores de $H^+ + Al^{+3}$ extraível (acidez extraível), refletem a capacidade de troca catiônica (CTC) de um solo.

Segundo Teixeira et al. (2017), os solos são considerados com alta CTC ou atividade alta (Ta) quando apresentam valores superiores a 27 cmolc Kg^{-1}, o que ocorre para as três amostras avaliadas nessa pesquisa (34,25; 41,07 e 75,14 cmolc Kg^{-1}). Em geral, a indicação de Ta caracteriza o solo como de potencial de expansão.

De acordo com Grim (1953), a CTC da Amostra 01 representa o argilomineral Ilita e Clorita (10 – 40 cmolc Kg^{-1}), a Amostra 02 tem CTC próximo ao argilomineral Haloisita $4H_2O$ ou Endelita (40 – 50 cmolc Kg^{-1}) e a Amostra 03, por sua vez, tem CTC mais próximo do grupo das Montmorilonitas (80 – 150 cmolc Kg^{-1}).

Os valores de saturação de base são superiores a 50% em todas as amostras, o que caracteriza o solo como eutrófico, isto é, fértil para a aplicação agrícola. Para a saturação com Sódio, foram registrados valores inferiores a 15%, caracterizando o caráter solódico (salino) dos solos avaliados.

Registros semelhantes foram apresentados por Morais (2017) e Paiva (2016) em solo da cidade de Paulista/PE e Ipojuca, respectivamente. Os autores identificaram solos expansivos com CTC, variando entre 48,98 e 80,59 cmolc Kg^{-1} (Paulista) e 63,0 cmolcKg^{-1} (Ipojuca), bem como férteis e de cárater solódico.

A condutividade elétrica no extrato de saturação representa a salinidade do solo. Para as amostras de Bonito, foram registradas CE variando entre 616 a 2210 mS cm^{-1}, o que indica alta salinidade (sálico) em função do elevado percentual de finos e baixa permeabilidade.

Um resumo dos aspectos descritos anteriormente em função dos ensaios químicos é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Resumo das características das amostras de Bonito referente aos ensaios químicos.

Determinação	Unidade	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
pH em água	-	Alcalino	Alcalino	Ácido
Matéria orgânica	g kg^{-1}	Pobre	Pobre	Pobre
CTC	cmolc Kg^{-1}	Ta - Alta	Ta - Alta	Ta – Alta
V	%	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Saturação de Sódio	%	Solódico	Solódico	Solódico
Condutividade Elétrica - CE	mS cm^{-1} (25°C)	Sálico	Sálico	Sálico

Fonte: A autora, 2019.

4.2.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios X

Na Tabela 24, são exibidos os valores referentes à análise química quantitativa dos óxidos presentes nas Amostras 01, 02 e 03 de Bonito. A identificação dos óxidos nas amostras permite avaliar o efeito do intemperismo nos solos locais, visto que quanto maior o número de óxidos mais evoluído é o solo.

Por meio dos resultados da Fluorescência de Raios X, observa-se a presença preponderante, para as três amostras investigadas, dos óxidos de Silício (SiO_2), Alumínio (Al_2O_3) e Ferro (Fe_2O_{3t}), nessa ordem, representando 83,78%, 84% e 83,49% para as Amostras 01, 02 e 03, respectivamente. Nos trabalhos de Ataíde (2017) e Bezerra (2019) com solo expansivo de Ipojuca e Brejo da Madre de Deus, respectivamente, a soma dos óxidos supracitados correspondeu a 81,34% e 82,11%, números bem próximos aos encontrados nessa pesquisa.

Já o óxido de Magnésio (MnO), não foi detectado (Nd) nas amostras de Bonito, e os óxidos de Níquel (NiO) e Fósforo ($P_2O_{5)}$ foram identificados com menores percentuais, tendo-se registrado apenas traço do primeiro na Amostra 03.

Tabela 24 – Dados das análises químicas quantitativas para as Amostras 01, 02 e 03.

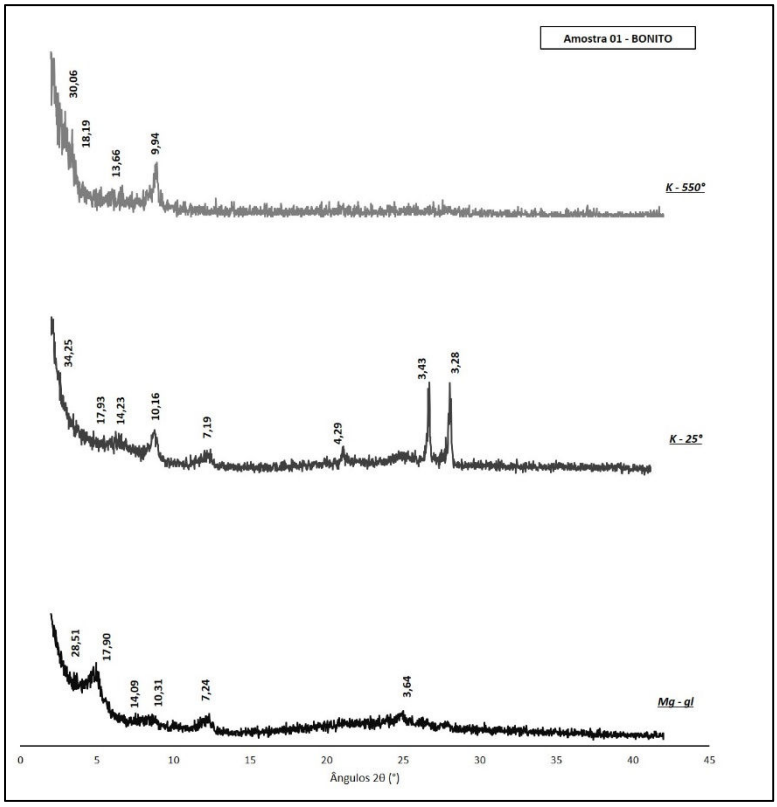
Constituinte Químico	Amostra 01 (%)	Amostra 02 (%)	Amostra 03 (%)
Na_2O	1,45	1,59	0,39
MgO	1,34	1,48	0,44
Al_2O_3	22,48	22,82	29,15
SiO_2	50,60	51,36	46,09
P_2O_5	0,19	0,18	0,13
K_2O	2,95	2,98	0,51
CaO	1,29	1,35	0,24
TiO_2	1,71	1,50	1,70
MnO	Nd	Nd	Nd
Fe_2O_{3t}	10,70	9,82	8,25
NiO	0,01	0,01	Tr
P.F	6,73	6,46	12,85
Total	99,44	99,54	99,76

Fonte: A Autora, 2019.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

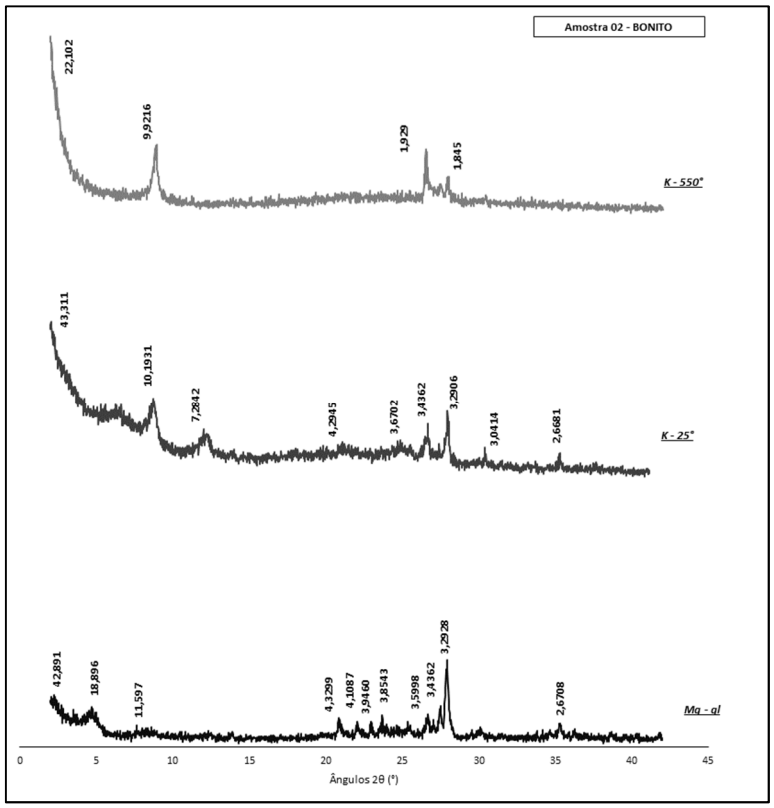
De maneira a caracterizar qualitativamente as amostras de Bonito, foi realizado o ensaio de Difração de Raios X, cujos difratogramas são representados nas Figuras 38, 39 e 40 para as Amostras 01, 02 e 03, respectivamente. A Tabela 25 mostra as distâncias basais dos principais minerais argílicos obtidas por meio dos tratamentos realizados para as três amostras. A Amostra 01 é constituída principalmente de Montmorilonita, Caulinita, Ilita e interestratificação desse argilos minerais. A Amostra 02 é constituída sobretudo por Caulinita, Vermiculita, Ilita, Clorita expansível e Montmorilonita. Os argilominerais encontrados na Amostra 03 são especialmente a Montmorilonita e a Caulinita.

Figura 38 - Difratogramas de Raios X da Amostra 01.



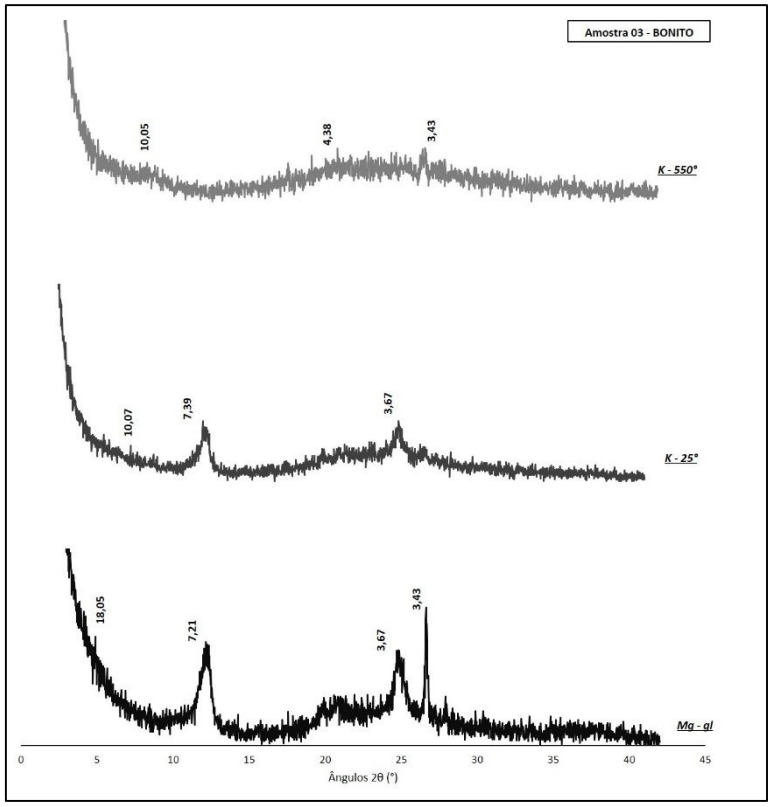
Fonte: A Autora, 2019.

Figura 39 - Difratogramas de Raios X da Amostra 02.



Fonte: A Autora, 2019.

Figura 40 - Difratogramas de Raios X da Amostra 03.



Fonte: A Autora, 2019.

Tabela 25 – Distâncias basais obtidas pelo ensaio de Difração de Raios X.

Tratamentos	Amostra 01 (Å)	Amostra 02 (Å)	Amostra 03 (Å)
K 550 ^{0}C	30,06 – 26,15 – 18,19 13,66 – 10,00	14,05 – 9,94	10,05
K 25 ^{0}C	34,24 – 17,93 – 18,20 10,16 – 7,19	14,14 – 10,12 – 7,28	10,07 – 7,39
Mg-Gl	28,51 – 17,90 10,31 – 7,24	17,69 – 13,19 – 9,92 – 7,12	18,05 – 7,21
Principais Argilomenerais	Montmorilonita, Caulinita, Ilita	Caulinita, Ilita, Vermiculita, Clorita, Montmorilonita	Montmorilonita, Caulinita

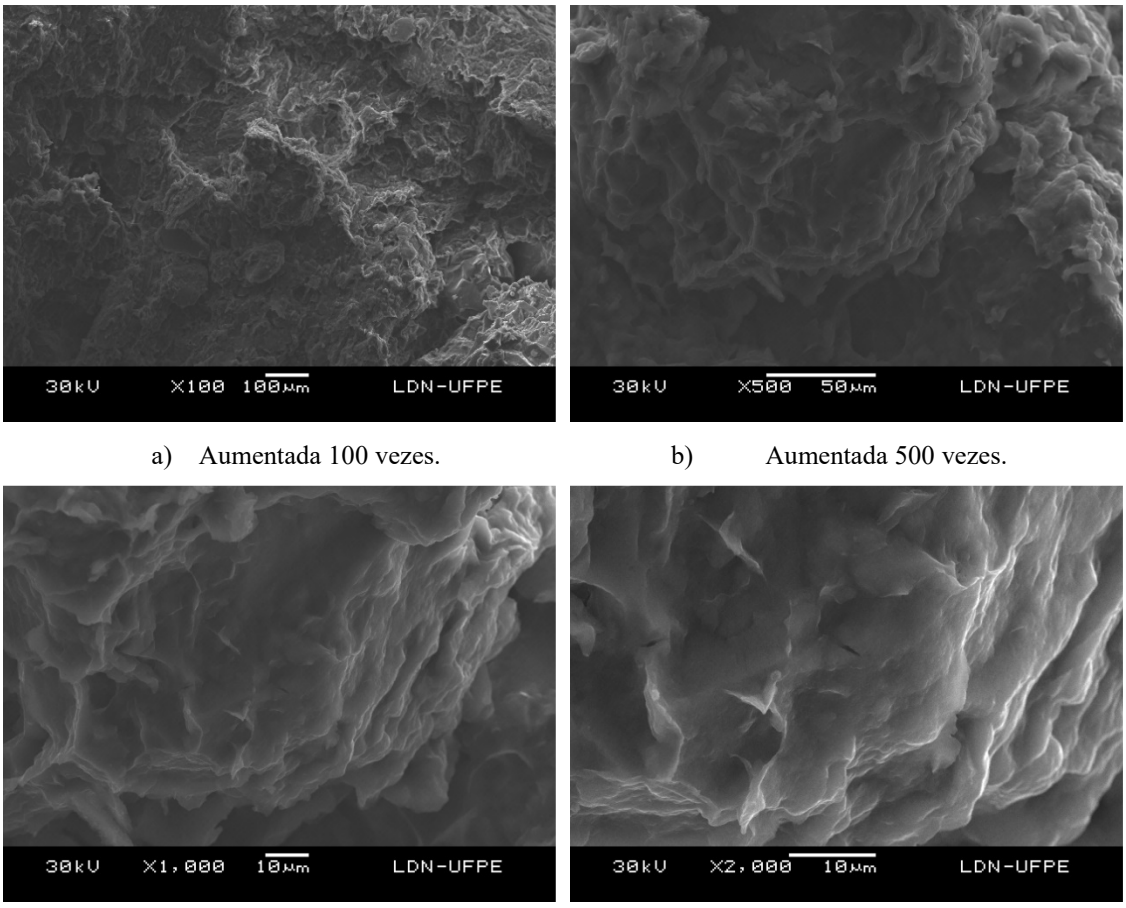
Fonte: A Autora, 2019.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As eletromicrografias obtidas a partir da Amostra 01 indeformada de Bonito, resultantes do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), são mostradas na Figura 46. A contextura (microestrutura) é formada por agregados constituídos por

grânulos com formas poliédricas, lisos a pouco rugosos, sem orientação definida (Figura 41.a). Os grãos de quartzo são subangulosos a angulosos e não apresentam fraturamento e orientação. São permeados pelas frações de siltes e argilas (Figura 41.b). Há presença de lâminas finas e formato alongado angular, as micas. Observa-se a falta de orientação dos argilominerais e a ocorrência de vazios entre as placas (Figura 41.c e d).

Figura 41 - Eletromicrografias da Amostra 01.



a) Aumentada 100 vezes. b) Aumentada 500 vezes.

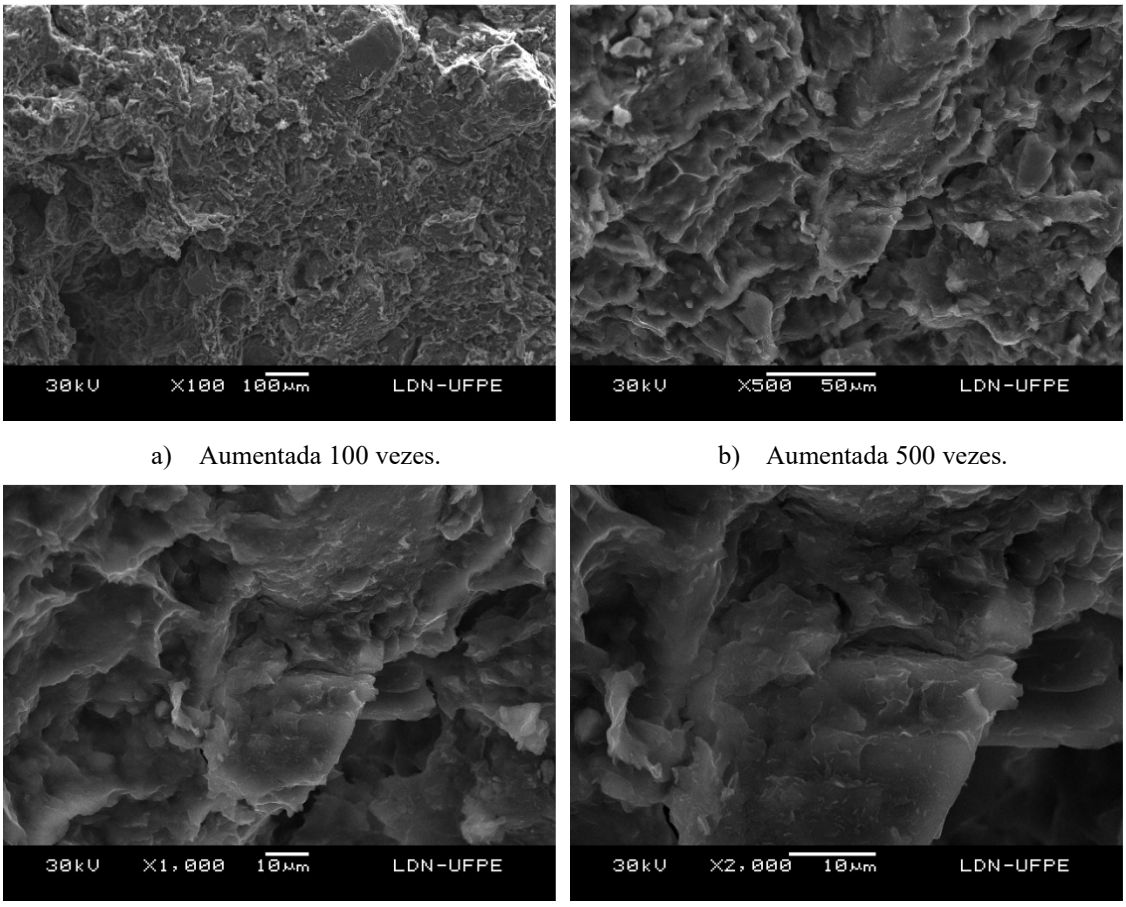
c) Aumentada 1.000 vezes. d) Aumentada 2.00 vezes.

Fonte: A Autora, 2019.

Por sua vez, as eletromicrografias obtidas a partir da Amostra 02 indeformada de Bonito, resultantes do ensaio MEV, encontram-se presentes na Figura 42. A contextura (microestrutura) é semelhante à da Amostra 01, formada por agregados constituídos por grânulos com formas poliédricas, lisos a pouco rugosos. Os minerais não apresentam uma orientação preferencial. Observa-se abundância de partículas e agregados de minerais argílicos de tamanho silte em matriz de finos e traços de quartzo tamanho areia fina (Figura 42.a), mostra agregados de minerais argílicos fracamente unidos. Há poros entre agregados de tamanho médio, com certa floculação entre partículas e agregados de

partículas (Figura 42.b e c). Observa-se ainda agregados de partículas de silte e argila de formato subangular, e flocos de partículas de argila na área central da imagem, além de demonstrar um poro entre-agregados grande, alongado e irregular, como também poro intraesqueléticogrosseiro alongado (Figura 42.d).

Figura 42 - Eletromicrografias da Amostra 02.



a) Aumentada 100 vezes.

b) Aumentada 500 vezes.

c) Aumentada 1.000 vezes.

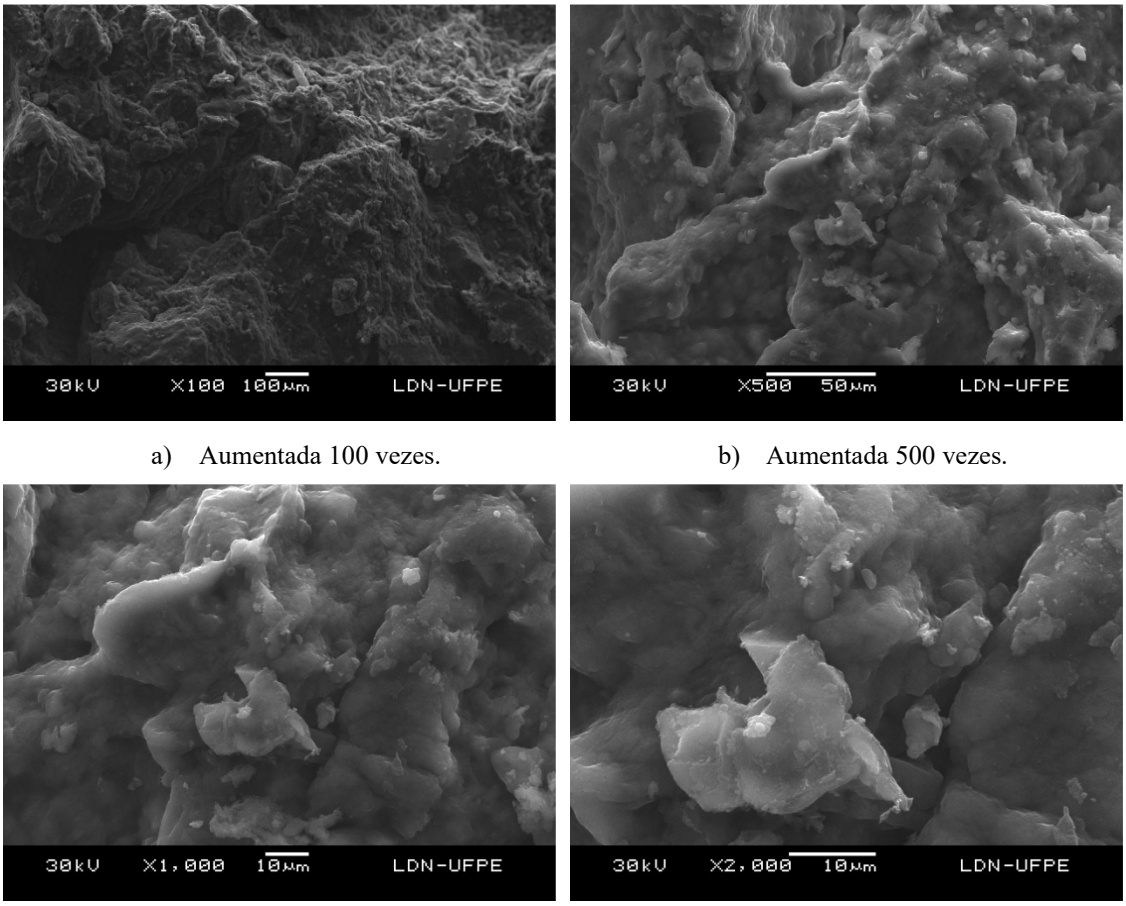
d) Aumentada 2.00 vezes.

Fonte: A Autora, 2019.

As eletromicrografias obtidas a partir da Amostra 03 indeformada de Bonito, resultantes do ensaio MEV, são exibidas na Figura 43. Observa-se a presença de poros finos a médios intra-agregados e médios a grosseiros entre-agregados (Figura 43.a). Não se verifica a presença de orientação preferencial e ocorrência de vazios entre as placas de caulinita (Figura 43.b). Nota-se a presença de argilominerais dos grupos da Montmorilonita e Caulinita e Quartzo (Figura 43.c). A Figura 43.d mostra floculação borda-borda e borda-face de agregados de argila ligados por contatos estreitos, formando

poros intra-agregados finos a médios e estrutura pouco aberta do tipo “castelo de livros”, com base em Collins & Mc Gown (1974).

Figura 43 - Eletromicrografias da Amostra 03.



a) Aumentada 100 vezes.

b) Aumentada 500 vezes.

c) Aumentada 1.000 vezes.

d) Aumentada 2.00 vezes.

Fonte: A Autora, 2019.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DA EXPANSIVIDADE

Conforme descrito no Capítulo 3, a caracterização da expansividade das amostras investigadas nessa pesquisa correspondeu à realização dos ensaios de expansão livre e à tensão de expansão, cujos resultados são detalhados a seguir.

4.5.1 Expansão Livre

O comportamento das curvas de deformação de expansão devido à inundação, com o tempo (escala log), quando aplicada tensão de consolidação de 10 kPa, das Amostras 01, 02 e 03 é representado na Figura 44, ocorrendo a variação da expansão até

aproximadamente 24h (1.440 min), quando há uma tendência de estabilização da expansão livre. Para a definição da curva, foi utilizada a formulação hiperbólica, proposta por Daksanamurthy (1978), conforme Equação 9.

$$El = t/(a + bt) \quad (9)$$

Em que:
E_l – Expansão livre;
T – Tempo;
a e b – constantes obtidas pela linearização de curva não linear.

Na Tabela 26 são expostas as constantes de linearização adotadas para cada amostra, bem como o coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 26 – Dados de ajuste da curva de expansão livre.

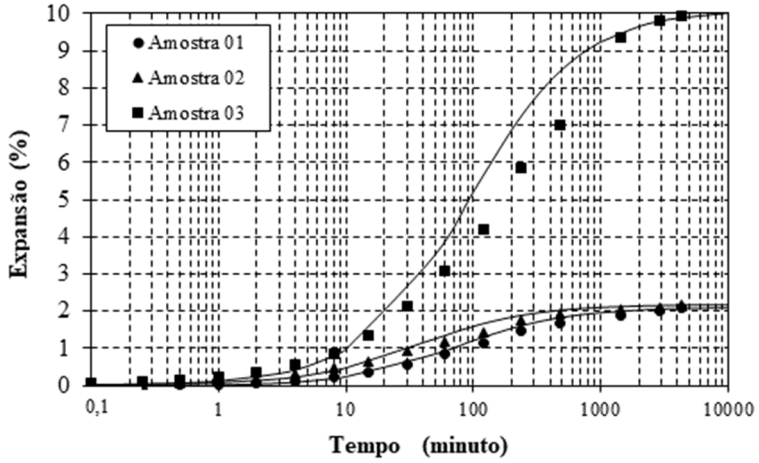
Ajuste da curva	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Constante a	34,630	17,178	9,3208
Constante b	0,4799	0,4626	0,099
R^2	0,999	0,9996	0,998

Fonte: A Autora, 2019.

A Amostra 01 iniciou o ensaio com altura de 19,70 mm e umidade de 14,95%, e finalizou com altura de 20,11 mm e umidade de 21,16%. Já a Amostra 02, iniciou com altura de 19,95 mm e umidade de 14,10%, e concluiu com altura de 19,88 mm e umidade de 16,22%. Por sua vez, a Amostra 03 iniciou o ensaio com altura de 19,72 mm e umidade de 27,43%, e terminou com altura de 21,68 mm e umidade de 37,38%. A expansão livre foi de 2,08%; 2,17% e 9,93% para as Amostras 01, 02 e 03, nessa ordem (Figura 44).

A Tabela 27 revela os índices físicos dos corpos de prova para as três amostras antes e após a realização do ensaio.

Figura 44 – Curva deformação de expansão versus tempo das Amostras 01, 02 e 03.



Fonte: A Autora, 2019.

Tabela 27 – Índice físicos dos ensaios de expansão livre realizadas nas amostras investigadas de Bonito/PE.

Índices Físicos		Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Antes do ensaio	w (%)	14,95	14,10	27,43
	e	0,60	0,58	0,95
	n (%)	37,62	36,85	48,77
	θ (%)	24,88	23,81	36,31
	Sr (%)	66	64	74
Depois do ensaio	w (%)	21,16	16,22	37,38
	e	0,67	0,62	0,96
	n (%)	40,28	38,15	48,93
	θ (%)	33,60	26,82	49,30
	Sr (%)	83	70	100
	Δ Sr (%)	17,3	5,7	25,5

Fonte: A Autora, 2019.

Conforme índices físicos, observa-se que a Amostra 03, no início do ensaio, apresentou porosidade superior à das outras duas amostras com grau de saturação em torno de 74 %, passando a 100 % ao final do ensaio. Já as Amostras 01 e 02, registraram valores de porosidade e grau de saturação próximos no início do ensaio (n = 36 a 37% e Sr = 64 a 66%), porém, ao final do ensaio a Amostra 01, apresentou maior ganho de umidade, com elevação do grau de saturação para 83%. Registra-se, porém, que, embora as Amostra 01 e 02 não tenham atingido grau de saturação superior a 90 %, a expansão livre mostrou-se estabilizada com valor próximo a 2 %.

O comparativo da expansão livre obtida por diversos autores para solos expansivos de Pernambuco é representado na Tabela 28. A avaliação de tais dados permite diagnosticar que os solos das Amostras 01 e 02 apresentam potencial de expansão

com valores próximos aos do solo de Cabrobó e o solo da Amostra 03 apresenta potencial de expansão próximo ao solo de Paulista. Os maiores valores de expansão livre quando aplicada tensão de inundação de 10 kPa foram obtidos para solo de Petrolândia (11,09%) e Ipojuca (12,00%), investigados por Ferreira (1995) e Paiva (2016).

Os resultados dos demais solos expansivos de Pernambuco já investigados não aparecem no comparativo da Tabela 28, uma vez que os ensaios não foram realizados para tensão de expansão de 10 kPa e, conforme diagnosticado por Bastos (1994) e Paiva (2016), para tensão de inundação diferentes são obtidos valores diferentes de expansão livre para um mesmo solo, o que impossibilita a comparação.

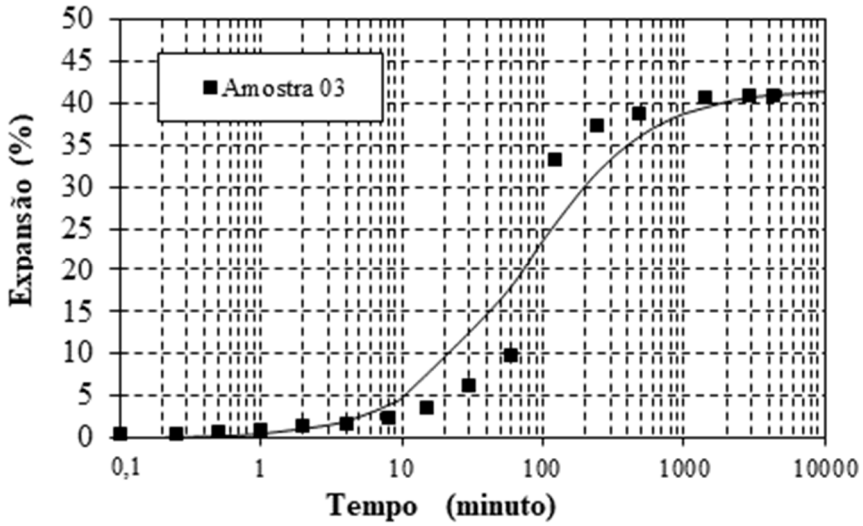
Tabela 28 – Comparativo da Expansão Livre de Solos de Pernambuco.

Origem do Solo	**Expansão Livre (%) (Sobrecarga de 10 kPa)**
Bonito (Amostra 01)	2,08
Bonito (Amostra 02)	2,17
Bonito (Amostra 03)	9,93
Paulista (PAIVA,2016)	10,70
Paulista (MORAIS,2016)	10,16
Agrestina (SILVA, 2018)	6,58
Cabrobó (LACERDA,2019)	1,26
Cabrobó (LACERDA,2019)	4,22
Cabrobó (BARBOSA, 2013 e PAIVA, 2016)	3,20
Petrolândia (FERREIRA, 1995)	11,09
Ipojuca (PAIVA, 2016)	12,00
Santa Maria da Boa Vista (MARINHO, 2018)	8,58

Fonte: A autora, 2019.

Para a Amostra 03, a qual apresentou maior percentual de expansão livre, foi realizado também ensaio sem aplicação de carregamento de estabilização, conforme descrito no Capítulo 03. Nessa condição, a Amostra 03 alcançou expansão livre de 40,92 %, tendo iniciado o ensaio com altura de 13,93 mm e umidade de 21,03 % e concluído com altura de 19,63 mm e umidade equivalente a 43,61 %. A curva apresentada na Figura 45 também seguiu a formulação hiperbólica proposta por Daksanamurthy (1978), a partir da constante “a”, equivalente a 1,8172, e “b”, correspondente a 0,0239, com $R^2 = 0,9978$.

Figura 45 – Curva deformação de expansão *versus* tempo da Amostra 03 (sem aplicação de tensão de consolidação).



Fonte: A Autora, 2019.

4.5.2 Tensão de Expansão

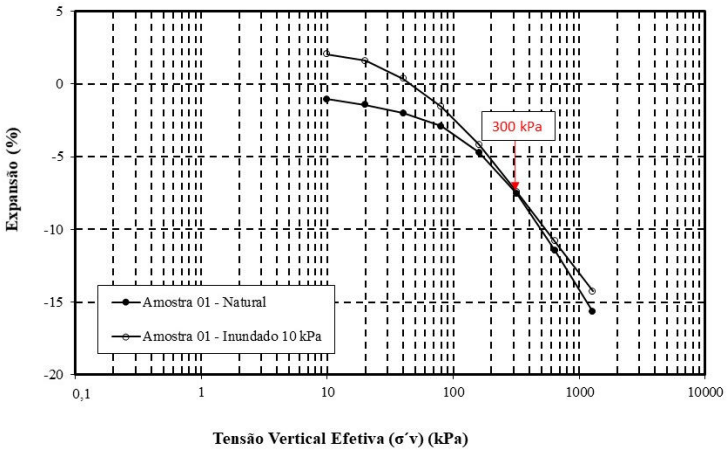
A tensão de expansão das Amostras 01, 02 e 03 indeformadas, determinada pelo método a volume constante, correspondeu a 10,62 kPa; 8,98 kPa e 371,02 kPa, respectivamente. Já a tensão de expansão pelo método edométrico duplo, foi equivalente a 300 kPa, 115 kPa e 550 kPa, para as Amostras 01, 02 e 03, nessa ordem (Figuras 46; 47 e 48). A Tabela 29 apresenta um resumo desses resultados, juntamente com os índices de vazios iniciais do ensaio.

Tabela 29 – Resumo do ensaio de tensão de Expansão das amostras investigadas.

	Ensaio	**Amostra 01**	**Amostra 02**	**Amostra 03**
Volume Constante	Tensão de Expansão (kPa)	10,62	8,98	371,02
	$e_{inicial}$	0,68	0,65	0,78
Edométrico duplo	Tensão de Expansão (kPa)	300	115	550
	$e_{inicial}$ (Natural)	0,69	0,58	0,81
	$e_{inicial}$ (Inundado)	0,60	0,58	0,95

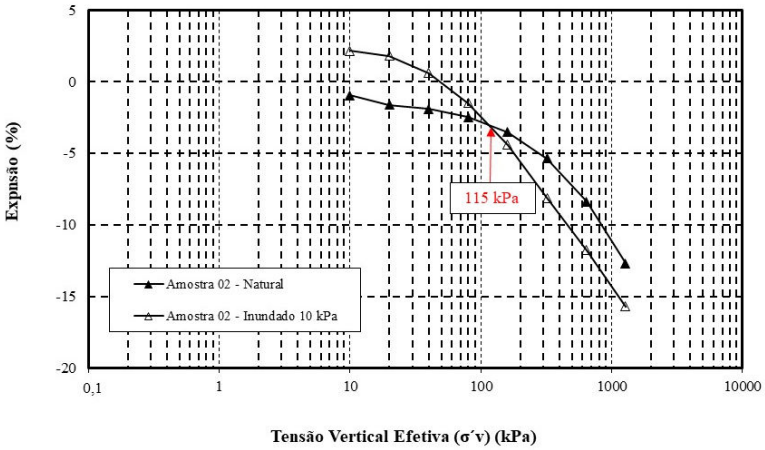
Fonte: A autora, 2019.

Figura 46 – Resultado do Ensaio Edométrico Duplo da Amostra 01.



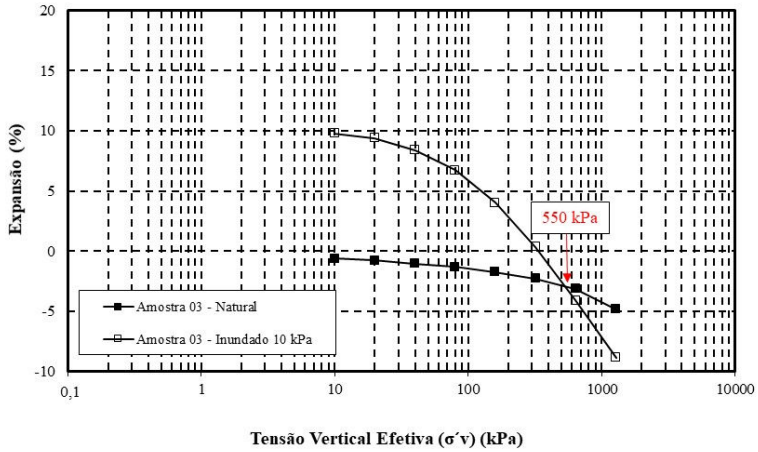
Fonte: A Autora, 2019.

Figura 47 – Resultado do Ensaio Edométrico Duplo da Amostra 02.



Fonte: A Autora, 2019.

Figura 48 – Resultado do Ensaio Edométrico Duplo da Amostra 03.



Fonte: A Autora, 2019.

Uma comparação entre a tensão de expansão atingida para os dois primeiros métodos executados permite distinguir a Amostra 03 com alta expansão, com valor de

tensão de expansão superior em torno 32,5 vezes para o método de volume constante e 3,30 vezes para o método edométrico duplo em relação às outras duas amostras.

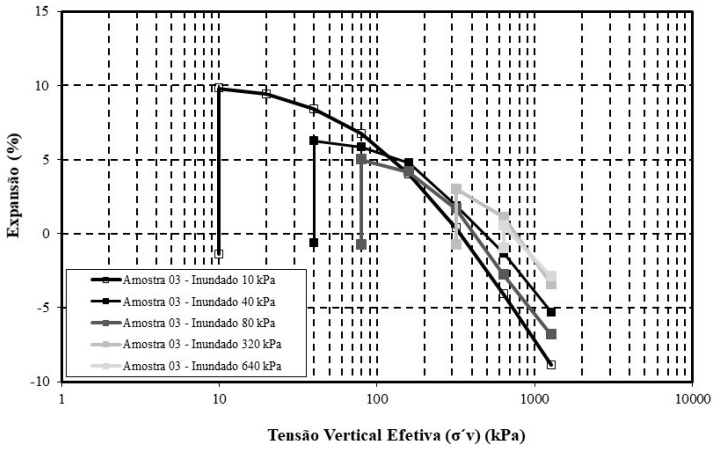
Aplicando-se o critério de Vijayverviya & Ghazzaly (1973) e considerando o resultado da tensão de expansão à volume constante, o grau de expansividade das Amostras 01 e 02 variaram de baixo (tensão de expansão) a médio (expansão livre), e da Amostra 03 variou de alto (expansão livre) a muito alto (tensão de expansão).

Já segundo o critério de Jimenez Salas (1980), as Amostras 01 e 02 não causariam danos às estruturas assentes sob esse solo se considerada a tensão à volume constante. Contudo, se avaliado o ensaio endométrico duplo, estruturas construídas sobre a Amostra 01 seriam condenadas à demolição, enquanto para a Amostra 02 ocorreriam danos graves.

Ainda considerando o mesmo critério, independentemente do método de ensaio de tensão de expansão, edificações quando construídas sob solo da Amostra 03 teriam danos a nível tão elevado que seriam indicadas à demolição.

Baseando-se nesses resultados, conforme já esclarecido no Capítulo 3, prosseguiu-se apenas para a Amostra 03 a determinação da tensão de expansão pelo método carregamento após expansão com diferentes sobrecargas, tendo-se atingido um valor médio de 544 kPa (Figura 49). Também foi determinada a tensão de expansão pelo método expansão e colapso alcançando valor na ordem de 860 kPa (Figura 50).

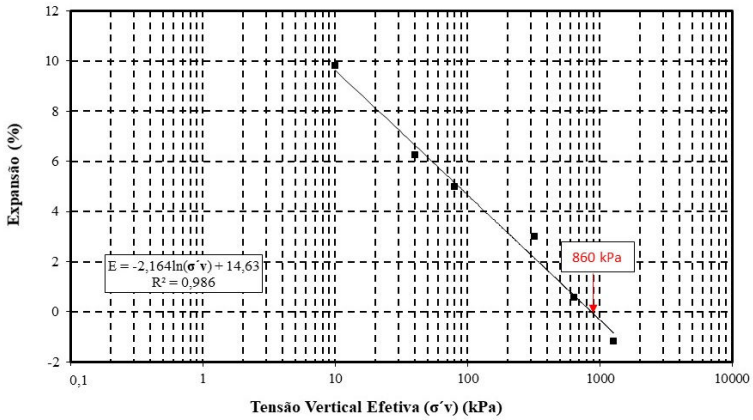
Figura 49 – Tensão de Expansão pelo método Carregamento após Expansão da Amostra 03.



.

Fonte: A Autora, 2019.

Figura 50 – Tensão de Expansão pelo método Expansão e Colapso da Amostra 03.



Fonte: A Autora, 2019.

A Tabela 30 apresenta resumo dos valores de tensão de expansão (kPa) pelos diferentes métodos para a Amostra 03, juntamente com dados de outros solos de Pernambuco (Brasil) e de Sevilha (Espanha).

Tabela 30 – Comparativo da Tensão de Expansão de Solos de Pernambuco (Brasil) e Sevilha (Espanha).

Origem do Solo	Tensão de Expansão (kPa)			
	Volume Constante	Carregamento Após Expansão	Expansão e Colapso	Edométrico Duplo
Bonito (Amostra 03)	371,02	544	860	550
Paulista (PAIVA,2016)	275	300	180	-
Paulista (MORAIS,2016)	275	343	250	160
Agrestina (SILVA, 2018)	100	160	201	-
Brejo da Madre de Deus (BEZERRA,2019)	131	180	310	100
Cabrobó (BARBOSA, 2013 e PAIVA, 2016)	87	90	100	-
Petrolândia (FERREIRA, 1995)	242	333	239	308
Ipojuca (PAIVA, 2016)	245	190	220	-
Santa Maria da Boa Vista (MARINHO,2018)	81,25	242	105	320
Sevilha (DELGADO, 1986)	193	260	150	-

Fonte: A Autora, 2019.

De modo geral, a Amostra 03 registrou maiores valores de tensão de expansão entre os solos de Pernambuco para os diferentes métodos aplicados, com valor médio de 581 kPa.

4.5.3 Comparativo dos Métodos Indiretos e Diretos

Analisando ainda os resultados da caracterização da expansividade das amostras de Bonito foi elaborada a Tabela 31 para apresentação de comparativo entre os métodos indiretos e diretos de classificação do potencial de expansão das amostras.

Tabela 31 – Comparativo do potencial de expansão segundo os métodos de classificação Diretos e Indiretos.

Método	Critério	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
Indireto	Skempton (1953)	B	B	B
	Van Der Merwe (1964)	A	A	A
	Seed et al. (1962)	MA	MA	MA
	Chen (1965)	MA	MA	MA
	Daksanamurthy & Raman (1973)	A	A	MA
	Cuellar (1978)	NA	NA	NA
	Ranganathan & Satyanarayana (1965)	A	A	MA
Direto	Vijayverviya & Ghazzaly (1973)*	B - M	B - M	A - MA
	Jimenez Salas (1980)*	B	B	MA

* Tensão de expansão à Volume Constante

B – Baixo; M – Médio; A – Alto; MA – Muito Alto; NA – Não aplicável.

Fonte: A Autora, 2019.

Para os métodos indiretos, há uma tendência predominante de expansão muito alta para todas as amostras, com exceção para o critério de Skempton (1953), em que as três amostras se enquadraram como inativas, bem como para as Amostras 01 e 02, os critérios de Daksanamurthy & Raman (1973) e Ranganathan & Satyanarayana (1965) apresentaram alto potencial de expansão.

No tocante aos métodos quantitativos aplicados, as Amostras 01 e 02 comportaram-se com grau de expansão de baixo a médio, o que, conforme Jimenez Salas (1980), não provocaria danos a edificações. Já a Amostra 03, foi classificada como de

alto a muito alto potencial de expansão, impactando em danos graves até demolição das estruturas, segundo mesmo critério.

Em resumo, registra-se que houve, para as amostras de baixa expansão, boa concordância entre o método de Skempton (1953) quando confrontado com as medições de expansão e critérios diretos. Por outro lado, para o solo com alto a muito alto potencial de variação volumétrica, houve concordância entres os métodos diretos (excluindo o de Skempton (1953)) e os resultados dos métodos diretos.

4.6 CURVA CARACTERÍSTICA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

São apresentadas as relações entre umidade volumérica, grau de saturação, índice de vazios e sucção total para a Amostra 03, obtidas por meio do ensaio de sucção do através do método do papel filtro e dessecador de vidro com solução de Nacl e H_2SO_4. A Tabela 32 indica os parâmetros do solo obtidos após os ensaios, assim como a Figura 51 representa as curvas de tais relações.

A curva ilustrada na Figura 51.a (índice de vazios versus umidade volumétrica) permite observar a proximidade da paralela à linha de saturação da Amostra 03 até próximo ao limite de contração. A partir daí, o índice de vazios apresenta menor variação, tornando-se praticamente constante com a redução da umidade.

Considerando a curva de variação do grau de saturação com a umidade volumétrica (Figura 51.c), é possível determinar a umidade de 40% como o ponto de dessaturação da amostra investigada no processo de secagem, ou seja, quando há mudança de forma acentuada da quantidade de variação da saturação, indicando o ponto onde o ar começa a entrar no solo.

Por sua vez, o ponto de entrada generalizada de ar é obtido por meio da relação entre a sucção total e o grau de saturação correspondente à aproximadamente 10.000 kPa, valor esse característico de solo em zona ativa, conforme também identificado por PAIVA (2016), em solos de Paulista, Cabrobó e Ipojuca, cidades de Pernambuco.

Tabela 32 – Parâmetros do solo obtidos no ensaio de sucção.

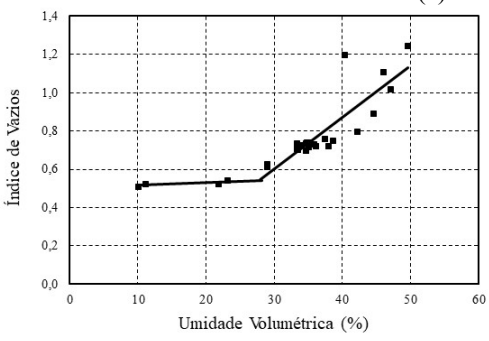
e	**Sr (%)**	**w (%)**	**θ (%)**	**ψ total (kPa)**	**γh (g/cm³)**	**γs (g/cm³)**	**γg (g/cm³)**
1,20	74,06	34,28	40,34	1261	1,58	1,18	2,584
0,89	94,70	32,65	44,62	1584	1,81	1,37	2,584
0,79	95,40	29,32	42,23	2207	1,86	1,44	2,584

Tabela 32 – Parâmetros do solo obtidos no ensaio de sucção (continuação).

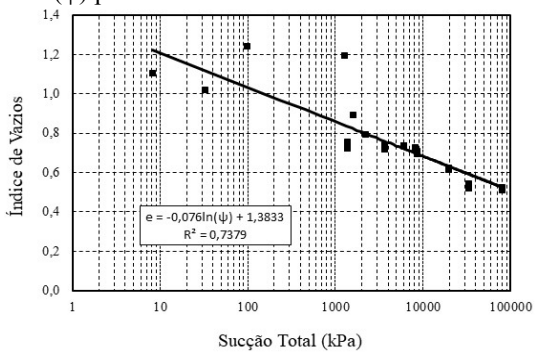
e	Sr (%)	w (%)	θ (%)	ψ total (kPa)	γh (g/cm³)	γs (g/cm³)	γg (g/cm³)
1,02	93,29	36,75	47,06	33	1,75	1,28	2,584
1,11	87,70	37,51	46,04	8	1,69	1,23	2,584
1,24	89,39	43,04	49,56	99	1,65	1,15	2,584
0,72	86,15	24,08	36,13	8110	1,86	1,50	2,584
0,73	80,93	22,73	34,04	8110	1,84	1,50	2,584
0,52	63,93	12,88	21,89	33160	1,92	1,70	2,584
0,54	65,88	13,80	23,14	33160	1,91	1,68	2,584
0,61	76,38	18,12	29,03	19910	1,89	1,60	2,584
0,62	75,36	18,21	28,97	19910	1,88	1,59	2,584
0,51	29,99	5,92	10,13	81070	1,81	1,71	2,584
0,52	32,27	6,55	11,10	81070	1,81	1,70	2,584
0,76	86,78	25,42	37,39	1370	1,84	1,47	2,584
0,75	90,24	26,07	38,57	1370	1,87	1,48	2,584
0,72	90,57	25,34	38,00	1370	1,88	1,50	2,584
0,74	81,90	23,45	34,83	3680	1,83	1,49	2,584
0,72	83,78	23,27	35,00	3680	1,85	1,50	2,584
0,73	85,19	24,02	35,91	3680	1,85	1,49	2,584
0,74	78,75	22,44	33,39	6110	1,82	1,49	2,584
0,74	81,72	23,31	34,67	6110	1,83	1,49	2,584
0,74	82,76	23,66	35,16	6110	1,84	1,49	2,584
0,70	81,09	22,03	33,45	8690	1,85	1,52	2,584
0,71	80,54	22,05	33,37	8690	1,85	1,51	2,584
0,70	84,40	22,73	34,63	8690	1,87	1,52	2,584

Fonte: A Autora, 2019.

Figura 51 – Relação entre umidade volumérica (θ), grau de saturação (Sr), índice de vazios (e) e sucção total (ψ) para a Amostra 03.

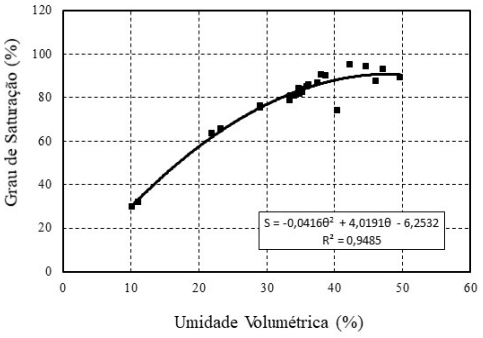


a) Gráfico índice de vazios (e) *versus* Umidade Volumétrica (θ).

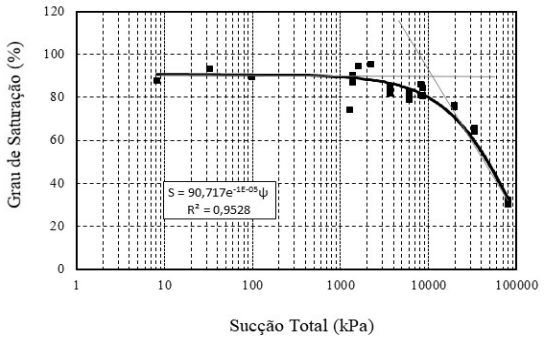


b) Gráfico índice de vazios (e) *versus* Sucção Total (ψ).

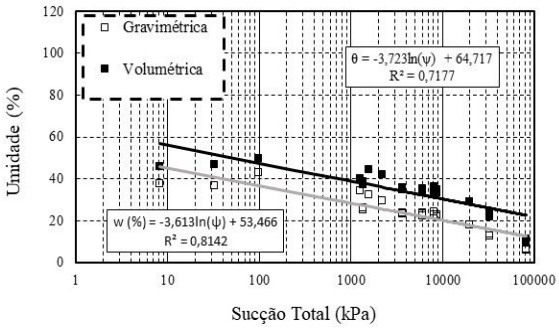
Figura 51 – Relação entre umidade volumérica (θ), grau de saturação (Sr), índice de vazios (e) e sucção total (ψ) para a Amostra 03 (continuação).



a) Gráfico Grau de Saturação (Sr) *versus* Umidade Volumétrica (θ).



b) Gráfico Grau de Saturação (Sr) *versus* Sucção Total (ψ).

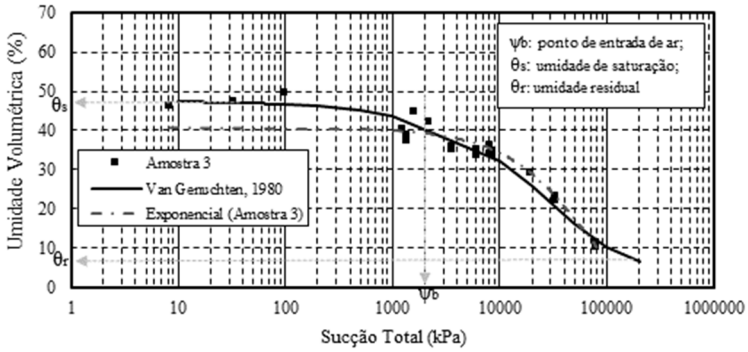


c) Gráfico Umidade (w, θ) *versus* Sucção Total (ψ).

Fonte: A Autora, 2019.

Foi, ainda, realizado o ajuste da curva de retenção de água (umidade volumétrica *versus* sucção total) para a Amostra 03 pela Equação 4 (VAN GENUCHTEN, 1980), comparando com o resultado de laboratório para ajuste de curva exponencial. Percebe-se a boa aplicabilidade para a proposta de Van Genuchten, 1980 (Figura 52), considerando os parâmetros θr equivalente a 7% e θs igual a 47,5 %.

Figura 52 – Curva Característica de retenção de água da Amostra 03 (resultados experimentais e ajuste da equação de Van Genuchten, 1980).

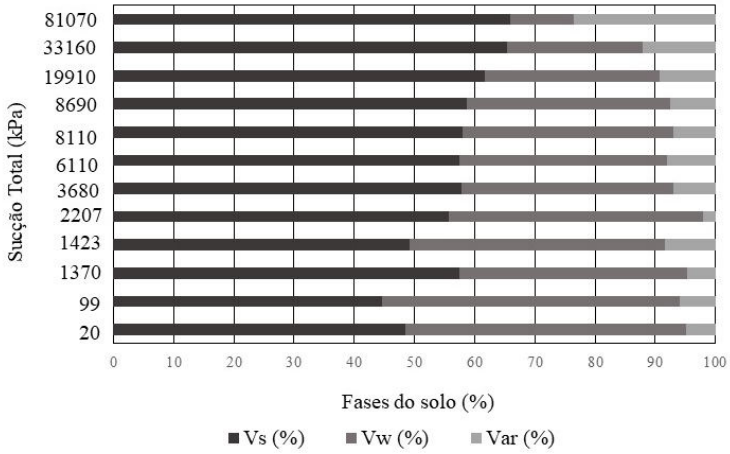


.

Fonte: A Autora, 2019.

A partir dos dados dos ensaios anteriores, foram ainda identificados os volumes percentuais das fases constituintes do solo (sólida, líquida e gasosa), representadas por meio da Figura 53. Com o aumento da sucção, o volume total (Vt) da amostra reduz (contração volumétrica), o percentual de água (Vw) reduz e cresce o percentual do volume de sólidos (Vs) e de ar (Var).

Figura 53 – Relação sucção com as fases constituintes da Amostra 03.

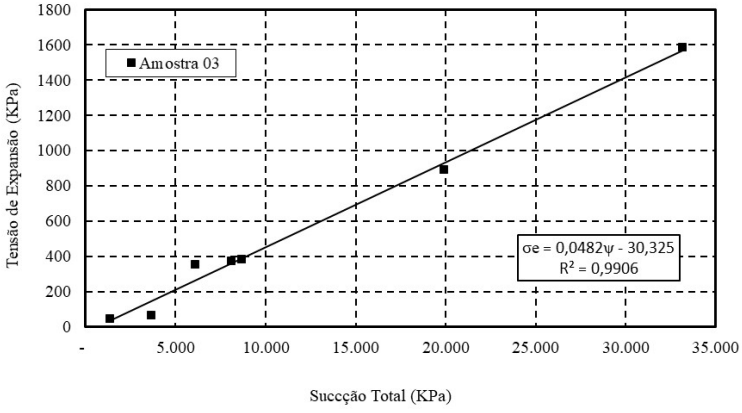


Fonte: A Autora, 2019.

Na tentativa de avaliar a influência da variação da sucção na tensão de expansão da Amostra 03, foram realizados ensaios de tensão de expansão a volume constante nas amostras após avaliação da sucção versus umidade, com o uso do dessecador de vidro.

O gráfico da Figura 54 mostra, como acreditado, a tendência ao crescimento da tensão de expansão do material com o aumento da sucção, tendo-se obtido ajuste satisfatório da reta (R^2 = 0,9906). Pereira (2004), em investigação de solo de Curitiba, também registrou a correlação de crescimento da tensão de expansão ao se impor maiores valores de sucção à amostra.

Figura 54 – Relação entre a tensão de expansão (σe) e sucção (ψ) para a Amostra 03.



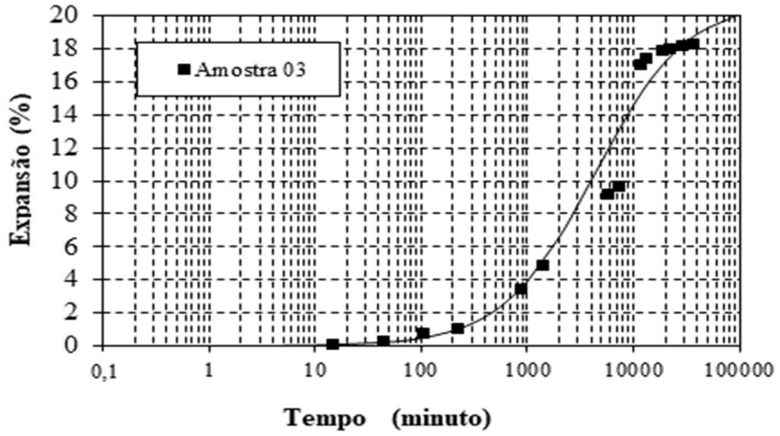
Fonte: A Autora, 2019.

4.7 CARACTERIZAÇÃO MACROESTRUTURAL

O ensaio de tomografia computadorizada de Raios X permitiu avaliar a variação dos macroporos da Amostra 03 na condição indeformada e compactada na umidade ótima (Proctor Normal), bem como após sofrer expansão.

O primeiro conjunto de escaneamento foi realizado com a referida amostra na condição indeformada com umidade de aproximadamente 22,36% e altura de 75,4 mm. Após inundado, o corpo de prova apresentou umidade de 32,58% e registrou variação de altura de 13,82 mm, o que levou a uma expansão de 18,34% e altura final 89,22 mm. A Figura 55 revela o acompanhamento da expansão até estabilização, por meio da curva hiperbólica de Daksanamurthy (1978), conforme Equação 9.

Figura 55 – Expansão livre do Corpo de Prova indeformado moldado no molde de PVC.



Fonte: A Autora, 2019.

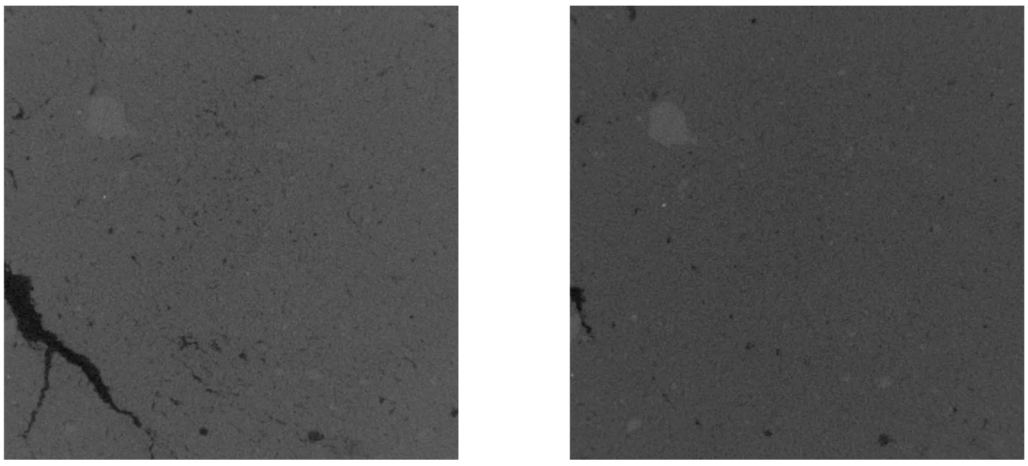
Observa-se que, para esse ensaio, o valor da expansão livre (E_l = 18,34 %) foi superior ao valor alcançado pela Amostra 03 quando do ensaio na célula edométrica com aplicação de tensão de inundação de 10 kPa (E_l = 9,93 %), possivelmente em função da própria aplicação de carregamento prévio, como também pela amostra nesse ensaio ter apresentado umidade inicial (22,36 %) inferior ao ensaio na célula edométrica (27,43 %).

Ao se comparar, agora, com o ensaio de expansão livre sem aplicação de carregamento exibido na Figura 45 (E_l=4 0,92 %), registrou-se valor inferior de expansão livre para o corpo de prova no PVC em função da umidade superior desse (22,36 %) com Sucção Total correspondente a 8.700 kPa, conforme curva de retenção exibida na Figura 54 quando comparado com o corpo de prova do ensaio anterior (21,03%) e Sucção Total em torno de 10.000 kPa.

Em relação ao escaneamento de tomografia computadorizada de Raios X, a Figura 56 exibe o comparativo da Amostra 03 na condição indeformada natural (3BIN) com a amostra expandida (3BIE) após inundação, tendo-se tomado um cubo representativo das dimensões 840 x 840 x 840 voxels. As Figuras 56.a e b representam a seção Nº 403 do corpo de prova após conversão para a escala de Hounsfield no VGStudio MAX 2.2 na condição natural e expandida. Já as Figuras 56.c e d, exibem as mesmas seções depois de binarizadas, sendo identificados na cor branca os vazios e na cor preta os não vazios da amostra. Logo abaixo, nas Figuras 56.e e f, são exibidas perspectivas em três dimensões do volume avaliado nesse ensaio, a partir do qual foi realizada a avaliação da variação dos vazios com dimensões superiores a $1{,}25x10^{-4}$ mm^3 da amostra. Finalmente, as Figuras 56.g e h permitem acesso, por meio de QR-COD, à animação com as 840 imagens geradas, produzido com auxílio dos sites livres Kizoa e QR Code Generator.

Entre as imagens destacadas, percebe-se que ao sofrer aumento de umidade e variação de volume, o solo da amostra indeformada apresentou modificação da macroestrutura através da reordenação do arranjo dos grãos e, como era de se esperar, redução do espaço poroso.

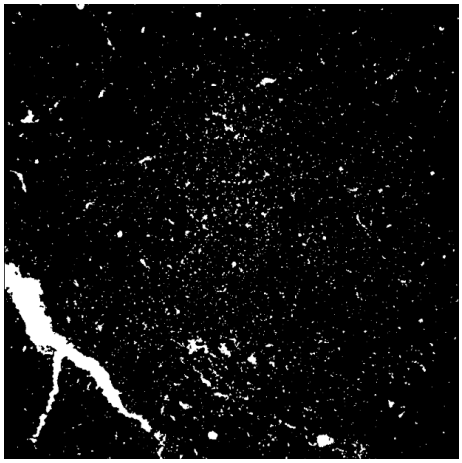
Figura 56 – Comparativo do escaneamento da Amostra 03 de Bonito na condição Indeformada Natural (BIN) e Expandida (BIE).



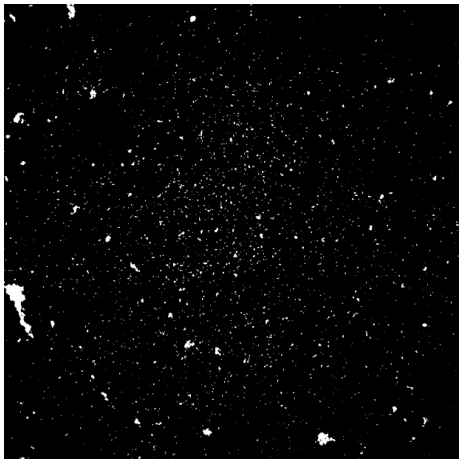
a) Imagem original Hu – Amostra 3BIN.

b) Imagem original Hu – Amostra 3BIE.

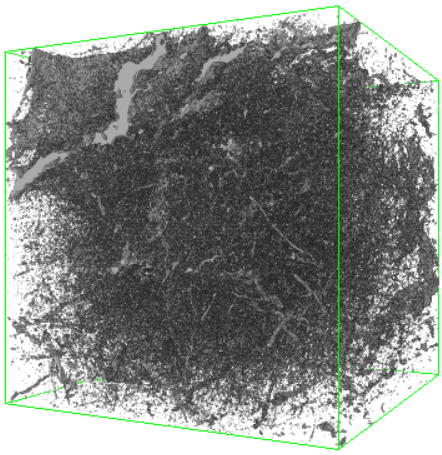
Figura 56 – Comparativo do escaneamento da Amostra 03 de Bonito na condição Indeformada Natural (BIN) e Expandida (BIE) (continuação).



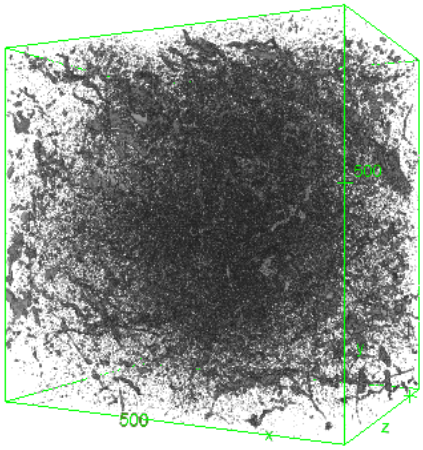
c) Imagem Binarizada – Amostra 3BIN.



d) Imagem Binarizada – Amostra 3BIE.



e) Imagem 3D – Amostra 3BIN.



f) Imagem 3D – Amostra 3BIE.

g) Imagem QR-COD – Amostra 3BIN.

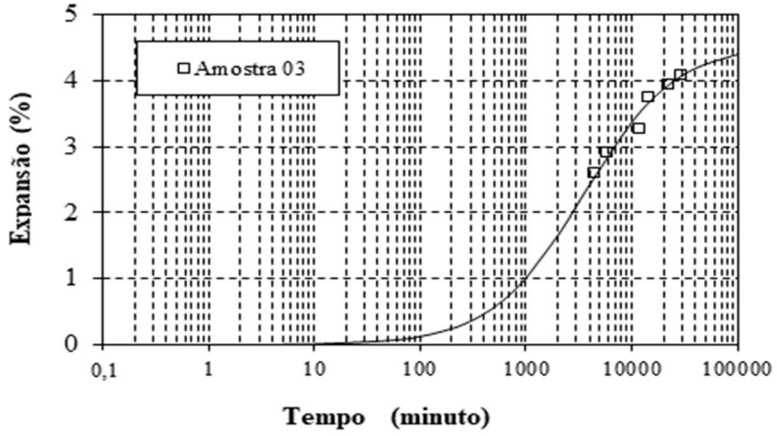
h) Imagem QR-COD – Amostra 3BIE.

Fonte: A Autora, 2019.

O segundo conjunto de escaneamento foi realizado com a amostra na condição compactada com umidade de 34,00 % e altura de 75,25 mm. Após inundado, o corpo de prova apresentou umidade de 35,22% e registrou variação de altura de 3,07 mm, o que

levou a uma expansão de 4,08% e altura final 78,32 mm. A Figura 57 revela o acompanhamento da expansão com a curva hiperbólica de Daksanamurthy (1978).

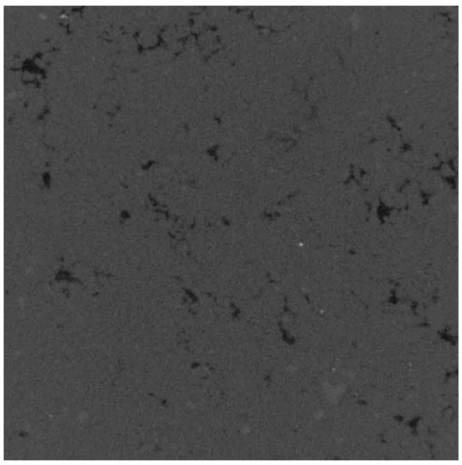
Figura 57 – Expansão livre do Corpo de Prova Compactado moldado no molde de PVC.



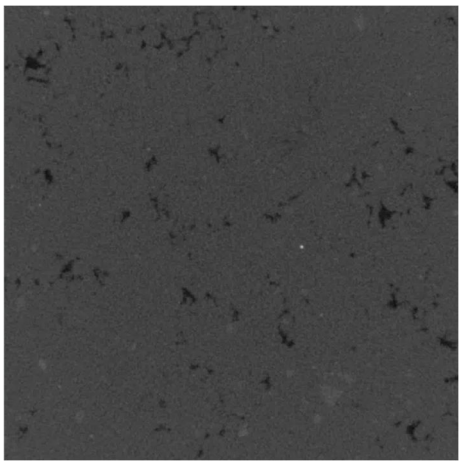
Fonte: A Autora, 2019.

No que se refere ao escaneamento, a Figura 60 exibe o comparativo da Amostra 03 na condição compactada na umidade ótima (BCO) com a amostra expandida (BCE), tendo-se adotado um cubo representativo das dimensões 840 x 840 x 840. As Figuras 58.a e b representam a seção Nº 579 do corpo de prova após conversão para a escala de Hounsfield no VGStudio MAX 2.2, na condição compactada na ótima e expandida. Já as Figuras 58.c e d, exibem as mesmas seções depois de binarizadas, sendo identificados na cor branca os vazios e na cor preta os não vazios. Em seguida, são representadas nas Figuras 58.e e f perspectivas em três dimensões do volume estudado nesse ensaio, tendo-se avaliado a variação da porosidade da amostra. Por fim, as Figuras 58.g e h permitem acesso, por meio de QR-COD, à animação com as 840 imagens geradas.

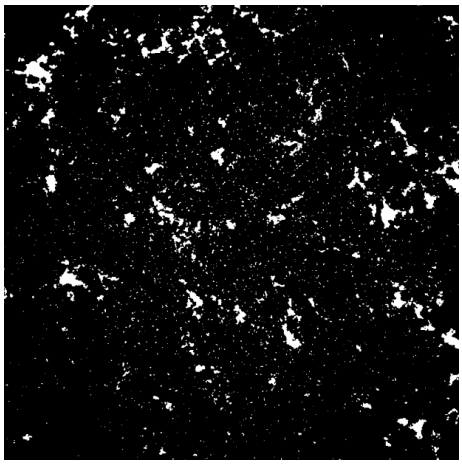
Figura 58 – Comparativo do escaneamento da Amostra 03 de Bonito na condição Compactada na umidade ótima (BCO) e expandida (BCE).



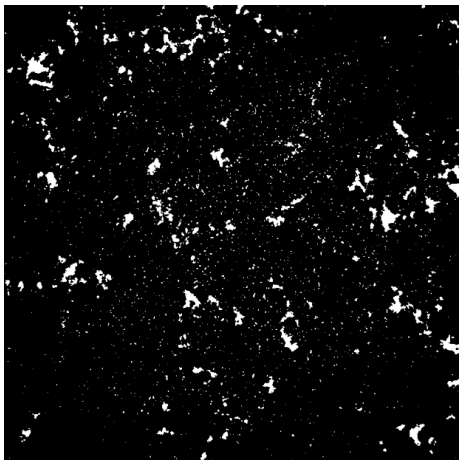
a) Imagem original Hu – Amostra 3BCO.



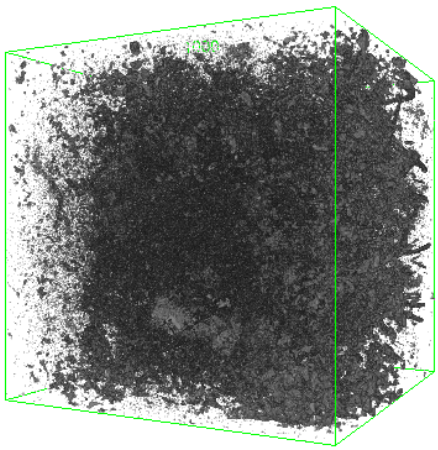
b) Imagem original Hu – Amostra 3BCE.



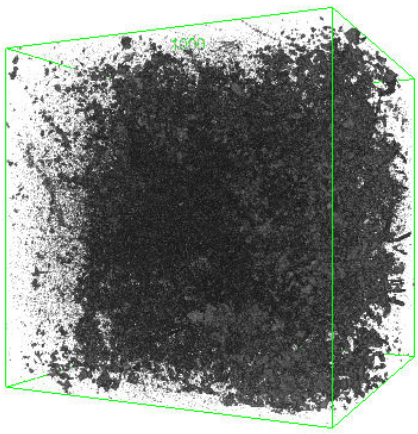
c) Imagem Binarizada – Amostra 3BCO.



d) Imagem Binarizada – Amostra 3BCE.



e) Imagem 3D – Amostra 3BCO.



f) Imagem 3D – Amostra 3BCE.

Figura 58 – Comparativo do escaneamento da Amostra 03 de Bonito na condição Compactada na umidade ótima (BCO) e expandida (BCE) (continuação).

g) Imagem QR-COD – Amostra 3BCO.

h) Imagem QR-COD – Amostra 3BCE.

Fonte: A Autora, 2019.

Para a condição compactada, após inundação, a amostra apresentou baixo ganho de umidade e pequeno percentual de expansão, não tendo sido diagnosticada variação significativa no arranjo dos grãos e do volume de vazios, fato esse esclarecido pelo processo de compactação que provoca reorientação das partículas de argila com arranjo disperso e menor permeabilidade.

Para obtenção do volume dos poros superior a $1{,}25x10^{-4}$ mm^3 representativo das amostras, foi calculado o volume de vazios identificados em $pixels^3$ por meio do plugin "Particule Analyzer", do software livre Image J. A macroporosidade correspondeu, então, à razão entre tal volume de vazios e o volume total do cubo (Tabela 33).

Tabela 33 – Macroporosidade resultante das imagens tomográficas.

	Amostra 03 BIN	**Amostra 03 BIE**	**Amostra 03 BCO**	**Amostra 03 BCE**
Volume de poros (pixels)	27.170.217	10.942.827	23.553.761	19.298.700
Volume de poros (mm3)	3.396	1.368	2.944	2.412
Volume Total (pixels)	592.704.000	592.704.000	592.704.000	592.704.000
Volume Total (mm3)	74.088	74.088	74.088	74.088
Macroporosidade (%)	4,58	1,85	3,97	3,26

BIN – Bonito Indeformada Natural; BIE – Bonito Indeformada Expandida
BCO – Bonito Compactada na umidade ótima; BCO – Bonito Compactada Expandida

Fonte: A Autora, 2019.

Diante de tais resultados, é possível verificar que os valores encontrados para o volume de vazios foi bem inferir aos valores para condições reais em campo ou mesmo compactado. Tal fato se deve à limitação decorrente da resolução das imagens analisadas (50 μm), restringindo a avaliação das partículas com volumes superiores ao volume do voxel, ou seja, volumes acima de $1{,}25x10^{-4}$ mm^3. Solos argilosos apresentam valor elevado para porosidade intraagregados, ou seja, microporos que não puderam ser identificados nesse ensaio. Santos (2017) e Machado (2019) também encontraram valores de porosidade inferiores para amostras de solos arenosos quando comparados os resultados de laboratório e a técnica de tomografia computadorizada de Raios X.

De toda forma, o ensaio foi importante em termos comparativos, visto que se observou uma redução do volume de poros quando da expansão da amostra (59,60% para a amostra na condição natural e 17,88% para a condição compactada), fato esse comprovado por meio dos registros do escaneamento já apresentados.

Somado a isso, como era de se esperar, a macroporosidade da amostra indeformada é superior à da amostra compactada, fato esse esclarecido pelas trincas existentes no interior da amostra indeformada, assim como o processo de compactação que permite a maior densidade da amostra e redução dos vazios.

5 ANÁLISE DO PROCESSO E PROPAGAÇÃO DE FISSURAS

É apresentado breve resumo de trabalhos identificados na literatura sobre o processo de fissuração, assim como o procedimento de ensaio realizado nesta pesquisa. Etapas de montagem do aparato utilizado como suporte para as amostras e demais equipamentos, bem como descrições do desenvolvimento dos diferentes procedimentos de ensaio são também detalhadas. Por fim, são revelados os resultados obtidos e as análises dos principais aspectos observados no processo de propagação de fissuras.

5.1 ESTUDOS PRELIMINARES

De modo geral, esta pesquisa visa contribuir para o estudo do comportamento do aparecimento das fissuras em solos expansivos, uma vez que o seu surgimento provoca efeitos adversos em diferentes ocasiões, tais como a movimento acelerado da água da superfície até camadas mais profundas. Fleureau et al. (2015) afirmam que a fragmentação da secagem de solos de argila pode ter um impacto no desempenho de várias aplicações geotécnicas, agrícolas e ambientais. Por exemplo, em muitas circunstâncias, é a causa de danos em estruturas de terra.

Shi et al. (2013) acrescentam que a fissuração está associada a uma redução no volume, mas a taxa com que ocorre e a própria composição da matriz de solo exposto ao ressecamento influenciam o processo. Das variáveis envolvidas na fissuração, algumas são de natureza interna, ou próprias ao solo em seu estado inicial, enquanto outras são ambientais, dependentes de condições externas ao solo, como a taxa com que a entrada e a saída de água ocorre nos solos argilosos ativos.

Das variáveis internas, Lakshmikantha (2009) cita que a própria composição do solo tem influência direta nas propriedades de sua contração e expansão, que, por sua vez, afetam o comportamento de fissuração. O pesquisador faz referência ainda a uma série de circunstâncias descobertas por Williams & Jennings (1997), que contribuem para o desenvolvimento de fissuras em argilas: (i) Fissuras se desenvolvem durante o processo de consolidação; (ii) Como resultado de uma redução na tensão de sobrecarga durante o processo de expansão da argila; (iii) Como resultado de um fenômeno coloidal; (iv) Reações químicas na argila podem induzir a variações de volume com consequente aparecimento de fissuras; (v) Como resultado de tensões tectônicas; (vi) As fissuras

desenvolvem com o ressecamento da argila; (vii) As fissuras podem ser herdadas da rocha; (viii) Elevadas tensões laterais podem induzir a fissuração em argilas.

Parâmetros de fissuração nas amostras de solo permitem um comparativo entre as fissuras ou até mesmo estabelecer um padrão de fissuração. Entre os principais parâmetros estudados, tem-se o quantitativo de células fissuradas, número de fissuras, largura média das fissuras, comprimento da abertura das fissuras e área fissurada. O parâmetro já disseminado entre os trabalhos previamente publicados sobre o tema é o CIF, ou "Crack Intensity Factor", o qual corresponde à intensidade da fissuração em uma amostra por meio da relação entre a área superficial da amostra que sofreu a trinca e a área superficial da amostra no estado inicial (Equação 10).

$$CIF = Af/At \quad (10)$$

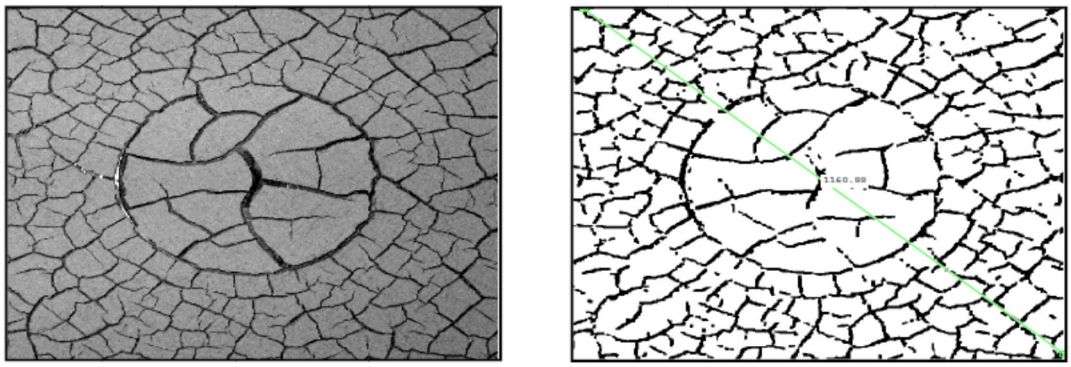
Sendo:

CIF – Fator de Intensidade de Fissuração;
Af – Área Superficial de trincas;
At – Área Superficial total inicial.

Tais parâmetros normalmente são obtidos em laboratório por meio de ensaios experimentais de secagem em solos cuja umidade é inicialmente imposta próximo ao valor do seu limite de liquidez. Realiza-se o acompanhamento periódico através de fotos e posterior processamento das imagens com auxílio de programas computacionais que permitem a transformação binária da imagem e a obtenção das informações correspondentes.

Pesquisa com o objetivo de avaliar os parâmetros citados anteriormente foi desenvolvida por Atique & Sánchez (2011), em solo da Indonésia. Os pesquisadores realizaram testes com solos espalhados em placas circulares nas espessuras de 5 mm, 10 mm e 20 mm, tendo observado que todas as amostras produziram padrões de fissuras ortogonais (fissuras que tendem a se encontrar em ângulos retos) predominantemente sequenciais, levando a subdivisão da área fissurada em células menores (Figura 59). Somado a isso, foi percebido também que, para as amostras de maior espessura (10 mm e 20 mm), as fissuras iniciam a partir da parede lateral e o formato de interseção das fissuras é sempre em "+" ou "T", independentemente da condição experimental.

Figura 59 – Processamento de imagem de uma placa de 5mm
para extrair vários parâmetros de fissuras.

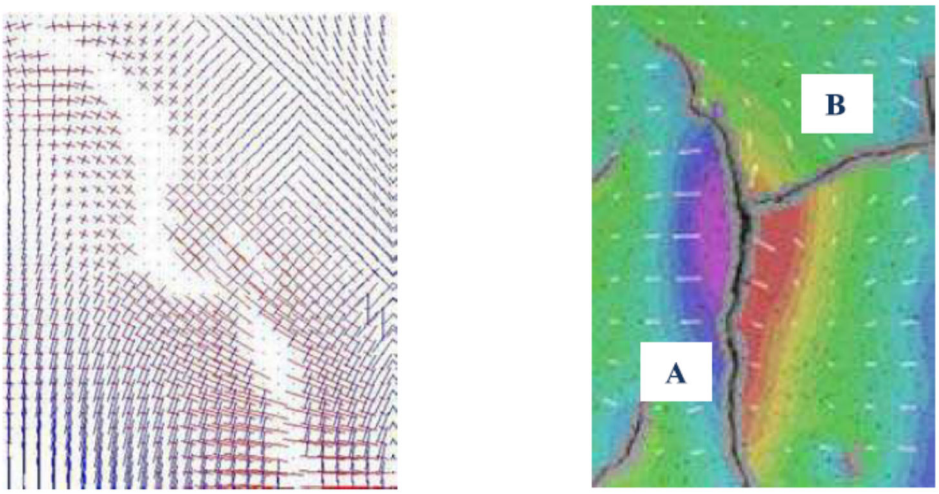


Fonte: ATIQUE & SÁNCHEZ, 2011.

Também nesse sentido, Fleureau et al. (2015) analisaram a formação e propagação de fissuras relacionadas ao ressecamento em argilas por meio de estudo experimental, em nível macroscópico, submetidas a condições controladas de sucção. Por meio de registros fotográficos em diferentes momentos e uso de programa computacional para análise dos dados, os pesquisadores identificaram diversos mecanismos de formação de fissuras, como modo de abertura e deslizamento, bifurcação e coalescência das fissuras. Perceberam, ainda, que os efeitos da mineralogia sobre o fenômeno de fissuração influenciam mais na cinética de secagem do que no mecanismo em si.

Fleureau et al. (2015) revelam que, em alguns casos, a propagação de fissuras foi resultado do mecanismo de abertura e deslizamento, conforme Figura 60. A abertura da fissura “B” resulta em grandes deslocamentos paralelos a um lado da fissura “A”, onde os deslocamentos são muito menores do que o outro lado da fissura “A”. Tal diferença de deslocamento resulta em mecanismo de deslizamento e ao mesmo tempo de abertura, devido à tensão de tração ainda ativa (Figura 60).

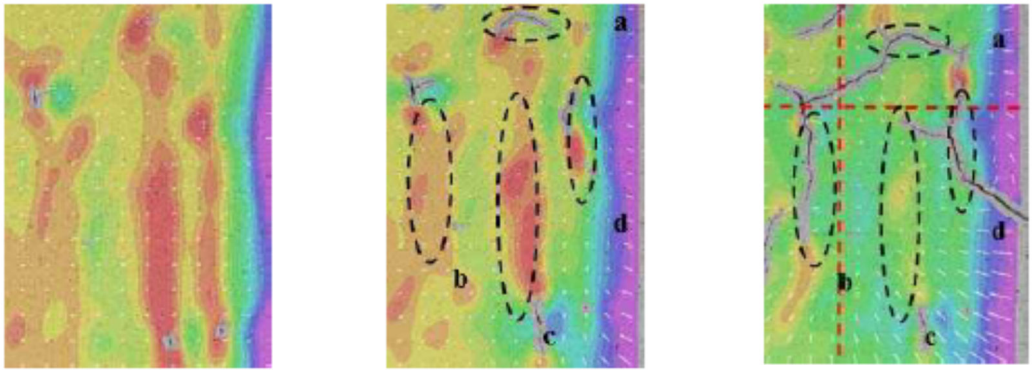
Figura 60 – Exemplo de propagação de fissuras como resultado de mecanismo misto de abertura e deslizamento.



Fonte: FLEUREAU et al.,2015.

Fleureau et al. (2015) apresentaram fissuras em amostra de solo argiloso após 8 h, 9 h e 10 horas de iniciada a secagem (Figura 61). Conforme registros, as pequenas fissuras se conectam e ao longo da amostra vão formando uma rede de fissuras similares a fissuras proporcionadas por fadiga térmica. A propagação se dá por meio da conexão das fissuras da zona "a" com as fissuras da zona "b" e "d", e não com as fissuras da zona "c". Segundo a publicação, as tensões longitudinais na zona "c" são muito pequenas e diminuem significativamente devido à formação primeira de fissuras nas zonas "a", "b" e "d", o que provoca um relaxamento na zona "c".

Figura 61 – Formação e coalescência de fissuras em solos argilosos.

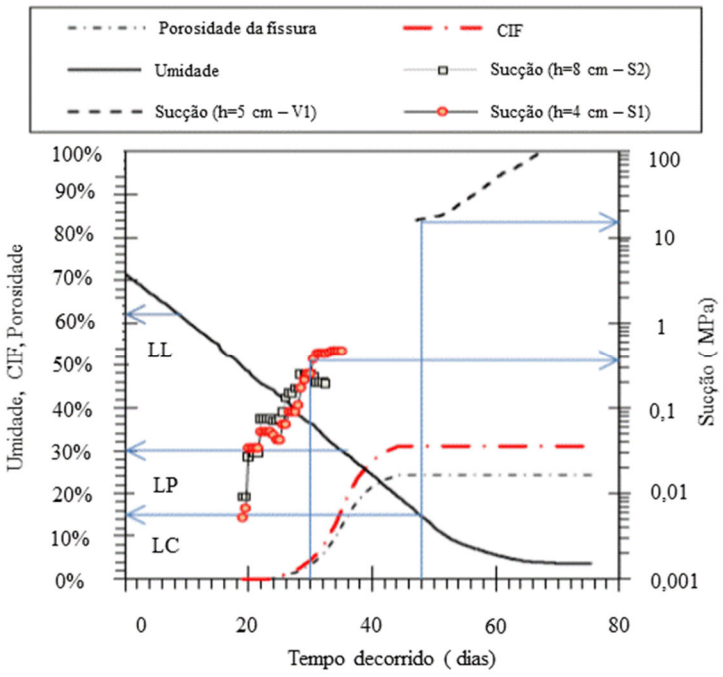


a) Após 8h. b) Após 9h. c) Após 10 h.

Fonte: FLEUREAU et al.,2015.

Louati et al. (2018) avaliaram as propriedades hidráulicas, como a curva de retenção de água e a condutividade hidráulica saturada e não saturada de um solo, propondo um novo modelo para determinar a permeabilidade não saturada em argilas fissuradas. Através de ensaios realizados com solo extraído do Nordeste da Tunísia, os pesquisadores realizaram análise de imagens por meio da determinação do CIF, assim como testes de permeabilidade pelo método natural de evaporação, e identificaram que, durante os primeiros 28 dias, a taxa de evaporação foi quase constante e na faixa de 35 a 50 g/h.m^2. Entre 28 e 50 dias, a variação da taxa de evaporação foi relaxada, sendo associada ao aumento da sucção e ao desenvolvimento das fissuras por contração, tendo-se registrado o aparecimento da primeira fissura com 28 dias. Em seguida, Louati et al. (2018) observaram que a taxa de fluxo diminuiu e as fissuras mantêm um valor estável quando a quantidade de água contida na amostra atinge perto do limite de contração (Figura 62).

Figura 62 – Evolução do CIF, Sucção e Umidade com o tempo.



Fonte: LOUATI et. al., 2018.

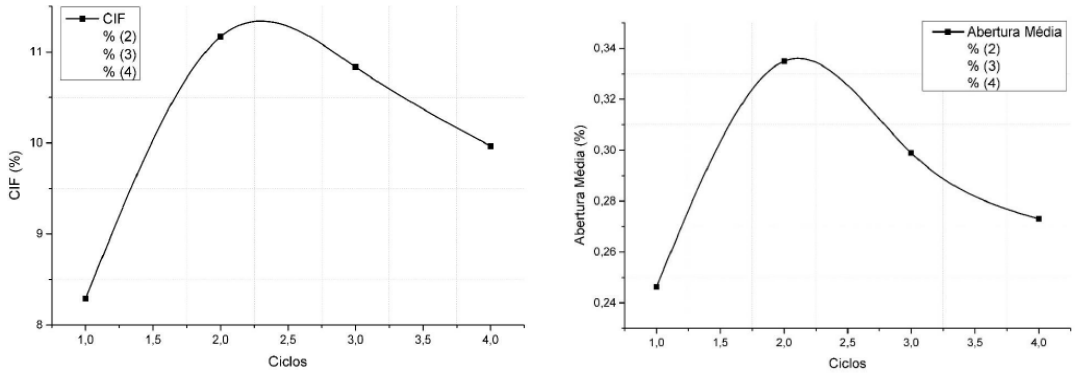
No Brasil, trabalhos com enfoques semelhantes quanto à análise de fissuras foram desenvolvidos por Costa (2015), Silva (2017) e Silva (2018).

Costa (2015) realizou ensaios experimentais com ciclos de ressecamento e umedecimento em amostras de solo natural do Distrito Federal, bem como em amostras do mesmo solo com adição de Resíduo da Construção Civil beneficiado (material

granular) e fibras de PET (material fibroso), visando à aplicação em camadas de cobertura de aterros sanitários. Foi constatada a mudança no padrão de fissuração em função da mistura com os materiais citados, como retardo na formação das fissuras e redução do CIF.

Resultados encontrados por Silva (2017), após realização de testes em mistura de solo puro com adição de 10% de bentonita com ciclos de ressecamento e posterior saturação, totalizando 4 repetições, revelaram uma tendência à estabilização das fissuras, tanto em abertura quanto em área fissurada. Os valores do quarto ciclo são inferiores ao do terceiro ciclo e os valores máximos desses parâmetros foram obtidos no segundo ciclo de fissuração (Figura 63).

Figura 63 – Correlação de parâmetros de fissuração com ciclos de ressecamento e umedecimento.



a) Variação do CIF. b) Variação da abertura média das fissuras

Fonte: SILVA, 2017.

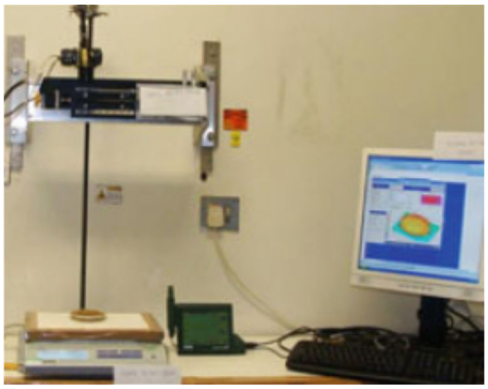
Mais recentemente, Silva (2018) realizou monitoramento do aparecimento de fissuras em mistura composta por areia (40%) e bentonita (60%) dispostas em Placas Petri de Vidro de diferentes dimensões e espessura. Tais amostras foram submetidas à secagem, com peso e temperatura da amostra controlados, assim como temperatura e umidade do ar do ambiente, além disso, a captura de imagens automática foi feita em intervalo de tempo pré-determinado. A pesquisadora obteve resultados preliminares em que amostras de mesma área de superfície, mas com alturas diferentes, apresentaram valores superiores de espaçamentos entre fendas e menor quantidade de células fissuradas para amostra de maior espessura. Por meio de processamento de imagens, registrou-se também o acompanhamento dos parâmetros de fissuração da mistura ao longo de 90 horas, com acréscimo do CIF ao longo do tempo até o registro de valor máximo e posterior estabilização.

5.2 MONTAGEM DO APARATO

A metodologia do ensaio de propagação de fissuras constou de um projeto piloto de ressecamento da amostra do solo de Bonito, Pernambuco. Para tanto, foi desenvolvido um aparato para instalação dos equipamentos necessários ao ensaio.

Inicialmente, foram pesquisados na literatura as formas de instalação realizadas por outros pesquisadores, tendo-se avaliado principalmente os equipamentos produzidos por Fleureau et. al. (2015); Ammour & Bouhanna (2016); Silva (2017) e Silva (2018) (Figura 64).

Figura 64 – Modelos de montagem de ensaios de fissuras.



a) Aparato utilizado por FLEUREAU et al., 2015.

b) Aparato utilizado por Ammour, & Bouhanna, 2016.

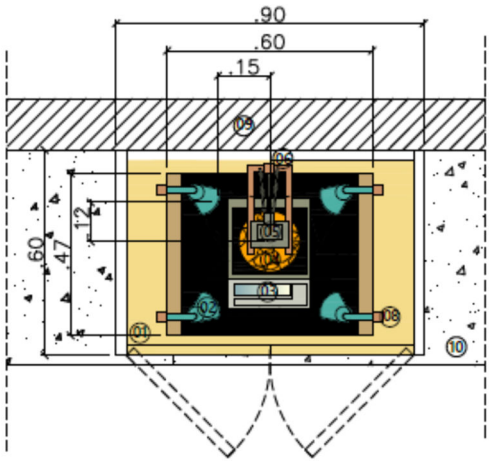
c) Aparato utilizado por Silva,2017.

d) Aparato utilizado por Silva, 2018.

Fonte: A Autora, 2019.

Diante de tais referências, a equipe do Grupo de Pesquisas de Solos Não Saturados (GÑSat) da Universidade Federal de Pernambuco, do qual a autora faz parte, elaborou o projeto do Aparato e montou o dispositivo para realização dos ensaios de propagação de fissuras, conforme Figura 65.

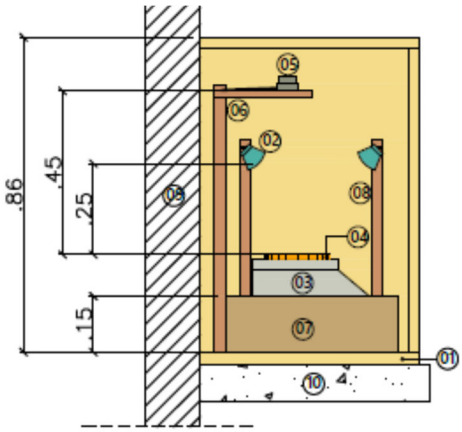
Figura 65 – Projeto Aparato para ensaio de Fissuras.



01 Caixa em MDF
02 Luminárias
03 Balança
04 Conjunto solo-placa petri
05 Webcam
06 Haste de suporte da webcam
07 Base de madeira revestido com papel cartão fosco preto
08 Haste de suporte das luminárias
09 Parede
10 Bancada

* Unidade em cm.

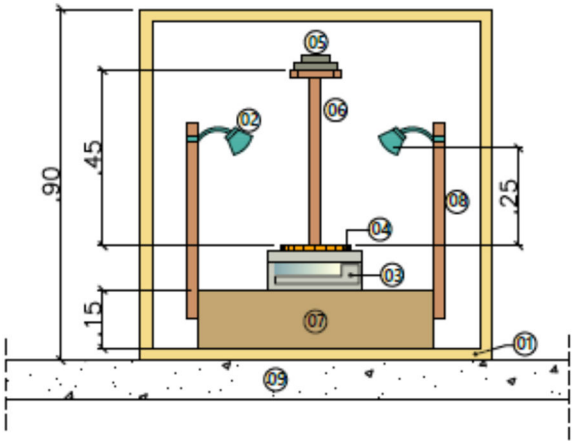
a) Vista superior.



01 Caixa em MDF
02 Luminárias
03 Balança
04 Conjunto solo-placa petri
05 Webcam
06 Haste de suporte da webcam
07 Base de madeira revestido com papel cartão fosco preto
08 Haste de suporte das luminárias
09 Parede
10 Bancada

* Unidade em cm.

b) Vista Lateral



01 Caixa em MDF
02 Luminárias
03 Balança
04 Conjunto solo-placa petri
05 Webcam
06 Haste de suporte da webcam
07 Base de madeira revestido com papel cartão fosco preto
08 Haste de suporte das luminárias
09 Bancada

* Unidade em cm.

c) Vista Frontal.

d) Registro fotográfico.

Fonte: FERREIRA et al., 2019.

O aparato é composto de cinco hastes de madeira, base e caixa em MDF. Quatro hastes foram utilizadas para fixação de uma luminária, cada uma à distância de aproximadamente 25 cm da placa petri de vidro, e uma haste foi utilizada como suporte para fixação de Webcam a uma altura em torno de 45 cm em relação à amostra a ser ensaiada.

Nas luminárias, foram instaladas lâmpadas incandescentes de 40 W, modelo Classic P, da OSRAM (Figura 66.a), com o objetivo de acelerar o processo de ressecamento por meio da elevação da temperatura local, tendo-se posicionado um termohigrômetro, do fabricante Inconterm, para aferição da temperatura e umidade relativa do ar ao longo do período de realização do ensaio. Também se manteve ligado o aparelho de ar condicionado da sala onde o conjunto estava instalado durante a fase de ensaio, com temperatura ambiente em torno de 20º C. A webcam utilizada foi a modelo C922 Pro Full HD, da Logitech, com conexão através de USB (Figura 66.b).

Uma balança digital de marca Marte, com precisão de 0,01 g, foi alojada sobre suporte de madeira, sendo todo o conjunto abrigado dentro do armário MDF de modo a garantir o isolamento parcial do meio e a evitar interferência externa como manipulação inadequada (Figura 66.c).

Figura 66 – Equipamentos utilizados para o ensaio de propagação de fissuras.

a) Lâmpada incandescente 40 W (Osram).

b) Webcam modelo C922 Pro Full HD (Logitech).

c) Balança digital precisão 0,01g. (Marte).

Fonte: A Autora, 2019.

5.3 METODOLOGIA DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS

Após montagem do aparato, foi dado início aos procedimentos para realização dos ensaios. Destaca-se que pesquisas para avaliação do processo de fissuração em solos estão

ainda em fase primária, não existindo ainda normas ou procedimentos estabelecidos para servir como referência.

Diante desse cenário, o conjunto de ensaios da presente pesquisa foi dividido em dois blocos, sendo o primeiro composto por ensaios de ressecamento para diferentes condições e o segundo correspondeu ao ensaio com ciclo de secagem e umedecimento. O esquema apresentado na Tabela 34 apresenta as etapas realizadas para o primeiro bloco.

Tabela 34 - Etapas de procedimentos para o primeiro bloco de ensaios de fissuras.

Procedimento	Registro Fotográfico
Inicialmente, a Amostra 03 foi destorroada e seca ao ar. Para definir a quantidade de água a adicionar na amostra, foi determinada a umidade higroscópica, a qual correspondeu a 9%.	
Em seguida, foi separada a quantidade de material necessária para a realização do ensaio, bem como os demais utensílios: Placa Petri de Vidro; Espátula; Capsulas; Recipiente plástico; Molde de acrílico com haste para apoio e Proveta.	
Procedeu-se a adição de água de maneira a atingir umidade equivalente ao Limite de Liquidez da Amostra 03, sendo realizada mistura manual com auxílio da espátula.	

Tabela 34 - Etapas de procedimentos para o primeiro bloco de ensaios de fissuras (continuação).

Procedimento	Registro Fotográfico
Posteriormente, o solo umedecido foi transferido a Placa Petri de Vidro em camadas sendo espalhado com ajuda do molde de acrílico. Entre cada camada era realizado o procedimento de pequenas batidas da Placa Petri sobre a superfície da bancada, com o objetivo de eliminar maior quantidade possível de vazios.	
Após esse momento, foi realizada a regularização da superfície e a pesagem do conjunto solo + Placa Petri de maneira a permitir o acompanhamento da umidade do solo durante o ensaio. Também foram coletadas amostras em cápsulas para a determinação da umidade inicial pelo método da estufa.	
Por fim, a amostra foi posicionada na balança digital dentro do aparato para início efetivo do ensaio, com instalação das luminárias, webcam e termohigrômetro. A Webcam foi posicionada de modo a permitir a visualização nas imagens do peso do conjunto (solo + Placa Petri) na balança e da temperatura e umidade no termohigrômetro.	

Fonte: A Autora, 2019.

Para o procedimento descrito na Tabela 34, foram realizados três ensaios de secagem, sendo: (i) Ensaio 1 – Placa Petri de vidro com altura de 15 mm e 2 Lâmpadas incandescentes; (ii) Ensaio 2 – Placa Petri de vidro com altura de 15 mm e 4 Lâmpadas

incandescentes; (iii) Ensaio 3 – Placa Petri de vidro com altura de 20 mm e 4 Lâmpadas incandescentes.

Em função da dificuldade de garantir a homogeneidade da amostra no conjunto de ensaios realizados previamente, para o segundo bloco de ensaio, realizaram-se etapas diferenciadas de preparação do conjunto, conforme descritas na Tabela 35.

Tabela 35 - Etapas de procedimentos para o segundo bloco de ensaios de fissuras.

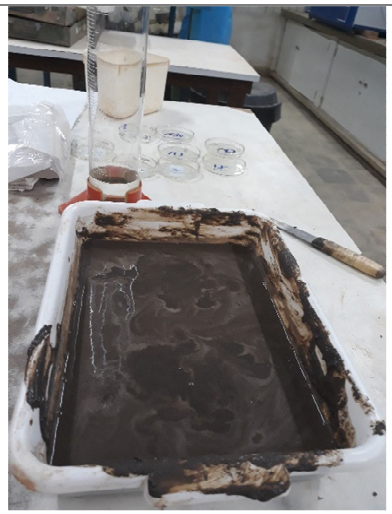
Procedimento	**Registro Fotográfico**
Considerando a primeira etapa do bloco anterior, nesse ensaio foi adicionado água até umidade gravimétrica 150% do LL da Amostra 03.	
Em seguida, todo o material foi misturado no dispersor de maneira a permitir a uniformidade da amostra.	
O material foi então transferido para Placa Petri de vidro com diâmetro aproximado de 140 mm e posicionada dentro de dessecador, o qual foi ligado à bomba de vácuo para eliminação das bolhas de ar.	

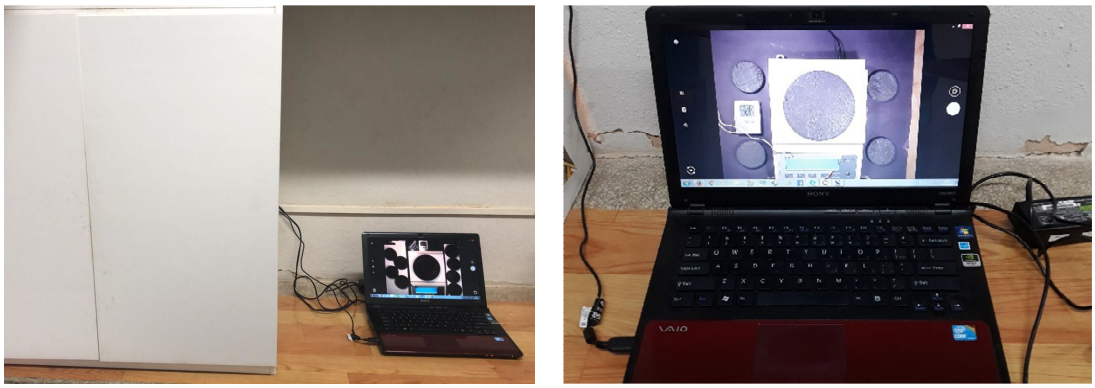
Tabela 35 - Etapas de procedimentos para o segundo bloco de ensaios de fissuras (continuação).

Também foram preenchidas Placas Petri de vidro com diâmetro de 70 mm, as quais foram retiradas do aparato ao longo da primeira etapa de secagem para determinação da sucção pelo método do papel filtro.	

Fonte: A Autora, 2019.

Passada a etapa de preparação, foi dado início ao ressecamento da amostra com elevação da temperatura a partir da quantidade de lâmpadas acesas e monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar com o termohigrômetro. A webcam ligada ao computador, o qual foi posicionado externamente ao aparato, registrou fotos do material a cada 10 min com auxílio do programa livre Auto Screenshot Capture. (Figura 67.a e b). Tal programa foi escolhido por permitir a captura de fotos em intervalo de tempo pré-fixado, assim como o arquivamento automático com identificação da data e horário de cada foto em sequência.

Figura 67 – Monitoramento do ensaio de propagação de fissuras.



a) Computador conectado a webcam.

b) Registro fotográfico com programa Auto Screenshot Capture.

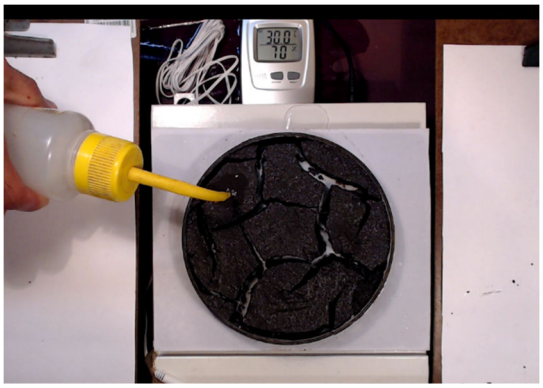
Fonte: A Autora, 2019.

Para o segundo bloco de ensaio, denominado Ensaio 4, foram posicionadas as Placas Petri de Vidro com diâmetro de 140 mm e 70 mm, e acesas duas lâmpadas incandescentes para a primeira etapa de secagem, a qual durou 60 horas. Após essa etapa, foi realizado o umedecimento da amostra de maneira a permitir a expansão do solo com auxílio de uma pipeta durante período de 9 h, completando o primeiro ciclo (Figura 68).

A água foi adicionada periodicamente de maneira a permitir a absorção pelo solo e a recomposição da água evaporada. Em seguida, deixou-se a amostra secar novamente por 58 horas com nova etapa de umedecimento, concluindo mais um ciclo. Por fim, deixou-se a amostra secar mais uma vez durante 46 horas. Ao longo de todo o processo, a webcam também realizou registros fotográficos a cada 10 min.

Figura 68 – Ensaio com ciclo de secagem e umedecimento.

a) Posicionamento das Placas Petri de vidro no aparato.



b) Umedecimento da amostra após etapa de secagem.

Fonte: A Autora, 2019.

Concluída a fase laboratorial, iniciou-se a análise e o processamento das imagens capturadas durante os ensaios. Primeiramente, foi elaborada uma planilha (Tabela 36) com identificação da numeração das fotos, data e horário de registro, temperatura (ºC), umidade relativa do ar (URA), umidade da amostra e CIF.

Tabela 36 – Exemplo de planilha utilizada para registro dos dados do ensaio de fissuras.

Nº Foto	Data e Horário	Tempo	Temp. (ºC)	URA (%)	Peso conj. (g)	W (%)	CIF
1	18/02/2019 19:18	0	36,6	40	553,13	91,0	0
2	18/02/2019 20:18	1h	36,7	39	550,00	90,42	0,2

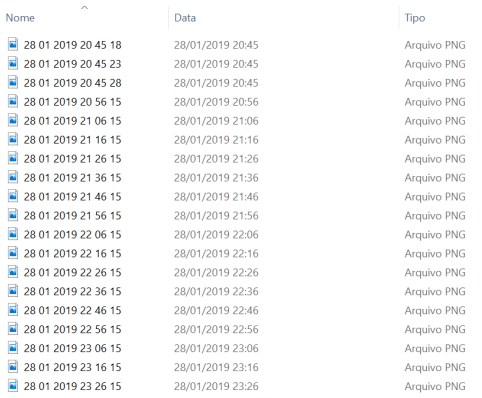
URA – Umidade Relativa do Ar; w – Umidade da amostra; CIF – Fator de Intensidade de Fissuras.

Fonte: A Autora, 2019.

As primeiras informações (numeração, data, temperatura e umidade relativa do ar) foram obtidas a partir da observação do arquivo de cada foto selecionada com intervalo a cada hora (Figura 69.a e b). A umidade da amostra foi calculada através do peso do conjunto registrado no dado momento do ensaio, uma vez que era conhecida a umidade inicial da amostra (Figura 69.c). Em seguida, procedeu-se ao recorte circular das

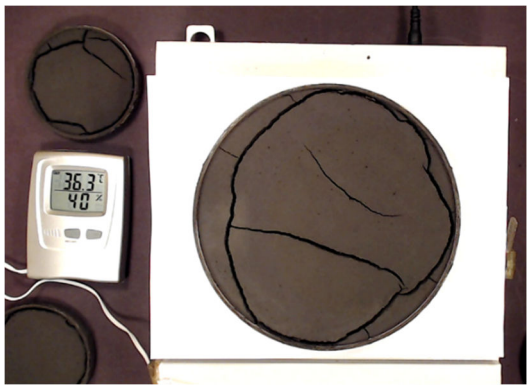
imagens de maneira a permitir apenas a visualização do solo na imagem com o uso do programa livre PhotoScape, versão 3.4 (Figura 69.d). Com essas imagens recortadas e salvas na extensão .JPEG, foi obtido o CIF através de uma rotina de programação do Matlab, disponibilizada no trabalho de Silva (2017). A Figura 69.e revela a interface do programa, que realiza a binarização da imagem para cálculo da área fissurada dividido pela área total (CIF).

Figura 69 – Etapas de análise e processamento das imagens do ensaio de fissuras.



Nome	Data	Tipo
28 01 2019 20 45 18	28/01/2019 20:45	Arquivo PNG
28 01 2019 20 45 23	28/01/2019 20:45	Arquivo PNG
28 01 2019 20 45 28	28/01/2019 20:45	Arquivo PNG
28 01 2019 20 56 15	28/01/2019 20:56	Arquivo PNG
28 01 2019 21 06 15	28/01/2019 21:06	Arquivo PNG
28 01 2019 21 16 15	28/01/2019 21:16	Arquivo PNG
28 01 2019 21 26 15	28/01/2019 21:26	Arquivo PNG
28 01 2019 21 36 15	28/01/2019 21:36	Arquivo PNG
28 01 2019 21 46 15	28/01/2019 21:46	Arquivo PNG
28 01 2019 21 56 15	28/01/2019 21:56	Arquivo PNG
28 01 2019 22 06 15	28/01/2019 22:06	Arquivo PNG
28 01 2019 22 16 15	28/01/2019 22:16	Arquivo PNG
28 01 2019 22 26 15	28/01/2019 22:26	Arquivo PNG
28 01 2019 22 36 15	28/01/2019 22:36	Arquivo PNG
28 01 2019 22 46 15	28/01/2019 22:46	Arquivo PNG
28 01 2019 22 56 15	28/01/2019 22:56	Arquivo PNG
28 01 2019 23 06 15	28/01/2019 23:06	Arquivo PNG
28 01 2019 23 16 15	28/01/2019 23:16	Arquivo PNG
28 01 2019 23 26 15	28/01/2019 23:26	Arquivo PNG

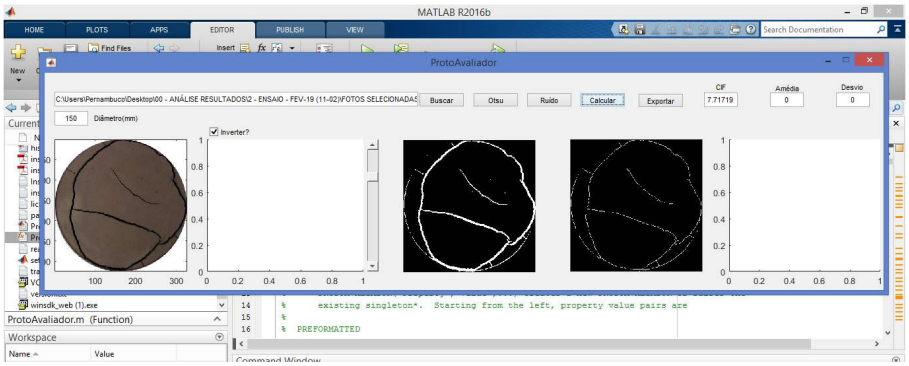
a) Nome dos arquivos com data e hora.



b) Registro da temperatura e umidade relativa do ar.

c) Identificação do peso do conjunto a cada etapa.

d) Foto recortada com auxílio do programa PhotoScape versão 3.4

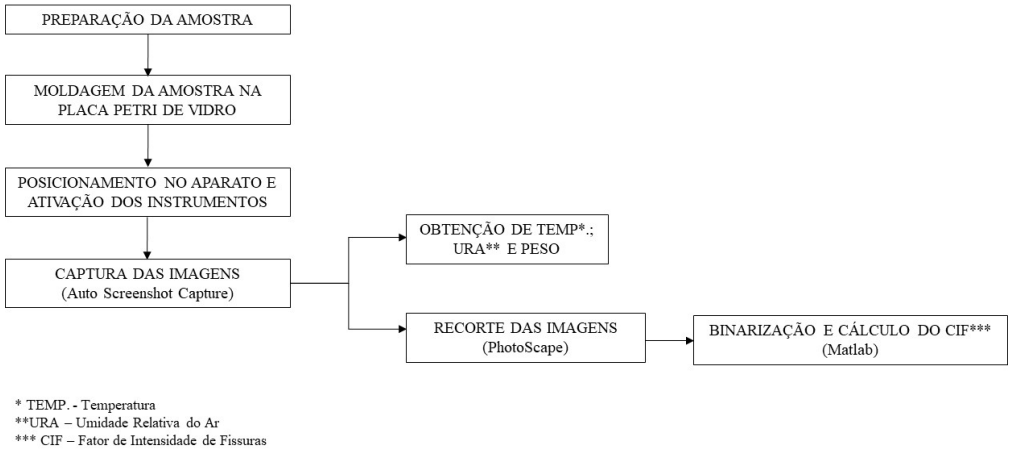


e) Interface do Matlab para cálculo do CIF.

Fonte: A Autora, 2019.

Em resumo, a Figura 70 representa o fluxograma do ensaio de propagação de fissuras.

Figura 70 – Fluxograma do Ensaio de Propagação de Fissuras.



Fonte: A Autora, 2019.

5.4 RESULTADOS E ANÁLISE DO PROCESSO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURAS

São apresentados a seguir os resultados individuais dos ensaios obtidos no conjunto do bloco 1 (ensaios de secagem) e do bloco 2 (ensaio com ciclo de secagem e umedecimento). Em seguida, é descrito o processo de expansão e contração de solo expansivo. Por fim, é realizada comparação entre os quatro tipos de ensaio realizados.

5.4.1 Resultados do Ensaio 1 – Secagem por 2 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com altura de 15 mm

Conforme relatado no item 5.3, o Ensaio 1 de secagem foi realizado com duas lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro (h = 15 mm). A umidade gravimétrica inicial da amostra foi de 91% e índice de vazios de 2,36. A sequência de imagens da Figura 71 revela o aparecimento e evolução das fissuras ao longo de 45 horas, quando o ensaio foi paralisado, visto que se percebeu a quebra da Placa Petri de vidro. Após análise das imagens, estima-se que a quebra ocorreu com 41h de ensaio e com umidade equivalente a 43,8%. O QR-COD (Figura 71.o) permite acesso às imagens com intervalo a cada 1 hora.

Figura 71 – Evolução das fissuras no Ensaio 1.

a) Tempo: 0h
Temp. (ºC): 31,3 / URA (%): 53
w (%): 90,9 / CIF (%): 0

b) Tempo: 6h
Temp. (ºC): 32,5 / URA (%): 50
w (%): 85,3 / CIF (%): 0,1

c) Tempo: 10h
Temp. (ºC): 32,5 / URA (%): 50
w (%): 81,4 / CIF (%): 1,6

d) Tempo: 13h
Temp. (ºC): 32,2 / URA (%): 50
w (%): 78,7 / CIF (%): 3,8

e) Tempo: 15h
Temp. (ºC): 32,2 / URA (%): 48
w (%): 76,4 / CIF (%): 5,0

f) Tempo: 18
Temp. (ºC): 31,8 / URA (%): 48
w (%): 73,10 / CIF (%): 7,8

g) Tempo: 21h
Temp. (ºC): 32,2 / URA (%): 47
w (%): 69,7 / CIF (%): 11,3

h) Tempo: 24h
Temp. (ºC): 32,1 / URA (%): 46
w (%): 66,2 / CIF (%): 14,1

i) Tempo: 27h
Temp. (ºC): 32,4 / URA (%): 45
w (%): 62,4 / CIF (%): 16,0

j) Tempo: 30h
Temp. (ºC): 32,1 / URA (%): 45
w (%): 58,8 / CIF (%): 18,3

k) Tempo: 36h
Temp. (ºC): 30,4 / URA (%): 48
w (%): 51,8 / CIF (%): 23,1

l) Tempo: 40h
Temp. (ºC): 31,3 / URA (%): 46
w (%): 45,3 / CIF (%): 25,6

Figura 71 – Evolução das fissuras no Ensaio 1 (continuação).

m) Tempo: 45h
Temp. (ºC): 31,5 / URA (%): 46
w (%): 37,10 / CIF (%): 29,1

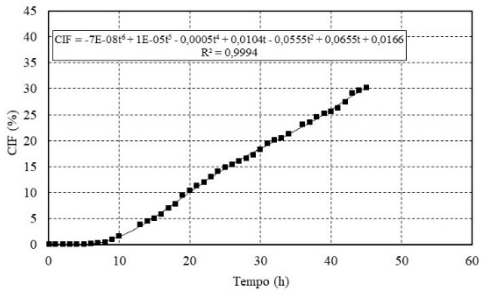
n) Placa Petri quebrada.

o) QR-COD
Ensaio 1

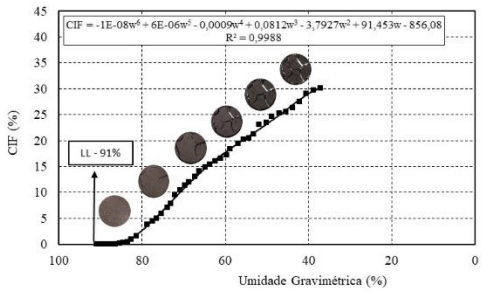
Fonte: A Autora, 2019.

O aparecimento das fissuras iniciou em torno de 6h do ensaio em andamento, com direcionamento da borda para o centro, após a amostra perder 5,6 % de umidade gravimétrica. No entanto, as fissuras começaram a se tornar mais significativas, porém ainda isoladas e em área concentrada, com um intervalo de 13 h e CIF correspondente a 3,8%, correspondendo a fissuras primárias. À medida que a umidade do solo reduziu, ocorreu contração e a propagação das fissuras secundárias em toda a superfície do solo. Observa-se que, de modo geral, uma nova fissura (secundária) tem origem em uma fissura anterior pré-definida (primária), configurando o formato "T" ou "Y", com formação de células e microrelevo. Os resultados do Ensaio 1 estão mostrados na Figura 72, apresentando as curvas CIF versus Tempo, CIF versus Umidade Gravimétrica, Umidade Gravimétrica versus Tempo em escala aritmética e logarítmica e a variação da Temperatura e Umidade Relativa do Ar com o Tempo no ambiente do aparato realizado.

Figura 72 – Resultados do Ensaio 1: Secagem por 2 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 15 mm.

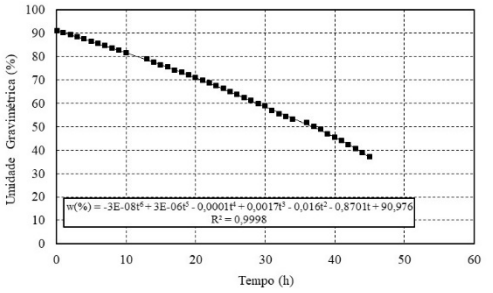


a) Curva CIF *versus* Tempo.

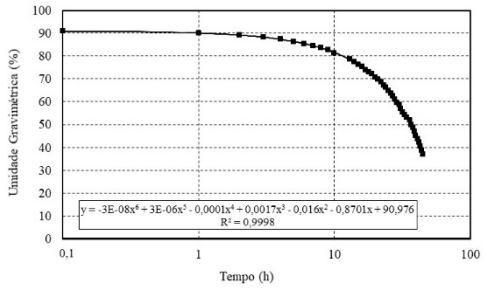


b) Curva CIF *versus* Umidade Gravimétrica .

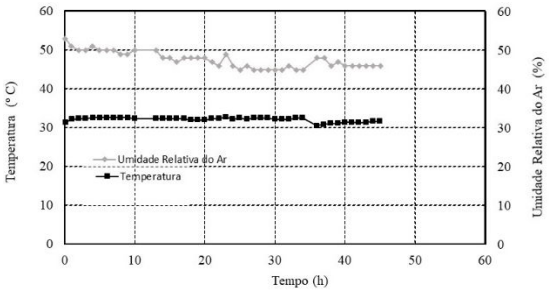
Figura 72 – Resultados do Ensaio 1: Secagem por 2 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 15 mm (continuação).



a) Curva Umidade Gravimétrica *versus* Tempo.



b) Curva Umidade Gravimétrica *versus* Tempo (esc. Log.).



c) Curva Temperatura e Umidade Relativa do Ar *versus* Tempo.

Fonte: A Autora, 2019.

A curva CIF versus Tempo (Figura 72.a) permite observar o crescimento da área fissurada ao longo do período de realização do ensaio (0,81% / h), favorecendo a redução da umidade em função da maior quantidade de superfície exposta (Figura 72.b).

Percebe-se que o gráfico Umidade Gravimétrica versus Tempo apresenta curva decrescente de umidade, sem ainda indicar estabilização da umidade, tendo o ensaio sido paralisado antes de atingir a umidade residual. A taxa de perda de umidade gravimétrica teve média de 0,91 % / h até próximo ao início das fissuras. Após o aparecimento de fissuras, a taxa de perda de umidade média foi de 1,26 % / h. Ao se colocar os valores em gráfico com eixo X em escala logarítmica, observa-se a similaridade com o gráfico de deformação versus tempo do adensamento.

De acordo com a Figura 72.a, ao longo do ensaio, a temperatura apresentou média de 32 ±, 0,5 ºC e Coeficiente de Variação (CV) correspondente a 1,72%. A umidade relativa do ar média foi de 47,5 ± 2,08% e CV equivalente a 4,39%. Tal acompanhamento confirma a baixa dispersão (CV < 15%) das condicionantes climatológicas garantidas pelo ambiente e cuidados adotados ao longo do ensaio.

5.4.2 Resultados do Ensaio 2 - Secagem por 4 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com altura de 20 mm

O Ensaio 2 de secagem foi realizado com quatro lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro de altura de 15 mm. A umidade gravimétrica inicial da amostra foi de 90,7% e o índice de vazios foi de 2,44. A Figura 73 revela o desenvolvimento das fissuras durante período de 38 horas. Nesse ensaio, também ocorreu a quebra da Placa Petri de Vidro, semelhante ao ocorrido no Ensaio 1. A Figura 73.o permite a visualização das imagens captadas a cada uma hora.

Figura 73 – Evolução das fissuras no Ensaio 2.

a) Tempo: 0h
Temp. (ºC): 36,3 / URA (%): 45
w (%): 90,7 / CIF (%): 0

b) Tempo: 9h
Temp. (ºC): 36,3 / URA (%): 40
w (%): 74,7 / CIF (%): 0,1

c) Tempo: 10h
Temp. (ºC): 36,9 / URA (%): 41
w (%): 73,4 / CIF (%): 0,9

d) Tempo: 11h
Temp. (ºC): 36,6 / URA (%): 41
w (%): 70,7 / CIF (%): 1,8

e) Tempo: 13h
Temp. (ºC): 36,3 / URA (%): 40
w (%): 66,6 / CIF (%): 6,4

f) Tempo: 14h
Temp. (ºC): 36,5 / URA (%): 39
w (%): 64,4 / CIF (%): 11,1

g) Tempo: 16h
Temp. (ºC): 36,0 / URA (%): 38
w (%): 60,0 / CIF (%): 15,0

h) Tempo: 20h
Temp. (ºC): 36,3 / URA (%): 36
w (%): 50,0 / CIF (%): 22,6

i) Tempo: 24h
Temp. (ºC): 36,7 / URA (%): 36
w (%): 41,4 / CIF (%): 28,5

Figura 73 – Evolução das fissuras no Ensaio 2 (continuação).

j) Tempo: 27h
Temp. (ºC): 36,7 / URA (%): 37
w (%): 33,6 / CIF (%): 30,6

k) Tempo: 30h
Temp. (ºC): 37,6 / URA (%): 36
w (%): 27,9 / CIF (%): 30,8

l) Tempo: 33h
Temp. (ºC): 37,8 / URA (%): 35
w (%): 22,9 / CIF (%): 31,5

m) Tempo: 35h
Temp. (ºC): 37,3 / URA (%): 34
w (%): 21,0 / CIF (%): 31,9

n) Tempo: 38h
Temp. (ºC): 37,3 / URA (%): 35
w (%): 19,5 / CIF (%): 32,9

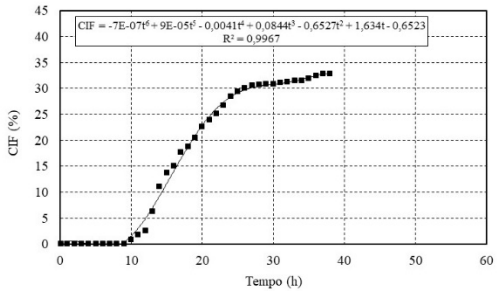
o) QR-COD
Ensaio 2

Fonte: A Autora, 2019.

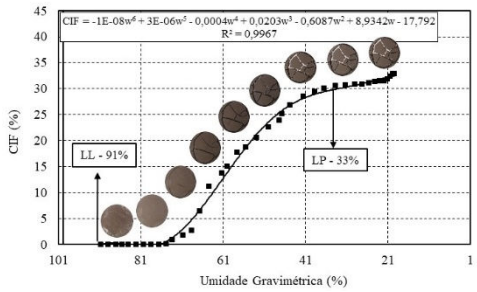
Neste ensaio, a perda de umidade gravimétrica proporcionou inicialmente a contração da amostra com pequeno deslocamento da Placa Petri com aproximadamente 9 h de ensaio e umidade de 74,7 %. Na hora seguinte, foi registrado o surgimento de fissura. Com 11 h de ensaio, o CIF já atingiu valor de 1,8 % e apresentou crescimento significativo nas primeiras 24 h de ensaio, atingindo valor de 28,5 %. Desse ponto em diante, percebe-se uma menor evolução do CIF até a conclusão do ensaio com CIF correspondente a 32,9 % em 38 h. Registra-se, porém, continuação da perda de umidade, o que reflete a mudança de coloração da amostra, que passa a ter tom mais claro. Semelhante ao Ensaio 1, esse ensaio teve o surgimento das fissuras com direcionamento da borda, a partir da contração do solo para o centro, de onde se formaram as novas fissuras. Em geral, as fissuras apresentaram configuração no formato “T” ou “Y”.

A Figura 74 ilustra os resultados do Ensaio 2 de fissuras.

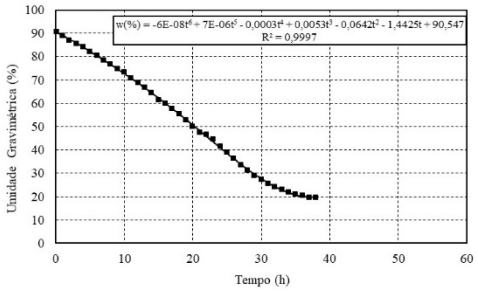
Figura 74 – Resultados do Ensaio 2: Secagem por 4 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 15 mm.



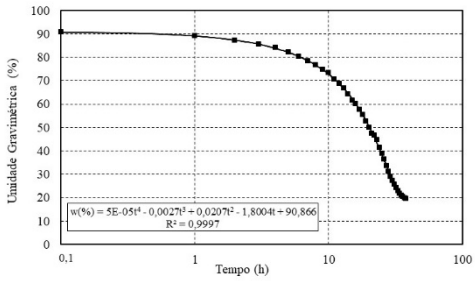
a) Curva CIF *versus* Tempo.



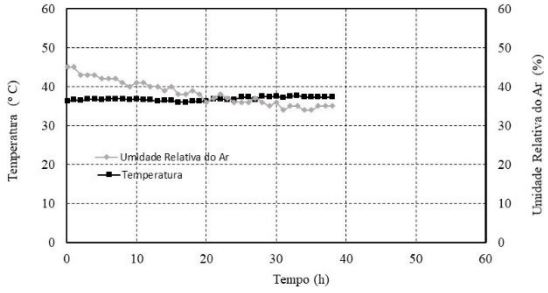
b) Curva CIF *versus* Umidade Gravimétrica .



c) Curva Umidade Gravimétrica *versus* Tempo.



d) Curva Umidade Gravimétrica *versus* Tempo (esc. Log.).



e) Curva Temperatura e Umidade Relativa do Ar *versus* Tempo.

Fonte: A Autora, 2019.

A curva CIF versus Tempo permite observar aproximadamente duas regiões em que o índice de área fissurada se comportou aproximadamente constante, com valores em torno de 0,08%/h e 0,27 %/h para o tempo de 0h – 10h e 25h – 38h, respectivamente. Por outro lado, uma reta ascendente foi registrada com taxa de crescimento de CIF de 2,05 % / h entre as 11 h às 24 h do ensaio. Comportamento de curva similar é observada no gráfico CIF versus Umidade Gravimétrica. Ou seja, dois trechos da curva (início e final do ensaio) apresentaram pouca variação de CIF com a redução de umidade (w = 91% - 74,7% e 38,79% - 19,5%) e um trecho da curva comportou-se como uma reta, com taxa de crescimento de CIF de 0,91% a cada redução de 1% de umidade.

Por sua vez, a curva Umidade Gravimétrica versus Tempo indica que a amostra perdeu umidade a uma taxa média de 1,73% até 10h de ensaio e 2,25 % / h até 33 h do ensaio, com umidade correspondente a 22,9 %. Em seguida, a taxa foi reduzida para um valor médio de 0,70 % / h até atingir uma umidade gravimétrica residual de 19%, muito próximo ao limite de contração da amostra (LC = 17%). Ao se apresentar os dados em gráfico em escala logarítmica (eixo X), percebe-se similaridade com curva de adensamento. A continuidade do ensaio levaria à melhor definição do segundo ponto de inflexão da curva.

Ainda de acordo com a Figura 74.a, temperatura média do ensaio foi de 36,8 ± 0,45 ºC, e CV equivalente a 1,24 %. A média da umidade relativa do ar foi de 38,4 ± 3,20 %, e CV de 8,45 %. CV inferior a 15 % confirma a homogeneidade das condições climatológicas durante a realização do ensaio.

5.4.3 Resultados do Ensaio 3 - Secagem por 4 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com altura de 20 mm

O último ensaio de secagem correspondeu ao Ensaio 3, o qual foi executado com quatro lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro de altura de 20 mm. O ensaio teve início com a amostra na umidade gravimétrica de 91,0 % e índice de vazios de 2,34. Na Figura 75, são apresentadas imagens do ensaio desde o tempo 0 h até a conclusão com 50 h. Assim como nos outros dois ensaios, no Ensaio 3, o processo de contração no solo provocou a quebra da Placa Petri. O QR-COD (Figura 75.o) possibilita a observação das imagens a cada uma hora de ensaio.

Figura 75 – Evolução das fissuras no Ensaio 3.

a) Tempo: 0h
Temp. (ºC): 35,8 / URA (%): 47
w (%): 91,0 / CIF (%): 0

b) Tempo: 4h
Temp. (ºC): 37,0 / URA (%): 41
w (%): 86,5 / CIF (%): 0

c) Tempo: 8h
Temp. (ºC): 37,3 / URA (%): 38
w (%): 81,0 / CIF (%): 0,8

Figura 75 – Evolução das fissuras no Ensaio 3 (continuação).

d) Tempo: 14h
Temp. (ºC): 36,7 / URA (%): 40
w (%): 73,5 / CIF (%): 5,3

e) Tempo: 16h
Temp. (ºC): 36,4 / URA (%): 38
w (%): 69,4 / CIF (%): 8,8

f) Tempo: 19h
Temp. (ºC): 36,4 / URA (%): 37
w (%): 64,8 / CIF (%): 12,2

g) Tempo: 22h
Temp. (ºC): 36,9 / URA (%): 36
w (%): 59,7 / CIF (%): 18,1

h) Tempo: 25h
Temp. (ºC): 37,1 / URA (%): 34
w (%): 54,2 / CIF (%): 20,6

i) Tempo: 27h
Temp. (ºC): 37,4 / URA (%): 35
w (%): 50,3 / CIF (%): 23,0

j) Tempo: 30h
Temp. (ºC): 37,4 / URA (%): 33
w (%): 44,3 / CIF (%): 25,7

k) Tempo: 33h
Temp. (ºC): 37,4 / URA (%): 35
w (%): 37,6 / CIF (%): 27,0

l) Tempo: 34h
Temp. (ºC): 37,7 / URA (%): 35
w (%): 35,5 / CIF (%): 28,7

m) Tempo: 37h
Temp. (ºC): 37,1 / URA (%): 35
w (%): 29,3 / CIF (%): 30,8

n) Tempo: 40h
Temp. (ºC): 37,1 / URA (%): 34
w (%): 24,1 / CIF (%): 31,5

o) Tempo: 44h
Temp. (ºC): 36,9 / URA (%): 33
w (%): 19,7 / CIF (%): 33,6

Figura 75 – Evolução das fissuras no Ensaio 3 (continuação).

p) Tempo: 50h
Temp. (ºC): 37,4 / URA (%): 34
w (%): 16,0 / CIF (%): 35

q) Placa Petri quebrada.

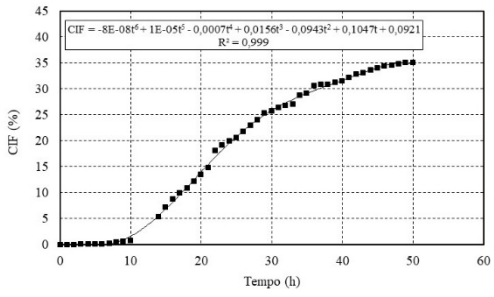
r) QR-COD
Ensaio 3

Fonte: A Autora, 2019.

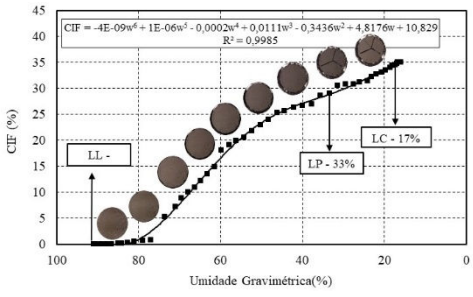
O conjunto de imagens do Ensaio 3 permite observar grande contração da amostra antes de iniciar o processo de formação de fissuras, evidenciando uma contração radial praticamente uniforme. A amostra perdeu 53,4 % de umidade gravimétrica para surgirem três fissuras concêntricas, com origem do centro para o bordo em formato de "Y". A partir de 34 h do ensaio até a conclusão com 50 h e umidade gravimétrica de 16 %, a amostra apresentou principalmente o alargamento das fissuras, aumento da contração e mudança de coloração, com o surgimento de apenas mais uma fissura em torno de 37 h e sinais de outra fissura com 38 h. Foram formadas placas grandes sem caracterização de microrelevo e parte do material próximo às bordas e na base da placa Petri formaram células menores que não acompanharam o deslocamento da células maiores.

As curvas correspondentes aos dados do Ensaio 3 são apresentadas na Figura 76.

Figura 76 – Resultados do Ensaio 3: Secagem por 4 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 20 mm.

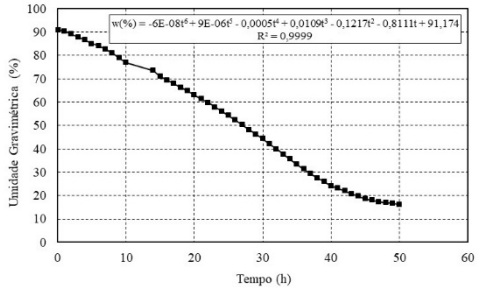


a) Curva CIF *versus* Tempo.

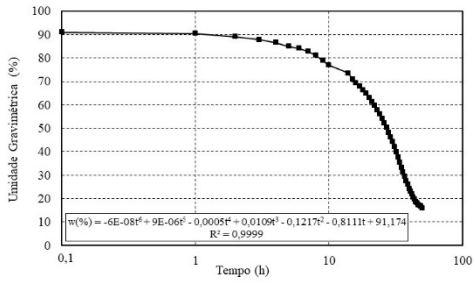


b) Curva CIF *versus* Umidade Gravimétrica.

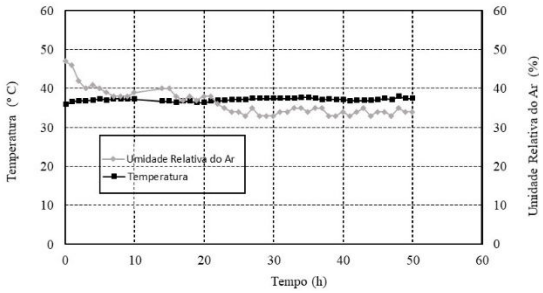
Figura 76 – Resultados do Ensaio 3: Secagem por 4 lâmpadas incandescentes e Placa Petri de vidro com Altura de 20 mm (continuação).



c) Curva Umidade Gravimétrica *versus* Tempo.



d) Curva Umidade Gravimétrica *versus* Tempo (esc. Log.).



e) Curva Temperatura e Umidade Relativa do Ar *versus* Tempo.

Fonte: A Autora, 2019.

A análise da curva CIF versus Tempo permite inferir a identificação de três trechos característicos, sendo o primeiro com valores de CIF nulos ou muito próximos a zero, com taxa média de 0,08 %/h até 10h de ensaio; em seguida, trecho ascendente com taxa de crescimento de 1,28 % / h até 30h de ensaio e, por fim, outro intervalo com taxa de crescimento um pouco mais baixo de 0,46 % / h. Já na curva CIF versus Umidade Gravimétrica, foi possível identificar quatro intervalos, sendo o primeiro de valores nulos ou próximos a nulos; o segundo trecho crescente com taxa de 0,79 % a cada redução de 1% de umidade; em seguida, terceiro intervalo com taxa de 0,38 % e, o último intervalo com taxa de 0,29 %.

A curva Umidade Gravimétrica versus Tempo indica um trecho inicial de perda de umidade com taxa média de 1,42 % / h até 10 h do ensaio, quando ocorreu problema na captura de imagens (acionamento automático por aproximadamente 4h de outro programa no centro da imagem do computador impossibilitando a visualização da amostra e dos dados de peso, temperatura e URA). Após a minimização do programa e o retorno do ensaio com 14h, observa-se nova taxa de redução de umidade equivalente a 1,90 % / h, até 40h de ensaio e continuação da redução em trecho curvilíneo até atingir

umidade de 16 %, com taxa de 0,78 %/h. Plotando tais resultado em gráfico com a umidade em escala logarítmica, observa-se comportamento da curva com aparência semelhante à curva de adensamento.

A temperatura média durante o ensaio foi equivalente a 37,1 ± 0,38 ºC e o Coeficiente de Variação correspondente a 1,05 %. A umidade relativa do ar média foi de 36,3 ± 3,33 %, com CV de 9,20 %.

5.4.4 Resultados do Ensaio 4 – Ciclo de secagem e umedecimento

Para o segundo bloco de ensaios, foram realizadas, em uma mesma amostra, três etapas de secagem e duas de umedecimento, alternadamente, de maneira a simular, em laboratório, o que acontece em campo com períodos secos e chuvosos.

A Figura 77 revela a imagem inicial e final de cada etapa, com os respectivos dados de ensaio (Temperatura, Umidade Relativa do Ar, Umidade Gravimétrica da amostra e CIF). O Ensaio 4 teve início com a amostra na umidade gravimétrica de 134,8% e índice de vazios de 3,52.

Semelhante ao ocorrido no bloco de ensaio anterior, houve registro da quebra da Placa Petri na primeira etapa de secagem, fato esse que dificultou a inundação da amostra na etapa seguinte de umedecimento, sendo necessário realizar a adição de água continuamente com auxílio de pipeta.

Por meio do acesso ao QR-COD é possível visualizar toda a evolução do ensaio a cada uma hora (Figura 77.p).

Figura 77 – Evolução das fissuras no Ensaio 4.

a) Secagem 1
Tempo: 0 h
Temp. (ºC): 28,8 / URA (%): 58
w (%): 134,8% / CIF (%): 0

b) Secagem 1
Tempo: 22 h
Temp. (ºC): 30,6 / URA (%): 47
w (%): 113,2% / CIF (%): 0,8

c) Secagem 1
Tempo: 60 h
Temp. (ºC): 30,3 / URA (%): 48
w (%): 49,3% / CIF (%): 36,9

Figura 77 – Evolução das fissuras no Ensaio 4 (continuação).

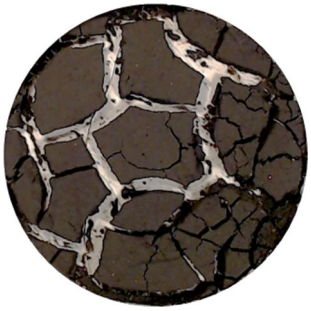
d) Umedecimento 1
Tempo: 60,3 h
Temp. (ºC): 29,9 / URA (%): 50
w (%): 77,1% / CIF (%): 26,4

e) Umedecimento 1
Tempo: 66 h
Temp. (ºC): 29,9 / URA (%): 70
w (%): 84,5% / CIF (%): 15,3

f) Umedecimento 1
Tempo: 69 h
Temp. (ºC): 29,6 / URA (%): 69
w (%): 85,5% / CIF (%): 14,1

g) Secagem 2
Tempo: 70 h
Temp. (ºC): 30,1 / URA (%): 68
w (%): 79,8% / CIF (%): 17,7

h) Secagem 2
Tempo: 76 h
Temp. (ºC): 30,2 / URA (%): 63
w (%): 63,9% / CIF (%): 29,7



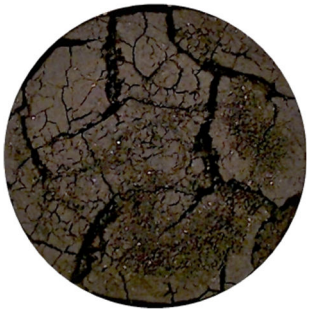
i) Secagem 2
Tempo: 128 h
Temp. (ºC): 30,2 / URA (%): 46
w (%): 5,7% / CIF (%): 41,2

j) Umedecimento 2
Tempo: 129 h
Temp. (ºC): 29,6 / URA (%): 47
w (%): 10,2% / CIF (%): 22,9

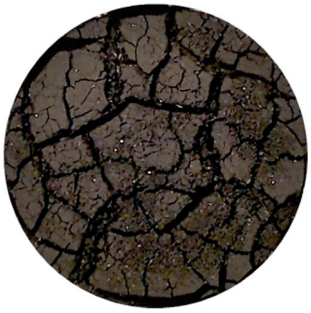
k) Umedecimento 2
Tempo: 133 h
Temp. (ºC): 29,5 / URA (%): 48
w (%): 47,3% / CIF (%): 14,4

l) Umedecimento 2
Tempo: 141 h
Temp. (ºC): 29,6 / URA (%): 47
w (%): 80,4% / CIF (%): 13,4

m) Secagem 3
Tempo: 142 h
Temp. (ºC): 29,6 / URA (%): 47
w (%): 75,3% / CIF (%): 16,9



n) Secagem 3
Tempo: 151 h
Temp. (ºC): 29,8 / URA (%): 47
w (%): 53,4% / CIF (%): 28,0



o) Secagem 3
Tempo: 188 h
Temp. (ºC): 30,2 / URA (%): 47
w (%): 5,5% / CIF (%): 45,9

Figura 77 – Evolução das fissuras no Ensaio 4 (continuação).

p) QR-COD Ensaio 4

Fonte: A Autora, 2019.

Na primeira etapa de secagem do Ensaio 4, as fissuras surgiram inicialmente do bordo para o centro da amostra (Figura 77.b), tendo evoluído para fissuras maiores e com maior abertura no formato “T” e “Y”, similar ao Ensaio 1. Observa-se que o desenvolvimento do processo de fissuração favoreceu a perda de umidade gravimétrica da amostra, tendo-se finalizado a referida etapa com 60 h do ensaio em andamento e CIF correspondente a 37%, valor próximo ao intervalo de CIF identificado nos Ensaios 1 ao 3. Ocorreu também a contração do solo com desprendimento da Placa Petri.

Para a etapa seguinte de umedecimento, foi possível perceber que, à medida que a água foi infiltrando na amostra e elevando a umidade gravimétrica do solo, houve redução da abertura das fissuras e até o fechamento completo de fissuras de menores dimensões (Figura 77.f), proporcionada pela expansão do solo, chegando-se ao final da etapa com umidade gravimétrica de 85,5% e CIF de 14,1%.

O segundo ciclo de secagem proporcionou o alargamento das fissuras que permaneceram durante a etapa de umedecimento e o surgimento de novas fissuras de menores dimensões, mas em maior quantidade, fragmentando a amostra em células menores quando comparadas às células formadas na primeira secagem A segunda secagem foi concluída com 128 h de ensaio, CIF correspondente a 41,2% e umidade gravimétrica de 5,7% (Figura 77.i).

Com a adição de mais água à amostra na segunda fase de umedecimento, foi registrada novamente a expansão do solo evidenciada pela redução do CIF para 13,4% ao final da etapa (141 h) em função da diminuição da espessura de algumas fissuras e, até mesmo, do desaparecimento de outras.

Por fim, a última etapa de secagem provocou o surgimento de grande densidade de microfissuras com CIF resultante de 45,9% e umidade gravimétrica de 5,5%. A

imagem da Figura 77.o permite observar também a deposição de material fragmentado na superfície da amostra.

Destaca-se que nas etapas de umedecimento é possível observar que, apesar do solo expandir, a etapa de secagem posterior revela a região já enfraquecida do solo e a fissura inicialmente reduzida no umedecimento volta a abrir (Figura 77.i e 77.o). Esse comportamento foi evidenciado por Li & Zhang (2011), os quais observaram que, embora as fissuras de solos expansivos sejam unidas após o contato com a água, os danos internos não são recuperados totalmente, havendo manutenção da posição da quebra original (Figura 78).

Figura 78 – Fissuras de solo expansivo após secagem e após saturação.

a) Após secagem. b) Após saturação.

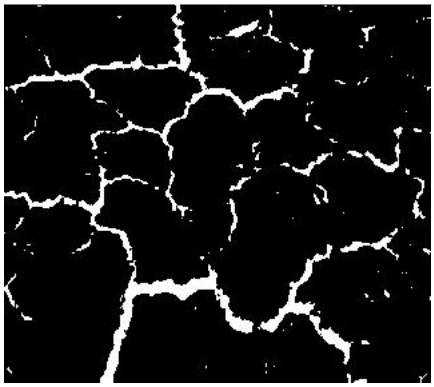
Fonte: LI & ZHANG, 2011.

De maneira a comparar com situações de campo, foi aplicada a metodologia de cálculo do CIF para as imagens de fissuras dos solos expansivos de Petrolândia e Estados Unidos, apresentadas no Capítulo 2 (Item 2.7), considerando que tais solos já foram submetidos a inúmeros ciclos de umedecimento e secagem (Figura 79).

Para ambas, o CIF obtido foi próximo a 15%, valor este inferior ao encontrado para o último ciclo de secagem da amostra de Bonito em laboratório. Apesar de inferior, motivado possivelmente por problemas de captura de imagem em campo, ângulo de registro fotográfico e não identificação da contração do solo, visto que não se tem registro da área anterior as fissuras, observa-se características semelhantes entre as fissuras de campo e laboratório, tais como: (i) formação de microrelevo; (ii) fissuras secundárias originadas de fissuras primárias e (iii) desagregação de material com deposição entre as fissuras e na superfície.

Figura 79 – Cálculo do CIF para fissuras de campo.

a) Binarização Solo Petrolândia (campo). CIF = 15,09%.

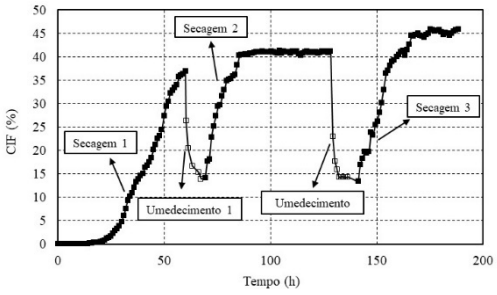


b) Binarização Solo EUA (campo). CIF = 15,17%.

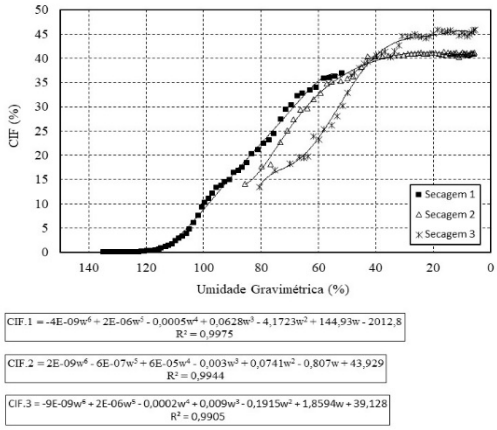
Fonte: A Autora, 2019.

Para os resultados do Ensaio 4 foram elaborados os gráficos da Figura 80.

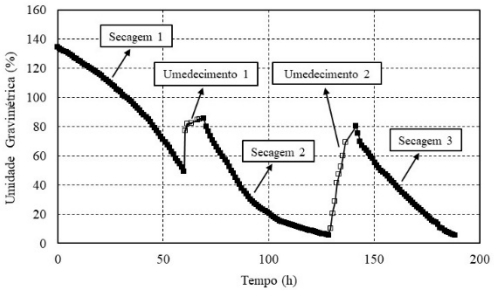
Figura 80 – Resultados do Ensaio 4 de propagação de fissuras com ciclo de secagem e umedecimento.



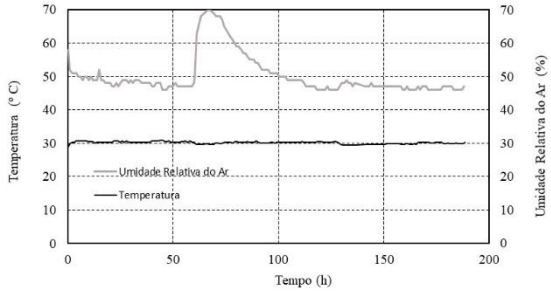
a) Curva CIF *versus* Tempo.



b) Curva CIF *versus* Umidade Gravimétrica.



c) Curva Umidade Gravimétrica *versus* Tempo.



d) Curva Temperatura e Umidade Relativa do Ar *versus* Tempo.

Fonte: A Autora, 2019.

A curva CIF versus Tempo do Ensaio 4 permite identificar, entre o intervalo de 30 h e 60 h de ensaio, taxa de crescimento médio na primeira etapa de secagem em torno

de 1,07 % / h. Para a segunda etapa de secagem, foi observada taxa de 1,47 % / h entre 69 h e 85 h, com posterior equilíbrio, formando um patamar. Por fim, a taxa de crescimento do CIF da terceira etapa correspondeu a 1,19 %/h até 167 h, tendo-se evidências de seguida estabilização. A fase final da última etapa de secagem revela pequenas ondulações da curva em função das microcélulas provocarem distorções na rotina de programação utilizada.

Para os períodos de umedecimento da amostra, o CIF diminuiu a valores bem próximos para as duas etapas (14,1 e 13,4 %). Assim, apesar de registrar valores de umidade gravimétrica próximos ao final da primeira e da segunda etapas de umedecimento, a terceira etapa de secagem obteve maior taxa de perda de umidade em função do tempo (1,52 % / h) quando comparada à segunda etapa de secagem (1,27 % / h). Tal característica é provocada em função da grande quantidade de microfissuras observadas na terceira etapa, a qual proporciona maior perda de água por evaporação através da superfície exposta.

Observou-se ainda que, ao atingir o umidade gravimétrica equivalente ao LC na segunda e terceira etapa de secagem, o CIF comportou-se quase que constante, similar ao observado por Louati et. al. (2018).

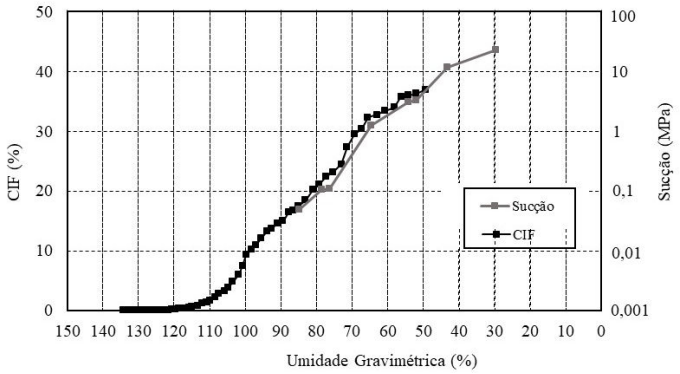
A temperatura média do Ensaio 4 foi de 30,1 ± 0,33 ºC e CV igual a 1,10 %. O registro da temperatura mais baixa no início do ensaio se deu pelo tempo necessário para equilíbrio de temperatura no ambiente interno ao aparato. Já a Umidade Relativa do Ar, teve média de 49,8 ± 5,36 % e Coeficiente de Variação equivalente a 10,78 %. O valor elevado de URA na primeira etapa de umedecimento ocorreu em função de parte da água adicionada à amostra ter escorrido entre as trincas existentes na Placa Petri de vidro, atingindo o sensor do termohigrômetro. Observa-se que, após 100h de ensaio, a URA retornou ao equilíbrio.

Ainda durante a primeira etapa de secagem, foram obtidos os valores de sucção do solo para diferentes umidades gravimétricas, os quais são exibidos na Figura 81. Nesse gráfico, é feita a junção entre os dados de CIF, Sucção Total e Umidade Gravimétrica de maneira a correlacioná-los.

Percebe-se que as curvas CIF versus Umidade Gravimétrica e Umidade Gravimétrica versus Sucção (esc. Logarítimica) apresentaram comportamento bem próximo no intervalo de sucção medida, com aumento do CIF e da Sucção Total à proporção que ocorreu a redução da umidade gravimétrica.

Na curva Umidade Gravimétrica versus Sucção, são plotados valores de umidade inferiores ao atingido na primeira etapa de secagem do Ensaio 4, visto que as placas com menores dimensões, utilizadas para o ensaio de sucção, perderam umidade mais rapidamente do que a placa maior adotada para acompanhar o processo de contração e propagação de fissuras do solo de Bonito.

Figura 81 – Correlação entre CIF, Umidade Gravimétrica e Sucção na etapa 1 de secagem.



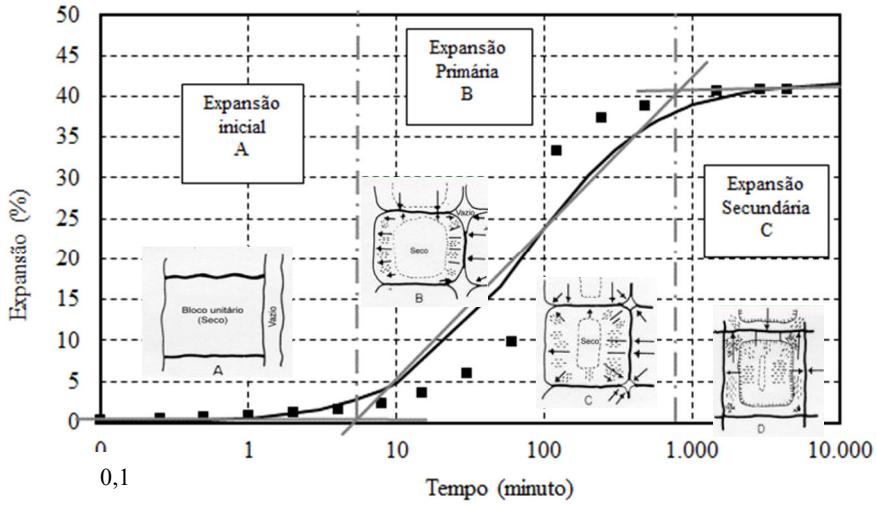
Fonte: A autora, 2019.

5.4.5 Processo de expansão e contração de solo expansivo

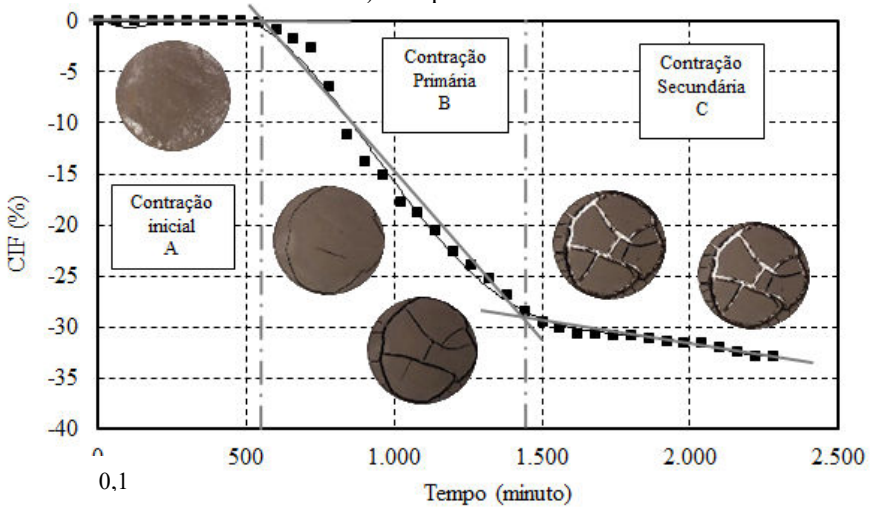
Após a realização do ensaio de expansão (item 4.5) e contração (item 5.4) na Amostra 03 do solo de Bonito/PE, foi possível identificar o comportamento do material quando há ganho de umidade e consequente aumento de volume (expansão). Além disso, foi possível perceber também quando ocorre a redução do teor de água na amostra com redução de volume e formação de fissuras (contração).

A Figura 82.a exibe a curva expansão versus tempo (esc. logarítmica) para o ensaio de expansão livre, enquanto a Figura 82.b revela o a curva do fator de intensidade de fissuras versus tempo.

Figura 82 – Processo de expansão e contração de solo expansivo.



a) Expansão.



b) Contração.

Fonte: A Autora, 2019.

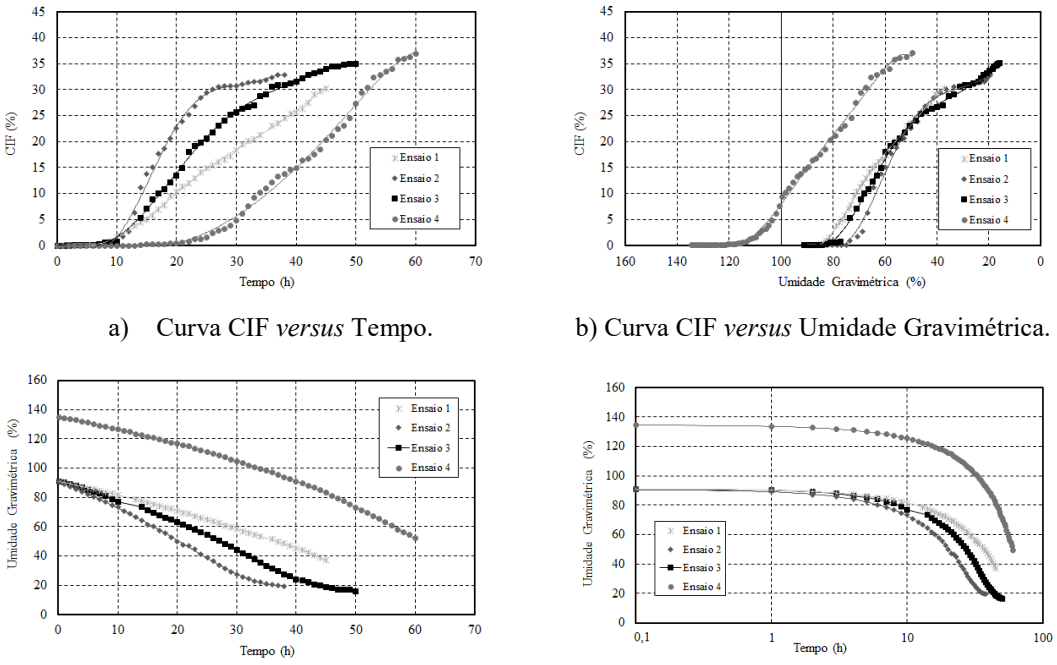
Para o ensaio de expansão são identificadas três regiões distintas: (a) Inicialmente, o solo apresenta pequeno ganho de umidade e, portanto, o solo não apresenta comportamento de expansão ou revela variação muito pequena de volume. Tal fase é denominada de expansão inicial. (b) Em seguida, o processo de variação de umidade revela-se mais significativo com aumento da umidade na periferia do solo e incremento de volume da amostra. (c) Mantendo-se o solo inundado, ocorre cada vez mais o avanço da frente de umidade para dentro do solo, até apenas o núcleo central da amostra manter a umidade inicial, com expressiva expansão. Estes dois últimos cenários correspondem à expansão primária. d) Ao final, todo o solo já sofreu mudança de umidade, com natural estabilização da expansão, sendo essa fase denominada de expansão secundária. Comportamentos similares foram obtidos por Delgado (1986), Ferreira (1995) e Justino da Silva (2001).

Semelhantemente, para o ensaio de secagem, distingue-se a etapa de contração inicial, em que o Fator de Intensidade de Fissuras é nulo ou muito próximo a zero, sendo chamada de contração inicial. Nessa fase, a amostra perde umidade superficial, sem, contudo, ocorrer contração ou aparecimento de fissuras significativas. A segunda etapa corresponde à fase de maior taxa de aumento do CIF por tempo de ensaio decorrido, com consequente avanço da redução de umidade, sendo a etapa denominada de contração primária. Nessa fase, a perda de umidade ocorre inicialmente na periferia avançando para o núcleo da amostra. Ao final, a terceira etapa corresponde à contração secundária em que ocorre redução da taxa de CIF por tempo, sobretudo ao se aproximar da umidade correspondente ao limite de contração da amostra. Tal aspecto de curva foi obtido também por Miller et al. (1998), Trabelsi et al. (2018) e Louati et al. (2018).

5.4.6 Comparativo dos Ensaios 1, 2, 3 e 4

O conjunto de curvas representados na Figura 83 exibe comparativo dos resultados entre os Ensaios 1, 2, 3 e 4 e a Tabela 37 apresenta um resumo dos principais aspectos de cada ensaio.

Figura 83 – Comparativo dos Ensaios 1, 2, 3 e 4 de propagação de fissuras.



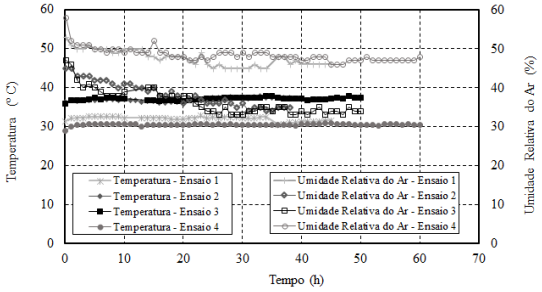
a) Curva CIF *versus* Tempo.

b) Curva CIF *versus* Umidade Gravimétrica.

c) Curva Umidade Gravimétrica *versus* Tempo.

d) Curva Umidade Gravimétrica *versus* Tempo (esc. Log.).

Figura 83 – Comparativo dos Ensaios 1, 2, 3 e 4 de propagação de fissuras (continuação).



c) Curva Temperatura e Umidade Relativa do Ar *versus* Tempo.

Fonte: A Autora, 2019.

Tabela 37 – Resumo dos principais aspectos dos ensaios de secagem.

Dados do Ensaio	**Ensaio 1**	**Ensaio 2**	**Ensaio 3**	**Ensaio 4**
Lâmpada (und)	2	4	4	2
Altura (mm)	15	15	20	15
Diâmetro (mm)	146	146	136	146
w inicial (%)	91	90,7	91	134,8
e inicial	2,36	2,44	2,34	3,52
Tempo de ensaio (h)	45	38	50	60
Quebra Placa Petri	Sim	Sim	Sim	Sim
Tempo para aparecimento de fissuras (h)	6	10	33	22
Direção da fissura	Borda/Centro	Borda/Centro	Centro/Borda	Borba/Centro
Perda de umidade para início de fissuração (%)	5,6	17,2	53,4	21,6
Formato da Fissura	“T” ou “Y”	“T” ou “Y”	“Y”	“T” ou “Y”
Taxa de evaporação inicial (%/h)	0,91	1,73	1,42	1,0
Taxa de evaporação primário (%/h)	1,26	2,25	1,90	1,7
Taxa de evaporação secundário (%/h)	-	0,7	0,78	-
Temperatura (ºC)	32 ±, 0,5	36,8 ± 0,45	37,1 ± 0,38	30,4 ± 0,27
CV temperatura (%)	1,72	1,24	1,05	0,90
Umidade Relativa do Ar (%)	47,5 ± 2,08	38,4 ± 3,20	36,3 ± 3,33	48,5 ± 1,85
CV URA (%)	4,39	8,45	9,2	3,83
CIF (%)	30,1	32,9	35	37
Taxa de CIF inicial (%/h)	0,06	0,08	0,08	0,04
Taxa de CIF primária (%/h)	0,81	2,05	1,28	1,0
Taxa de CIF secundária (%/h)	-	0,27	0,46	-

Fonte: A Autora, 2019.

O comparativo das curvas CIF versus tempo (Figura 83.a) dos quatro ensaios exibe inclinação crescente da curva mais acentuada para o Ensaio 2 (2,05%/h), em seguida o Ensaio 3 (1,28 %/h) e com menor taxa para o Ensaio 4 (1,0 %/h) e o Ensaio 1 (0,81%/h). Tal ocorrência pode ser justificada pelo fato de que os Ensaios 2 e 3 tenham sido conduzidos em temperaturas mais elevadas do que o Ensaio 1 e 4 (Figura 83.e), proporcionando maior taxa de evaporação e, consequentemente, maior taxa de perda de umidade em comparação ao Ensaio 1 e 4.

Por outro lado, o Ensaio 4 teve início com elevada umidade gravimétrica quando comparado aos demais ensaios (umidade acima do limite de Liquidez da amostra), o que possibilitou maior redução da água livre e por conseguinte taxa de evaporação (1,7 % / h) acima da taxa do Ensaio 1 (1,2 % / h), apesar de ter sido utilizado o mesmo quantitativo de lâmpadas.

Adicionalmente, ao se comparar os Ensaios 2 e 3, percebe-se menor taxa de redução de umidade gravimétrica do Ensaio 3 (1,90 %/h), que foi realizado com a Placa Petri mais alta (Figura 77.c) em relação ao Ensaio 2 (2,25 %/h), justificado pela menor quantidade de fissuras formadas e menor superfície exposta para facilitar a saída de água da amostra.

Registra-se, contudo, a tendência dos ensaios de atingir valor de CIF entre 30 a 35 - 37%, independente do caminho da curva CIF versus Umidade Gravimétrica (Figura 83.b). Somado a isso, percebe-se também que para os Ensaios 1, 2 e 3 ocorreu crescimento expressivo do CIF entre o intervalo de umidade gravimétrica de 80% a 40% (próximo ao LP – 33%). No Ensaio 4, o crescimento do CIF foi significativo entre 110% a 60% de umidade da amostra. Destaca-se, ainda, que nos Ensaios 2 e 3 houve pouca variação do CIF para umidade próxima ao LC (17%). Nos Ensaios 1 e 4, não foi possível diagnosticar tal situação, pois o Ensaio 1 foi encerrado com a amostra na umidade de 37,1% e o Ensaio 4 teve a etapa de umedecimento iniciada quando a amostra estava com 49,3 % de umidade gravimétrica.

É possível realizar também um comparativo com a forma de aparecimento das fissuras entre os Ensaios 2 e 3 com alturas diferentes (Figura 84). Percebe-se que o Ensaio 3, em que foi utilizada Placa Petri de altura de 20 mm e acesas quatro lâmpadas (Temp. média de 37,1 ºC), apresentou a formação de placas maiores e menor quantidade de células fissuradas quando comparado ao Ensaio 2, o qual foi executado com Placa Petri de altura de 15 mm e com mesma quantidade de lâmpadas (Temp. média de 36,8 ºC).

Esse fato foi registrado também por Costa et. al. (2008), Atique & Sánchez (2011) e Silva (2018), conforme Figura 85.

Figura 84 – Comparativo do aspecto das células formadas nos Ensaios 2 e 3.

a) Amostra fissurada ao final do Ensaio 2 (Altura de 15 mm).

b) Amostra fissurada ao final do Ensaio 3 (Altura de 20 mm).

Fonte: A Autora, 2019.

Figura 85 – Padrão de fissuração para amostras com diferentes alturas.

a) Solo de Merbourne – Altura de 5 mm.
Fonte: COSTA et. al., 2008.

b) Solo de Merbourne – Altura de 10 mm.
Fonte: COSTA et. al., 2008.

c) Solo da Indonésia - Altura de 10 mm.
Fonte: ATIQUE & SÁNCHEZ, 2011.

d) Solo da Indonésia - Altura de 20 mm
Fonte: ATIQUE & SÁNCHEZ, 2011.

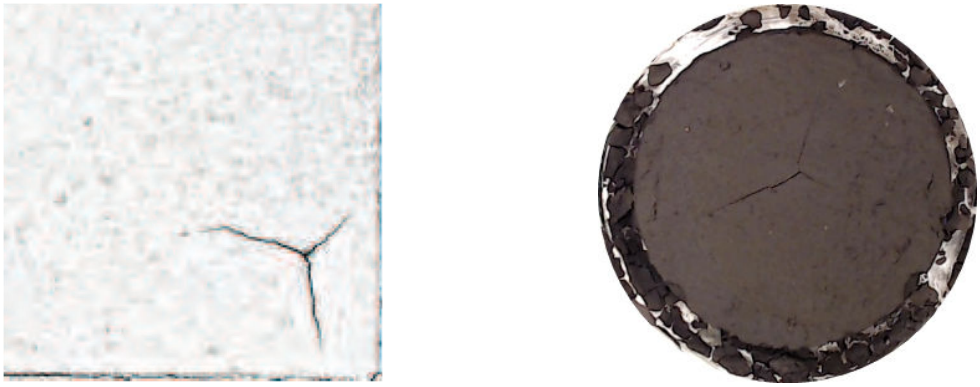
e) Mistura de areia com bentonita
Altura de 3 mm.
Fonte: SILVA, 2018.

f) Mistura de areia com bentonita
Altura de 4 mm.
Fonte: SILVA, 2018.

Por sua vez, os Ensaios 1, 2 e 4, os quais foram realizados com Placa Petri de mesma altura (h=15 mm), registraram comportamento semelhante quanto ao aparecimento das fissuras no sentido borda para o centro, com maior densidade das fissuras e placas de menores dimensões.

Para todos os ensaios, foi possível identificar fissuras no formato "Y", ou seja, ângulos não ortogonais, revelando a quebra em função de tensões cisalhantes, segundo Lakshmikantha (2009). O autor revela exemplo da configuração "Y" quando há junção de fissuras originadas do mesmo ponto (Figura 86), semelhante ao ocorrido no Ensaio 3. Cita ainda que tal configuração tem menor frequência do que as fissuras no formato ortogonal "T", provocadas por tensões de tração, fato esse observado nos Ensaios 1, 2 e 4.

Figura 86 - Fissura não ortogonal durante processo de secagem de solos.



a) Exemplo de Lakshmikantha, 2009. b) Ensaio 3.

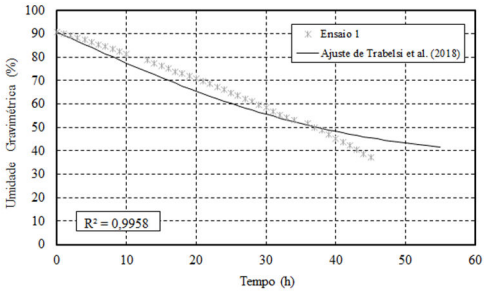
Fonte: A Autora, 2019.

Considerando o modelo analítico (Equação 11) proposto por Trabelsi et. al. (2018) para prever a variação de umidade ao longo do tempo (Figura 87), registra-se que a curva do Ensaio 1 apresentou melhor ajuste (R^2 = 0,9958) quando comparada às curvas dos outros três ensaios.

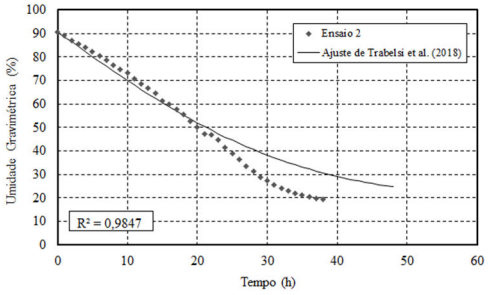
$$w(t) = (w_0 - w_r).\ erfc(t/T_0) + w_r \quad (11)$$

Sendo:
w_0 – Umidade gravimétrica no tempo t;
w_r – Umidade gravimétrica residual;
t- Tempo t;
T_0 – Tempo.

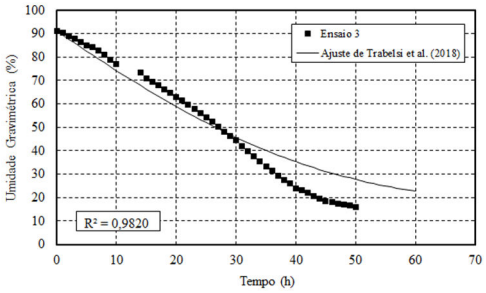
Figura 87 - Aplicação do modelo de Trabelsi et. al. (2018) aos ensaios de fissuras.



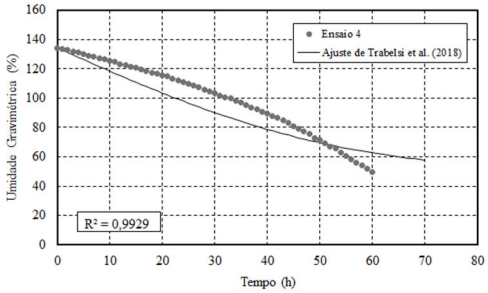
a) Dados laboratoriais do Ensaio 1.



b) Dados laboratoriais do Ensaio 2.



c) Dados laboratoriais do Ensaio 3.



d) Dados laboratoriais do Ensaio 4.

Fonte: A Autora, 2019.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir do programa experimental desenvolvido nesta dissertação e as sugestões para trabalhos futuros sobre o tema.

6.1 CONCLUSÕES

Os problemas causados pelos solos expansivos em diversas regiões do mundo têm levado engenheiros geotécnicos a realizar estudos voltados para investigação, identificação, registro e avaliação do desempenho mecânico desses solos. Nesse sentido, o presente trabalho estudou o comportamento hidromecânico e o processo de propagação de fissuras em solo de Bonito/ PE, por meio de ensaios laboratoriais.

As três amostras de solos investigadas correspondem a, segundo mapa pedológica da EMBRAPA, Planossolo Háplico, com característica de alta atividade. Contudo, em função das características de expansão das Amostras 01 e 02 e da variabilidade dos limites de transição dos solos no mapa, tais amostras foram consideradas como Argissolo Amarelo.

Os valores dos Limites de Plasticidade e Liquidez das Amostras 01 e 02 apresentaram valores bem próximos entre 24 – 26 % e 62 – 68 %. Já a amostra 03, registrou valores superiores para ambos os limites, com LP igual a 33 % e LL a 91 %. A atividade de Skempton (1953) para as três amostras foi inferior a 0,75.

Quanto à Caracterização Física, as Amostras 01, 02 e 03, no sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), são consideradas como argilas altamente plásticas (CH), com percentual de argila equivalente a 48 %, 47 % e 94 %, respectivamente. Para a classificação TRB, as três amostras ensaiadas se enquadram no grupo A-7-6.

A curva de compactação das amostras (Proctor Normal) permitiu inferir resultados equivalentes para as amostras 01 e 02 com peso específico seco máximo próximo a 26 KN/m^3 e umidade ótima de 21%. Já a Amostra 03, em função do maior percentual de material fino, registrou peso específico seco máximo de 13,75 KN/m^3 e umidade ótima de 35%.

Os ensaios químicos realizados com as três amostras revelaram se tratar de solos eutróficos, de caráter solódico, pobres em matéria orgânica, com alta salinidade e elevada

capacidade de troca catiônica. Quanto ao pH, os resultados classificam as Amostras 01 e 02 como solos alcalinos e a Amostra 03 como solo ácido.

A análise química quantitativa desenvolvida para as três amostras permitiu inferir a presença em maior percentual de óxidos de Sílicio, Alumínio e Ferro.

Diante dos difratogramas de Raios X, foi possível identificar a presença de Montmorilonita, Caulinita e Ilita na Amostra 01; Caulinita, Vermiculita, Ilita, Clorita expansível e Montmorilonita na Amostra 02; e Montmorilomita e Caulinita na Amostra 03.

A caracterização microestrutural através do MEV registrou contextura similar entre as Amostras 01 e 02, com agregados constituídos por grânulos com formas poliédricas, lisos a pouco rugosos, sem orientação preferencial. Para a Amostra 03, foi identificada a presença de poros finos a médios intra-agregados e médios a grosseiros entre-agregados. Observou-se ainda a presença de argilominerais do grupo da Montmorilotina e Caulinita.

Partindo-se dos ensaios de caracterização da expansividade, as Amostras 01 e 02 registraram expansão livre de 2,08 % e 2,17 % para tensão de inundação de 10 kPa. Já a Amostra 03 atingiu expansão livre de 9,93 %, para tensão de 10 kPa e 40,92% quando não foi aplicada tensão de consolidação.

Para a tensão de expansão, as Amostras 01 e 02 alcançaram valores de 10,62 kPa e 8,98 kPa para o método a volume constante e 300 kPa e 115 kPa para o edométrico duplo. Já a Amostra 03 apresentou tensão de expansão média de 581 kPa utilizando-se os métodos conhecidos de avaliação de tensão de expansão (volume constante, carregamento após expansão, expansão e colapso e edométrico duplo).

Os resultados obtidos nesta pesquisa quanto à expansão livre e à tensão de expansão permitiram destacar que os métodos indiretos de classificação de solos podem apresentar distorções quanto à identificação de solos expansivos não sendo indicados para adoção em projetos de engenharia, o que corrobora para a importância de investigação geotécnica local, englobando etapas de ensaios de campo e ensaios laboratoriais.

Através de ensaios de tensão de expansão a volume constante em amostras submetidas a diferentes sucções, foi evidenciado o crescimento da tensão de expansão do solo da Amostra 03 com o aumento da sucção imposta.

O ensaio de tomografia computadorizada de Raios X revelou a redução do volume de vazios (macroporos) da amostra após expansão para a amostra indeformada. Já para a amostra compactada, não foram registradas alterações significativas após inundação.

O aparato desenvolvido para a realização dos ensaios de fissuras mostrou-se eficiente, visto que possibilitou a realização dos ensaios com instalação dos equipamentos necessários de acompanhamento (balança, webcam, luminárias e termo higrômetro), bem como garantiu pequena variação da temperatura no ambiente do ensaio.

Os ensaios de propagação de fissuras revelaram a tendência à formação de fissuras no formato “T”, ou seja, ortogonal e no formato “Y” não ortogonal.

As curvas de umidade versus tempo para ensaios de fissuras realizados sob temperatura mais elevada (média de 37 º C) apresentaram maior inclinação justificadas pela maior taxa de evaporação da água quando comparada a curva do ensaio com temperatura mais baixa (média de 31 ºC). Foi confirmada, também, a formação de menor quantidade de células e maior tamanho das placas para o ensaio realizado com amostra de maior altura (20 cm) quando comparadas as amostras de menor altura (15 cm).

Destaca-se, contudo, que, independente das condições de temperatura e espessura da amostra ensaiada, considerando a umidade inicial próximo ao limite de liquidez, houve tendência do CIF a atingir valor entre 30 % a 35 % para uma única etapa de secagem, bem como maior taxa de crescimento do CIF para umidades da amostra entre 80 % a 40 %.

No ciclo secagem e umedecimento, foi verificada a tendência à estabilização da área fissurada a partir da segunda etapa de secagem, assim como redução do valor do CIF a valores bem próximos nas duas etapas de umedecimento. Também foi diagnosticada maior taxa de evaporação na terceira etapa de secagem, favorecida pela elevada densidade de microfissuras que expõem maior superfície ao ambiente. A partir das imagens de acompanhamento do ensaio, foi possível concluir também que uma vez formada a fissura, independente da redução com o processo de umedecimento, o dano causado à amostra ocorreu, não havendo a recuperação total do solo.

A avaliação do comportamento de expansão e contração do solo de Bonito/PE revelou etapas características para o processo de umedecimento e secagem, ou seja, etapa inicial, primária e secundária. Na etapa inicial, a variação de volume para o ensaio de expansão e o fator de intensidade de fissuras para o ressecamento são muito próximos a zero. A fase primária é quando ocorre maior registro de expansão do solo ou CIF ao longo do tempo e a etapa secundária já há indicativos de estabilização da variação volumétrica.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados deste trabalho, sugerem-se os itens abaixo como possíveis trabalhos futuros:

- Avaliar experimentalmente o tratamento do solo expansivo da cidade de Bonito com diferentes técnicas de melhoramento já disponibilizados na literatura, por exemplo: mistura com cal, areia, Cinza de Casca de Arroz, Resíduo da Construção;
- Avaliar a viabilidade econômica das técnicas de melhoramento do solo expansivo citadas acima para o solo de Bonito e o impacto dessas técnicas ao meio ambiente e à sociedade;
- Ampliar a investigação da influência da sucção no solo de Bonito no potencial de expansão por meio de ensaios de tensão de expansão com sucção controlada;
- Realizar a caracterização mecânica deste solo por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento direto na condição natural e inundada;
- Utilizar o mesmo programa experimental em solos de outras cidades do estado de Pernambuco de maneira a mapear os solos expansivos da região, formando um banco de dados;
- Revisar o projeto do aparato para instalação de segunda webcam de maneira a permitir avaliação da variação do volume do solo ao longo do ensaio de secagem e umedecimento por meio de análise de imagens;
- Expandir a avaliação da propagação de fissuras em outros solos expansivos de Pernambuco de maneira a se ter um diagnóstico do comportamento geral de formação de fissuras;
- Realizar o ensaio de fissuras no solo de Bonito para moldes compostos de outros materiais de maneira a avaliar se a quebra da Placa Petri de vidro influenciou no processo de propagação das fissuras;
- Aferir a tensão cisalhante oriunda do processo de contração do solo de Bonito;
- Desenvolver programa experimental para avaliação da propagação de fissuras com adição de materiais como cal, areia, RCD, CCA utilizados para estabilização de solos expansivos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMAS (APAC). **Monitoramento pluviométrico.** Disponível em: www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php. Acesso em: 31 mar. 2019.

ALLAM, M. M.; SRIDHARAN, S. Effect of wetting and drying on shear strength. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**. v. 107, p. 421-438, 1981.

ALBERS, A. P. F. F. G; MELCHIADES, R.; MACHADO, J. B.; BALDO, A. O. BOSCHI. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica**, v. 48, n. 305, p. 34-37. 2002.

AMMOUR, A. & BOUHANNA, B. **Contribution a L´etude de la Fissuration des Argiles.** 2016. 71 f. Master em Génie Civil. Spécialité Ingénierie des Structures. Argélia, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Solo: Preparação para ensaio de Compactação e ensaio de Caracterização. Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR **6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7183**: Solo: Determinação do Limite de Contração. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo: Ensaio de Compactação utilizando energia de compactação normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604:** Solo: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostra deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ATIQUE, A. & SÁNCHEZ M. Analysis of Cracking Behavior of Drying Soil. In : **International Conference on Environmental Science and Technology**. 2., 2011, Singapore. Proceedings […] Singapore : ICEST, 2011.

AYALA, J.F.; GIJON, M. F.; MOZO, C. O. E RODRIGUEZ J. L. S. **Mapa Previsor de Riesgos por Expansividad de Argillas En España a Escala 1:1.000.000**. Série: Geologia Ambiental. Instituto Geologico y Minero de España. Madrid. 1986.

BARBOSA, V. **Estudo do Comportamento Geotécnico de um Solo Argiloso de Cabrobó, Potencialmente Expansivo, Estabilizado com Cal**. 2013. 111 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.

BASTOS, E. G**. Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva do Litoral Norte de Pernambuco.** 1994. 155 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 1994.

BELEDELLI, R.; SOUZA, P. H. C. O que são e como se formam os artefatos nas imagens da tomografia computadorizada de feixe cônico. **Revista ABRO – Associação Brasileira de Radiologia Odontológica.** v.13, n.1, p.2-15, jan./jun., 2012.

BELTRÃO, B. A. **Diagnóstico do Município de Bonito, Estado de Pernambuco. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea.** Recife: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA/CPRM /PRODEEM. p. 20, 2005.

BEZERRA, A. L. **Análise da expansão de um solo no estado natural e compactado com adição de cinza de casca de arroz do município de Brejo da Madre de Deus/PE.** 2019. 120 f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2019.

CAPITAL GEOTECHNICAL. Pavement Design and Performance. Disponível em: http://www.capitalgeotechnical.com/pavementcracking.html. Acesso em: 20 de novembro de 2017.

CHADUVULA, U.; VISWANADHAM, B. V.S.; KODIKARA, J. Desiccation Cracking Behavior of Geofiber-Reinforced Expansive Clay. *In:* **Geo-Chicago,** 2016. Chicago. Proceedings [v. 271, p. 368 – 377] Chicago, 2016.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings. **Proceedings of the Institute of Civil Engineering**, v.92, n. 2, p. 82-89. 1992.

CHEN, F. H. **Fundation on Expansive Soils**. New York: Elsevier. 1988.

CHEN, F.H. The Use of Piers to Prevent the Uplifting of Lightly Loaded Structures Founded on Expansive Soils. *In:* **International Research and Engineering Conference on Expansive Clay Soils,** 1, 1965. Texas A&M University, edited by College Station. Texas A&M University. 1965.

CHENGGANG, B et al. Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soil. *In:* **International Conference on Unsaturated Soils**. 2, 1998, China. Proceedings [vol 2, p. 71] China, 1998.

CIDADE-BRASIL. Disponível em: www.cidade-brasil.com.br/municipio-bonito-pe.html. Acesso em: 27/03/2019.

CNUDDE, V & BOONE, M. N. High-resolution X-ray computed tomography in geoscienes: A review of the current technology and applications. **Earth-Science Review**. v. 123, p. 1-17. 2013.

COLLINS, K. & McGOWN, A. The Form and Function of Microfabric Features in a Veriety of Natural Soils. **Geotechnique**, v. 24, nº 2, p. 223-254. 1974.

CORTE, A. & HIGASHI, A. **Experimental research on desiccation crack in soil.** U.S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment. Research report n.66. Corps of Engineers. USA. 1960.

COSTA, C. DE M. C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos.** 2015. 163 f. Tese de doutorado. Universidade de Brasília. Distrito Federal, 2015.

COSTA, L. F. **Tomografia computadorizada de raios-x aplicada à caracterização do espaço poroso do solo**. 2017. 71 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

COSTA, L. F.; ANTONINO, A. C. D.; HECK, R. J.; COUTINHO, A. P.; VASCONCELOS, T. C. & CASSIA, B. M. X-ray computed microtomography in the evaluation of the porous system of soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.22, n.4, p.249-254. 2018.

COSTA, S.; KODIKARA, J.; THUSYANTHAN, I. Study of desiccation crack Evolution using image analysis. **Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering**. London. p. 159 – 164, 2008.

CRESTANA, S. **A tomografia computadorizada como um novo método para estudos da física da água no solo**. 1985. 140 f. Tese de Doutorado. Instituto de física e química de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 1985.

CRISTELO, M.N.C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal.** 2001. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia. Universidade do Minho. Braga, 2001.

CUELLAR, V. **Análisis Crítica de los Métodos Existentes para el Empleo de Arcillas Expansivas em obras de Carreteras y Recomendaciones Sobre las Técnicas Más Idóneas Para se Uso habitual en España**. 1978. 303 f. *In*:Laboratório del Transporte y Mecanica del suelo. Madrid, 1978.

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

DAKSHANAMUTHY, V. A new method to predict swelling using a hyperbolic Equation. **Geotechnical Engineering**. Vol. 9, pp. 79 –87, 1978.

DAY, R.W. Swell-Shrink Behavior of Compacted Clay. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**. v. 120, pp. 618 – 623, 1994.

DELGADO, A. **Influencia de la Trayectoria de las Tensiones em el Comportamento de Las arcilas Expansivas y de los suelos colapsables en el laboratório y en el terreno.** Tese de Doutorado. 1986. 564 f. Universidad de Sevilha. Sevillia,1986.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Mapa Exploratório-Reconhecimento de solos do Município de Bonito, PE**. Recife. 2018.

FERREIRA, S. R. M. Solos Especiais – Colapsíveis, Dispersivos e Expansivos. **Relatório Anual do CNPq**. 1988.

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

FERREIRA, S. R. M; ARAÚJO, A.G. D; BARBOSA, F. A. S.; SILVA, T. C. R.; BEZERRA, I. M. L. Analysis of volume change and crack propagation in swellig soil due to water content change. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2019. (PRELO)

FERREIRA, S. R. M; PAIVA, S. C.; FREITAS, M. L. A. A.; BARBOSA, V. & REGO, W.A. Estabilização de Solos Expansivos de Cabrobó, Paulista e Suape / PE com Cal. *In:* **Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica, XVI**, 2012, Porto de galinhas. Anais p.264, COBRAMSEG, 2012.

FERREIRA, S. R. M; OLIVEIRA, J. T. R.; GONZÁLEZ, Y. V. Técnicas de amostragem e preparação de amostras. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** 2015. 759 f. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. São Paulo, 2015.

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

FLEUREAU, J; WEI, X; IGHIL-AMEUR, L; HATTAB, M; BICALHO, K. V. Experimental Study of the Cracking Mechanisms of Clay during Drying. *In:* **Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.** 15, 2015. Proceedings […] Buenos Aires. Argentina. 2015.

FREDLUND, D. G. & MORGENSTERN, N. R. Stress state variable for unsaturated soils. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, ASGE, v. 103, p. 447- 466, 1977.

GITIRANA JUNIOR, G.F.N., MARINHO, F.A.M e SOTO, M.A.A. A curva de retenção de água de materiais porosos. CARVALHO, J. C., GITIRANA JUNIOR, G.F.N, MACHADO, S.L., MASCARENHA, M.M.A.,SILVA FILHO, F.C. **Solos não saturados no contexto geotécnico.** Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e engenharia geotécnica. São Paulo. 2015.

GRIM, R. E. Clay Mineralogy. **McGRaw-Hill Publ**. Company Ltda, Ney York, p.384, 1953.

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

HANDY, R. L. & SPANGLER, M.G. **Geotechnical Engineering – Soil and Foundation Principles and Practice.** Mcgraw-hill. 5 edition. 1976.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/bonito. Acesso em: 15 de fevereiro de 2019.

JACINTHO, E. C. **Estudo do Comportamento de Misturas Solo-emulsão para Uso em Barragens.** 2005. 160 f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, 2005.

JIMENEZ, S. J. A. Cimentationes em terrenos expansivos o cola sables. **Geotecnia Y Cimentos**, Vol. 1, n 111, p. 533-650. 1980.

JUCÁ, J. F. T. **Comportamiento de los Suelos Parcialmente Saturados Bajo Succión Controlada.** 1990. 346 f. Tesis Doctoral. Universidad Politecnica de Madrid. E.T.S. de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Madrid, 1990.

JUSTINO DA SILVA, J. M. **Variação Volumétrica de uma argila Expansiva não Saturada submetida a Diferentes Condições Climáticas**. 2001. 249 f. Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

JUSTINO DA SILVA, J. M. Solos Expansivos. In: Gusmão, A. D.; Gusmão Filho, J.; Oliveira, J. T. R.; Maia, G. B. **Geotecnia do Nordeste**. Editora Universitária da UFPE, Recife. p. 397 - 418, 2005.

KORMANN, A.C.M. **Comportamento geomecânico da formação Guabirotuba: Estudos de campo e laboratório.** 2004. 429 f. Tese de doutorado. Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2004.

LACERDA, L. S. S. N. **Análise do comportamento geotécnico de solos de Cabrobó, potencialmente expansivos, estabilizados com cinza de casca de arroz.** 2019. 82 f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

LAKSHMIKANTHA, M. R. **Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils.** 2009. 355 f. PhD Thesis. Universitat Politècnica de Catalynya, Barcelona, 2009.

LI, J.H. & ZHANG, L.M. Study of desiccation crack initiation and development at ground surface. **Engineering Geology**, vol. 123, p. 347-358, 2011.

LING, T. C. **Tomografia Computadorizada de Raio X aplicada à análise da qualidade ambiental de solo no entorno da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira – SP**. 2013. 97 f. Dissertação de mestrado. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

LLORET, A.; LEDESMA, A.; RODRÍGUES, R.; SÁNCHEZ, M. J.; OLIVELLA, S.; SURIOL, J. Crack Initiation in Drying Soils. **Unsaturated Soils**. vol. 1, p. 497 – 502, 1998.

LOUATI, F.; TRABELSI, H.; JAMEI, M. & MABROUK, A. Unsaturated permeability prediction using natural evaporation method cracked clay. *In:* **International Conference on Unsaturated Soil.** 7, 2018. Proceedings [...]. Hong Kong, 2018.

MACHADO, C. B. **Caracterização da Microestrutura de uma Pedosequência com Lamelas utilizando tomografia computadorizada de Raios X**. 2019. 69 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2019.

MARINHO, F. A. M. **Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados.** Concurso de livre docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2005.

MARINHO, F. A. M. Caracterização do solo não saturado. In: **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, XI, 1998. Anais [...],** Brasília, 1998.

MARINHO, F. A. M. A técnica do papel filtro para medição de sucção. **Encontro sobre solos não saturados.** Rio Grande do Sul. 1995.

MARINHO, R. P. **Melhoramento de solo colapsível e expansivo de Santa Maria da Boa Vista-PE.** 2018. 114 f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2018.

MENEGOTTO, M. L. **Previsão da curva tensão-recalque de ensaios de placa em solo não saturado.** 2004. 224 f. Tese de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

MIGUEL M.G.& VILAR, O.M. **Study of the water retention properties of a tropical soil.** Canadian Geotechnical Journal. v. 46, n. 9, p. 1084-1092, 2009.

MILLER, C.J.; MI, H.; YESILLER, N. Experimental Analysis of Desiccation Crack Propagation in Clay Liners. **Journal of the American Water Resources Association.** vol. 34, nº 3, p. 677 – 686. 1998.

MITCHELL, J. **Fundamentals of Soil Behavior**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. p. 422,1976.

MITCHELL, J. **Fundamentals of Soil Behavior**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. p. 437, 1993.

MORAIS, J. J. O. **Caracterização geotécnica da expansividade de um solo argiloso do município de paulista-PE.** 2017. 129 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

O'DOWD, N. **Advanced Fracture Mechanics: Lectures on Fundamentals of Elastic, Elastic-Plastic and Creep Fracture**, 2002–2003. Imperial College London. Londres. 2003.

PAIVA, S. C. **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de Cabrobó, Paulista e Ipojuca-PE e de suas misturas com cal.** 2016. 190 f. Tese de doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2016.

PEREIRA, E. M. **Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada**. 2004. 227 f. Tese de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

PETH, S.; Nellesen, J.; Fischer, G. & Horn, R. Dynamics of soil por espace structure investigated by X-ray microtomography. *In :* **World Congress os Soil Science, Soil Solutions for a Changing Worl.** 19, 2010. Brisbane, Australia. Proceedings [...]. Australia, 2010.

PINTO, C. de S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos. 3ª edição. p. 365, 2013.

RODRIGUES, R. A. **Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático.** 2007. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

RODRIGUÉZ, R. Hydrogeotechnical characterization of a metallurgical waste. **Canadian Geotechnical Journal**. Canadá. v. 43, p. 1041 – 1060. 2006.

ROGERS, J. D.; OLSHANSKY, R.; ROGERS, R. B. Damage to Foudations From Expansive Sols. Disponível em:

http://web.mst.edu/~rogersda/expansive_soils/DAMAGE%20TO%20FOUNDATIONS%20FROM%20EXPANSIVE%20SOILS.pdf. Acesso em: 07 de Março de 2018.

SAMINGAN, AGUS SETIANTO. **An Experimental Study on Hydro-Mechanical Characteristics os Compacted Bentonite-Sand Mixtures.** 2005. 208 f. Dissertation Doktor – Ingenieur. Faculty of Civil Engineering Bauhaus – University Weimar. Weimar, 2005.

SANTOS, E. M. DOS. **Diagnóstico da geodiversidade e potencial Geoturístico do município de Bonito, Agreste de Pernambuco.** 2012. 113 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2012.

SANTOS, G. M. DOS. **Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não saturada**. 2008. 119 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008.

SANTOS, L. C. **Estudo da estabilização de um solo expansivo através da incorporação de areia verde de fundição residual.** 2015. 80 f. Trabalho de conclusão de curso. Santa Catarina, 2015.

SANTOS, P.S. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2a ed. São Paulo, Edgard Blücher. v1, p.408, 1989.

SEED, H.B.; R.J. WOODWARD, JR.; & R. LUNDGREN. Perdition of Swelling Potential for Compacted Clays. **Journal of Soil Mech**. Found. Div., Am. Soc. Civil Eng 88. 1962.

SILVA, J. A. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo potencialmente expansivo, encontrado em Agrestina/PE, aplicando cinza de casca de arroz e cal**

como aditivos estabilizantes. 2018. 137 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2018.

SILVA, M. F. **Estudo Comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal.** 2010. 113 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia). Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, 2010.

SILVA, T. J. L. **Avaliação do impacto de fissuras na condutividade hidráulica em aplicações de camada fina por meio de análise de imagens.** 2017. 154 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados.** 2004. 221 f. Tese de doutorado. Escola de engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

SOUZA, R. F. C. **Estudo da influência da sucção na pressão de expansão de materiais argilosos com a técnica da transferência de vapor.** 2014. 240 f. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2014.

SKEMPTON, A.W. The Colloidal Activity. *In :* **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,** 3, 1953, Switzerland. Proceddings [v.1, p. 57–61], 1953.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Solos. 3ª edição. Brasília. EMBRAPA. p. 573, 2017.

TRABELSI, H.; JAMEI, M.; ROMERO, E. Stabilization of clayey soil using fibre reinforcement. Unsaturated permeability prediction using natural evaporation method cracked clay. *In :* **International Conference on Unsaturated Soil,** 7, 2018, Hong Kong. Proceedings [...], 2018.

VAN DER MERWE, D.H. **The Prediction of Heave from the Plasticity Index and Percentage Clay Fraction of Soils.** The Civil Engineer in South Africa, South African Institution of Civil Engineers 6. 1964.

VAN GENUCHTEN. M. Th. **A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsatured soils.** Proc. Soil. Soc. Am., v.44, v.5, p.892-898, 1980.

VAN GENUCHTEN, M.Th.; NIELSEN, D.R. **On describing and predicting the hydraulic properties of unsatured soils.** Ann. Geoph., v.3, p.615-628. 1985.

VILLAR, L.F.S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita.** 2002. 511 f. Tese de doutorado. PUC/RJ. Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2002.

YAN, S.; GUO, B.; CHU, J.; SUN, L.; JI, Y. Mechanism Study and Model Tests on Soft Clay Cracking. **Soil Behavior and Geomechanics.** Geoshangai International Congress. Shangai. v. 236, p. 184 – 193, 2014.