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

FELIPE ARAÚJO SILVA BARBOSA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO E DA DINÂMICA DE FISSURAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO

Recife
2019

FELIPE ARAÚJO SILVA BARBOSA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO E DA DINÂMICA DE FISSURAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO

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
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

B238a Barbosa, Felipe Araújo Silva.
Análise do comportamento hidromecânico e da dinâmica de fissuração de um solo expansivo / Felipe Araújo Silva Barbosa. - 2019.
132 folhas, il., tab.

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 e apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Solos expansivos. 3. Solos não saturados. 4. Comportamento hidromecânico. 5. Fissuras em solo. I. Ferreira, Silvio Romero de Melo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2020-37

FELIPE ARAÚJO SILVA BARBOSA

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO E DA DINÂMICA DE FISSURAÇÃO DE UM SOLO EXPANSIVO

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: 29 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

_____

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

_____

Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Jr. (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dedico esse trabalho aos meus pais Hideraldo (*In memoriam*) e Iara, por todo o apoio e incentivo ao longo de minha vida.

Essa conquista é nossa.

AGRADECIMENTOS

Neste momento se faz necessário agradecer a todos que, de alguma forma, colaboraram durante a realização do mestrado.

Primeiramente, agradeço a Deus por mais uma conquista acadêmica e pessoal em minha vida.

Aos meus familiares, por todo o apoio e compreensão, em especial ao meus pais Hideraldo (In memoriam) e Iara, a quem eu dedico este trabalho. Essa conquista também é de vocês.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEC-UFPE) e a todos os seus funcionários e colaboradores por terem me propiciado uma formação técnica e acadêmica de excelência. Agradeço, de forma especial, ao Prof. Dr. Sílvio Romero pela brilhante orientação durante todo o mestrado. Sua competência, disponibilidade e atenção estimularam meu desejo acadêmico e foram determinantes no desenvolvimento da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio ao projeto de pesquisa.

Aos novos amigos que o mestrado me deu, no qual pude compartilhar as alegrias e preocupações ao longo da jornada. Agradeço em especial a Arthur Araújo, Bruno Andrade, Carlos Rolim, Francisco Carlos (Chico), Ilton Santos e Thalita Rodrigues.

À Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) e à empresa BRK Ambiental pelo o apoio logístico.

À Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMA) do Paulista pela compreensão, amizade e apoio durante a fase final da pesquisa.

MUITO OBRIGADO A TODOS!

RESUMO

Solos expansivos são solos não saturados constituídos por argilominerais de estrutura 2:1 cuja mudança de umidade acarreta em variação de volume. A ocorrência de fissuras neste tipo de solo provoca alterações em sua geomorfologia, influenciando assim fatores como permeabilidade e resistência. Este fenômeno está normalmente associado à elevação da sucção, sendo comum sua observação em regiões com alternância de estações chuvosas e secas intensas. O presente trabalho teve por objetivo analisar o comportamento hidromecânico e a dinâmica de fissuração de um solo expansivo situado no município de Paulista-PE, Região Metropolitana do Recife (RMR). O local de estudo, inserido na Formação Maria Farinha, possui um perfil composto por 5 camadas sendo todas elas classificadas como CH ou CL na SUCS. A Camada II (de -0,10 até -2,00 m) é moderadamente ácida (pH em água), distrófica (pouco fértil), possui baixo teor de matéria orgânica (abaixo de 1%) e um elevado valor de Capacidade de Troca de Cátions (CTC ou T), acima dos 27 $cmol_c/kg$ (índice indicativo de solos expansivos). Ensaios de compressibilidade e expansividade realizados nesta camada revelaram um potencial de expansão variando de médio a muito alto, a depender de sua umidade/sucção inicial. Ensaios de resistência ao cisalhamento realizados na umidade natural e com inundação prévia mostram uma redução significativa dos valores de coesão e ângulo de atrito, além da alteração do comportamento (frágil para dúctil). Análise da estrutura do solo por meio de tomografia computadorizada constataram mudança na sua macroporosidade devido ao processo de inundação e expansão. Estudos sobre a dinâmica de fissuração em solo também foram realizados, para isso se fez necessário o desenvolvimento de equipamentos, aparatos e metodologia de modo a possibilitar a realização dos ensaios e posterior análises. Nestes ensaios observou-se que a propagação de fissuras ocorre em formato de “X” e “T”, e simultaneamente em toda a superfície da amostra juntamente com sua contração. O fator CIF (razão entre a área de fissuras e área inicial da amostra) cresce de maneira progressiva, porém não linear, até atingir uma tendência a estabilização mesmo com perda umidade.

Palavras-chave: Solos expansivos. Solos não saturados. Comportamento hidromecânico. Fissuras em solo.

ABSTRACT

Expansive soils are unsaturated soils consisting of 2:1 clay minerals whose change in humidity results in a change in volume. The occurrence of cracks in this type of soil causes changes in its geomorphology, thus influencing factors such as permeability and strength. This phenomenon is usually associated with increased suction, and its observation is common in regions with alternating rainy and intense dry seasons. This study aimed to analyze the hydromechanical behavior and cracking dynamics of an expansive soil located in the city of Paulista-PE, Metropolitan Region of Recife (RMR). The study site, inserted in the Maria Farinha Formation, has a profile composed of 5 layers, all of which are classified as CH or CL in SUCS. Layer II (from -0.10 to -2.00 m) is moderately acidic (pH in water), dystrophic (poorly fertile), has a low organic matter content (below 1%) and a high Cation exchange (CTC or T), above 27 cmolc / kg (indicative index of expansive soils). Compressibility and expandability tests carried out on this layer revealed an expansion potential ranging from medium to very high, depending on its initial humidity/suction. Shear strength tests carried out in natural moisture and with previous flooding show a significant reduction in the values of cohesion and friction angle, in addition to the change in behavior (brittle to ductile). Analysis of the soil structure using computed tomography showed a change in its macroporosity due to the process of flooding and expansion. Studies on the dynamics of cracking in the soil were also carried out, for this it was necessary to develop equipment, apparatus, and methodology to enable the performance of tests and subsequent analyzes. In these tests, it was observed that crack propagation occurs in “X” and “T” formats, and simultaneously over the entire sample surface together with its contraction. The CIF factor (ratio between the crack area and the initial sample area) grows progressively, but not linearly until it reaches a tendency to stabilize even with moisture loss.

Keywords: Expansive soils. Unsaturated soils. Hydromechanical behavior. Cracks in the soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Representação da estrutura dos argilominerais.....	19
Figura 2 –	Modelo simplificado das fases de um Solo Não Saturado.....	21
Figura 3 –	Modelo conceitual de uma curva de retenção de água no solo……..	22
Figura 4 –	Parâmetros de uma curva de retenção.....	24
Figura 5 –	Efeito de Histerese…….....	25
Figura 6 –	Ocorrência de solos expansivos em Pernambuco ….....	29
Figura 7 –	Curvas da TG e DTG, com o correspondente do difratograma de raio-X, do solo de Paulista.	31
Figura 8 –	Eletromicrografias do solo de Paulista.....	31
Figura 9 –	Sistema de funcionamento do tomógrafo e subsequente reconstrução de imagens.....	32
Figura 10 –	Aparatos desenvolvidos para ensaios de fissuras	35
Figura 11 –	Conceito de CIF	36
Figura 12 –	Curva Umidade x Tempo e os 3 trechos referentes a taxa de evaporação.....	36
Figura 13 –	Resultado de fissuras nos moldes com espessura de 5 mm, 10 mm e 20 mm.....	38
Figura 14 –	Processo de contração de argila simples.....	38
Figura 15 –	Comparativo, em escala macro, dos resultados obtidos entre solos não reforçados e reforçados com fibras ao final de teste de dessecação.....	39
Figura 16 –	Comparativo, em escala micro, dos resultados obtidos entre não reforçados e reforçados com fibras ao final de teste de dessecação.....	39
Figura 17–	Comparativo das dinâmicas de fissuração do solo puro ($\eta f = 0,0$ %) e do solo reforçado ($\eta f = 0,3$ %)	40
Figura 18–	Mapa de situação do município do Paulista-PE.....	42
Figura 19 –	Mapa geológico da região de Paulista e adjacências	43
Figura 20 –	Trabalho em campo – escavação da vala e coleta dos blocos.....	43

Figura 21 – Escavação a trado manual - Perfil Sucção x Umidade..... 45
Figura 22 – Moldagem do Corpo de Prova Corpo de Prova na base metálica do tomógrafo; e inundação do Corpo de Prova..... 48
Figura 23 – Equipamentos utilizado na Tomografia Computadorizada e Corpo de Prova em processo de escaneamento..... 48
Figura 24 – Moldagem do Corpo de Prova; Parte "rebaixada" do CP; Parte do CP no nível do anel..... 50
Figura 25 – Matérias utilizados; Obtenção da sucção Matricial; e Obtenção da sucção Total. 51
Figura 26 – Metodologia proposta pro Paiva (2016) para umedecimento das amostras utilizando vapor de água 52
Figura 27 – Metodologia dos Dessecadores de Vácuo. 53
Figura 28 – Pedras porosas e papeis filtros dentro de um dessecador, equalizando a sucção; Componentes utilizados em um ensaio edométrico; e Modelo de prensa de ensaio utilizada 55
Figura 29 – Modelo de prensa de ensaio utilizada; Amostra após ruptura..... 56
Figura 30– Perfil de Solo..... 59
Figura 31 – Variação da Umidade Gravimétrica (a) e Sucção (b) ao longo da profundidade. 59
Figura 32 – Variação da Umidade Gravimétrica ao longo da profundidade obtido por Silva (2001) 60
Figura 33 – Fissuras em Solo relatadas por Silva (2001) 61
Figura 34 – Curva Granulométrica com uso de defloculante..... 62
Figura 35 – Curva Granulométrica sem uso de defloculante. 62
Figura 36 – Potencial de expansão pelo critério de Skempton (1953) e Williams (1957)..... 65
Figura 37 – Potencial de expansão pelo critério de Daksanamurthy e Raman (1973) 65
Figura 38 – Potencial de expansão pelo critério de Seed *et al.* (1962) 65
Figura 39 – Curvas de compactação da Camada II (com e sem preparação) 66
Figura 40 – Curva Característica 68

Figura 41 – Relações entre umidade, grau de saturação, índices de vazios, sucção e fases do solo..... 69
Figura 42– Comparativo do escaneamento da Amostra da Camada II (Indeformada)..... 71
Figura 43 – Curvas de compressão edométricas..... 73
Figura 44 – Curvas de Deformação de Expansão ou Colapso x Tempo – Formulação Hiperbólica..... 75
Figura 45 – Curvas Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante; Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical e Envoltória de Ruptura para as situações ensaiadas..... 79
Figura 46 – Curvas Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante (Formulação Hiperbólica)..... 80
Figura 47 – Gráficos de Deformação Axial x Tensão Desviatória; Deformação Axial x Poro Pressão; e Envoltória de Ruptura..... 83
Figura 48 – Curvas Deformação Específica Axial x Tensão Cisalhante Deslocamento (Formulação Hiperbólica) 84
Figura 49– Aparato de madeira utilizado – Ilustração (dimensões em metros): Vista Superior; Frontal e Lateral 88
Figura 50– Aparato desenvolvido para realização dos testes de fissuras..... 89
Figura 51 – Materiais utilizados nos processos de homogeneização, mistura e moldagem; detalhe do molde de vidro e “soquete” de plástico utilizados; processo de e mistura e moldagem das amostras; e padrão para o início dos ensaios 92
Figura 52 – Detalhe para o processo de inundação das amostras – Ensaio 02 e amostra ao termino do Ensaio 01 93
Figura 53 – Modelo da Webcam utilizada e vista do software Auto Screenshot Capture - empregado para aquisição de imagens 93
Figura 54 – Processo de seleção e corte das imagens..... 94
Figura 55 – Comparativo entre a imagem original colorida e binarizada 95
Figura 56 – Interface do programa de análise de imagens..... 95
Figura 57 – Desenvolvimento do processo de secagem e fissuração – Wi : 76,1%.... 98

Figura 58 – Vídeo acelerado do ensaio (QR Code) 100
Figura 59 – Desenvolvimento do processo de secagem e fissuração – Wi : 94,2%.... 101
Figura 60 – Comparativo dos parâmetros e resultados obtidos nos dois ensaios. Variação de Temperatura e URA ao longo do tempo; Relação Tempo x Umidade da Amostra; e Relação Umidade x CIF 104
Figura 61 – Curva Tempo x Umidade obtida pro Asma e Bahya (2016) 106
Figura 62 – Modelo analítico proposto por H. Trabelsi *et al.* (2018) aplicado aos dados experimentais obtidos. 106
Figura 63 – Comparativo entre as amostras no fim dos períodos de secagem e com 1h de inundação. 107
Figura 64 – Comparativo entre as amostras no início e fim de cada ciclo de secagem..... 108
Figura 65 – Variação de Temperatura e URA ao longo do tempo; Relação Tempo x Umidade da Amostra; e Relação Umidade x CIF 109
Figura 66 – Comportamento do solo durante a expansão..... 110
Figura 67 – Comportamento do solo durante a propagação de fissuras 111
Figura 68 – Fissuras em solo no campo..... 112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Estrutura Química dos principais argilominerais..... 18

Tabela 2 – Métodos Diretos e Indiretos de medição de sucção..... 25

Tabela 3 – Métodos de identificação de Solos Expansivos..... 28

Tabela 4 – Comparativo entre as granulometrias de pesquisas já realizadas em Paulista..... 30

Tabela 5 – Comparativo entre os Limites de Atteberg de pesquisas já realizadas em Paulista 30

Tabela 6 – Relação dos ensaios realizados e correspondentes laboratórios..... 41

Tabela 7 – Concentração das soluções H_2SO_4 e sucções correspondentes 52

Tabela 8 – Composição granulométrica das camadas e densidade real dos grãos 63

Tabela 9 – Limites de Atterberg..... 63

Tabela 10 – Avaliação qualitativa do potencial de expansão do solo 64

Tabela 11 – Compactação 66

Tabela 12 – Caracterização química da Camada II..... 67

Tabela 13 – Resumo dos Índices físicos e resultados obtidos..... 72

Tabela 14 – Parâmetros de ajustes da formulação hiperbólica para a curva Deformação x Tempo..... 77

Tabela 15 – Valores de Tensão de Expansão a Volume Constante para diferentes sucções/umidades iniciais..... 77

Tabela 16 – Índices físicos inicias das amostras ensaiadas e parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos nos ensaios de Cisalhamento Direto..... 78

Tabela 17– Parâmetros de ajustes da formulação hiperbólica para a curva Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante..... 81

Tabela 18– Índices físicos inicias das amostras ensaiadas e parâmetros de resistência ao cisalhamento obtido dos ensaios de compressão triaxial..... 82

Tabela 19– Parâmetros de ajustes da formulação hiperbólica para a curva Deformação Específica Axial x Tensão Desviatória 85

Tabela 20 – Dados do molde e da amostra de solo..... 96

Tabela 21 – Resumos dos principais parâmetros e resultados 97

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	15
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	16
1.2	ESTUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2	**REFERENCIAL TEÓRICO.....**	18
2.1	SOLOS ARGILOSOS	18
2.2	SOLOS NÃO SATURADOS E CURVA CARACTERÍSTICA	20
2.3	SOLOS EXPANSIVOS.....	27
2.3.1	**Solos Expansivos em Pernambuco e no município do Paulista .....**	29
2.4	ANÁLISE ESTRUTURAL DO SOLO POR TOMOGRAFIA	32
2.5	FISSURAS EM SOLOS	32
2.5.1	**Estudo do Processo de Fissuração em Solo.....**	34
3	**MATERIAIS E MÉTODOS .....**	41
3.1	LOCAL DE ESTUDO E COLETA DE AMOSTRAS	41
3.1.1	**Perfil Sucção x Umidade em campo .....**	44
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	46
3.2.1	**Ensaios Físicos.....**	46
3.2.1.1	Caracterização Física do Solo ……..…….....…….....	46
3.2.1.2	Análise da Estrutura do Solo .....…….....….....……...……	47
3.2.2	**Ensaios Químicos .....**	49
3.2.3	**Curva Característica .....**	49
3.2.3.1	Determinação da Sucção pelo Método do Papel Filtro	50
3.2.3.2	Determinação da Sucção pelo Método do Dessecador de Vácuo	52
3.2.4	**Ensaios Mecânicos .....**	53
3.2.4.1	Compressibilidade e Expansividade.....	53
3.2.4.2	Resistência ao Cisalhamento.....	55
4	**RESULTADOS .....**	58
4.1	PERFIL DE SOLO DO LOCAL DE ESTUDO E VARIAÇÃO DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA E SUCÇÃO AO LONGO DA PROFUNDIDADE	58
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO.....	61

4.2.1 **Caracterização Física 61**
4.2.1.1 Granulometria e Densidade Real dos Grãos..... 61
4.2.1.2 Limites de Consistência..... 63
4.2.1.3 Compactação de Solos 66
4.2.2 **Caracterização Química 67**
4.3 RELAÇÃO UMIDADE X SUCÇÃO - CURVA CARATERÍSTICA 68
4.4 ANÁLISE MACROESTRUTURAL DO SOLO POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA 70
4.5 COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO 72
4.5.1 **Compressibilidade e Expansividade 72**
4.5.2 **Resistência ao Cisalhamento 78**
5 **DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE FISSURAS EM SOLO..** 86
5.1 MATÉRIAS E MÉTODOS 87
5.1.1 **Montagem dos Equipamentos e Procedimentos Adotados 87**
5.1.2 **Preparação da Amostra e Ensaios de Fissuras 89**
5.1.3 **Captura, Seleção e Preparação das Imagens 93**
5.1.4 **Análise das Imagens 94**
5.2 RESULTADOS E ANÁLISES 96
5.2.1 **Propagação de Fissuras em Ciclos de Secagem 96**
5.2.2 **Propagação de Fissuras em Ciclos de Secagem e Inundação 106**
5.2.3 **Comparativo entre curvas de expansão e fissuração 110**
5.2.4 **Observações de Fissuras em Campo 111**
6 **CONCLUSÃO 113**
6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS 114
REFERÊNCIAS 116
APÊNDICE A - ENSAIOS PRELIMINARES E SUGESTÕES DE APRIMORAMENTO DA METODOLOGIA 122
APÊNDICE B - DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE FISSURAÇÃO PARA CICLOS DE SECAGEM E UMEDECIMENTO – Wi : 94,2% 127

1 INTRODUÇÃO

O entendimento do comportamento e das propriedades hidromecânicas do solo é de fundamental importância para sucesso dos empreendimentos instalados sobrejacentes a ele. Soluções de engenharia, em meio a problemas geotécnicos, devem possuir respaldo técnico suficiente para minimizar os riscos envolvidos.

Dentre os solos tidos como “problemáticos” os solos expansivos ganham atenção especial pois possuem um comportamento de difícil previsão, sofrendo variação de volume devido à mudança de umidade/sucção, sob tensões praticamente constantes, e de forma cíclica. Esta variação volumétrica tende a provocar elevadas deformações nas estruturas assentadas sobre esses solos, a depender das tensões aplicadas pelas estruturas, comprometendo assim sua segurança e funcionalidade.

Vilar e Ferreira (2015) definem solos expansivos como sendo solos não saturados constituídos de argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, como as montmorilonitas e as vermiculitas. A presença deste tipo de solo pode ser associada a locais onde a evapotranspiração excede a precipitação e em regiões áridas e semiáridas de clima tropical e temperado.

Metodologias corriqueiras de investigação em campo, como as sondagens a percussão tipo SPT, não são capazes de identificar com exatidão se um solo é expansivo ou não, sendo necessária a adoção de métodos diretos (ensaios de laboratório com inundação) e indiretos (aqueles que correlacionam resultados de ensaios de caracterização e índices físicos para indicar a potencialidade de expansão) para a verificação de seu potencial de expansão.

Morais (2017) realizou um apanhado na literatura de problemas já registrados por causa de solos expansivos, sendo verificado desde rachaduras em lajes, paredes e fundação de pequenas edificações; passando por fissuras e rachaduras em pavimentação; até do rompimento de tubulações e canais.

Além dos transtornos relacionados à expansão do solo, o processo de contração e propagação de fissuração por dessecação também acarreta em danos. O aparecimento de fissuras no maciço de solo provoca alteração, de maneira substancial, na geomorfologia do solo, influenciando assim fatores como permeabilidade e resistência. Problemas relacionados ao aparecimento de fissuras em obras de engenharia, tal como camada de cobertura de aterro sanitário e em pavimentos, já foram discutidos por Silva (2017).

Apesar da importância desta temática, observa-se que este assunto ainda é pouco explorado, não sendo verificada nenhuma norma ou diretriz a respeito. Mesmo assim, nota-se que os trabalhos presentes na literatura, em sua grande maioria realizados em laboratório e em

escala reduzida, apresentam certa padronização nos procedimentos adotados e técnicas de análises utilizadas (ATIQUE e SANCHEZ, 2011; VARSEI *et al.* 2014; COSTA, 2015; FLEUREAU *et al.*, 2015; ASMA e BAHYA, 2016 ; UMA CHADUVULA *et al.*, 2017; e SILVA, 2018).

No Brasil, há registros de solos expansivos em todas as 5 regiões do país, sendo a região Nordeste a que apresenta maior incidência. Em Pernambuco, os solos expansivos se fazem presentes em mais de 20 municípios do estado. Em Paulista, município integrante da Região Metropolitana do Recife, os estudos relacionados ao solo expansivo do local, proveniente da formação Maria Farinha, vêm desde a década de 1980 (COSTA NUNES *et al.*, 1982), sendo realizadas avaliações de seu comportamento tanto em campo (SILVA, 2001) quanto em laboratório (JUCÁ, 1992; BASTOS, 1994; MORAIS, 2017). Também foram realizados estudos relacionados ao melhoramento da expansividade deste solo utilizando-se de misturas com areia (CAVALCANTI, 2017); cal (PAIVA, 2016) e cinza de casca de arroz (CONSTATINO, 2018).

Neste contexto, este trabalho visa dar continuidade aos estudos com o solo expansivo de Paulista, analisando seu comportamento hidromecânico, sua estrutura, e sua dinâmica de fissuração.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento hidromecânico e a dinâmica de fissuração de um solo expansivo situado no município de Paulista-PE, região Metropolitana do Recife (RMR). Para isso, foi necessário:

- determinar o perfil de solo do local de estudo;
- avaliar as características Físicas, Químicas, Mecânicas e Estrutural das camadas de solo estudadas;
- determinar a relação sucção x umidade do solo;
- analisar a expansividade e compressibilidade do solo, com e sem inundação e para diferentes umidades iniciais;
- colaborar com a elaboração de um aparato que auxilie no acompanhamento do processo de fissuras em solo ao longo do tempo.
- analisar a dinâmica de fissuração do solo em ciclos de secagem, com diferentes umidades inicias, e em ciclos de secagem e inundação, dentro de um mesmo ensaio.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A Dissertação está estruturada em seis capítulos, além de dois apêndices. No Capítulo 1, a introdução, é contextualizado a problemática relacionada aos solos expansivos, tanto durante a expansão (aumento de volume) quanto durante sua contração e fissuração. Além disso, apresenta também os principais objetivos e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 realiza uma revisão de literatura dos principais temas abordados durante este trabalho, sendo recapitulados conceitos fundamentais e consagrados da geotecnia, tais como solos argilosos, passando por solos não saturados, sucção e curva caraterística, expondo ainda sobre os conceitos de solos expansivos e fissuração em solos.

O Capítulo 3 é direcionado a descrição dos materiais e métodos empregados durante a pesquisa. Dessa maneira, foi realizado um apanhado geral desde as caraterísticas do local de coleta das amostras até a explanação de detalhes dos procedimentos de ensaios realizados, em campo e laboratório, além de referenciar as normas utilizadas.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de campo e laboratório, das propriedades Geotécnicas, Químicas, Estruturais e Mecânicas.

O Capítulo 5, por sua vez, descreve o processo de fissuração em solos, sendo subdividido em duas partes. A primeira parte do Capítulo corresponde à metodologia empregada durante a realização dos ensaios de fissuração, mostrando os procedimentos adotados desde a fase de moldagem das amostras, passando pelos ensaios propriamente ditos e os processos de preparação, corte e análise das imagens obtidas. A segunda parte apresenta os resultados obtidos dos ensaios realizados. Durante esta etapa foram realizadas duas formas de análises, a primeira delas comparou a influência da umidade e índice de vazios iniciais das amostras ensaiadas no processo de fissuração do solo durante ciclos de secagem e a segunda analisou o comportamento do solo durante ciclos de secagem e inundações.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas na pesquisa, além de sugestões de aprimoramento das metodologias de ensaio e análise bem como propostas de ensaios para pesquisas futuras.

Esta dissertação apresenta ainda dois apêndices. O Apêndice A contempla os registros dos ensaios preliminares de fissuras, sendo discutidos pontos de suma importância para o aprimoramento da metodologia de ensaio, uma vez que esta foi desenvolvida em conjunto pelos alunos do Grupo de Pesquisa de Solos Não Saturados (GÑSat) na própria Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O Apêndice B mostra a seleção das imagens referentes ao ensaio realizado para ciclos de secagem e inundação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta secção do trabalho visa realizar um embasamento teórico dos principais temas abordados ao longo da pesquisa, recapitulando desde os conceitos fundamentais da geotecnia como os argilominerais, passando por Solos Não Saturados, até chegar nos estudos de fissuras em solos, entre outros aspectos relevantes.

2.1 SOLOS ARGILOSOS

A origem dos argilominerais, e consequentemente dos solos argilosos, está diretamente relacionado ao intemperismo químico dos minerais contidos nas rochas, principalmente o feldspato. Os argilominerais fazem parte da subclasse dos filossilicatos, ou seja, são silicatos que formam lâminas, de baixa dureza, baixa densidade e boa clivagem em uma direção. São constituídos de silicatos hidratados, principalmente de alumínio, sendo sua estrutura atômica formada por folhas de tetraedros de silício e oxigênio - SiO_2, e por folhas de octaedros de alumínio e hidroxila - $Al(OH)_3$, ambas em arranjo hexagonal.

Os principais argilominerais existentes na natureza são: Caulinita; Ilita; e as Esmectitas (no qual abrange as Montmorilonita e as Vermiculitas). Desses três, apenas a Caulinita possui a chamada estruturas 1:1, já as Ilitas e as Esmectitas possuem a chamada estruturas 2:1. A Tabela 1 apresenta a estrutura química dos argilominerais citados.

Tabela 1 - Estrutura Química dos principais argilominerais

Argilomineral	Estrutura
Caulinita	$(OH)_8Al_4Si_4O_{10}$.
Montmorilonita	$(OH)_4Al_4Si_8O_{20}\ nH_2O$
Vermiculita	$(Mg.Ca)_{0,7}(MgFeAl)_{0,6}[(AlSi)_8O_{20})](OH)_4.8H_2O$
Ilita	$(OH)_4K_y(Al_4Fe_4Mg_4)(Si_{8y}Al_y)O_{20}$

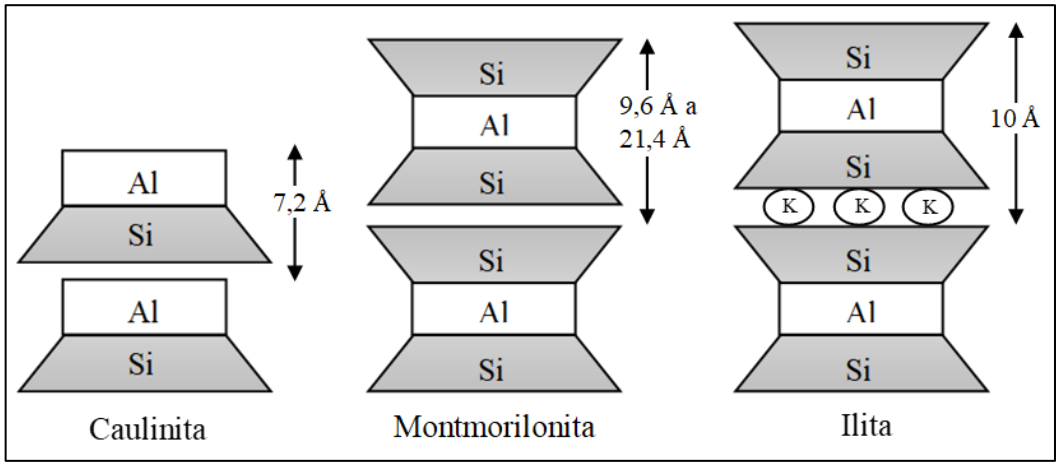
Onde: y = varia de 1 a 15 e n = água intermolecular

Fonte: Housecroft; Sharpe (2013).

Entende-se por Estrutura 1:1 a junção entre uma camada tetraédrica de SiO_4 e uma octaédrica de $Al(OH)_3$. Esta união é realizada por meio de ligações iônicas entre o oxigênio da estrutura tetraédrica com o alumínio da octaédrica, formando assim uma estrutura estável e não expansiva. Estruturas 1:1 apresentam uma distância basal (distância entre as placas) de 7 Å (1 Angstrom Å = 10^{-10} m).

As Estruturas 2:1, por sua vez, são caracterizadas pela união entre uma camada octaédrica de alumina e duas lâminas tetraédricas de silício, propiciando assim uma estrutura instável devido as ligações apolares entre as moléculas. Dessa forma, existe uma maior facilidade para penetração de água entre as camadas, acarretando na hidratação dos cátions e, consequentemente, na expansão do solo quando umedecido. Possuem uma distância basal maior que de 10 Å. Assim, quanto maior a distância basal mais instável é a ligação da estrutura, ou seja, mais expansivo é o solo em questão. A Figura 1 apresenta os tipos de ligações (estruturas) e a distância basal do argilominerais em questão.

Figura 1 - Representação da estrutura dos argilominerais



Fonte: Adaptado de Paiva (2016).

Mitchell (1976) sugere que quanto maior for a porcentagem de argilominerais presente no solo, maiores deverão ser sua plasticidade, seu potencial de expansão e sua compressibilidade, e menores deverão ser seu ângulo de atrito e sua permeabilidade.

Solos argilosos são constituídos, de grãos de pequenas dimensões, cujo diâmetro é menor que 0,002 mm (ABNT NBR 7181/2016), por isso, possuem baixa permeabilidade. A presença deste tipo de solo é algo comum em praticamente todas as regiões do país, em especial na região Nordeste.

A elevada incidência de solos argilosos no Nordeste do Brasil se dá em razão de uma combinação de aspectos como o clima, formações vegetais, formação geológica (tipos de rochas) e conformações do relevo. Solos deste tipo são encontrados do litoral, cujo clima é o tropical úmido e a vegetação nativa é a Mata Atlântica, ao sertão, o qual, possui clima semiárido e a Caatinga como vegetação típica.

2.2 SOLOS NÃO SATURADOS E CURVA CARACTERÍSTICA

Os primeiros estudos acadêmicos relacionados às propriedades mecânicas do solo foram realizados pelo Engenheiro Karl Von Terzaghi, no início do século XX. Tais publicações foram de grande importância no âmbito técnico e acadêmico, sendo algumas delas utilizadas até os dias atuais. Dentre as principais prerrogativas para elaboração de suas teorias, Terzaghi considerava o solo em sua condição saturada, ou seja, com todos os vazios preenchidos por água.

Com o passar dos anos, vários estudos foram sendo desenvolvidos em diversas partes do mundo, inclusive em regiões de clima tropicais, como é o caso do Brasil. Nestas regiões verificou-se que conceitos e teorias iniciais da Mecânica dos Solos Clássica, como o princípio das tensões efetivas para solos saturados, não correspondiam de forma adequada. Burgos e Conciani (2015) relatam a dificuldade de se utilizar a classificação geotécnica convencional em solos tropicais, uma vez que tais teorias não consideraram as peculiaridades que esses materiais apresentam devido ao seu processo de formação, que confere propriedades físicas, químicas, mineralógicas e de estrutura particulares.

Diante dessa nova "realidade" surgiu a necessidade de se elaborar novos conceitos e novas teorias que se aplicassem de modo satisfatórios a essas novas situações, levando à criação da chamada Mecânica dos Solos Não Saturados. Os primeiros estudos relacionados ao comportamento hidromecânico dos Solos Não Saturados vêm desde a década de 1960, sendo a publicação do livro "*Soil mechanics for unsaturated soils*", em 1993, de autoria de Fredlund e Rahardjo, considerado o maior marco acadêmico desta temática.

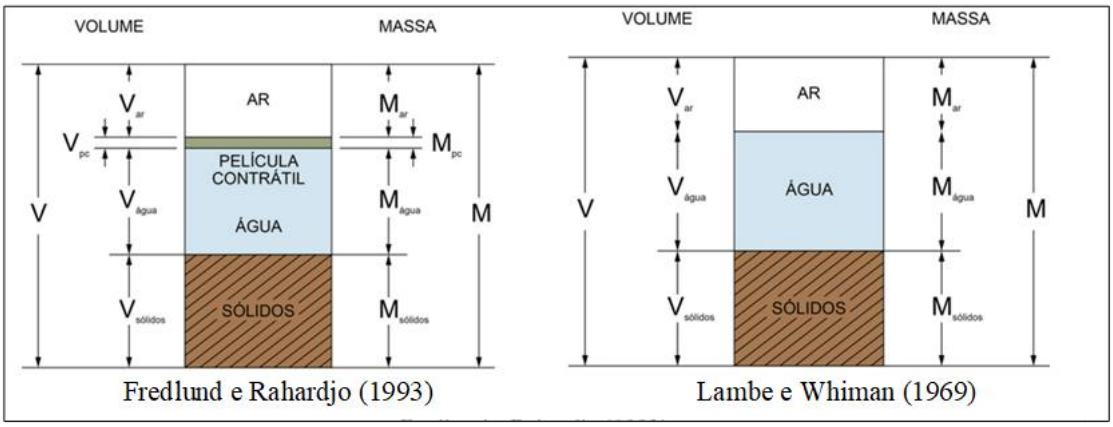
No Brasil, o estudo da Mecânica dos Solos Não Saturados se deu de forma rápida e próspera em praticamente todas as regiões do país. As primeiras publicações dentro desse "novo universo" surgiram ainda na década de 70 (VARGAS, 1973), entretanto, o principal ponto de partida para amadurecimento dos estudos relacionados a esta linha de pesquisa se deu em 1991 com a realização do 1º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, em Brasília. A partir daí, o crescimento dessa temática se deu de forma sólida e acelerada. Atualmente diversas universidades brasileiras contam com grupos de pesquisas específicos na área de Solos Não Saturados, como é o caso da Universidade Federal de Pernambuco.

Dentre os novos conceitos adotados na Mecânica dos Solos Não Saturados, o entendimento sobre sucção se torna primordial. O termo sucção está atrelado a capacidade de um solo de reter ou absorver água. Este parâmetro é de grande importância pois fornece

embasamento para prever as propriedades e características de fluxo e da relação resistência-deformação dos solos.

O entendimento da estrutura de um solo Não Saturado também mudou. Na Mecânica dos Solos Clássicas o solo é composto, basicamente, por duas fases (sólido e líquido) dado que os vazios do solo se encontram totalmente preenchidos pela fração líquida. Já na Mecânica dos Solos Não Saturados o solo é considerado como sendo um sistema trifásico, isto é, constituído de três fases: líquida (água), gasosa (ar) e sólida (partículas de minerais). Este conceito foi proposto inicialmente por Lambe e Whitman (1969), sendo amplamente aceito por diversos outros autores, como é o caso de Alonso et al (1990). Fredlund e Rahardjo (1993), ainda consideraram ainda uma quarta fase independente na estrutura do solo, denominada de interface ar-água (*película contrátil*). Esta interface estaria disposta entre as fases líquida e gasosa dentro da massa de solo. A Figura 2 apresenta os modelos descritos acima.

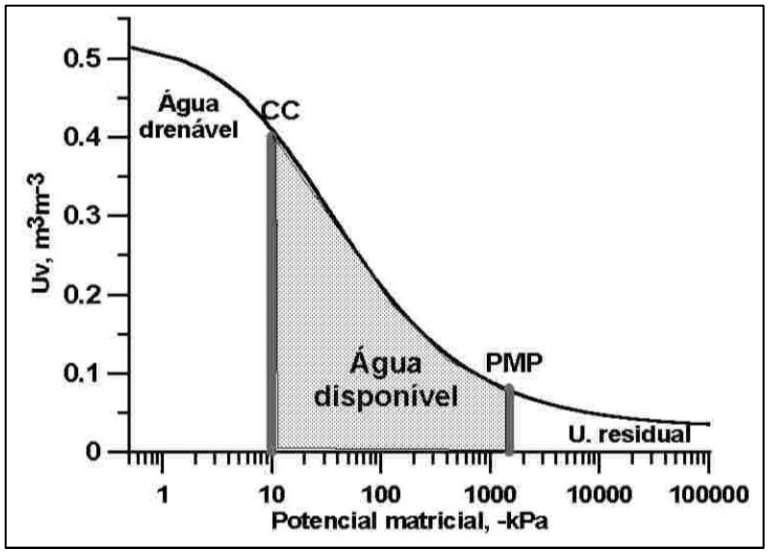
Figura 2 - Modelo simplificado das fases de um Solo Não Saturado



Fonte: Burgos; Conciani (2015).

A sucção é a propriedade do solo que indica a afinidade em reter ou absorver água. Segundo Marinho e Pereira (1998), a definição teórica de sucção seria a pressão isotrópica que a água impõe para absorver mais água. Na prática, esta pressão seria a máxima pressão que o solo pode exercer para absorver a água. No campo da agricultura, o entendimento sobre sucção (água disponível no solo) também existe. Nesta ciência, o estudo da sucção está atrelado a dois importantes conceitos: o de Capacidade de Campo (CC) e o de Ponto de Murcha Permanente (PMP), sendo a diferença de umidade entre eles correspondente à faixa de Água Total Disponível (ATD) de um solo, que pode ser dada em termos percentuais ou em lâmina de água. A Figura 3 apresenta um modelo conceitual de uma curva de retenção de água no solo.

Figura 3 - Modelo conceitual de uma curva de retenção de água no solo



Fonte: Agrosmart (2018).

A sucção é constituída de duas componentes: sucção matricial e sucção osmótica. A sucção matricial corresponde a parte sólida do solo, ou seja, as propriedades físicas e mineralógicas da matriz do solo. Já a sucção osmótica, por sua vez, está relacionada à diferença de concentração química de solutos da água no solo, podendo ser definida como sendo a pressão a qual deve ser aplicada a solução para que o potencial químico da solução seja igual nos diversos pontos do solo. O somatório dessas duas componentes corresponde a sucção total. A Equação 2.1 apresenta a formulação de Sucção Total.

$$S_t = S_m + S_o \quad (1)$$

A sucção matricial é a componente mais importante no que tange as propriedades mecânicas do solo, sendo definida como a parcela de sucção referente à pressão isotrópica negativa da água intersticial do solo devido às forças de capilaridade e de adsorção, as quais dependem da matriz do solo. A Equação 2.2 apresenta a representação da sucção matricial.

$$S_m = (u_a - u_w) \quad (2)$$

A relação entre a umidade e sua respectiva sucção é tão importante para entendimento de comportamento hidromecânico do solo que se faz necessário elaborar uma curva de retenção de água, também chamada de curva característica, com o intuito de obter valores específicos como o de entrada de ar e o da sucção residual.

De forma geral, as curvas características apresentam formatos definidos por parâmetros com significados físicos relativamente bem definidos. Pode-se subdividi-la em três zonas, no qual possuem dois pontos de inflexão.

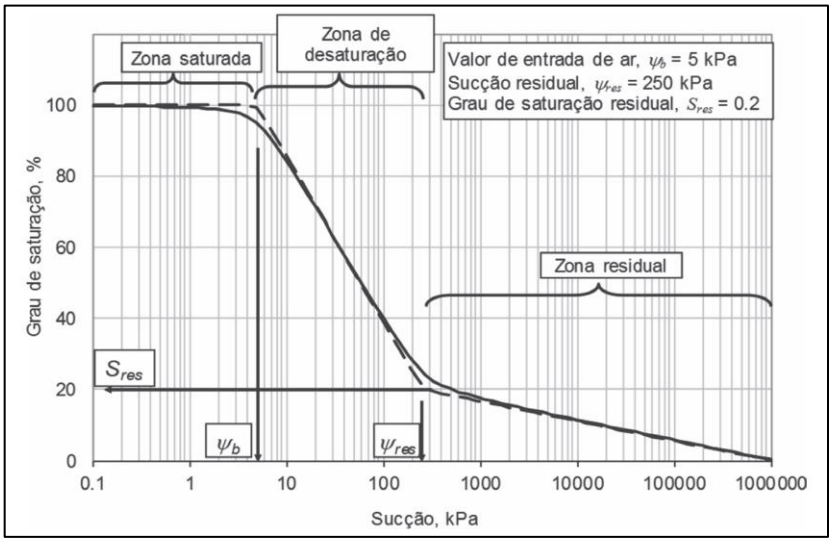
A primeira parte é a Zona de Saturada. Este trecho inicia na sucção zero e estende-se até o ponto conhecido como “valor de entrada de ar”. Este ponto corresponde a máxima sucção que os maiores poros do material são capazes de suportar sem serem drenados, ou seja, até atingir o “valor de entrada de ar” o solo encontra-se saturado.

O segundo trecho é a Zona de Dessaturação. Esta zona corresponde a parte que o solo sofre drenagem sob o efeito de aumento da sucção, sendo tal drenagem possível em termos de fluxo de água líquida, ou seja, a água a ser drenada está em uma condição relativamente livre nos poros do solo. Este trecho inicia-se no “valor de entrada de ar” (grau de saturação = 1 ou 100%) e limita-se até a “Sucção residual” ou “Grau de saturação residual”.

A terceira e última parte é a Zona Residual. Este trecho inicia-se no valor de “Sucção residual” e vai até o solo totalmente seco (grau de saturação = 0 ou 0%). Esta zona corresponde àquela quantidade de água armazenada nos poros do material em condição relativamente menos livre do que a água drenada na forma de fluxo líquido.

A Figura 4 apresenta uma curva caraterística apresentada por Gitirana Junior *et al.* (2015), para fins didáticos. Esta ilustração indica as zonas constituintes de uma curva de retenção e exemplifica numericamente os valores dos pontos de inflexão.

Figura 4 - Parâmetros de uma curva de retenção



Fonte: Gitirana Junior *et al.* (2015).

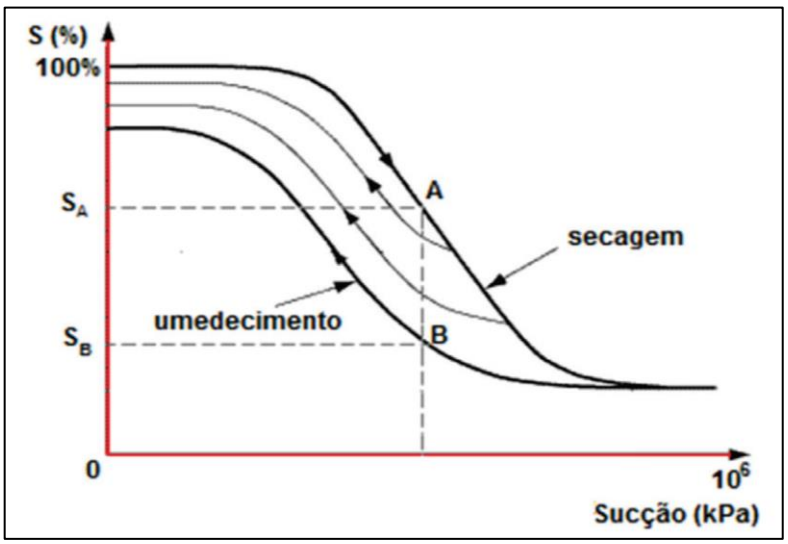
Gitirana Junior *et al.* (2015) alertam que a relação entre a quantidade de água no solo e seu estado de tensão depende de como essas duas grandezas são representadas. Dessa forma, a curva de retenção de um solo apresenta formatos diferentes utilizando-se da umidade gravimétrica ou grau de saturação, e da sucção matricial ou sucção total. Sendo assim, é importante definir como as variáveis de estado serão representadas, com base na finalidade do ensaio e das atividades seguintes.

Outro importante fator a ser considerado durante a elaboração da curva de retenção está relacionado as trajetórias de secagem e umedecimento e o nível de sucção associado a essas trajetórias. Desse modo, a curva de retenção obtida pela trajetória de secagem de uma amostra de solo inicialmente úmida é diferente da curva de retenção obtida pelo umedecimento de uma amostra inicialmente seca, resultando no fenômeno conhecido com histerese. Quanto mais argiloso for o solo, maior o fenômeno da histerese em sua curva.

A Figura 5, apresentada por Marinho *et al.* (2015), ilustram a diferença de trajetórias obtidas por ambos os processos, ou seja, o efeito da histerese. Observa-se que o grau de saturação na trajetória de secagem (Ponto A) é maior que o grau de saturação da trajetória de umedecimento para o mesmo valor de sucção (Ponto B).

Para a elaboração da curva de retenção se faz necessário medir a sucção do solo. Em geral, as técnicas empregadas permitem apenas a medição da sucção matricial e total. Calculando a diferença entre elas, obtém-se a sucção osmótica.

Figura 5 - Efeito de Histerese



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

Marinho *et al.* (2015) relatam de forma detalhada os principais métodos utilizados no Brasil para a medição da sucção do solo. Esses autores reforçam ainda a importância de

compreender a diferença entre processos de medição e imposição de sucção, tipo de sucção medida e tempo de resposta de cada técnica ou sensor utilizado. Vale salientar que as técnicas aplicadas em campo são sempre de medição de sucção, enquanto as utilizadas em laboratório, dependendo do caso, pode ter a imposição ou medição da sucção.

Os métodos de medição de sucção podem ser divididos em dois grandes grupos: Diretos e Indiretos. Nos métodos Diretos a sucção pode ser imposta de forma direta, controlando-se a pressão da água e/ou do ar. São exemplos de métodos diretos: placa de sucção, tensiômetros, centrífuga e membrana de pressão. Já nos métodos Indiretos, para se inferir a sucção é necessário realizar uma calibração prévia de algum outro elemento, realizando assim correlações posteriores, como é o caso das técnicas do dessecador de vácuo, célula de gesso, psicrômetro, papel filtro, condutividade térmica e condutividade elétrica.

A Tabela 2 apresenta um levantamento realizado por Ferreira *et al.* (2015) no qual apresenta os principais métodos existentes na literatura e suas características (princípios básicos, cuidados especiais e referências).

Tabela 2 - Métodos Diretos e Indiretos de medição de sucção

MÉTODO/ TÉCNICA	PRINCÍPIO -CONCEPÇÃO FUNDAMENTAL-	COMPONENTE DE SUCÇÃO/ CAMPO	CUIDADOS	REF. BIBLIO-GRÁFICAS
PLACA DE SUCÇÃO	Baseado no estabelecimento de uma diferença de pressão em uma placa porosa, mediante a aplicação direta de uma sucção na parte inferior, através de uma bomba de vácuo, enquanto a parte superior é mantida à pressão atmosférica.	MÁTRICA 0,0 - 3,0 pF 0,0 - 100 kPa	*Controle de temperatura, principalmente para baixas sucções.	Croney e Coleman (1961), Coleman e Marsh (1961)
TENSIÔ-METRO	O mesmo da placa de sucção. Uma pedra porosa de alta resistência de entrada de ar quando saturada, que, colocada em estreito contato com o solo, propicia uma medida direta de pressão negativa d'água existente nos vazios do solo.	MÁTRICA e TOTAL 0,0 - 4,0 pF 0,0 - 1,0 MPa	*Na escolha da pedra porosa, tem que se levar em conta o diâmetro dos poros. *Limitado o uso em clima semiárido. *Tempo de resposta.	Bocking e Fredlund (1993), De Campos (1994).

CÉLULA DE PRESSÃO	Baseado no princípio de translação de eixos, isto é, em que a fase líquida sofre um aumento de pressão igual à da fase gasosa.	MÁTRICA 0,0 - 5,3 pF 0,0-20,0 MPa	*Controle de temperatura. *Tempo de equilíbrio para baixa umidade pode ser muito grande.	Richards (1980), Ferreira (1995)
DESSECA-DOR DE VÁCUO	Consiste em estabelecer uma condição de equilíbrio entre a amostra de solo e uma solução de sal ou ácido com concentrações conhecidas, que foi previamente introduzida no dessecador.	TOTAL 4,5 - 7,0 pF 3,2 - 1000 MPa	*Controle de temperatura. A superfície da solução deve ser grande para acelerar o processo de transferência de umidade.	Aitchison e Richards (1965), Baker *et al.* (1973), Ferreira (1995)
PSICRÔ-METRO	Determina a sucção do solo através de medidas de umidade relativa do ar existente nos vazios do solo em equilíbrio com a interfase solo-água. O princípio de funcionamento desse equipamento envolve fenômenos de Seebeck e de Peltier, como descreve Presa *et al.* (1988).	TOTAL 3,0 - 5,0 pF 0,1 - 10,0 MPa	*Sensível à variação de temperatura. *Requer longo tempo de equilíbrio	Spanner (1951), Snethen *et al.* (1977), Fredlund e Rahardjo (1993)
PAPEL FILTRO	Consiste em medir a umidade do solo por meio de um potencial de água retido no meio poroso (papel filtro) previamente calibrado.	TOTAL e MÁTRICA 0,0 - 6,2 pF 0,0 - 160,0 M	*Pesagem em balança muito sensível. *Tempo de pesagem. *Tratamento do papel contra fungos.	Chandler e Gutierez (1986), McKeen (1980), Fredlund e Rahardjo (1993) Marinho (1994) Ferreira (1995)

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

Ferreira *et al.* (2015) relatam ainda que em algumas das técnicas, principalmente a do Papel Filtro, pode ser realizar a saturação prévia do corpo de prova e posterior dessecamento. Este processo permite obter os pontos de umidade x sucção do solo de forma mais rápida se comparado ao método do Dessecador de Vácuo, por exemplo. Entretanto, esse procedimento provoca efeito de histerese e, se tratando de solos expansivos, a pré-saturação provoca uma variação volumétrica no corpo de prova (aumento de volume), alterando assim sua estrutura.

Neste caso, o umedecimento da amostra deve ser realizado de forma mais amena, podendo ser feito pelo processo de absorção de vapor e/ou por capilaridade.

Para uma melhor correlação entre os dados obtidos do solo e o formato da curva de retenção de água, vários pesquisadores propuseram ajustes matemáticos de algum tipo de equação aos dados experimentais. Dentre os registros presentes na literatura, o modelo de Van Genuchten (1980) tem sido cada vez mais utilizado. Santos (2015) realiza uma ampla revisão dos autores e modelos utilizados no ajuste da curva de retenção de água no solo.

2.3 SOLOS EXPANSIVOS

Solos expansivos são solos não saturados constituídos de argilominerais de estrutura laminar do tipo 2:1, e que sofrem variação volumétrica (expansão e/ou contração) devido à mudança de umidade/sucção sob tensões praticamente constantes e de forma cíclica.

Ferreira (1995) relata a importância de se entender o significado de expansibilidade intrínseca e extrínseca do solo, uma vez que todo solo pode apresentar aumento de volume (podendo estar saturado ou não e não ser solo expansivo) desde que sofra um alívio de tensão. Neste caso, a expansão do solo ocorreu por um fato externo (expansibilidade extrínseca) e não por propriedades inerentes ao solo (expansibilidade intrínseca – solos expansivos).

A presença de solos expansivos, considerado como problemático do ponto de vista geotécnico, se faz presente nos 5 continentes. Sua ocorrência se dá principalmente em regiões onde a evapotranspiração excede a precipitação e em regiões semiáridas de clima tropical e temperado. No Brasil, os primeiros trabalhos relacionados a solos expansivos são datados da década de 1980 (SIMÕES e COSTA FILHO, 1981), desde então, solos com propriedades expansivas têm sido identificados e estudados em todas as 5 regiões do país.

Dentre as principais problemáticas relacionadas a este tipo de solo, destaca-se a dificuldade de identificar visualmente sua presença. Isso porque métodos tradicionais de investigação em campo, como o SPT, e ensaios de caraterização geotécnica, como granulometria e índices de consistência, não são capazes de identificar com exatidão se um solo é expansivo ou não. Por causa disso, diversos autores propuseram metodologias que pudessem determinar a suscetibilidade da expansividade de um solo, desenvolvendo assim métodos diretos e indiretos de investigação.

Entende-se por métodos diretos aqueles que avaliam o potencial de expansão de um solo por meio de ensaios de laboratório (edométricos) e/ou de campo (placa e/ou Expansocolapsômetro) com inundações. Já os métodos indiretos correlacionam os índices

físicos do solo e seus parâmetros geotécnicos (índices de consistência, textura, pedologia, etc.) com o potencial de expansão do solo.

No que se refere aos métodos indiretos as metodologias mais usuais correlacionam os índices de consistência (LL, LP e IP) com o potencial de expansão do solo. Nos métodos diretos, o mais comum é se utilizar de metodologias que classificam o Grau de Expansividade do solo e os possíveis danos à estrutura com base nos valores de expansão livre do solo e/ou tensão de expansão obtidos. Nota-se que os métodos indiretos não consideram o estado tensional do solo, já a tensão de expansão e expansão "livre", que se baseia nos métodos diretos, dependem do estado tensional (estrutura, umidade e sucção iniciais e tensão externa aplicada). A Tabela 3 apresenta um levantamento realizado por Vilar e Ferreira (2015) no qual constam os principais métodos de investigação de solos expansivos que se têm publicados na literatura.

Tabela 3 - Métodos de identificação de Solos Expansivos

MÉTODOS	SUBDIVISÕES	CRITÉRIO	REFERÊNCIA
INDIRETOS	Identificativos	Difração e raio-X; Microscopia eletrônica de varredura; Análise termodiferencial e Adsorção de etilenoglicol e glicerina	Ayala *et al.* (1986)
		Fisico-quimico	Fink *et al.* (1971)
	Orientativos	Granulometria;Consistência e Índices Físicos e Classificação Geotécnica	Priklonskij (1952); Skempom (1953); Seed *et al.* (1962); Van Der Merwe (1964); Chen (1965);Vijayvervia e Ghazzaly (1973); Rodriguez Ortiz(1975); Cuellar(1978); Daksanamurthy e Raman (1973).
	Qualitativos	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).
	Quantitativos	Expansão Livre e Tensão de Expansão, Ensaios Edométricos Duplos e Simples; Placa; Expansocolapsômetro.	Seed *et al.* (1962); Chen (1965); Vijayverviya 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: Vilar; Ferreira (2015).

Além da análise do comportamento dos solos expansivos por meio de resultados de laboratório, tem-se observado o crescimento da utilização de métodos computacionais para esta finalidade. Análises numéricas conseguem prever, de forma satisfatória, o comportamento desses solos mesmo em condições complexas. Guimarães et al. (2011) relatam da utilização de formulações teóricas acopladas de modo a fornecer um melhor entendimento dos fenômenos térmicos, hidráulicos, mecânicos e químicos que ocorrem em argilas expansivas compactadas.

2.3.1 Solos Expansivos em Pernambuco e no município do Paulista

Ao analisar o cenário nacional nota-se que a Região Nordeste ganha um destaque especial pela elevada incidência de solos expansivos. Isto se deve, principalmente, pelo clima da região e pela geologia do local. Registros de solos expansivos no Nordeste vão desde o Recôncavo Baiano, atravessando o estado de Pernambuco, até chegar ao Ceará.

No estado de Pernambuco, os solos expansivos se fazem presentes do litoral ao sertão. A Figura 6 apresenta um mapa que registra a presença de solos expansivos em Pernambuco.

Figura 6 - Ocorrência de solos expansivos em Pernambuco

Fonte: Adaptado de Ferreira (1995).

Gurgel e Santos Jr. (2016) relatam a presença de solos expansivos no município de Floresta, semiárido pernambucano. Os autores realizaram ensaios de caracterização física em 69 amostras, classificando-as como de médio a alta a suscetibilidade à expansão do solo. Ensaios oedométricos, em amostras indeformadas e compactadas, confirmaram este indicativo,

pois apresentaram potencial expansivo significativos, seja em baixas tensões de inundação (5 e 12,5 kPa) ou em tensões de inundação mais elevadas (100 kPa).

Em Paulista-PE, Região Metropolitana do Recife, observou-se a presença de solos expansivos proveniente da formação Marinha Farinha. Estudos relacionados as propriedades deste solo iniciaram-se em 1982, desde então vários trabalhos acadêmicos vêm sido desenvolvidos. Estudos sobre o comportamento hidro e geomecânico do solo e sobre técnicas de melhoramento de sua expansão, com base em misturas, vêm sido constantemente realizados pelo Grupo de Pesquisa de Solos Não Saturados da UFPE (GÑSat). Pode-se dizer que o solo expansivo de Paulista-PE é um dos solos expansivos mais estudados do Brasil.

Morais (2017) realiza um levantamento dos estudos e publicações sobre solo expansivo de Paulista-PE, até o ano de 2016, apresentando ainda um comparativo entre os resultados de caraterização geotécnica obtidos (Tabelas 4 e 5). É possível observar que alguns dos parâmetros analisados se diferenciam um pouco entre as publicações. Tal diferença se deve, sobretudo, ao ponto de coleta das amostras, uma vez que ao longo dos anos não foi possível realizar as coletas exatamente no mesmo local.

Tabela 4 - Comparativo entre as granulometrias de pesquisas já realizadas em Paulista

Tipo do Solo	Referência					
	Jucá et al (1992)	Bastos (1994)	Justino da Silva (2001)	Santos (2008)	Paiva (2009)	Morais (2017)
Areia	20	20	16	34	22	13
Silte	20	21	27	21	32	37
Argila	60	59	57	44	46	48

Fonte: Morais (2017).

Tabela 5 - Comparativo entre os Limites de Atteberg de pesquisas já realizadas em Paulista

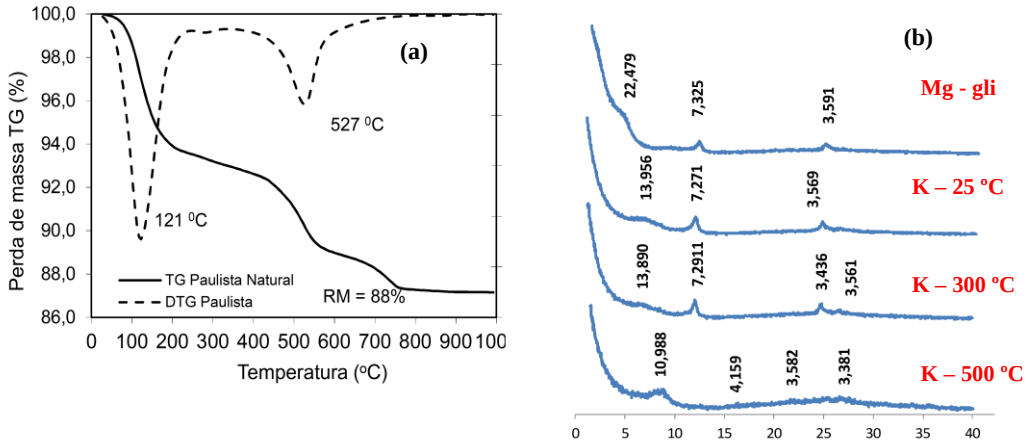
Limite de Consistência	Referência					
	Jucá et al (1992)	Bastos (1994)	Justino da Silva (2001)	Santos (2008)	Paiva (2009)	Morais (2017)
Limite de Liquidez	80	73	81	58	55	61
Limite de Plasticidade	32	35	33	26	28	31
Índice de Plasticidade	48	38	48	32	27	30
Índice de Atividade	0,8	0,64	0,84	0,74	0,59	0,63

Fonte: Morais (2017).

Paiva (2016) realizou análises da mineralogia do solo expansivo de Paulista, verificando assim a presença de mica, de argilomineriais expansivos (esmectita e vermiculitas) e de

Caulinita. A Figura 7 apresenta as curvas da TG (Termogravimetria) e DTG (Termogravimetria Derivada) do solo (a) e o correspondente difratograma de raio-X (b).

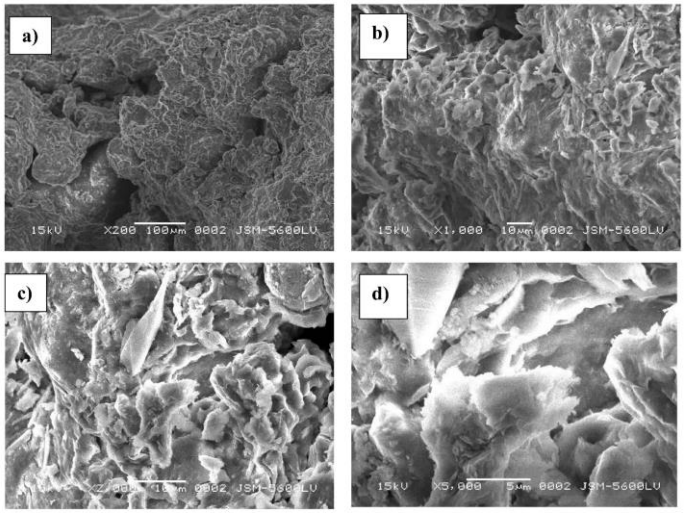
Figura 7 - Curvas da TG e DTG (a) com o correspondente do difratograma de raio-X (b) do solo de Paulista.



Fonte: Paiva (2016).

A Figura 8 mostra o estudo da eletromicrografia de amostras indeformadas de Paulista, também realizado por Paiva (2016), utilizando-se a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Esta análise revelou uma macroestrutura prismática formada por blocos angulares e subangulares. A textura do solo foi caracterizada como textura fina com parte predominante de argilas silicatadas prensadas por cristais de calcitas que compõem grande parte da fração de silte e areia fina. Verificou-se poros aplanados, características típicas de argilas de alta atividade por apresentarem expansão e contração.

Figura 8 - Eletromicrografias do solo de Paulista com aumento de: a) 200 vezes, b) 1000 vezes, c) 2000 vezes e d) 5000 vezes.



Fonte: Paiva (2016)

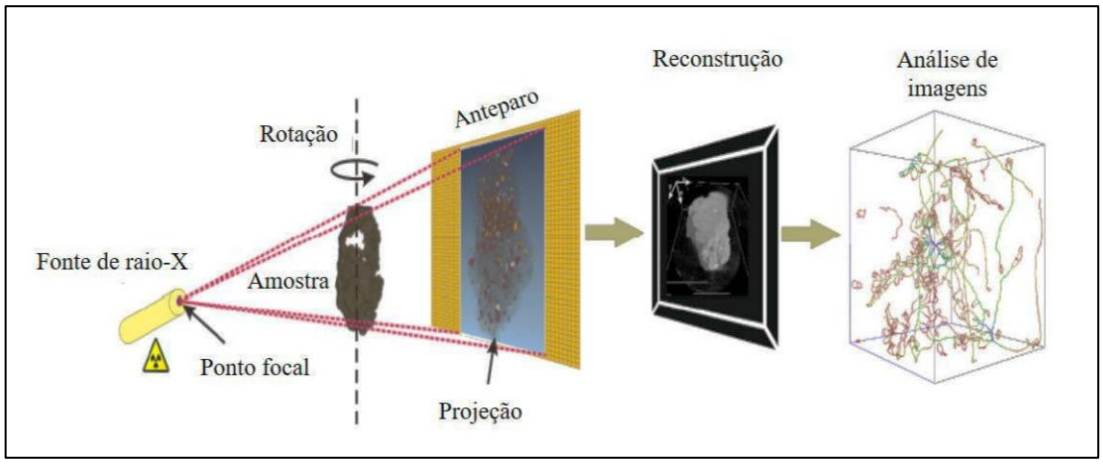
2.4 ANÁLISE ESTRUTURAL DO SOLO POR TOMOGRAFIA

Com o avanço da tecnologia, atrelada a necessidade de resultado cada vez mais precisos, observou-se que a Microtomografia Computadorizada de Raios-X, tradicional equipamento da área médica, passou a ser amplamente utilizado em diversas áreas do conhecimento, entre elas, as áreas agrícola e geotécnica, no estudo solo.

Este tipo de análise consiste em radiografar (indecência de Raio-X) uma amostra de solo para posterior análise (Figura 9). Dessa forma, é possível estudar o espaço poroso do solo de maneira rápida, tridimensionalmente, não destrutiva, e detalhada, auxiliando assim na compreensão da capacidade de condução/retenção de água no solo, entre outros fatores.

Os primeiros estudos de Microtomografia Computadorizada de Raios-x com solo foram realizados no campo da agricultura, sendo datados da década de 1980 (COSTA, 2016). Desde então, os equipamentos e metodologias de ensaio e análise utilizados têm evoluído bastante. Cavalcante *et al.* (2015) relatam a importância da tomografia para o entendimento de fluxos em meio poroso (solo), destacando ainda o método dos Autômatos Celulares como metodologia numérica aplicável nesses casos.

Figura 9 - Sistema de funcionamento do tomógrafo e subsequente reconstrução de imagens.



Fonte: Peth *et al.* (2010).

2.5 FISSURAS EM SOLOS

O processo de fissuração por ressecamento em solos está diretamente associado a perda de umidade e ao aumento da sucção. Este fenômeno pode afetar significativamente geomorfologia do solo, alterando assim suas propriedades hidromecânicas, tais como permeabilidade e resistência. Esse tipo de ressecamento, comum em solos argilosos, ocorre de

maneira natural e é decorrente de variações sazonais do ambiente provocadas pela alternância de períodos secos e úmidos.

O'DOWD, 2003 (apud SILVA, 2017) define fissuras como sendo rupturas localizadas dentro de materiais submetidos a esforços cisalhantes ou de tração. Essas fissuras modificam a geomorfologia do material para adequar-se a um estado de tensões diferente do original. No caso de fissuras por ressecamento em solos argilosos, este processo é devido aos efeitos de tração provocado pela contração do solo por causa da perda de água/aumento da sucção mátrica.

Haines (1923) apud Albrecht e Benson (2001) discorre sobre a dinâmica do fenômeno de ressecamento nos solos compactados. Este processo é dividido pelo autor em duas fases: ressecamento primário e ressecamento residual.

O ressecamento primário inicia-se quando o solo úmido é exposto ao ar, permitindo que a água saia sem que haja a entrada do ar. A variação de volume do material é igual à perda de água, como consequência da não entrada de ar e conservação da massa do sistema fechado. Nessa etapa inicial ocorre a maior parte da variação do volume.

Durante o ressecamento as partículas de solo (parte sólida da estrutura) começam a se tocar propiciando um ajuste das posições dos grãos. A partir deste momento o processo de secagem torna-se mais lento. Nesta fase do ressecamento, denominada de ressecamento residual, a variação volumétrica é pequena, pois o ar que entra no solo e ocupa somente os espaços deixados pela água removida.

Prat *et al.*, 2002 (apud SILVA, 2017) explicam que o início do fissuramento e a sua propagação em solos é um problema complexo que envolve as condições locais, a mecânica do solo e o sistema hidráulico que indica o fluxo de água em meios saturados e não-saturados, bem como a sua interação. Tang *et al.* (2011) também relatam a complexidade deste fenômeno e cita alguns aspetos que influenciam este processo, tais como: Composição mineralógica - em especial a presença de argilominerais expansivos; Quantidade de argila na massa de solo; Variação da sucção; Umidade relativa do ar; Temperatura; Espessura das camadas; entre outros etc.

Shi *et al.* (2013), classificam as variáveis envolvidas no processo de fissuração em dois grupos: as variáveis de natureza interna e as de natureza ambientais. As de natureza interna são propriedades do solo em seu estado inicial, tais como: conteúdo de argilominerais expansíveis; estrutura e Grau de compactação; presença de íons; e coeficiente de Poisson. Já as de natureza dependentes de condições externas ao solo, como a taxa com que a saída de água ocorre (evaporação).

Ciclos de umedecimento e secagem também são relatados na literatura como fatores de influência durante o processo de fissuração do solo.

No Brasil, a ocorrência de rachaduras em solo se dá de forma bastante marcante no sertão Nordestino, em épocas de secas. Este fenômeno também se faz presente em regiões próximas ao litoral, logo após chuvas torrenciais seguidas de dias ensolarados e quentes. Neste caso as fissuras normalmente ocorrem em áreas de topografia levemente mais baixas, propicias a pequenos alagamentos, provocando assim um aumento da umidade do solo naquele local seguida de uma intensa desidratação ao longo do tempo. O tamanho das placas de fissuras pode variar de pouco centímetros a placas de tamanho quase métrico.

2.5.1 Estudo do Processo de Fissuração em Solo

Estudos de fissuras em solo normalmente são realizados em laboratório e em escala reduzida. Tais estudos estão comumente associados a processos de captura e análise de imagens e, por muitas vezes, correlacionadas com modelagens numéricas computacionais. Estas análises permitem, de forma mais minuciosa, uma avaliação dos formatos, quantidade, largura, dinâmica de formação e, em alguns casos, até mesmo da profundidade dessas fissuras.

Apesar de não existir uma normativa nacional ou internacional especifica para esses estudos, observa-se na literatura uma certa padronização entre os autores nas metodologias de ensaios e nos parâmetros analisados.

No que diz respeito aos ensaios de laboratório verifica-se que os autores adotam metodologias análogas entre si, as quais consistem em moldar amostras de solo com a umidade inicial conhecida e registrar, por meio de uma câmera fotográfica/webcam, o processo de secagem e fissuração do solo.

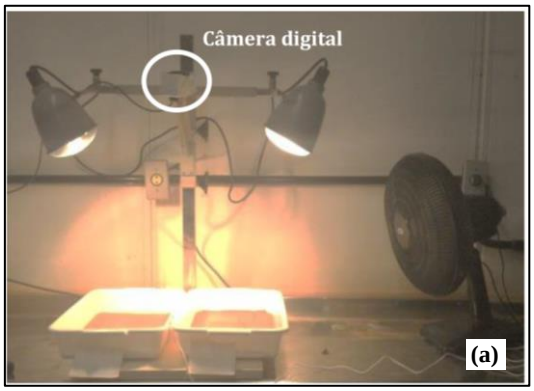
Ao longo do ensaio o corpo de prova é pesado (podendo ser em tempos pré-determinados ou colocado em cima de uma balança durante todo o ensaio) de modo a se obter o peso do conjunto e, consequentemente, a umidade correspondente aquele momento. O ensaio pode ser realizado com temperatura ambiente ou ainda de forma acelerada (com aquecimento). Os moldes utilizados podem ser de formato circular ou quarado/retangular, feitos de vidro ou metálico, de dimensões e medidas diversas.

Tran *et al.* (2018) descrevem com detalhes os procedimentos de ensaios de fissuras adotados por ele, relatando sobre a potência da lâmpada utilizada (500 W) e a distância entre ela e o corpo de prova (1000 mm); a referência da câmera usada (Nikon D5100) e do intervalo de tempo entre as fotos (a cada 15 min); da utilização de dispositivos de vibração para remover

as bolhas de ar da amostra; da utilização de um sensor próximo a amostra a fim de medir, de forma contínua, a temperatura do ambiente e a Umidade Relativa do Ar (URA); e da utilização de uma balança de 0,001 g de precisão.

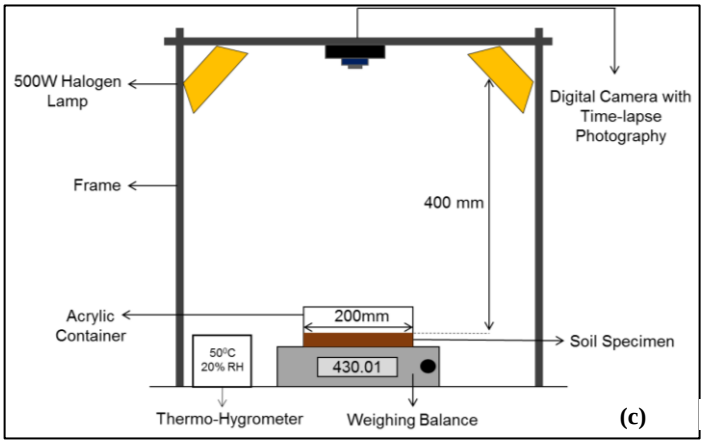
A Figura 10 apresenta os aparatos desenvolvidos por Costa, 2015 (a); por Asma e Bahya, 2016 (b); por Uma Chaduvula *et al.*, 2017 (c); Varsei *et al.*, 2014 (d) e por Fleureau *et al.*, 2015 (e) para a realização estudos e ensaios de fissuras em laboratório.

Figura 10 - Aparatos desenvolvidos para ensaios de fissuras.

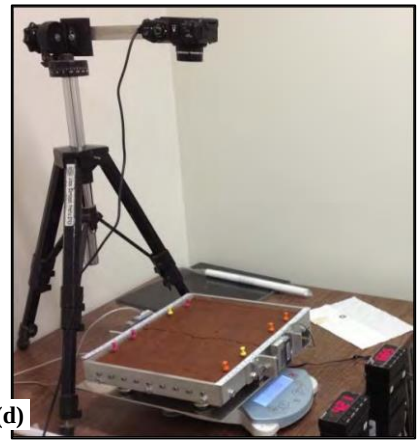


Costa (2015).

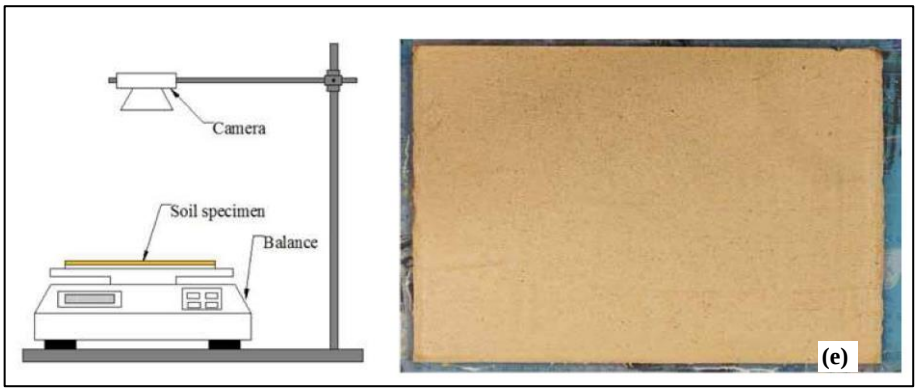
Asma e Bahya (2016).



Uma Chaduvula *et al.* (2017).



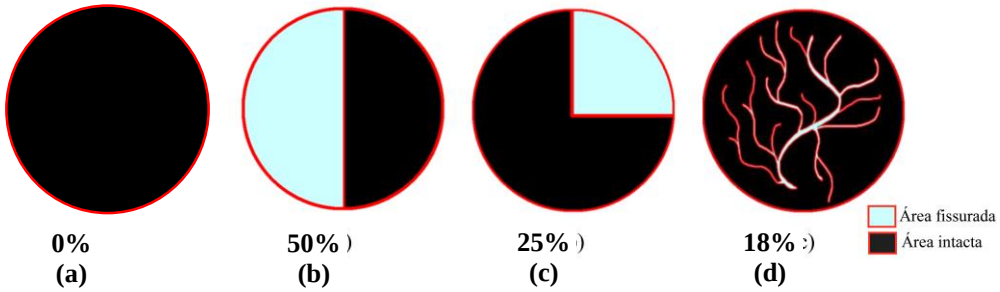
Varsei *et al.* (2014).



Fleureau *et al.* (2015).

Durante o processo de análise de imagens, o parâmetro CIF (sigla em inglês que representa o termo: *Crack Intensity Factor)* ganha destaque pela importância e praticidade de sua obtenção. Este parâmetro representa a razão entre a área fissurada e a área total da superfície da amostra. Para a obtenção desse e de outros parâmetros, verifica-se na literatura a utilização de softwares como o MATLAB® (Atique e Sanchez, 2011, e Silva, 2017) e VIC-2D (Fleureau *et al.*, 2015). A Figura 11 ilustra de forma didática o entendimento sore o parâmetro CIF.

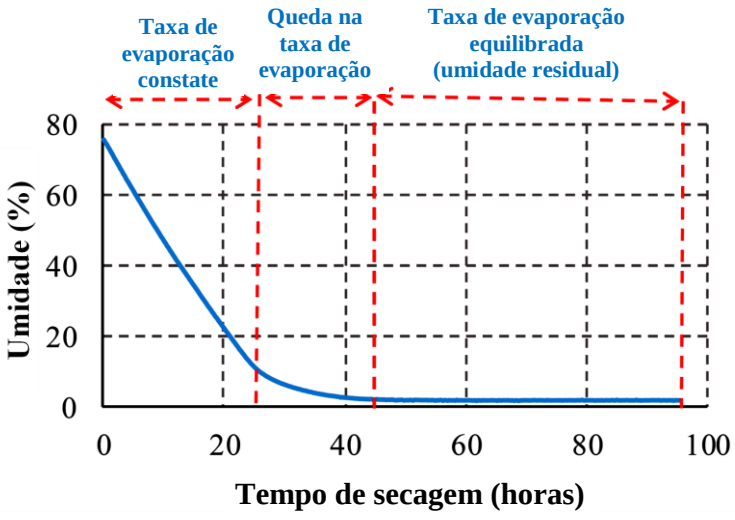
Figura 11 - Conceito de CIF.



Fonte: Adaptado de Silva (2017).

Outro importante dado a ser obtido é a curva umidade da amostra x tempo de ensaio. Tran *et al.* (2018) relatam que a elaboração desta curva permite observar com clareza 3 estágios de evaporação, sendo o primeiro trecho considerado uma constante, o segundo uma faixa de transição cuja velocidade de evaporação cai consideravelmente, e o terceiro e último trecho corresponde a uma umidade residual. A Figura 12 exemplifica a curva descrita acima.

Figura 12 - Curva Umidade x Tempo e os 3 trechos referentes a taxa de evaporação.



Fonte: Tran *et al.* (2018).

Ainda sobre a relação Umidade x tempo, Trabelsi *et al.* (2018) propuseram um modelo analítico, utilizando-se da função erro complementar, para prever o comportamento da perda de água do solo ao longo ensaio (Equação 2.3). Este modelo foi empregado pelos próprios autores nos resultados de ensaios de fissuras, tanto em amostras reforçadas com fibras quanto em amostras sem reforço, sendo verificada uma boa correlação da curva do modelo com os resultados obtidos experimentalmente.

$$W_{(t)} = (W_0 - W_r) * \text{erfc}\,(t/T_0) + W_r \quad (3)$$

Onde: W(t): Umidade para aquele momento;

W_0: Umidade inicial;

W_r: Umidade residual;

erfc: Função erro complementar;

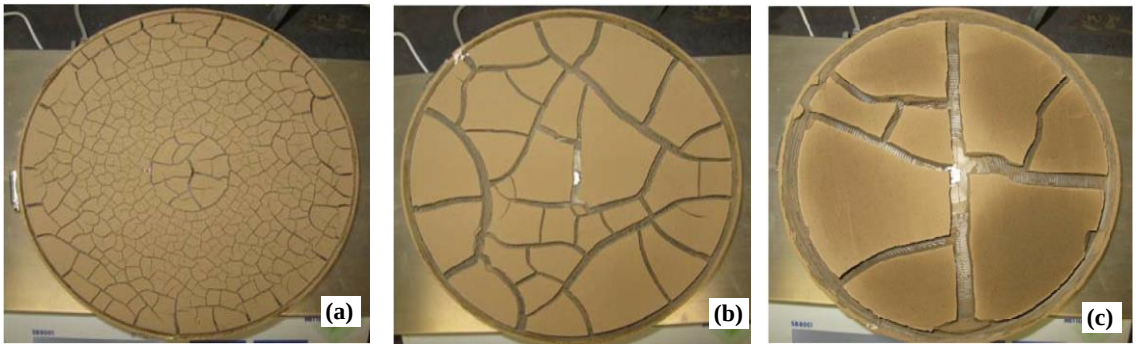
t: Tempo total do ensaio (em horas);

$T_{0:}$ Tempo correspondente a umidade residual (em horas).

Sobre os principais fatores de influência observados em um ensaio de fissura em solo, a espessura da camada ganha destaque especial. Quanto maior a espessura da camada, mais demorado é o processo desidratação e, por consequência, menor a intensidade de fissuras nas amostras, se comparado a outra de menor espessura.

Atique e Sanchez (2011), realizaram ensaios de modo a verificar apenas a influência da espessura da camada de solo no processo de fissuração, para isso utilizaram um solo classificado como sedimentos inorgânicos de alta compressibilidade e argila orgânica (LL:55% e IP:19%), proveniente da região de Bojonegoro, Indonésia. Esses ensaios foram realizados em placas circulares, variando apenas a espessura da camada de solo: 5 mm, 10 mm e 20 mm. Os resultados mostraram a forte influência desse fator na dinâmica e intensidade de fissuração (Figura 13). Enquanto o ensaio cuja espessura de camada foi de 5 mm apresentou, como resultado final, um CIF e uma largura média entre as fissuras de 21,43% e 1,36 mm respectivamente, o ensaio de espessura da camada de 20mm apresentou um CIF e uma largura média entre as fissuras de 11,18% e 7,10 mm. Além disso, foi constado que quanto mais espessa a camada de solo, mais demorada e menor a umidade para o aparecimento das primeiras fissuras.

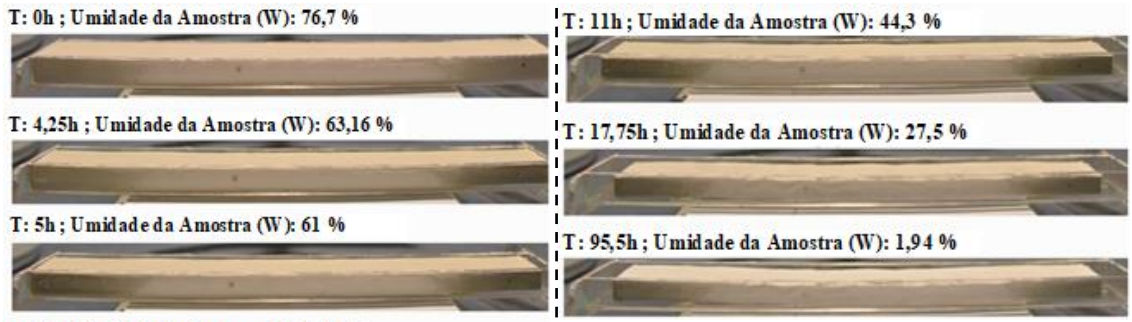
Figura 13 - Resultado de fissuras nos moldes com espessura de 5 mm(a), 10 mm(b) e 20 mm(c).



Fonte: Atique; Sanchez (2011).

Tran et al. (2018) realizaram ensaio para verificar apenas o comportamento do solo durante a contração, sem que haja fissuração. Para isso foi utilizada uma argila de alta compressibilidade (CH), moldada com a umidade inicial de 75,7% (equivalente a 1,35 do Limite de Liquidez do solo em questão). Esse ensaio foi realizado em um molde retangular, sendo a forma untada antes da moldagem da amostra. Concluíram que, com o passar do tempo e com a perda de umidade do solo, a amostra sofreu contração em todas as direções, sendo o encolhimento mais evidente na horizontal e no sentido do maior lado do molde. Além disso, pôde-se observar que as bordas da amostra são levantadas, sendo seu desenvolvimento realizado de forma progressiva até atingir sua elevação máxima e, em seguida, recuam para a uma posição estável. A Figura 14 mostra a evolução do ensaio ao longo do tempo.

Figura 14 - Processo de contração de argila simples

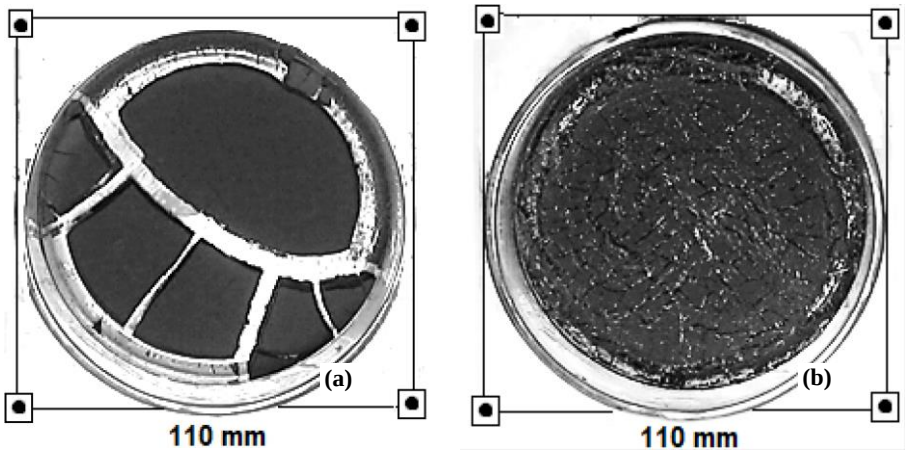


Fonte: Adaptado de Tran *et al.* (2018).

De forma a minimizar a incidência de fissuras, observa-se a utilização de fibras misturadas na massa de solo. Tais fibras, naturais ou sintéticas, possuem elevada resistência a tração combatendo assim ao aparecimento de fissuras do solo durante o processo de secagem/contração. Dentre as variáveis observadas neste contexto, nota-se que o material, a quantidade, o formato e o comprimento das fibras influenciam no processo de fissuração.

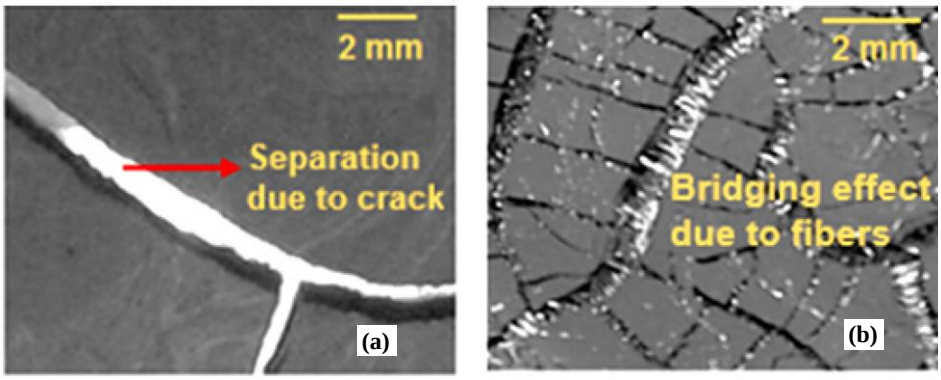
Uma Chaduvula *et al.* (2016) realizaram ensaios de fissuração, em laboratório, em um solo um argiloso de alta plasticidade (CH; LL: 87% e IP:49%) proveniente da cidade de Nanded, Índia, de modo a verificar a influência da adição de fibras sintéticas de PET. Tal estudo comprovou que o reforço provocado pelas fibras alterou significativamente a morfologia das trincas e dinâmica de fissuração do solo. O solo não reforçado apresentou fissuras uniformes, longas e grossas, já o solo reforçado apresentou uma menor intensidade de fissuras e de maneira não uniformes. Além disso a adição de fibras retardou o aparecimento de fissuras na massa de solo. A Figura 15 e 16 apresentam um comparativo, em escala macro e micro, dos resultados obtidos entre solos ao final de teste de dessecação

Figura 15 - Comparativo, em escala macro, dos resultados obtidos entre solos não reforçados (a) e reforçados com fibras (b) ao final de teste de dessecação



Fonte: Uma Chaduvula *et al.* (2016).

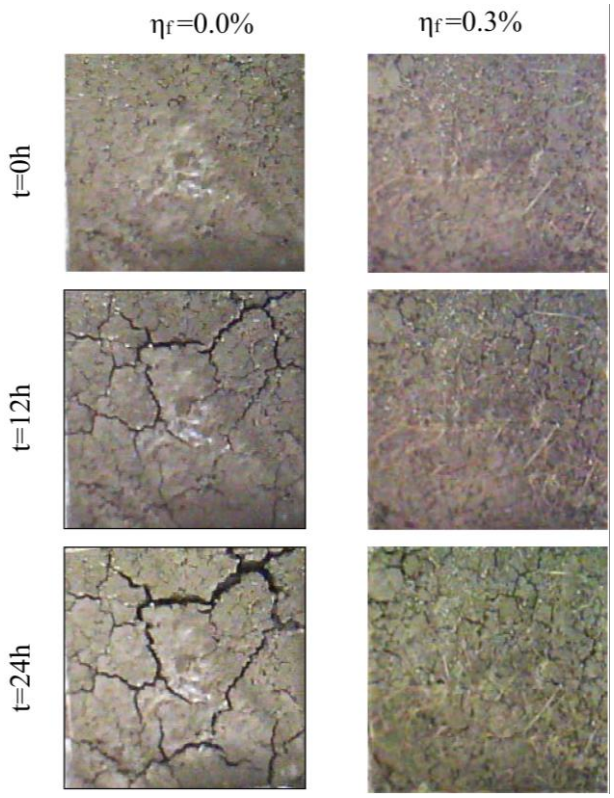
Figura 16 - Comparativo, em escala micro, dos resultados obtidos entre não reforçados (a) e reforçados com fibras (b) ao final de teste de dessecação.



Fonte: Uma Chaduvula *et al.* (2016).

Costa (2015) e Trabelsi *et al.* (2018) também realizaram estudos comparativos do processo de fissuração em solo puro e reforçado com fibras. Ambos os trabalhos chegaram a conclusões praticamente idênticas ao de Uma Chaduvula *et al.* (2016), no qual verificaram que no solo puro as fissuras se propagam de maneira mais rápida, além de serem mais longas, mais largas e de maior intensidade, se comparadas ao solo reforçado. A Figura 17mostra uma comparação visual entre a dinâmica de fissuração do solo puro (sem reforço - η_f = 0,0 %) e do solo reforçado (η_f = 0,3 %) obtidas por Trabelsi *et al.* (2018).

Figura 17 - Comparativo das dinâmicas de fissuração do solo puro (η_f = 0,0 %) e do solo reforçado (η_f = 0,3 %).



Fonte: Trabelsi *et al.* (2018)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão abordadas os materiais e métodos utilizados ao longo da pesquisa, desde os procedimentos de coleta de material e ações em campo, até os ensaios realizados em laboratório, incluindo metodologias específicas no âmbito de solos não saturados e expansivos. No Capítulo 5 será apresentada a montagem do aparato bem como a metodologia utilizada para avaliar o processo de propagação fissuras.

A Tabela 6 apresenta um resumo dos ensaios realizados e correspondentes laboratórios.

Tabela 6 - Relação dos ensaios realizados e correspondentes laboratórios.

ENSAIO REALIZADOS	LABORATÓRIO/INSTITUIÇÃO
Caracterização Física do Solo	Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE (LSI/UFPE)
Análise Estrutura do Solo	Departamento de Energia Nuclear da UFPE (DEN/UFPE)
Análises Químicas	Laboratório de Análises Químicas da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP)
Curva Característica	Laboratório de Solos Não Saturados da UFPE (ÑSat/UFPE)
Compressibilidade e Expansividade	Laboratórios de Solos e Instrumentação e de Solos Não Saturados da UFPE (LSI e ÑSat/UFPE)
Resistência ao Cisalhamento	Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE (LSI/UFPE)

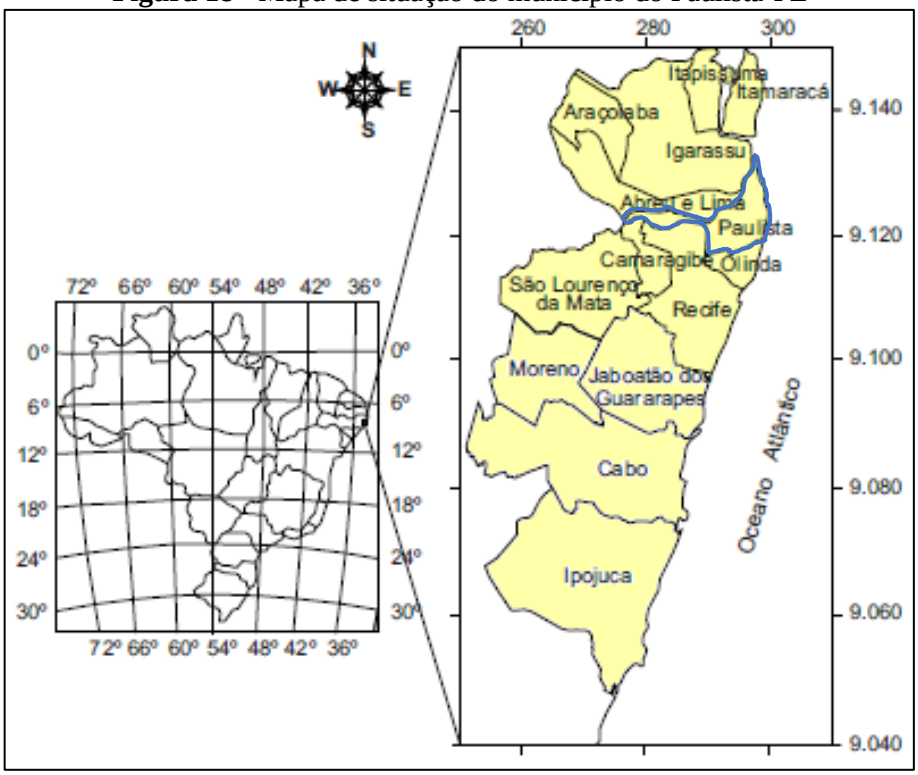
3.1 LOCAL DE ESTUDO E COLETA DE AMOSTRAS

O local de estudo está situado no município do Paulista-PE, cidade integrante da Região Metropolitana do Recife (RMR). Esse município, cuja extensão territorial abrange uma área de 96,846 km² (IBGE, 2018), possui clima tropical quente e úmido, sendo classificado como *Am* de acordo com os critérios de *Köppen e Geiger*. Possui temperatura média anual em torno dos 26 °C. e pluviosidade média anual de 1819 mm (Climate-Data.org, 2019). A Figura 18 apresenta um mapa de situação do município em questão.

O município do Paulista está inserido geologicamente na Bacia do Paraíba, sendo a Formação Barreiras a formação geológica predominante no município, algo bastante típico nas regiões do litoral nordestino. Existem ainda áreas com afloramento das Formações Gramame,

Beberibe e Marinha Farinha, sendo esta última a formação geológica do local da coleta das amostras.

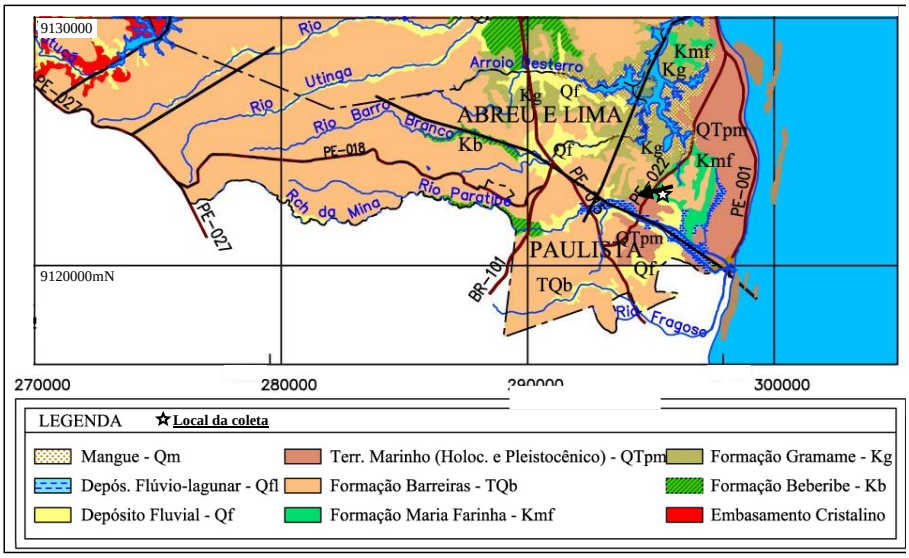
Figura 18 - Mapa de situação do município do Paulista-PE



Fonte: Adaptado de Researchgate.net (2019).

De acordo UFPE-LGGM (1992), a Formação Maria Farinha é de idade Terciária (Paleoceno-Eoceno) e apresenta-se como uma sequência sedimentar negativa, incompleta, característica do início de regressão marinha. Tem espessura máxima de 35 m e é constituída de calcários detríticos cinzentos e cremes, com intercalações de níveis argilosos cinzentos, os quais se tornam mais arenosos à medida que se aproximam do topo da formação, onde são dolomíticos. Este depósito, assim como a Formação Gramame, tem sido explorado pela indústria da região devido a elevada presença de calcário, matéria-prima na produção de cimento e cal. A Figura 19 apresenta um mapa geológico da região de Paulista e adjacências e o local da coleta.

Figura 19 - Mapa geológico da região de Paulista e adjacências.



Fonte: Adaptado de UFPE – LGGM (1992).

Os trabalhos em campo e as coletas das amostras foram realizados dentro da área de operação da Estação de Tratamento de Esgoto Janga (ETE Janga), localizada no bairro Maranguape II, nas proximidades da rodovia PE-22. Em campo realizou-se escavação manual de uma cava com medidas de 1,30 x 2,30 m, e profundidade de 1,40 m, possibilitando assim a coleta de 3 blocos indeformados com 0,40 m de aresta, e amostras amolgadas. Foi utilizado pá, enxada e chibanca, tanto na escavação da cava quanto na moldagem e coleta dos blocos. A Figura 20 apresenta a sequência de trabalho, desde a escavação (a), moldagem do bloco (b) e preparação do bloco para retirada – colocação de parafina (c).

Figura 20 - Trabalho em campo – escavação da vala e coleta dos blocos.

Fonte: O Autor (2019).

O procedimento de coleta dos blocos foi realizado segundo recomendações da NBR 9604/2016 e das orientações sugeridas por Ferreira et. al (2015). Utilizou-se de papel filme, papel alumínio, talagarça (tecido) e parafina, para envolver bloco de modo a preservar sua umidade de campo bem como caixas de madeira e serragem para proteção da amostra durante o processo de transporte e armazenamento. A profundidade de topo dos blocos foi -1,00 m a contar do nível do terreno. Todos os blocos coletados seguiram os mesmos procedimentos.

Realizou-se ainda coleta de amostras amolgadas a partir da cota -0,80 m até a cota -1,40 m (cota do fundo do bloco/limite da escavação da cava). Este material foi armazenado e transportado em sacos de nylon, revestidos internamente por sacos plásticos (sacos de lixo) cuja finalidade foi evitar a perda material fino além de preservar ao máximo a umidade em campo. Todo o material coletado foi transportado e armazenado no Laboratório de Solo e Instrumentação da UFPE (LSI/UFPE).

3.1.1 Perfil Sucção x Umidade em campo

Em campo, realizou-se uma perfuração manual com auxílio de um trado, cuja finalidade foi coletar amostras amolgadas ao longo da profundidade, possibilitando assim determinar o perfil geotécnico do terreno, além do perfil Sucção Umidade.

A perfuração foi realizada no mês de agosto de 2018, sendo verificada uma precipitação acumulada de 3,2 mm de chuvas nas 72h que antecederam a perfuração, segundo dados da Agência Pernambucana de Águas e Climas - APAC (Posto Paulista – Código 451).

As amostras foram coletadas nas seguintes profundidades: 0,10 m; 0,20 m; 0,40 m; 0,60 m; 0,80 m; 1,00 m; 1,50 m; 2,00 m; 2,50 m; 3,00 m; 3,50 m; 4,00 m; 4,50 m e 5,00 m. A Figura 21 (a) e (b) apresenta o local da realização da perfuração e a profundidade limite.

O perfil geotécnico do terreno foi determinado de forma táctil visual e com o respaldo dos resultados dos ensaios de caracterização – realizados posteriormente em laboratório. Em campo foram identificadas cinco camadas de solo, sendo coletados material em todas elas.

Figura 21 - Escavação a trado manual - Perfil Sucção x Umidade.

Fonte: O Autor (2019).

A umidade do solo foi determinada pelo método da estufa. Neste caso, o material coletado era colocado em cápsulas de umidade. Essas cápsulas eram tampadas, envoltas com papel filme e papel alumínio e armazenadas em um isopor termicamente isolado até a chegada no LSI/UFPE onde eram pesadas e colocadas na estufa. Após 24 horas de secagem, as cápsulas eram pesadas novamente, possibilitando assim a determinação das umidades do solo.

A sucção total do solo foi determinada pelo método do Papel Filtro, segundo metodologia proposta por Marinho (1995). Em campo, os torrões de solo eram desfeitos manualmente e colocados dentro de potes plásticos, previamente identificados, contendo um papel filtro em seu interior. Após a colocação do solo nos potes estes eram tampados e armazenados dentro de um isopor termicamente isolado até a chegada no LSI/UFPE onde eram dispostos em uma bancada para aguardar o tempo de equalização do papel com o solo. Após 07 (sete) dias de equalização, o papel filtro era pesado em uma balança de precisão de 0,0001 g e em seguida era colocado na estufa para secagem (T ≥ 105 ºC). Após 24 horas de secagem, o papel era pesado novamente, deste modo, em metodologia análoga a utilizada para determinação da umidade do solo, pode-se obter a umidade do papel filtro pós-equalização. Utilizando-se dos valores de umidade do papel e das equações de calibração de Chandler *et al.* (1992) – Equações 3.1 e 3.2, obteve-se a sucção do solo para aquela umidade.

Para $w_{papel} \leq 47\% \Longmapsto S(kPa) = 10^{4,84-0,066*w(\%)}$ (4)

Para $w_{papel} > 47\% \Longmapsto S(kPa) = 10^{6,05-2,48*\log(w\%)}$ (5)

Todo o manuseio do papel filtro (em campo e em laboratório) foi realizado com auxílio de pinças metálicas, dessa forma não houve contato do papel filtro com os dedos. O papel filtro utilizado foi o Whatman 42 de 55 mm de diâmetro.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Serão apresentados os métodos utilizados para obtenção das características Físicas, Químicas e Mecânicas do solo, além dos ensaios para determinação da sucção e determinação da curva característica.

3.2.1 Ensaios Físicos

Utilizou-se as seguintes metodologias de análises.:

3.2.1.1 Caracterização Física do Solo

Foram realizados ensaios de caracterização Física dos solos em todas as camadas do perfil. Para isso utilizou-se das seguintes Normas Brasileiras:

- Preparação para ensaios de compactação e caracterização - ABNT NBR 6457/2016;
- Análise granulométrica conjunta – ABNT NBR 7181/2016;
- Densidade real dos grãos – ABNT NBR 6508/2016;
- Limite de contração – ABNT NBR 7183/2016;
- Limite de plasticidade – ABNT NBR 7180/2016;
- Limite de liquidez – ABNT NBR 6459/2016;
- Compactação dos solos – ABNT NBR 7182/2016.

Os ensaios de granulometria foram realizados com e sem o uso do defloculante. Os ensaios de Limites de Consistência e Compactação da segunda camada (de - 0,10 a - 2,00 m) foram realizados com e sem secagem prévia e destorroamento. Esta medida foi adotada de modo a verificar a influência do processo e secagem no comportamento do solo uma vez que, por se tratar de solos expansivos, o procedimento de secagem acarretaria em perturbações na estrutura do solo.

3.2.1.2 Análise da Estrutura do Solo

A avaliação da estrutura do solo foi realizada em amostra indeformada da Camada II (de - 0,10 a - 2,00 m) do perfil. O equipamento utilizado foi o microtomógrafo de raios-X de terceira geração, modelo NIXON XT H 225 ST.

A amostra foi moldada em um tubo de PVC com diâmetro e altura de 75 mm. A utilização deste material e de suas dimensões foi referenciada pelo próprio laboratório. Após a moldagem, Corpo de Prova (CP) era envolto em papel filme e alumínio e acondicionado em um isopor isolado termicamente até a realização do ensaio.

O mesmo CP foi ensaiado duas vezes. Na primeira delas foi realizada uma análise em seu estado natural, de modo a verificar as condições de campo do material. A segunda análise ocorreu após uma inundação total do material durante 48 horas, forçando assim uma expansão no solo. Dessa forma, pôde-se comparar, de forma direta, os efeitos que a expansão do solo provoca em sua micro e macro estrutura.

A inundação da amostra foi realizada dentro de um recipiente plástico e com água destilada, utilizando-se ainda de um relógio comparador, de sensibilidade igual a 0,01 mm, para verificar a expansão do solo ao longo do tempo. Na base do Corpo de Prova foram colocados uma perda porosa e um papel filtro de modo a permitir a entrada e percolação de água por baixo. Na parte de cima, foi colocada uma placa de plástico, de diâmetro inferior ao do CP, de modo a evitar contato pontual entre a ponta do relógio comparador e o solo.

No Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X, a amostra era fixada na base metálica específica. Após isso, já com parâmetros de escaneamento previamente determinados, o Corpo de Prova era colocado dentro do tomógrafo e iniciava-se o ensaio. A captura das imagens ocorria de forma automática e, ao fim do ensaio, todas elas eram transferidas para o servidor do laboratório.

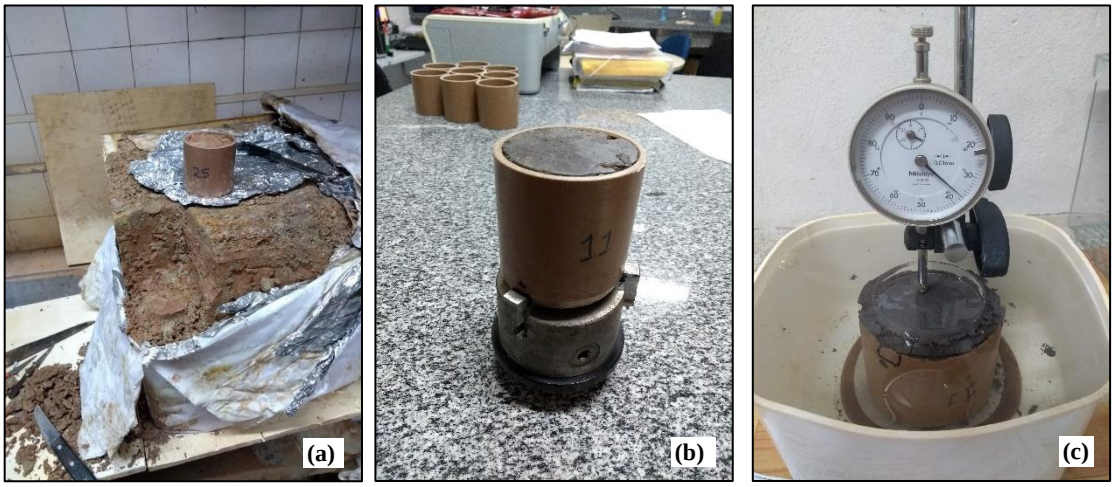
O volume de solo analisado refere-se a parte mais central da amostra. Essa medida foi adotada de modo contornar eventuais problemas referentes ao amolgamento da amostra, provocada pelo processo de preparação e moldagem, além de evitar interferências devido a mudança de material, do molde plástico com o solo.

Os parâmetros utilizados no escaneamento, para o processo de aquisição de imagens, foram: tensão de 160 kV, corrente de 180 μA e filtro de cobre com espessura igual a 0,5 mm. Tais parâmetros foram indicados pelo próprio laboratório de modo a melhor se adequar com a densidade e propriedades do solo ensaiado.

As análises e compilações das imagens geradas pela tomografia foram realizadas utilizando o software livre ImageJ. Referências sobre o software e sua utilização são explicados de forma bastante detalhada na dissertação de Costa (2016), desenvolvida na própria UFPE.

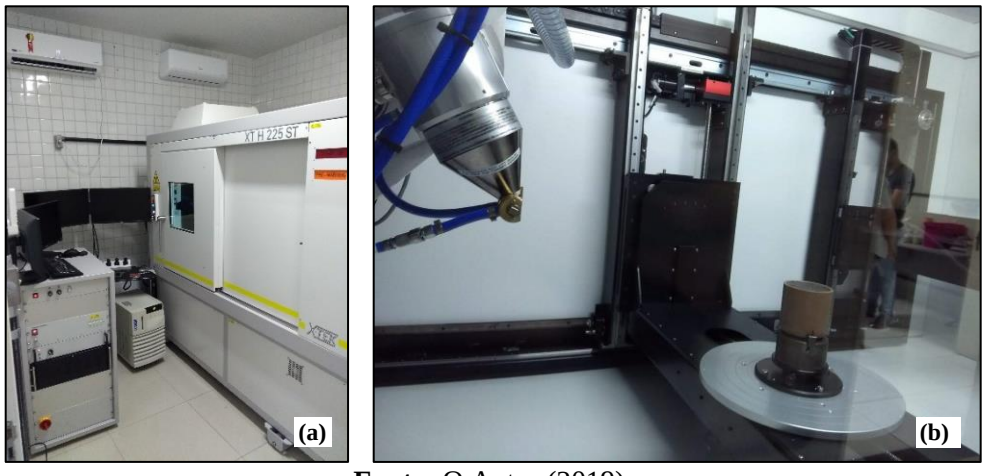
A Figura 22 ilustra os procedimentos de moldagens, inundação e acompanhamento da expansão da amostra. A Figura 23, por sua vez, apresenta o equipamento utilizado e o CP durante o processo de escaneamento.

Figura 22 - Moldagem do Corpo de Prova (a); Corpo de Prova na base metálica do tomógrafo(b); e inundação do Corpo de Prova (c).



Fonte: O Autor (2019).

Figura 23 - Equipamento utilizado na Tomografia Computadorizada (a); e Corpo de Prova em processo de escaneamento (b).



Fonte: O Autor (2019).

3.2.2 Ensaios Químicos

A caracterização Química foi realizada para a segunda camada (de -0,10 até -2,00 m) do perfil. A metodologia dos ensaios seguiu as orientações e diretrizes do Manual de Métodos de Análise de Solos (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Cada resultado foi obtido a partir de uma determinação realizada em triplicata e a diferença entre as determinações não deveria ultrapassar 0,1% do valor relacionados à titulação. Com repetições das análises até que os resultados ficassem dentro do limite de tolerância.

Foram determinadas as seguintes análises em cada solo com o intuito de verificar a qualidade do solo e a susceptibilidade à expansão:

1. Potencial hidrogeniônico em água $pH\mathrm{H_2O}$;
2. Potencial hidrogeniônico em cloreto de potássio $pHKCL$;
3. Potencial hidrogeniônico em cloreto de cálcio $pHCaCl_2$;
4. Matéria orgânica (g/kg) solo;
5. Alumínio extraível (meq $Al^{3+}/100g$ solo);
6. Cálcio trocável (meq $Ca^{2+/}100g$);
7. Magnésio trocável (meq $Mg^{2+}/100g$);
8. Sódio trocável (meq $Na^{+}/100g$);
9. Potássio trocável (meq $K^{+}/100g$);
10. Percentual de Saturação de Sódio (n);
11. Soma de cátions (S);
12. Hidrogênio (H^{+});
13. Capacidade de troca de cátions (T ou CTC meq/100g solo);
14. Percentagem de saturação de bases (% V);
15. Percentual de Saturação de Alumínio (n).

3.2.3 Curva Característica

A curva de retenção de água, desenvolvida para amostras indeformadas da Camada II (de -0,10 até -2,00 m), foi gerada através de resultados obtidos por dois métodos: Papel Filtro e Dessecador de Vácuo. Todas as amostras utilizadas foram moldadas em anéis metálicos de 20 mm de altura e 60 mm de diâmetro. As amostras de solo utilizadas tiveram uma redução de 5 mm na altura, desta forma, em uma eventual expansão, o solo não “transbordaria”

lateralmente, ficando sua expansão restrita a direção vertical, possibilitando assim a obtenção do volume do solo. Essa redução da altura foi realizada com auxílio de um complemento metálico.

No total foram moldados 18 corpos de prova, sendo 06 (seis) utilizados no método do Papel Filtro, e 12 (doze) no método do Dessecador de Vácuo. A Figura 24 apresenta a moldagem de um anel sua forma após a moldagem.

Figura 24 - Moldagem do Corpo de Prova(a); Parte "rebaixada" do CP (b); Parte do CP no nível do anel(c).

Fonte: O Autor (2019).

No início e ao final dos ensaios (após a estabilização de umidade) as amostras tinham suas dimensões (diâmetro e altura) medidas com o auxílio de um paquímetro metálico. Essa ação visava obter o volume corrigido das amostras de solo para a umidade correspondente, possibilitando assim o cálculo de sua umidade volumétrica. Esse procedimento foi realizado nos dois métodos utilizados.

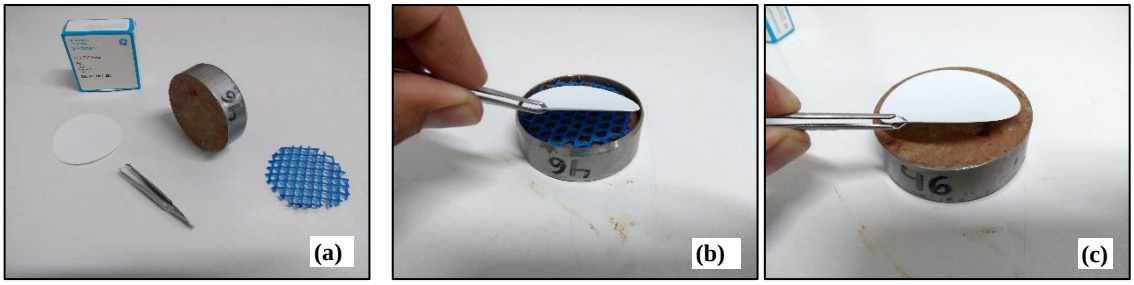
Para ajustar a curva característica aos dados experimentais foi empregado o modelo de Van Genuchten (1980). Esse ajuste foi feito por meio de planilhas eletrônicas de cálculo e ferramentas estatísticas.

3.2.3.1 Determinação da Sucção pelo Método do Papel Filtro

O método do papel filtro foi utilizado para obtenção dos pontos de umidade natural e umidades acima dela, ou seja, durante o processo de umedecimento da amostra. Essa técnica, descrita de forma detalhada por Marinho (1995), consiste basicamente em equalizar o papel filtro com o solo e obter da umidade do papel pós-equalização. Dessa forma, através de correlações, é possível estimar a sucção correspondente aquela umidade. O papel filtro e as equações de correlações utilizados nesta etapa são os mesmos que foram descritos no item 3.1.2. (Papel Filtro Whatman 42 de 55 mm de diâmetro e Equações 3.1 e 3.2). O tempo mínimo de equalização adotado na pesquisa foi de 7 dias.

A utilização desta técnica possibilitou ainda a obtenção, de forma simultânea, da sucção total e matricial do solo para os pontos de umidades analisados. Para a medição da Sucção Total colocou-se o papel filtro em contato direto com solo, já na sucção matricial utilizou-se uma "tela plástica" separando o solo do papel. Todo o manuseio do papel foi realizado com uma pinça, evitando assim o contato direto do papel com os dedos da mão. A Figura 25 apresenta os materiais utilizados (a) e o diferencial entre o procedimento para a obtenção da Sucção Matricial (b) e Total (c).

Figura 25 - Matérias utilizados(a); Obtenção da sucção Matricial(b); e Obtenção da sucção Total(c).



Fonte: O Autor (2019).

O umedecimento do solo foi realizado de acordo a metodologia proposta por Paiva (2016), utilizando-se de um umidificador de ambientes (vaporizador) que direcionava o vapor de água, com auxílio de uma mangueira, para uma espécie de "aquário", local onde os CP eram colocados. Esta metodologia foi desenvolvida pensando especificamente em solos expansivos e colapsíveis, uma vez que alterações bruscas de umidade (como inundação e/ou saturação dos corpos de prova) poderiam gerar grandes perturbações na estrutura inicial do solo.

Ao longo do tempo as amostras eram pesadas e ao chegarem no peso pré-estabelecido (correspondente a umidade pré-determinada) eram retiradas e colocadas para equalizar com o papel filtro. Para cada ponto de umidade foram utilizadas 3 amostras. A Figura 26 apresenta o aparato de umedecimento utilizado.

Figura 26 - Metodologia proposta por Paiva (2016) para umedecimento das amostras utilizando vapor de água.

Fonte: O Autor (2019).

3.2.3.2 Determinação da Sucção pelo Método do Dessecador de Vácuo

O método do Dessecador de Vácuo foi utilizado para obtenção dos pontos de umidade abaixo da umidade natural, ou seja, durante o processo de secagem da amostra. Esta metodologia se baseia no princípio da termodinâmica e na condição de equilíbrio entre a amostra de solo e a sucção imposta pela solução utilizada.

As amostras de solo foram colocadas em 4 dessecadores, os quais continham concentrações diferentes ácido sulfúrico (H_2SO_4) em seu interior. Cada concentração utilizada impõe uma sucção diferente ao ambiente em que se encontra (interior do dessecador).

Ao decorrer dos dias as amostras eram pesadas, em balança de precisão de 0,01g, até ser verificada a estabilidade de peso, ou seja, até atingirem umidade correspondente a sucção imposta pela solução. Para cada solução utilizou-se 3 amostras.

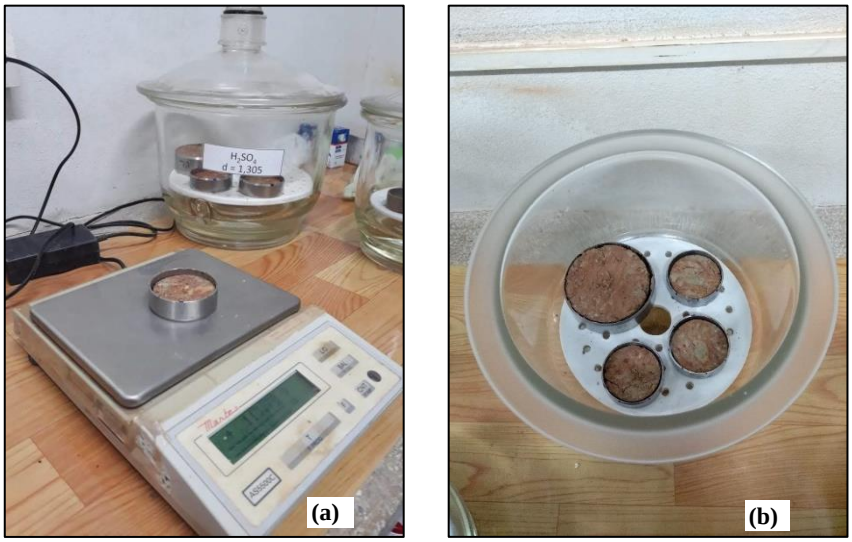
A Tabela 7 apresenta as concentrações de H_2SO_4 e as sucções correspondentes, já a Figura 27 mostra a metodologia dos dessecadores de vácuo.

Tabela 7 – Concentração das soluções H_2SO_4 e sucções correspondentes

Concentração da Solução (g/ml)	1,070	1,145	1,195	1,305
Sucção (MPa)	8,11	19,91	30,16	81,07

Fonte: Ferreira (1995).

Figura 27 - Metodologia dos Dessecadores de Vácuo.



Fonte: O Autor (2019).

3.2.4 Ensaios Mecânicos

Será abordada, nesta subseção, a metodologia utilizada nos ensaios de Compressibilidade e Expansividade e de Resistência ao Cisalhamento.

3.2.4.1 Compressibilidade e Expansividade

De modo a verificar a compressibilidade e expansividade do solo em seu estado natural, foram realizados ensaios edométricos. Todos os ensaios foram executados de acordo com as premissas da ABNT NBR 12007/1990. A seguir, será apresentada uma síntese dos ensaios realizados.

- 01 ensaio edométrico completo sem inundação partindo da umidade natural do bloco;
- 08 ensaios edométricos completos com inundação (inundações nas tensões de: 1, 10, 20, 40, 80, 160, 320 e 640 kPa);
- 04 ensaios de Tensão de Expansão a Volume Constante, cuja sucções inicias foram conhecidas (8,11; 19,91; 30,16 e 81,07 MPa).

Todos os ensaios edométricos completos seguiram ciclos de carregamento e descarregamento, sendo a tensão de 640 kPa a tensão máxima adotada. O tempo de adensamento por carga foi de 24 horas, já o período de inundação das amostras foi de 48 horas.

Os ensaios de Tensão de Expansão a Volume Constante realizam a inundação das amostras e estabilização de seu volume inicial por meio de acréscimos de cargas. Dessa forma é possível medir, de maneira direta, a tensão necessária para manter o mesmo volume após a inundação.

Tanto os ensaios de Expansão Livre quanto os de Tensão de Expansão a Volume Constante utilizaram-se dos mesmos equipamentos e acessórios empregados em um ensaio edométrico convencional.

Para a realização dos ensaios com sucção inicial conhecida, teve-se o cuidado de colocar as pedras porosas e os papéis filtros utilizados dentro do dessecador correspondente a sucção desejada de modo a equalizar a sucção destes itens com a do solo. Adotou-se o prazo de 48 horas como tempo de equalização.

A Figura 28 apresenta as pedras porosas e papéis filtros dentro de um dessecador, equalizando a sucção (a), os componentes utilizados em um ensaio edométrico (b) e uma prensa de ensaio (c).

Além das formulações tradicionais para obtenção das curvas de Deformação (Ɛ) x Tempo (t), utilizou-se também a metodologia de Daksanamurthy (1978), a qual propõe uma equação hiperbólica (Equação 3.3) para predizer a expansão, e colapso, de solos expansivos.

$$\mathcal{E} = \frac{t}{a + bt} \tag{6}$$

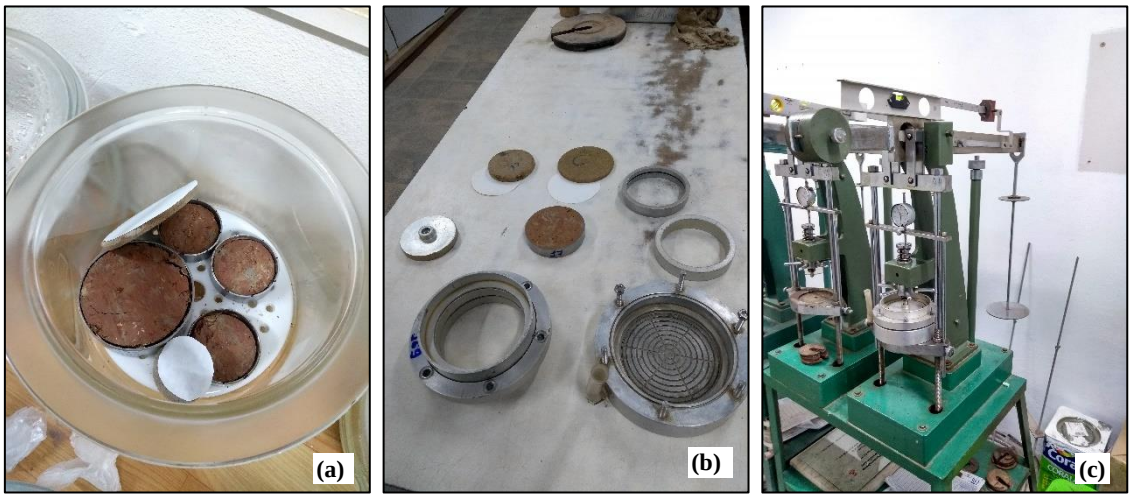
Onde: Ɛ = Deformação calculada (expansão ou colapso);

t = Tempo;

a = Valor do coeficiente linear referente a linearização da função;

b = Valor do coeficiente angular referente a linearização da função

Figura 28 - Pedras porosas e papéis filtros dentro de um dessecador, equalizando a sucção (a); Componentes utilizados em um ensaio edométrico (b); e Modelo de prensa de ensaio utilizada (c).



Fonte: O Autor (2019).

3.2.4.2 Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao Cisalhamento do solo natural foi avaliada por meio de ensaios de Cisalhamento Direto e de Compressão Triaxial.

Os ensaios de Cisalhamento Direto foram realizados nas condições natural e previamente inundado. Nas duas condições ensaiadas foram aplicadas 3 tensões normais correspondentes a 50, 100 e 200 kPa, sendo utilizado um Corpo de Prova para cada tensão normal ensaiada.

Nos ensaios previamente inundado a amostra era submersa em água destilada durante 24 horas e, após esse tempo, era colocada a carga correspondente a tensão normal desejada dando início ao adensamento do Corpo de Prova. O tempo de adensamento para esta condição durava cerca de 4 horas. Após o término desta etapa, iniciava-se o processo de ruptura/cisalhamento da amostra. Nos ensaios na condição natural, o adensamento da amostra durava 1 hora.

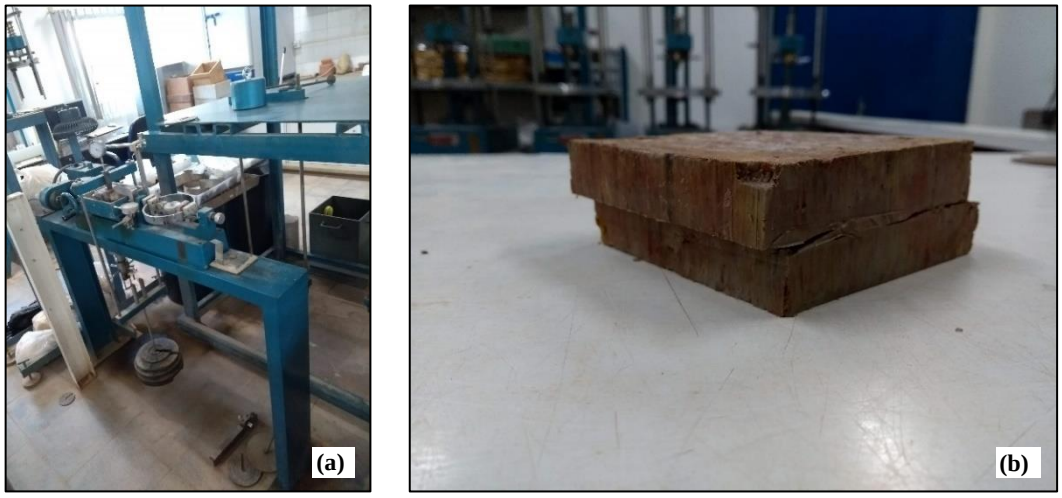
Ao término do ensaio do ensaio, a amostra era destruída de modo a se obter material para obtenção da umidade pós-ensaio.

A velocidade de ensaio foi de 0,48mm/min, sendo a mesma utilizada para as duas situações. Esta velocidade implica em uma envoltória de ruptura em tensão total, uma vez que não permitiu a dissipação total da poro-pressão da água ao longo do ensaio.

Ao total foram ensaiados 6 Corpos de Prova, 3 para cada situação, todos com dimensões aproximadas de 100 mm de lado e 40 mm de altura. Todos os ensaios foram realizados de acordo com as diretrizes da norma americana ASTM D3080-04.

A Figura 29 apresenta o modelo da prensa de Cisalhamento Direto utilizado (a), e uma amostra após processo de ruptura (b).

Figura 29 - Modelo de prensa de ensaio utilizada (a); Amostra após ruptura (b).



Fonte: O Autor (2019).

O ensaio de compressão triaxial foi realizado na condição Consolidado Não Drenado (CIU), seguindo as premissas da norma americana ASTM D4767. Nesta condição de ensaio (CIU) a drenagem/dissipação da poro-pressão da água é permitida apenas durante a etapa de consolidação, sendo interrompida na fase a ruptura.

Este ensaio se inicia com a moldagem, em formato cilíndrica, do Corpo de Prova e sua colocação dentro na célula de ensaio. Após isso dá-se início ao processo de saturação da amostra que ocorre por meio de aplicação de pressão e contrapressão, a cada 3 horas, sendo o parâmetro B o indicativo utilizado para verificação de sua de saturação

Após a completa saturação da amostra, inicia-se o processo de adensamento, ou seja, aplicação de tensão confinante (σ_3). Foram utilizadas 4 tensões confinantes: 50, 100, 150 e 200 kPa, sendo esta etapa finalizada quando verificada a estabilização da poropressão da amostra.

Ao término do adensamento, inicia-se a etapa de Ruptura. Esta fase consiste em aplicar uma tensão vertical (σ_1) a uma velocidade constante até ser verificado a ruptura da amostra e sua carga correspondente. Neste ensaio, foi utilizada uma velocidade correspondente a 0,133 mm/min.

Todas as etapas deste ensaio são monitoradas em tempo real. A poropressão é medida por meio de transdutores de pressão, as deformações medidas através de extensômetros elétrico tipo LVDT, e a carga aplicada é medida por meio de células de carga.

Ao todo foram utilizados 4 corpos de prova (um para cada tensão confinante), todos provenientes do bloco indeformado. As amostras possuem formato cilíndrico, com 35 mm de diâmetro e 90 mm de altura aproximadamente.

Foi utilizada ainda a formulação hiperbólica proposta por Kondner (1963) para a obtenção das Curvas Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal, para o Ensaio de Cisalhamento Direto, e Tensão Desviatória x Deformação Especifica Axial, para o ensaio de Compressão Triaxial. O desenvolvimento dessa formulação se dá de maneira análoga à de Daksanamurthy (1978).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos para os solos analisado serão apresentados e discutidos nessa seção. Tais resultados contemplam as características Físicas, Químicas, Macroestrutural e Hidromecânica.

4.1 PERFIL DE SOLO DO LOCAL DE ESTUDO E VARIAÇÃO DA UMIDADE GRAVIMÉTRICA E SUCÇÃO AO LONGO DA PROFUNDIDADE

Durante os trabalhos em campo foi realizada uma perfuração a trado manual, até a profundidade de 5 m, possibilitando assim determinar o perfil de solo do local além possibilitar coleta de solo para verificação da variação da umidade gravimétrica e sucção ao longo da profundidade.

O perfil de solo, até a profundidade investigada, é constituído de 5 camadas, não sendo observado nível de água (Figura 30):

A Camada I, superficial, vai de 0,00 até -0,10 m e é constituída predominantemente de argila siltosa, com baixo teor de areia, da cor marrom escuro e com presença de matéria orgânica (muitas raízes da vegetação gramínea);

A Camada II, camada no qual foi coletada as amostras indeformadas, vai de -0,10 até -2,00 m e é composta predominantemente por argila siltosa, com baixo teor de areia, de coloração variegada (vermelho, cinza e amarelo) e com presença esporádica de concreções ferruginosas;

A Camada III vai de -2,00 a -3,50 m, e é constituída por argila, areia fina e silte. Possui cor variegada (vermelho, cinza e amarelo) com rara presença de pedregulhos de rocha calcária;

A Camada IV, de -3,50 até -4,00 m, é formada por areia fina e média, argila e silte, tendo pouca areia grossa. Possui coloração marrom e com rara presença de pedregulhos de rocha calcária;

A Camada V, a última verificada, vai de -4,00 até -5,00 m e é constituída por argila, com areia fina e silte, de coloração marrom.

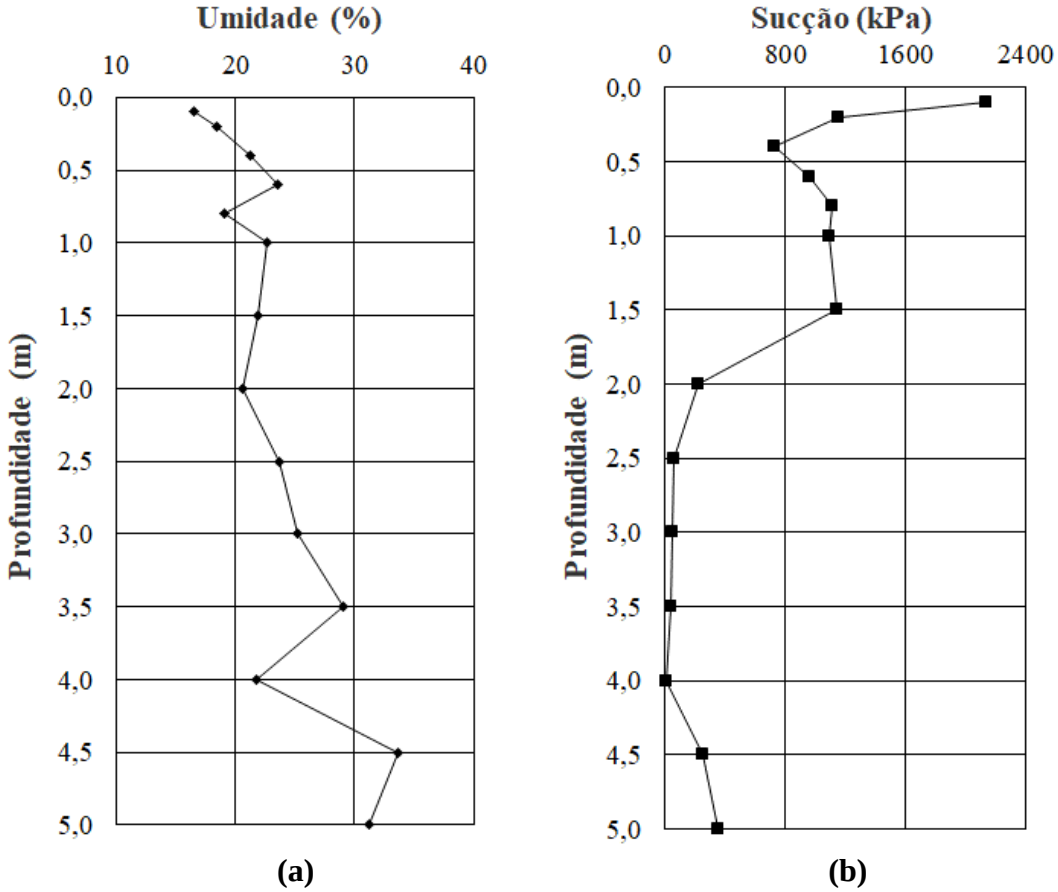
A Figura 31 apresenta os valores umidade gravimétrica (a) e sucção (b) ao longo da profundidade, sendo verificado o aumento da umidade e diminuição da sucção ao longo do perfil.

Figura 30 – Perfil de Solo.

Prof. (m)	Camadas	Classificação das Camadas
0,00	I	Argila, silto, arenosa, marrom escuro, com matéria orgânica (CH; A - 7 - 6)
0,10		
1,00	II	Argila, silto, arenosa, variegada (cinza, vermelho, amarelo (CH; A - 7 - 6)
2,00		
3,00	III	Argila, areno, siltosa, variegada (cinza, marrom, vermelho) (CL; A - 7 - 6)
3,50		
	IV	Areia, argilo, siltosa,cinza, marrom (CL; A - 6)
4,00		
	V	Argila, areno, siltosa, cinza e marrom (CH; A - 7 - 6)
5,00		

Fonte: O Autor (2019).

Figura 31 - Variação da Umidade Gravimétrica (a) e Sucção (b) ao longo da profundidade.



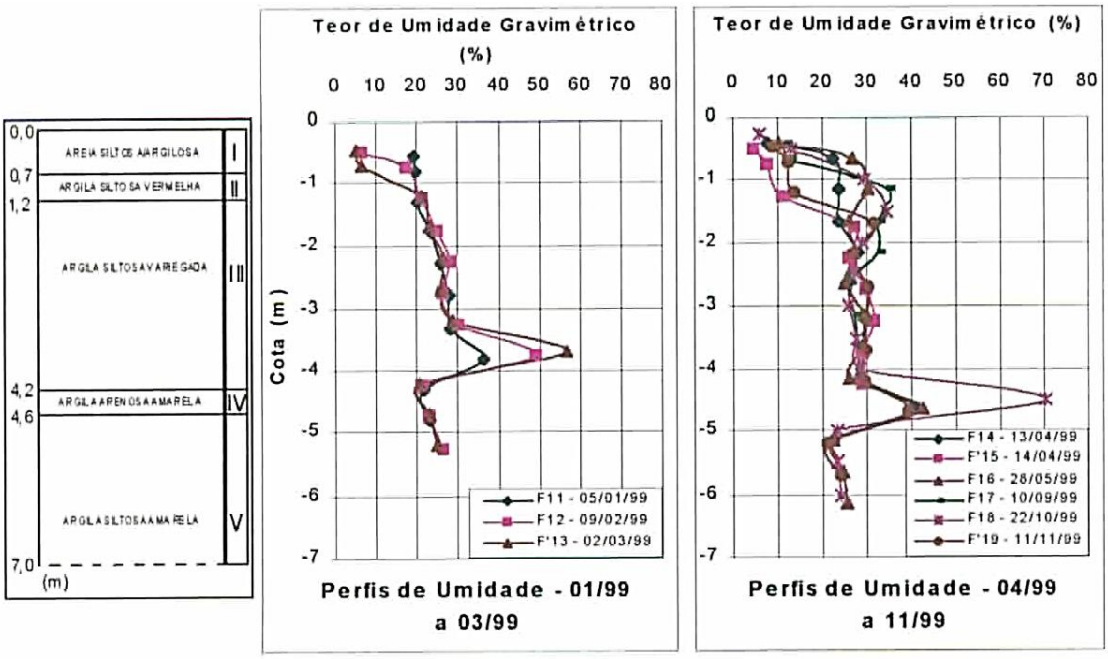
Fonte: O Autor (2019).

Estudos realizados por Silva (2001) no mesmo local, revelaram um perfil geotécnico semelhante ao deste trabalho, com predominância de camadas compostas por solos coesivos (argila siltosa em sua maioria), sem presença de nível d`água.

Esta mesma pesquisa também realizou um acompanhamento da variação da Umidade Gravimétrica e Sucção Matricial do perfil de solo ao longo do tempo, fazendo coletas em estações chuvosas e de seca. Essa análise constatou valores elevados de umidade ao longo da profundidade, sendo observado um pico entre as cota -3,50 a -4,50m (Figura 32). A elevada umidade do perfil solo acarretou em baixos valores de sucção ao longo do perfil.

As constatações de Silva (2001) se assemelharam bastante aos resultados obtidos por esta pesquisa, nos quais também foram verificados altos valores de umidade ao longo da profundidade, observando-se um pico na cota de -4,50 m.

Figura 32 - Variação da Umidade Gravimétrica ao longo da profundidade obtido por Silva (2001).



Fonte: Silva (2001).

Ao buscar uma explicação para este comportamento, uma vez que a literatura cita sobre a diminuição da umidade gravimétrica ao longo da profundidade (resultado oposto ao obtido), observou-se relatos de Silva (2001) sobre o surgimento de fissuras em campo durante os períodos de estiagens, associando-o as elevadas temperaturas e forte insolação. O autor constatou fissuras com aberturas máximas de 30 mm e comprimento variando de 1,5 a 8 m, sem obedecer a nenhum padrão de propagação e com formatos irregulares, sendo que algumas delas permanecem abertas durante muito tempo, mesmo após a ocorrência de chuvas (Figura 33).

Desta forma, ao analisar o histórico de precipitação do local durante o mês da coleta da pesquisa (agosto de 2018), nota-se uma distribuição irregular de chuvas alternados com dias de elevada temperatura. Estas variações bruscas e repentinas de temperatura e umidade relativa do ar propiciam o aparecimento de fissuras em solo alterando assim suas propriedades hidráulicas, o que reflete no aumento da permeabilidade a água e, consequentemente, da umidade do solo nas camadas sub superficiais.

Figura 33 - Fissuras em Solo relatadas por Silva (2001).

Fonte: Silva (2001).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Serão apresentados os resultados de Caraterização Física e Química de todas as camadas e a caraterização microestrutural da Camada II.

4.2.1 Caracterização Física

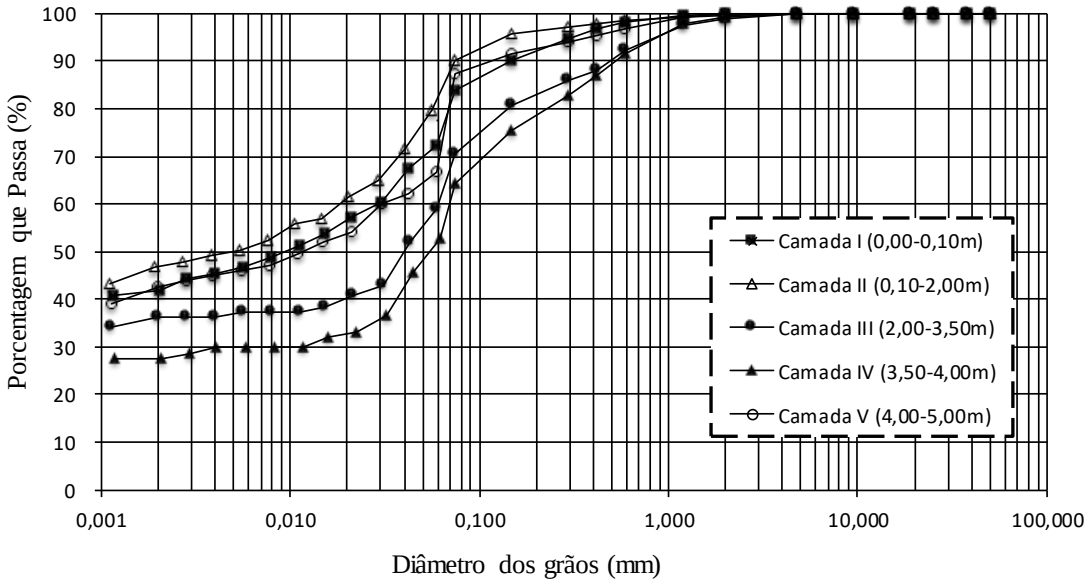
A seguir, os resultados da caracterização física dos solos estudados.

4.2.1.1 Granulometria e Densidade Real dos Grãos

Foram realizados ensaios de granulometria, com e sem o uso de defloculante, e de densidade real dos grãos. As Figuras 34 e 35 apresentam as curvas granulométricas obtidas. A Tabela 8contém a composição granulométrica das camadas e os valores de densidade real dos grãos obtidos.

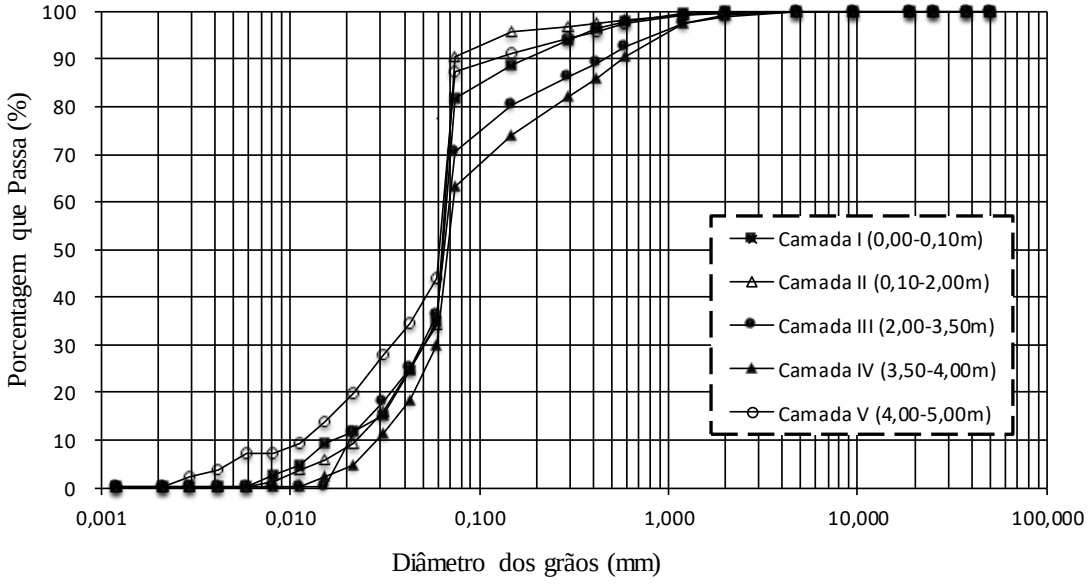
Nota-se a elevada presença de partículas finas (argila + silte) em todas as camadas, variando de 52% na Camada IV a 83% na Camada II. Quando não utilizado o defloculante, a fração areia cresce indicando que as partículas no solo em seu estado natural encontram-se floculadas.

Figura 34 - Curva Granulométrica com uso de defloculante.



Fonte: O Autor (2019).

Figura 35 - Curva Granulométrica sem uso de defloculante.



Fonte: O Autor (2019).

Tabela 8 - Composição granulométrica das camadas e densidade real dos grãos.

Solo	Camada									
	Com defloculante (%)					Sem defloculante (%)				
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Argila	42	47	36	28	43	-	-	-	-	-
Silte	30	36	23	24	24	34	33	37	30	43
Areia Fina	20	13	24	26	26	58	63	46	48	50
Areia Média	6	3	10	13	5	6	3	10	13	5
Areia Grossa	2	1	6	8	2	2	1	6	8	2
Pedregulho	-	-	1	1	-	-	-	1	1	-
γ_s (kN/m³)	25,97	26,81	26,74	26,45	26,42					

* γ_s = Peso Específico dos Sólidos (kN/m³)

Fonte: O Autor (2019).

4.2.1.2 Limites de Consistência

A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de Limites de Liquidez, Plasticidade e Contração para todas as camadas. Na camada II foram realizados os ensaios com e sem secagem prévia e destorroamento (ensaios partindo da umidade de campo).

Tabela 9 - Limites de Atterberg

Camada	LL (%)	LP (%)	IP (%)	LC (%)	% argila	A
I (0,00-0,10m)	52	25	27	14	42	0,64
II (0,10-2,00m)	62	30	32	16	47	0,68
II* (0,10-2,00m)	74	26	48	15	47	1,02
III (2,00-3,50m)	48	28	20	17	36	0,55
IV (3,50-4,00m)	35	20	15	17	28	0,53
V (4,00-5,00m)	72	25	47	13	43	1,09

Onde: LL = Limite de Liquidez; LP = Limite de Plasticidade; IP = Índice de Plasticidade (LL – LP); LC = Limite de Contração; A = Atividade da Argila (IP / % de argila).
*Amostra sem secagem prévia

Fonte: O Autor (2019).

Observa-se que os valores da Camada II para os Limites de Plasticidade e Liquidez e do Índice de Plasticidade sofrem grande variação para as condições com e sem preparação. A secagem prévia eleva a sucção e a formação de grumos no solo expansivo quando segue as recomendações da norma da ABNT. Quando o solo é seco ao ar e umedecido para determinar o Limite de Liquidez, o tempo de homogeneização não é suficiente para fazer com que a água penetre no interior dos grumos formados pela secagem (alta sucção) apresentando valores do

Limite de Liquidez menores do que com secagem prévia e a plasticidade cresce. Nota-se ainda que o Limite de Contração praticamente não variou entre as condições ensaiadas.

Com relação a Atividade das argilas, verifica-se que as camadas de maior atividade são as V e II* (sem preparação), sendo classificadas como normal pelo critério de Skempton (1953). As demais camadas são classificadas como inativas (A < 0,75).

Classificando as camadas pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), verifica-se que as Camadas I, II, II* e V são classificadas como Argilas de Alta Compressibilidade (CH) e as Camada III e IV como Argilas de Baixa Compressibilidade (CL). Pela classificação rodoviária HRB (Highway Research Board) todas as camadas são classificadas como Solos Argilosos (A-7-6 ou A-6), inapropriadas para uso em pavimentação.

Ao analisar o potencial de expansão dos solos, considerando os critérios de Skempton (1953) e Williams (1957); Daksanamurthy e Raman (1973); e Seed *et al.* (1962), verificou-se que parâmetro varia de médio a muito alto. A Tabela 10 e as Figuras 36 a 38

apresentam a classificação das camadas segundo os métodos mencionados acima.

É interessante observar que na Camada II, tanto os resultados dos limites de consistência quanto a classificação do potencial de expansão do solo variaram entre as amostras com e sem preparação prévia. Tais resultados acendem um alerta quanto a metodologia de preparação das amostras de solos expansivos, pois podem acarretar em resultados que não correspondam a realidade.

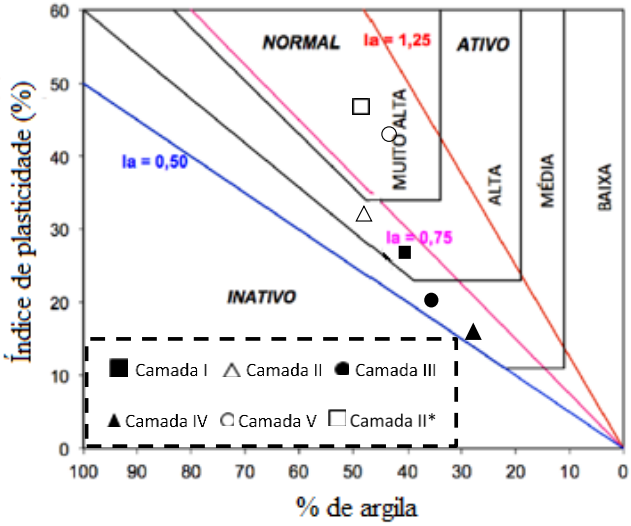
Tabela 10 - Avaliação qualitativa do potencial de expansão do solo

Camada	Método		
	Skempton (1953) e Williams (1957)	Daksanamurthy e Raman (1973)	Seed *et al.* (1962)
I	ALTA	ALTA	MÉDIA
II	ALTA	ALTA	ALTA
II*	MUTO ALTA	MUITO ALTA	ALTA
III	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA
IV	MÉDIA	MÉDIA	MÉDIA
V	MUITO ALTA	MUITO ALTA	ALTA

*Amostra sem preparação prévia

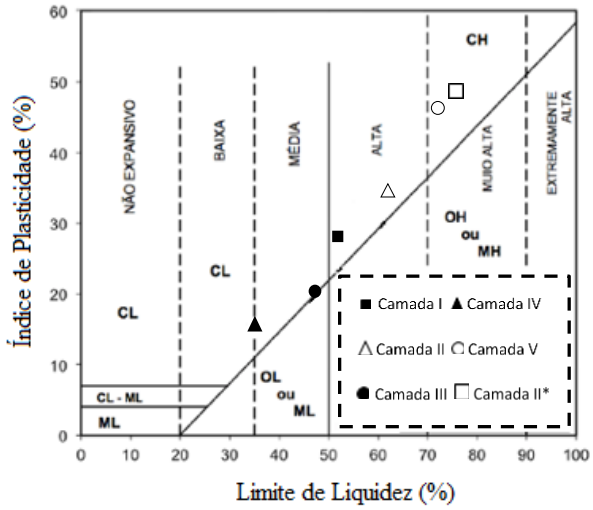
Fonte: O Autor (2019).

Figura 36 - Potencial de expansão pelo critério de Skempton (1953) e Williams (1957).



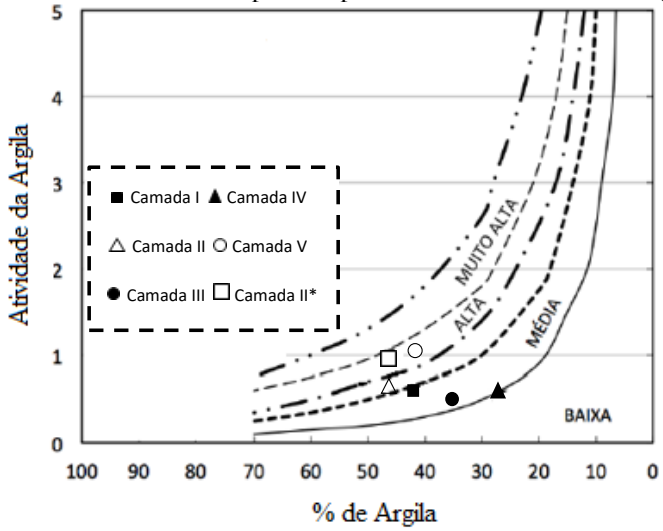
Fonte: O Autor (2019).

Figura **37** - Potencial de expansão pelo critério de Daksanamurthy e Raman (1973).



Fonte: O Autor (2019).

Figura 38 - Potencial de expansão pelo critério de Seed *et al.* (1962).



Fonte: O Autor (2019).

4.2.1.3 Compactação de Solos

A Figura 39 e a Tabela 11 apresentam os resultados e as curvas de compactação dos ensaios realizados na a Camada II, com e sem secagem prévia. Nota-se que o solo sem preparação prévia (secagem e destorroamento) apresenta menor Peso Específico Aparente Seco e maior Umidade Ótima, quando comparada com secagem prévia e destorroamento.

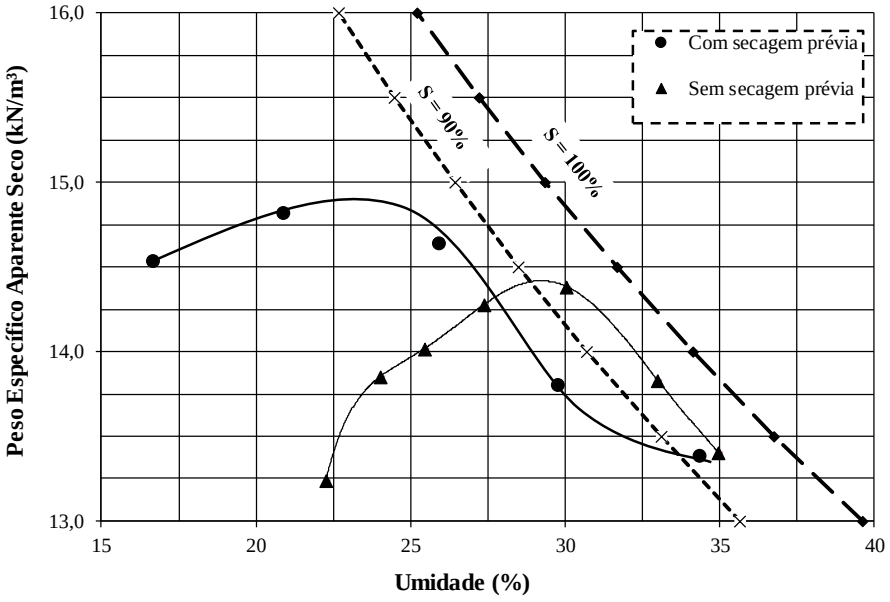
A secagem prévia causa formação de grumos de alta resistência de modo que o processo de destorroar não é capaz de separar as partículas. A alta sucção no interior do grumo e o pequeno tempo de homogeneização da amostra no ensaio de compactação, principalmente no ramo seco da curva, é insuficiente para fazer com que a água penetre totalmente em seu interior, deixando o solo com uma granulometria equivalente a de um silte, areia fina ou mesmo de areia média, quando o solo é uma argila. Estas condições levam a amostra que foi previamente seca ao ar a apresentar um Peso Específico Aparente Seco máximo maior e uma Umidade Ótima menor na curva de compactação do que na amostra ensaiada sem secagem prévia. Comportamento similar foi encontrado por Ferreira (1995).

Tabela 11 - Compactação

Amostra	Peso Específico Aparente Seco (kN/m³)	Umidade Ótima (%)
II – com secagem prévia	14,90	23,0
II* – sem secagem prévia	14,45	29,0

Fonte: O Autor (2019).

Figura 39 - Curvas de compactação da Camada II (com e sem preparação).



Fonte: O Autor (2019).

4.2.2 Caracterização Química

A Tabela 12 apresenta os resultados de caracterização química da Camada II.

Tabela 12 - Caracterização química da Camada II

Determinações	Unidade	Valores obtidos
pH em água	-	5,48
pH em KCl	-	2,25
pH em $CaCl_2$	-	3,52
Matéria Orgânica	g/kg	0,76
Alumínio (Al^{3+})	$cmol_c/kg$	21,20
Cálcio (Ca^{2+})	$cmol_c/kg$	2,50
Magnésio (Mg^{2+})	$cmol_c/kg$	13,75
Sódio (Na^{+})	$cmol_c/kg$	1,30
Potássio (K^{+})	$cmol_c/kg$	0,20
% de Saturação de Sódio (n)	%	3,17
Soma de cátions (S)	$cmol_c/kg$	17,72
Hidrogênio (H^{+})	$cmol_c/kg$	2,00
Capacidade de Troca Cátions (T ou CTC)	$cmol_c/kg$	40,92
% Sat. de Base (V)	%	43,30
% Saturação de Alumínio (m)	%	0,54
$V=100 \times S/T$; $m=100 \times Al^{3+} + S + Al^{3+}$; $S=Na^{+} + K^{+} + Ca^{2+} + Mg^{2+}$; $CTC=S + Al^{3+} + H^{+}$; $n=100 \times Na^{+}/T$;		

Fonte: O Autor (2019).

O solo da Camada II foi classificado como moderadamente ácido, no que respeito a acidez do solo para pH em água. É distrófico (pouco fértil), pois apresentou um valor de saturação de base (V) inferior a 50%.

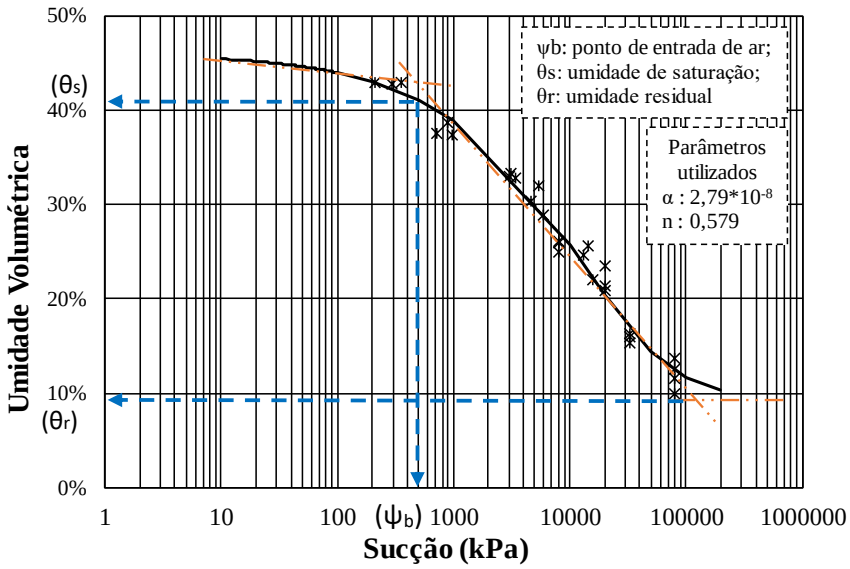
A Capacidade de Troca de Cátions (CTC ou T) é importante por causa da possibilidade de estimativa do potencial de expansão de um solo. Dessa forma observa-se que a camada analisada está propensa a expansividade pois apresentou um CTC considerado alto (> 27 $cmol_c/kg$) (BUOL *et al.*, 1997, apud PAIVA 2016).

Paiva (2016) obteve valores de caraterização Química para o solo de Paulista (equivalente a Camada II) semelhantes ao encontrados neste trabalho. O valor de Soma de cátions (S) e determinações relacionadas apresentaram diferença entre as pesquisas. Tal diferença pode ser explicada devido a variação de heterogeneidade da amostra em questão.

4.3 RELAÇÃO UMIDADE X SUCÇÃO - CURVA CARATERÍSTICA

A Figura 40 apresenta a curva caraterística obtida para a Camada II. Observa-se que os valores de Ponto de Entrada de Ar (ψb), Umidade Volumétrica de Saturação (θs) e Umidade Volumétrica Residual (θr) são iguais a 500 kPa; 42% e 10%, respectivamente.

Figura 40 - Curva Característica



Fonte: O Autor (2019).

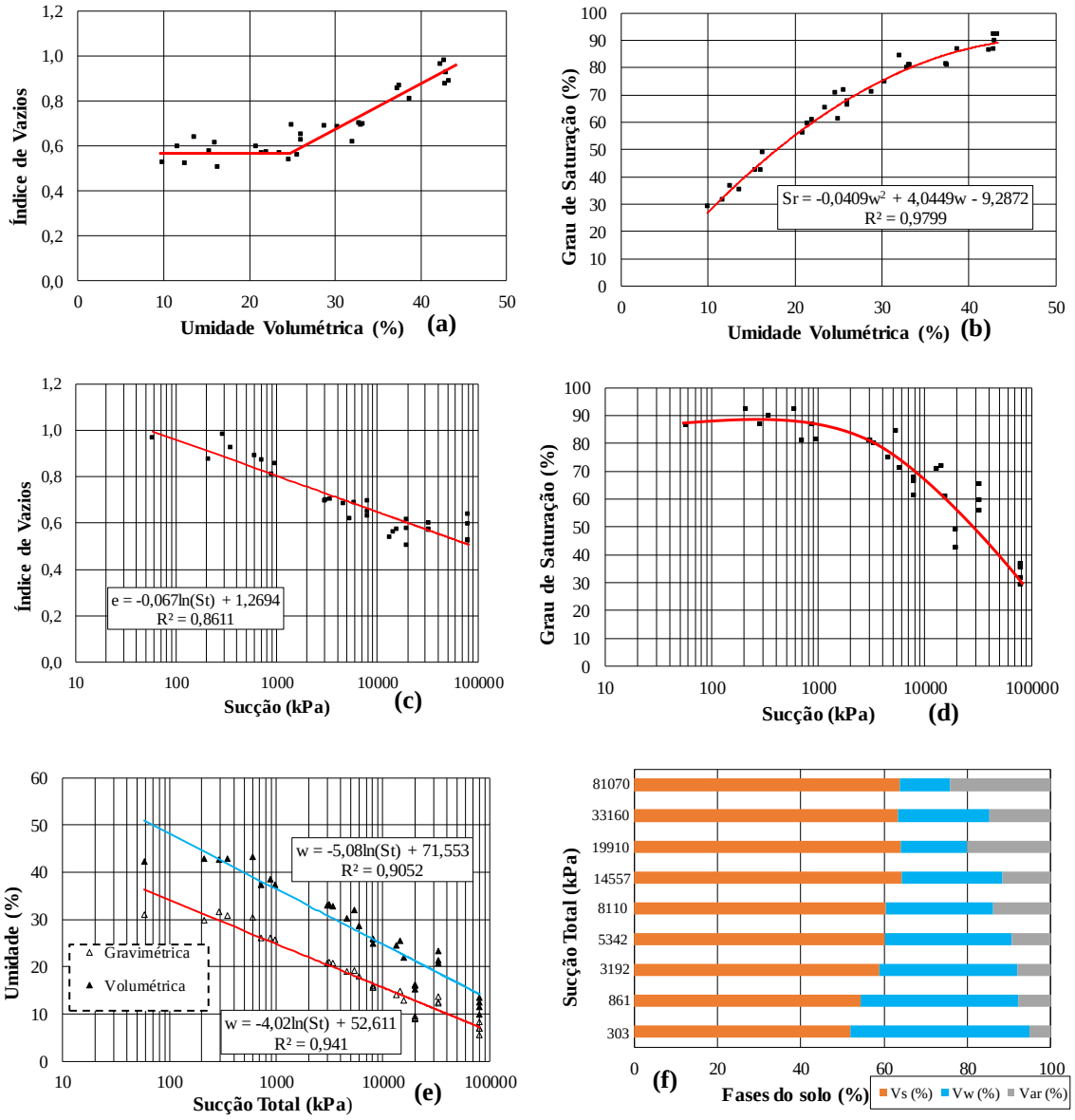
Durante o processo de secagem e umedecimento do solo, realizou-se medições das dimensões das amostras utilizadas de modo calcular seu volume real ao longo do ensaio, obtendo assim as propriedades e índices geotécnicos atualizados durante a variação de umidade e sucção.

A Figura 41 apresenta as relações entre umidade, grau de saturação, índice de vazios, sucção e fases do solo durante o período de secagem. A curva de variação do índice de vazios com a umidade volumétrica (a) durante o processo de secagem, tende a reduzir de forma gradativa até próximo ao limite de contração (LC = 15%), quando o índice de vazios se torna praticamente constante com a redução da umidade.

A Figura 41 (b) apresenta a relação entre a umidade volumétrica e o grau de saturação, no qual é possível observar, através da alteração de declividade da curva, a umidade correspondente a dessaturação das amostras, ou seja, o ponto referente ao início da entrada de ar no solo ($\theta \cong 33\%$). Nota-se que este valor se aproxima bastante ao valor de umidade de saturação encontrado pela curva caraterística.

A relação entre Grau de Saturação e Sucção permite determinar o ponto de entrada generalizada de ar, que se situa próximo dos 15 Mpa (Figura 41 c, d), valor típico de solos na zona ativa.

Figura 41 - Relações entre umidade, grau de saturação, índices de vazios, sucção e fases do solo.



Fonte: O Autor (2019).

O valor da Capacidade Diferencial de Umidade (C = Δw/ΔlogS) obtidos a partir da relação entre a sucção e umidade na curva de secagem (Figura 41 e) foi igual a 9,75%.

A Figura 41 (f) apresenta a relação entre as fases sólida, líquida e gasosa para o solo na curva de contração. Nota-se que com o aumento da sucção e redução de volume da amostra, o volume relativo da fase líquida diminui enquanto os volumes das fases sólida e gasosa crescem.

4.4 ANÁLISE MACROESTRUTURAL DO SOLO POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

O ensaio de tomografia computadorizada de raios-X permitiu avaliar a macroestrutura do solo da Camada II, verificando ainda a variação dos macroporos paras as condições natural e inundada, da mesma amostra.

A Figura 42 realiza um comparativo entre as situações ensaiadas. Nela pode-se observar, de forma visual, a morfologia dos vazios do solo e até sua interligação.

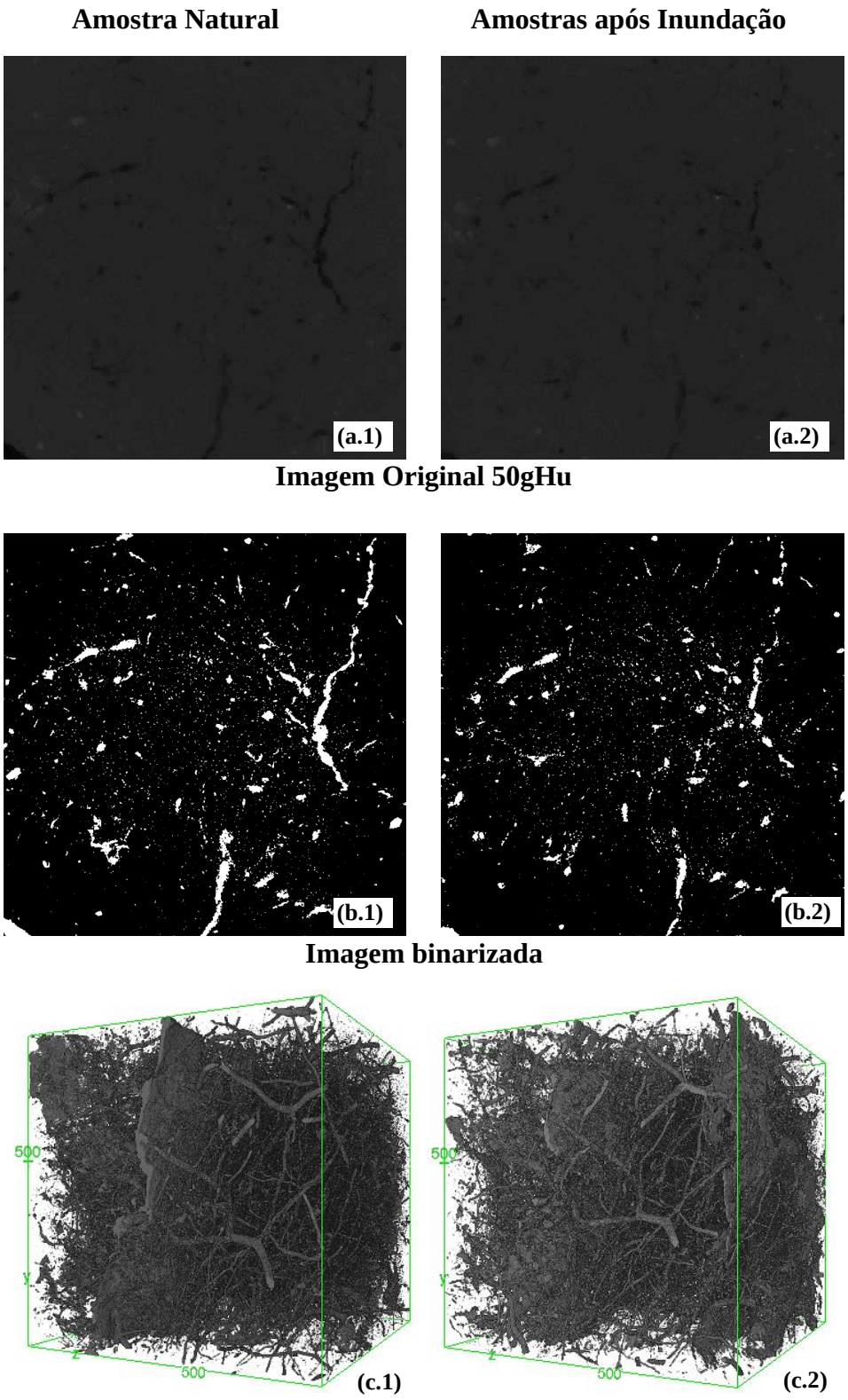
Analisando as imagens binarizadas, nas quais a massa de solo é representada na cor preta e os vazios/poros na cor branca (b.1 e b.2), e perspectiva 3D (c.1 e c.2), é possível uma melhor percepção da diminuição dos vazios no solo entre as situações ensaiadas. Em termos de valores, a amostra no seu estado natural apresentou uma porosidade de 4,69%, enquanto na situação inundada foi de 4,48%.

Estudos realizados por Costa (2017) mostram que os valores de porosidade encontrados pela tomografia divergem, de maneira substancial, dos valores obtidos por outros métodos, sendo os solos de menor granulometria (argilas e siltes) os que apresentam maiores discrepâncias. A autora explica ainda que esta diferença é devido a limitação da resolução das imagens do equipamento, não sendo possível observar volumes inferiores a $12{,}5x10^{-5}$ mm^3, para uma resolução de imagens de 50 ϰm. Dessa forma, a autora conclui que não é possível determinar a porosidade total do solo, apenas uma macroporosidade, por meio da tomografia.

Ao comparar o estudo da estrutura do solo por tomografia com os resultados obtidos por outras técnicas já consolidadas, como a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) por exemplo, observou-se que a utilização da tomografia oferece vantagens como a avaliação da estrutura original do solo (sem a necessidade de amolgamento ou preparação prévia), em diferentes umidades, além de possibilitar uma melhor visualização da morfologia da macroporosidade do solo.

Análises feita por MEV permitem o estudo da mircoestutura do solo de forma detalhada, entretanto se faz necessário o amolgamento da amostra e um cuidadoso processo de preparação da lâmina de ensaio, além de não permitir uma análise em diferentes umidades, nem a representação da interligação dos vazios dentro da massa de solo.

Figura 42 - Comparativo do escaneamento da Amostra da Camada II (Indeformada).



Fonte: O Autor (2019).

4.5 COMPORTAMENTO HIDROMECÂNICO

Serão apresentados, a seguir, os resultados relacionados a ensaios de deformação do solo.

4.5.1 Compressibilidade e Expansividade

A Tabela 13 apresenta os valores de expansão e dos índices físicos das amostras utilizados nos ensaios edométricos com inundação e no ensaio sem inundação. A Figura 43 apresenta as curvas de Deformação Específica (Ɛ) x Tensão Vertical Aplicada (σ) e a Deformação Específica com Tempo (Figura 43 j).

A expansão máxima do solo foi de 3,59%, quando inundado em 10 kPa, e o máximo colapso foi de 1,04%, quando inundado em 640 kPa. A tensão de expansão do solo ficou bem próxima de 160 kPa, apresentando uma variação volumétrica quase nula quando inundado nesta tensão (colapso de 0,10 %).

Os Índices de Compressão (C_c) e Descompressão (C_s) do solo sofreram variação a depender da tensão de inundação adotada, ficando entre 0,10 a 0,23 e 0,02 a 0,08, respectivamente.

Os valores de expansão com as sobrecargas de 1 kPa e 10 kPa foram de 8,00% e 3,49 %, respectivamente, (Figura 43 j), sendo o solo classificado, segundo o critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), com um grau de expansividade médio.

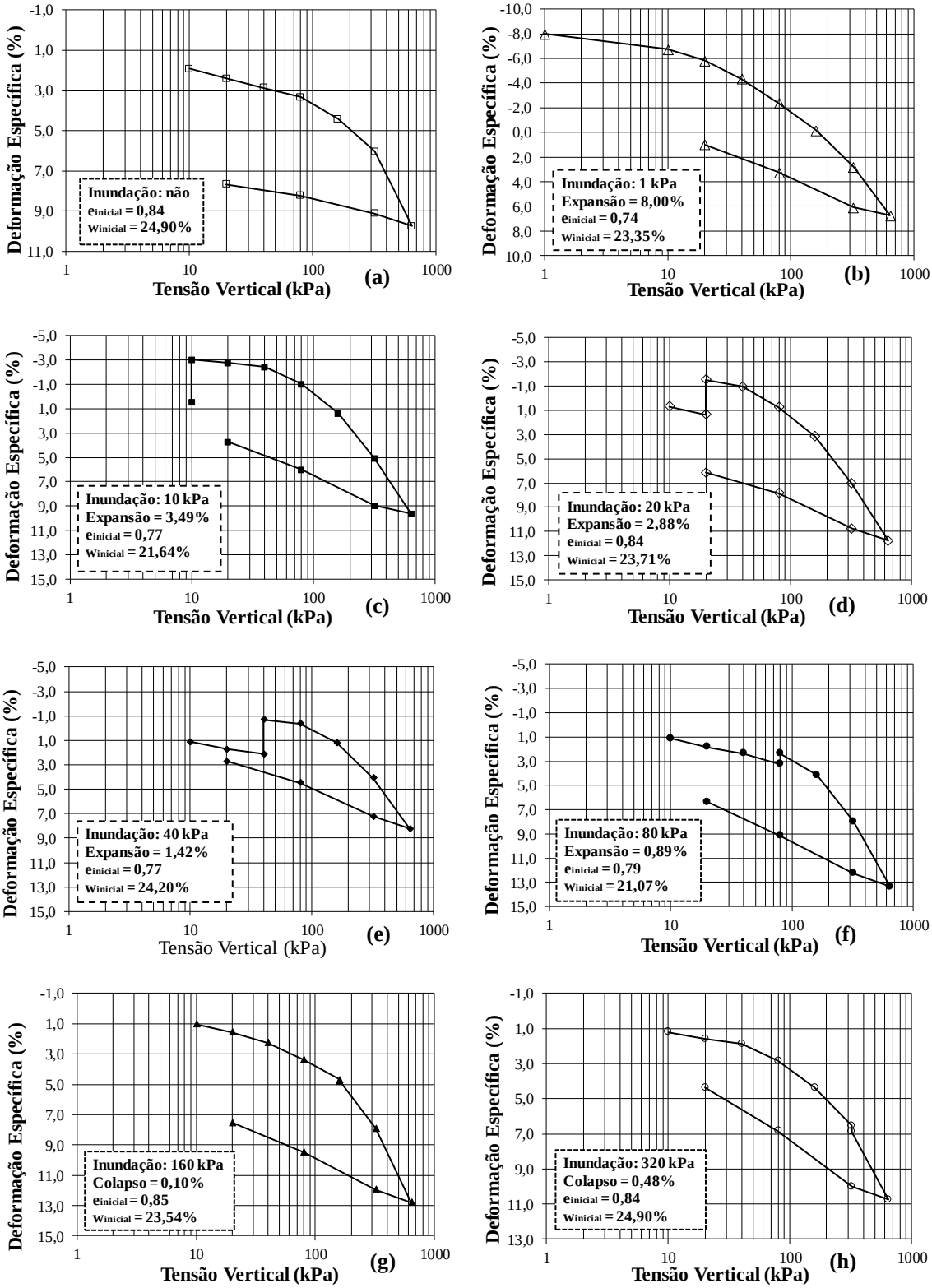
Tabela 13 - Resumo dos índices físicos e resultados obtidos

Dados	Inundação								
	Não	1 kPa	10 kPa	20 kPa	40 kPa	80 kPa	160 kPa	320 kPa	640 kPa
Expansão ou Colapso (%)	-	8,00	3,49	2,87	1,42	0,88	-0,10	-0,34	-1,04
W_i (%)	24,9	23,3	21,6	23,6	24,2	21,0	23,5	24,9	23,9
W_f (%)	23,17	32,6	32,6	31,8	30,3	30,7	30,7	29,7	30,2
γ_d (kN/m³)	14,9	15,4	15,2	15,2	15,2	15,0	14,5	14,6	15,0
γ (kN/m³)	18,6	18,9	18,5	18,7	18,8	18,1	17,9	18,2	18,6
e_0	0,80	0,74	0,77	0,77	0,77	0,79	0,85	0,84	0,78
C_c	0,10	0,18	0,18	0,19	0,17	0,22	0,23	0,14	0,14
C_s	0,02	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,08	0,08
SP ou CP (%)		0,80	0,35	0,29	0,15	0,09	-0,01	-0,03	-0,09

*Onde: W_i = Umidade Inicial da Amostra (%); W_f = Umidade Final da Amostra – após inundação (%); γ_d = Peso Especifico Seco (kN/m³); γ = Peso Especifico Úmido (kN/m³); e_0 = Índice de vazios inicial; C_c = Índice de Compressão; C_s = Índice de descompressão; SP ou CP = Potencial de Expansão ou Colapso (%).

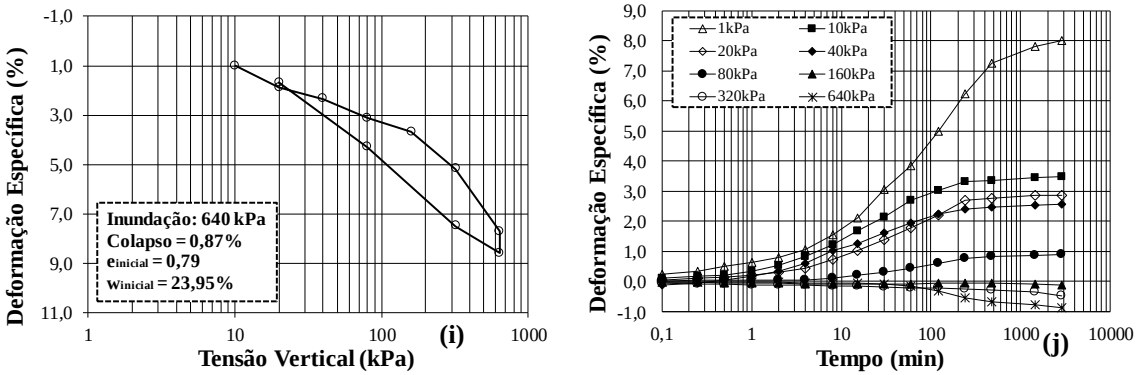
Fonte: O Autor (2019).

Figura 43 - Curvas de compressão edométricas.



Fonte: O Autor (2019).

Figura 43 - Curvas de compressão edométricas – Continuação.



Fonte: O Autor (2019).

Os resultados obtidos neste trabalho foram inferiores aos demais resultados relatados na literatura (Bastos,1994; Justino da Silva, 2001; Paiva, 2009; Paiva, 2016 e Morais, 2017), observando-se uma diferença no comportamento e no potencial de expansão do solo. Este fato se deve por causa da elevada umidade inicial do solo quando coletado (entre 21,1% e 24,9%).

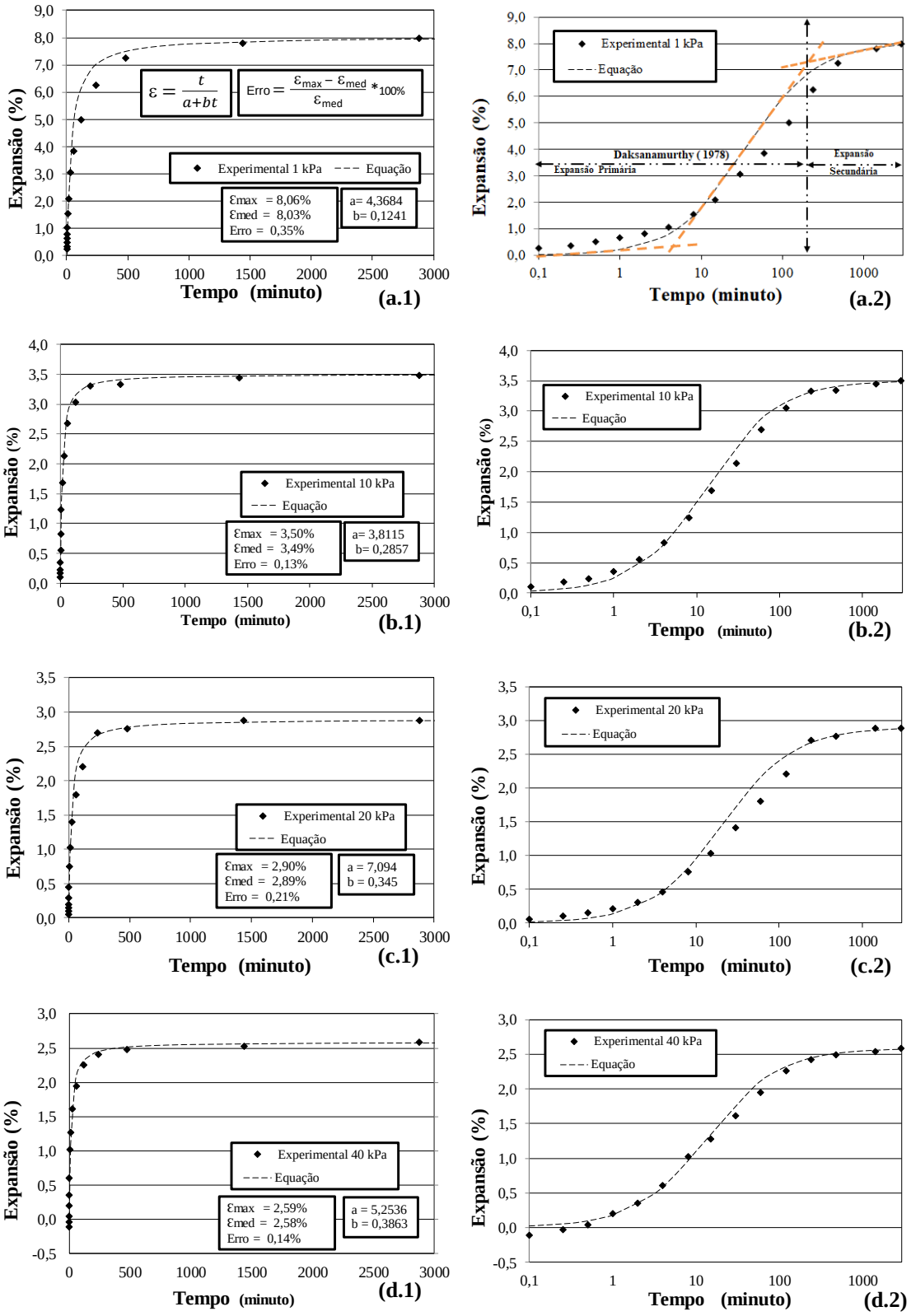
A influência da umidade inicial das amostras nas curvas de compressão edométricas já havia sido relatado por Ferreira (1995). O autor constatou mudança do comportamento solo, para uma Argila Bruno-Avermelhada, devido a mudança da umidade inicial (variando de 7,78 % a 22,60%). Se tratando de solos expansivos, essa variação de umidade exerce influência de maneira mais significativa, visto que o teor de água no solo altera sua estrutura interna.

Os dados experimentais de deformações devido à expansão ou ao colapso com tempo obtidas a partir de ensaios edométricos simples foram ajustados pela formulação matemática hiperbólica proposta por Dakshanamurthy (1978) para aplicação em solos expansivos, conforme a Figura 44.

A Tabela 14 mostra os parâmetros a e b, as Deformações Máximas, obtidas pela equação (ε_{max}) e medidas (ε_{med}), e o Erro de ajuste e o coeficiente de correlação (R^2). Valores de Deformações positivos representam expansão, valores negativos representam colapso.

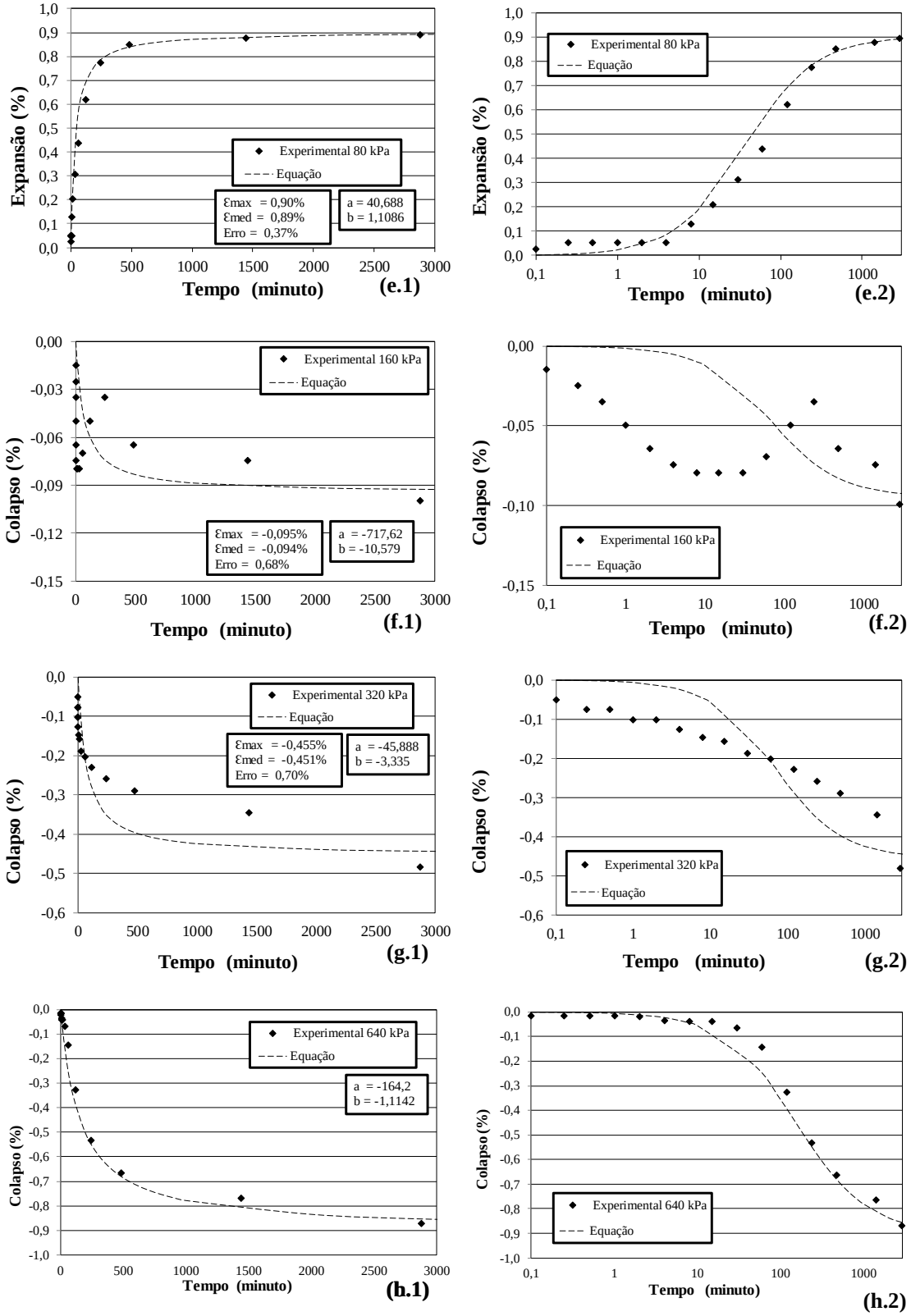
Analisando as curvas, verificou-se que esta metodologia possui um bom ajuste aos dados experimentais, principalmente nas tensões correspondentes a expansão do solo (1, 10, 20, 40 e 80 kPa), o qual apresentou valores de Erro inferior a 0,40. O coeficiente de correlação (R^2) das curvas foi superior a 0,96 em todas as tensões, sendo observados valores de R^2 igual a 0,999 para todas a tensão de expansão (1, 10, 20, 40 e 80 kPa). Dessa forma, pode-se constatar que a função hiperbólica empregada possui um bom ajuste aos dados experimentais obtidos, tanto em tensão de expansão quanto em colapso.

Figura 44 - Curvas de Deformação de Expansão ou Colapso x Tempo – Formulação Hiperbólica.



Fonte: O Autor (2019).

Figura 44 - Curvas de Expansão x Tempo das inundações – Formulação Hiperbólica (Continuação).



Fonte: O Autor (2019).

Tabela 14 - Parâmetros de ajustes da formulação hiperbólica para a curva Deformação x Tempo

Parâmetros	Tensão de Inundação (kPa)							
	1	10	20	40	80	160	320	640
a	4,384	3,811	7,094	2,590	40,688	-717,62	-45,888	-164,2
b	0,121	0,285	0,345	2,58	1,108	-10,579	-3,335	-1,114
Coeficiente de correlação(R^2)	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,964	0,968	0,979
$Ɛ_{max}$ (%)	8,06	3,50	2,90	5,253	0,90	-0,095	-0,455	-0,90
$Ɛ_{med}$ (%)	8,03	3,49	2,89	0,386	0,89	-0,094	-0,451	-0,88
Erro (%)	0,35	0,13	0,21	0,14	0,37	0,68	0,70	1,56

*Onde: a = valor do coeficiente linear da linearização da função; b = valor do coeficiente angular da linearização da função; Ɛmax = Deformação Máxima Calculada; Ɛmed =Deformação Máxima Medida; Erro = Erro final entre as deformações calculada e medida.

Fonte: O Autor (2019).

Na Tensão de 160 kPa foi observado que o solo apresentou um comportamento caraterístico de quando o solo está próximo a sua tensão de expansão. Nesta ocasião a amostra sofreu um colapso inicial, seguida de uma expansão e depois colapso. Este comportamento é difícil de ser previsto/estimado com exatidão por meio de formulações matemáticas. Nas tensões de 320 e 640 kPa observou-se um bom ajuste da curva com relação aos dados experimentais, apresentando valores de erro um pouco acima dos obtidos nas tensões de expansão, porém abaixo de 2%.

A Tabela 15 apresenta os valores das tensões de expansão obtidas pelo método Volume Constante das amostras submetidas a diferentes sucções iniciais. As umidades foram equalizadas em dessecadores de vácuo, que continham soluções de ácido sulfúrico (H_2SO_4), e aguardaram a equalização da umidade para aquela sucção imposta. Os resultados obtidos revelaram tensões de expansão variando entre 168 a 488 kPa. Ainda de acordo com Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), nestas situações, o grau de expansividade do solo variou entre alto a muito alto. Estes resultados comprovam a forte influência da umidade na tensão e no potencial de expansão de solos expansivos.

Tabela 15 - Valores de Tensão de Expansão a Volume Constante para diferentes sucções/umidades iniciais

Sucção Imposta (MPa)	8,11	19,91	33,16	81,07
Umidade inicial da Amostra (%)	16,0	12,5	9,0	7,7
Tensão de Expansão a Volume Constante (kPa)	168	250	438	488
Classificação por Vijayvergiya e Ghazzaly (1973).	Alto	Alto	Muito Alto	Muito Alto

Fonte: O Autor (2019).

4.5.2 Resistência ao Cisalhamento do Solo

Foram realizados ensaios de Cisalhamento Direto e Triaxial, na condição Consolidado não Drenado (CU), para amostras de solo indeformadas da Camada II. A Figura 45 apresenta as curvas Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante, curva Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical e Envoltória de Ruptura nas condições de umidade natural e inundada obtidas dos ensaios de Cisalhamento Direto. A Tabela 16 mostra os índices físicos das amostras no início dos ensaios e os valores do ângulo de atrito e coesão obtidos.

As envoltórias de ruptura foram estabelecidas para as tensões normais de 50, 100 e 200 kPa. Estes ensaios mostram uma diminuição dos valores de coesão e ângulo de atrito para as condições ensaiadas, sendo a coesão reduzida de 47 kPa para 13 kPa, e o ângulo de atrito reduzido de 27º para 22º. Além disso, observa-se uma mudança no comportamento da curva Tensão x Deformação. Na condição de umidade natural há um comportamento de pico e na inundada previamente um comportamento plástico. Isto é devido à redução de sucção

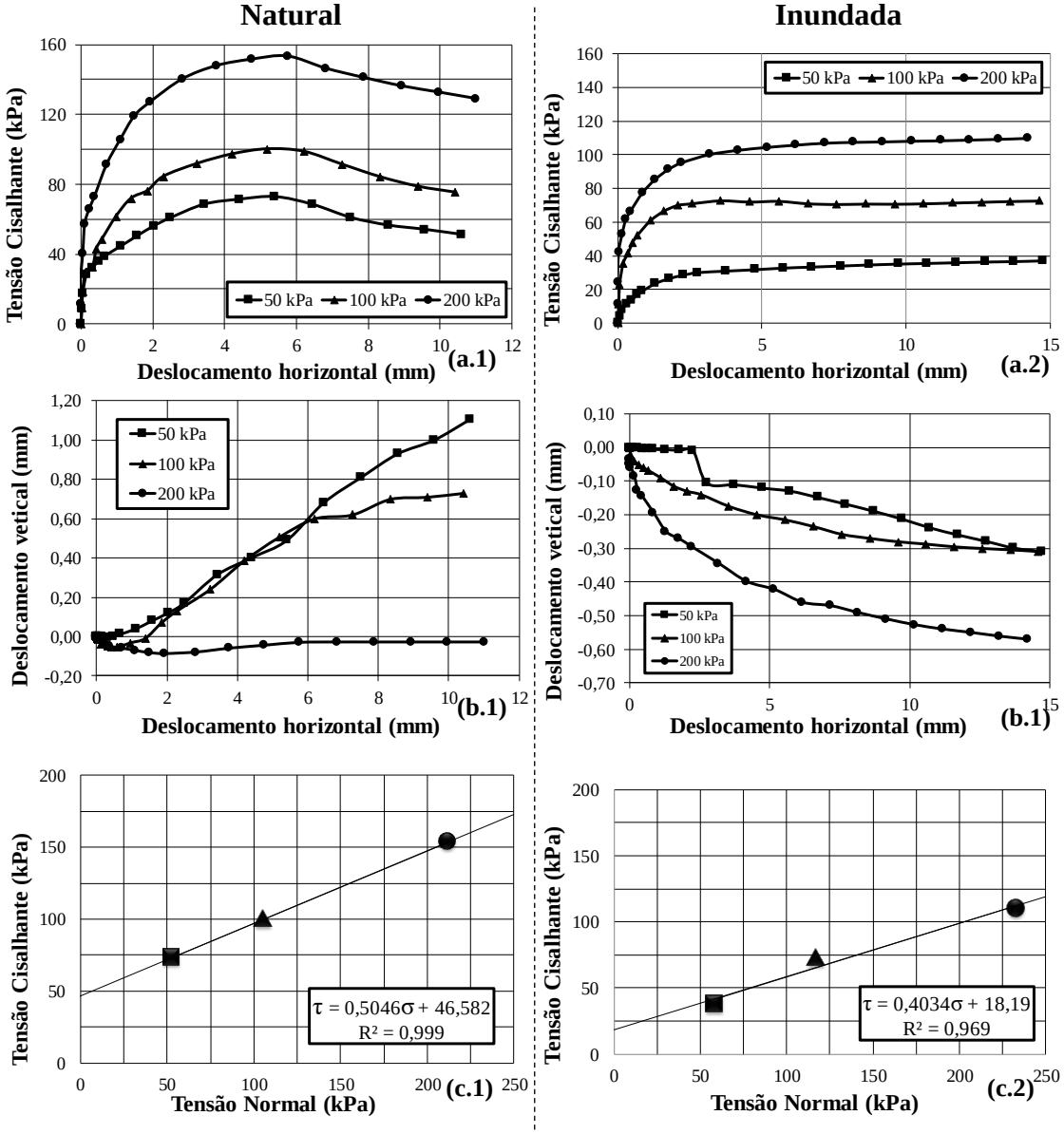
Tabela 16 - Índices físicos inicias das amostras ensaiadas e parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos nos ensaios de Cisalhamento Direto.

Dados	Ensaio Natural			Ensaio Inundado		
σ (kPa)	50	100	200	50	100	200
W_i (%)	26,31	26,31	26,57	22,75	23,32	20,55
γ (kN/m³)	18,31	18,52	19,34	19,15	19,19	18,62
γ_d (kN/m³)	14,5	14,66	15,28	15,60	15,56	15,44
e_0	0,85	0,83	0,75	0,72	0,72	0,74
σ_r (kPa)	52,81	105,37	212,01	58,48	116,80	232,53
τ_r (kPa)	72,93	100,20	153,42	35,76	61,46	106,10
Coesão (kPa)	46,6			18,2		
Ângulo de Atrito (º)	27			22		

*Onde: σ = Tensão Normal Aplicada (kPa); W_i = Umidade Inicial da Amostra (%); γ = Peso Especifico Úmido (kN/m³); γ_d = Peso Especifico Seco (kN/m³); e_0 = Índice de vazios inicial; σ_r = Tensão Normal no momento da ruptura – área corrigida (kPa); τ_r = Tensão Cisalhante de Ruptura (kPa).

Fonte: O Autor (2019).

Figura 45 - Curvas Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante (a); Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical (b) e Envoltória de Ruptura (c) para as situações ensaiadas.



Fonte: O Autor (2019).

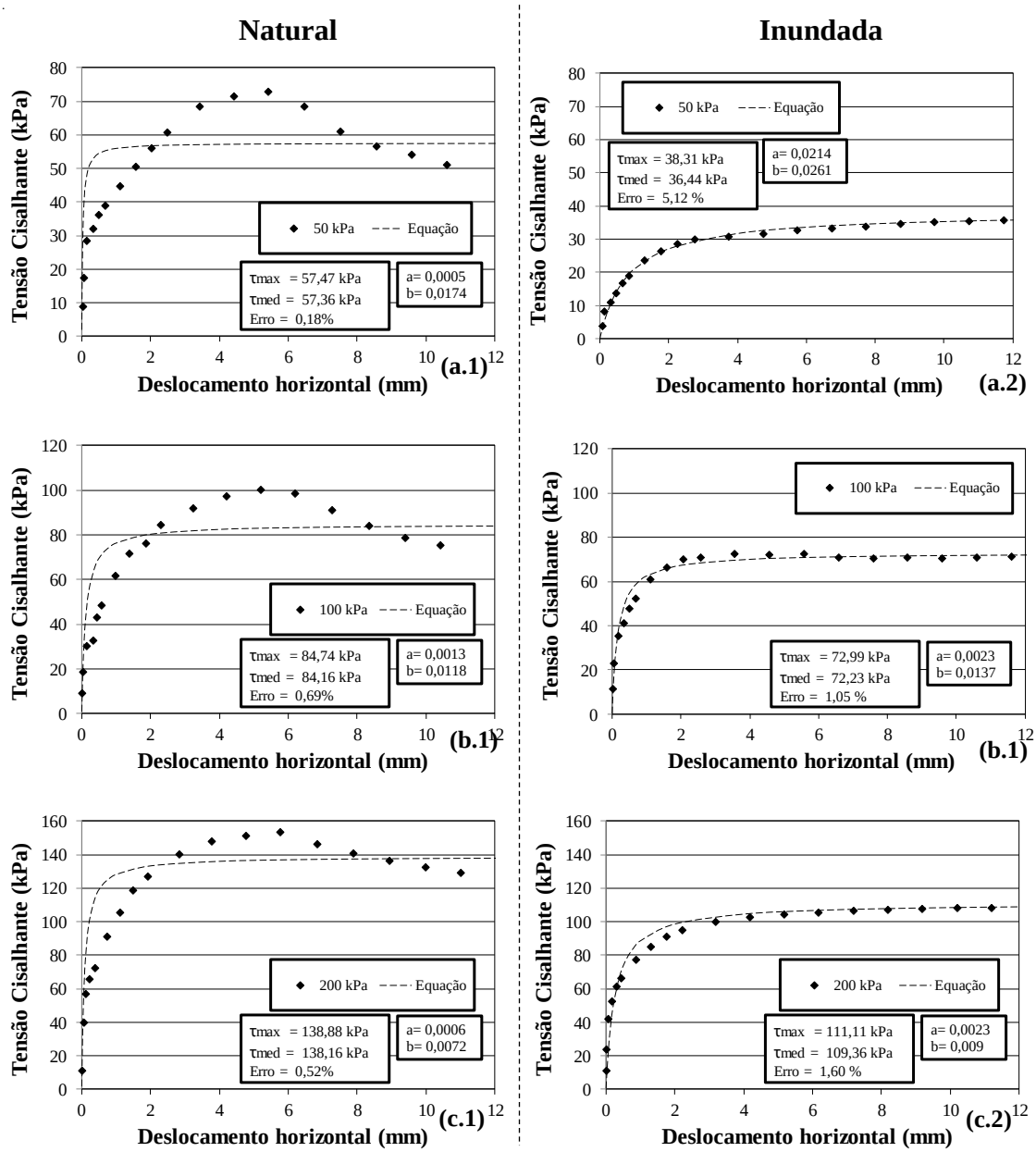
Aplicando a formulação hiperbólica, proposta por Kondner (1963), aos ensaios de Cisalhamento Direto observou-se um bom ajuste da curva aos resultados experimentais obtidos.

A Figura 46 apresenta as curvas Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante com a utilização da metodologia hiperbólica, para as situações Natural e Inundada. A Tabela 17 mostra os parâmetros a e b, o coeficiente de correlação (R^2), as Tensões Cisalhante Máximas calculadas (τ_{max}) e medidas (τ_{med}), e o Erro de ajuste.

Nota-se que amostras inundadas (as quais apresentaram um comportamento plástico durante a ruptura) possuem um melhor ajuste da função utilizada ao longo do ensaio, se

comparadas as amostras ensaiadas com umidade natural (comportamento de pico). O coeficiente de correlação (R^2) das curvas foi superior a 0,97 em todos os casos.

Figura 46 - Curvas Deslocamento Horizontal x Tensão Cisalhante (Formulação Hiperbólica).



Fonte: O Autor (2019).

Tabela 17 - Parâmetros de ajustes da formulação hiperbólica para a curva Deslocamento Horizontal x Tensão Desviatória

Parâmetros	Natural			Inundado		
	50	100	200	50	100	200
a	5.10^{-4}	0,001	6.10^{-4}	0,021	0,002	0,002
b	0,017	0,0118	0,007	0,026	0,013	0,009
Coeficiente de correlação (R^2)	0,972	0,976	0,992	0,999	0,999	0,999
τ_{max} (kPa)	57,47	84,74	138,88	38,31	72,99	111,11
τ_{med} (kPa)	57,36	84,16	138,17	36,44	72,23	109,36
Erro (%)	0,18	0,69	0,52	5,12	1,05	1,60

*Onde: a = valor do coeficiente linear da linearização da função = Inverso do Módulo Tangente Inicial; b = valor do coeficiente angular da linearização da função = inverso da Tensão Cisalhante Máxima calculada; τmax = Tensão Cisalhante Máxima Calculada; τmed =Tensão Cisalhante Máxima Medida; Erro = Erro final entre as tensões cisalhantes calculada e medida.

Fonte: O Autor (2019).

O ensaio de compressão Triaxial foi realizado para as tensões confinantes de 50, 100, 150 e 200 kPa. Neste tipo de ensaio, a amostra de solo é instalada na célula de ensaio e sofre o processo de saturação através de aplicações de pressão e contra pressão. Após a saturação é iniciado o processo de consolidação e, finalizada esta etapa, o processo de ruptura da amostra. Nos ensaios tipo Consolidado não Drenado (CU) não ocorre drenagem durante a etapa de ruptura da amostra.

A Tabela 18 mostra os índices físicos iniciais das amostras e parâmetros de resistência ao cisalhamento obtido no ensaio. A Figura 47 apresenta os gráficos correspondentes as Deformação Axial x Tensão Desviatória; Deformação Axial x Poro Pressão; e Envoltória de Ruptura.

Todas as amostras ensaiadas apresentam valores máximo de tensão cisalhante no intervalo entre 12,5% a 16,6% de deformação específica axial, sendo verificada uma estabilização da tensão cisalhante após isso. Durantes os ensaios, pôde-se observar ainda um aumento da poro pressão até atingir seu valor máximo, seguida de redução, com o aumento da deformação específica axial. Os valores obtidos para coesão e ângulo de atrito efetivos foram 10 kPa e 29° respectivamente.

O valor da coesão efetiva obtida no ensaio CIU (10 kPa) é inferior a obtida no ensaio de cisalhamento direto na condição de inundação prévia (18 kPa) e o valor do ângulo de atrito efetivo obtido no CIU (29º) é maior que do cisalhamento direto na condição inundada (22º). A diferença está associada a prefixação da superfície de ruptura do cisalhamento direto em relação

ao triaxial; a saturação do solo no ensaio triaxial, uma vez que no cisalhamento direto não se tem esta garantia (o solo foi inundado e submerso por 48 horas); além de que no cisalhamento direto há rotações dos planos principais durante o ruptura da amostra. É importante salientar também a heterogeneidade da amostra de um mesmo bloco e das orientações das fissuras internas.

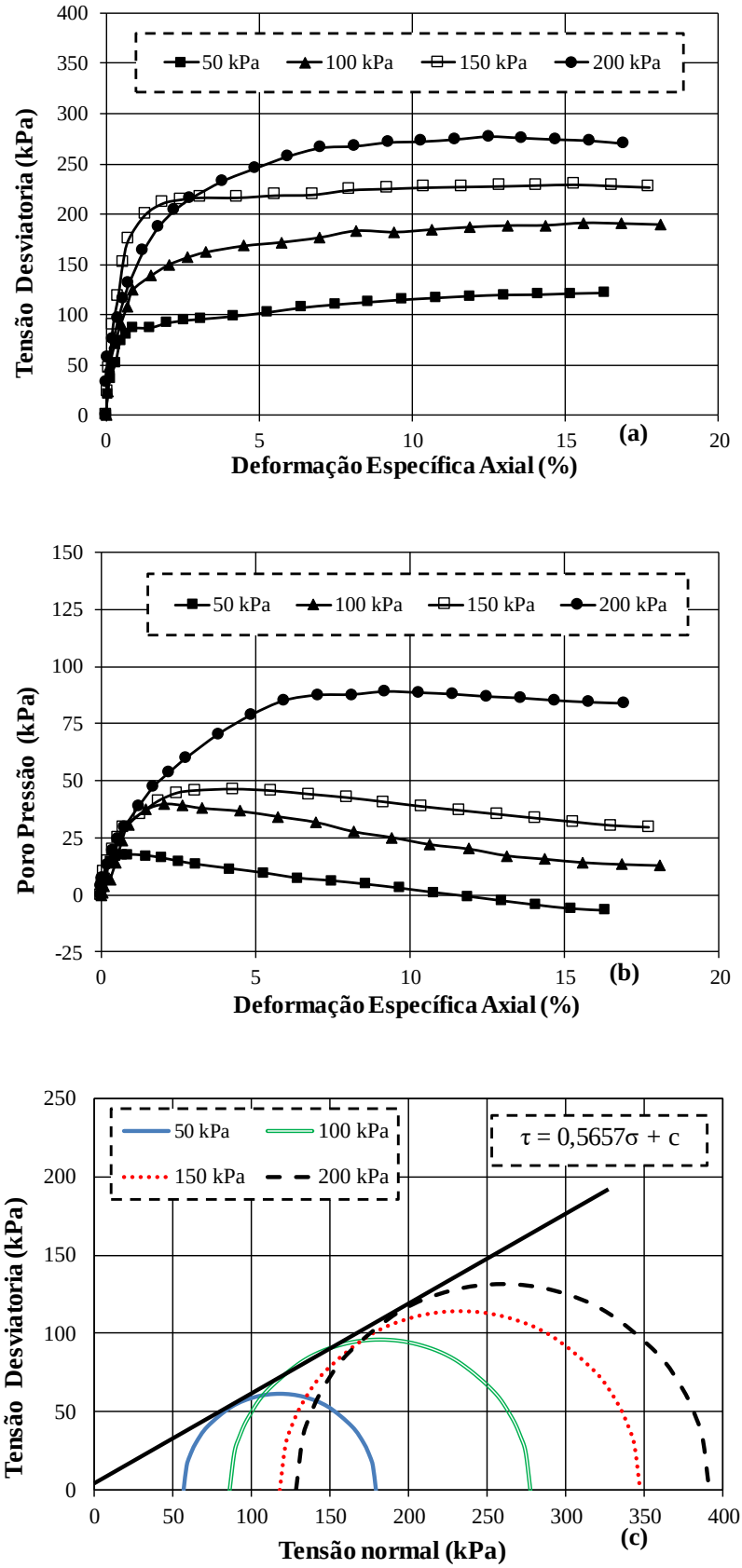
Tabela 18 - Índices físicos inicias das amostras ensaiadas e parâmetros de resistência ao cisalhamento obtido dos ensaios de compressão triaxial.

σ (kPa)	50	100	150	200
Wi (%)	22,84	20,36	26,84	22,57
γ (kN/m³)	17,77	17,34	16,76	18,71
γ_d (kN/m³)	14,47	14,40	13,21	15,26
e_0	0,85	0,86	1,03	0,76
$\sigma`_{3r}$ (kPa)	56,70	85,90	119,10	113,42
$\sigma`_{1r}$ (kPa)	178,76	277,26	347,90	390,58
$\Delta\sigma`$ (kPa)	122,06	191,36	229,79	277,16
Δu_r (kPa)	-6,70	14,10	31,90	86,58
ε_{ar} (%)	16,3	15,6	15,3	12,5
Coesão Efetiva (kPa)	10			
Ângulo de Atrito Efetivo (º)	29			

*Onde: σ = Pressão de Consolidação (kPa); Wi = Umidade Inicial da Amostra (%); γ = Peso Especifico Úmido (kN/m³); γd = Peso Especifico Seco (kN/m³); e_0 = Índice de vazios inicial; $\sigma`$3r = Tensão Principal Menor Efetiva (kPa); $\sigma`$1r = Tensão Principal Maior Efetiva (kPa); $\Delta\sigma`$ = Tensão Desvio (kPa); Δur = Pressão Neutra (kPa); εar = Deformação Especifica Axial (%).

Fonte: O Autor (2019).

Figura 47 - Gráficos de Deformação Axial x Tensão Desviatória (a); Deformação Axial x Poro Pressão (b); e Envoltória de Ruptura (c).

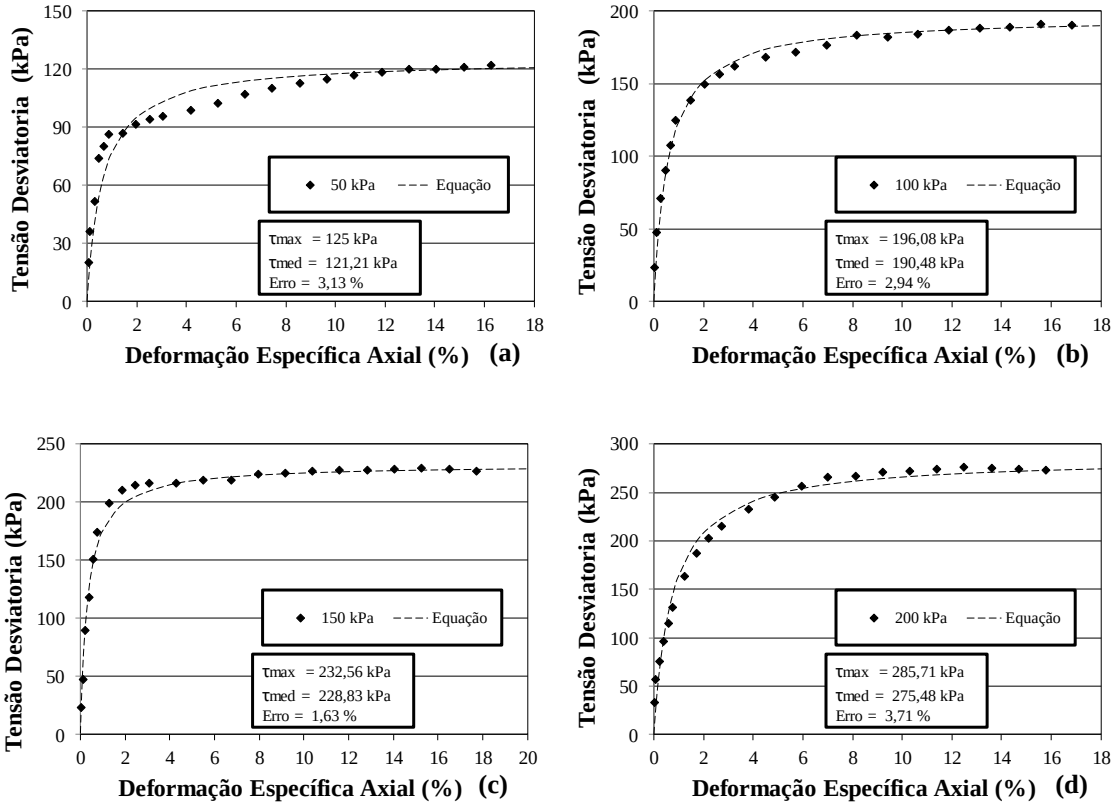


Fonte: O Autor (2019).

Utilizando-se da formulação hiperbólica para os resultados obtidos no ensaio de Compressão Triaxial nota-se, assim como foi visto na aplicação desta formulação nos resultados obtidos pelo Cisalhamento Direto, que esta metodologia se ajusta bem aos resultados experimentais obtidos. O Coeficiente de correlação (R^2) das curvas ficou acima de 0,99 para todas as pressões de consolidações adotadas.

A Figura 48 apresenta as curvas Deformação Específica Axial x Tensão Cisalhante com a utilização da metodologia hiperbólica para todas as tensões confinantes ensaiadas. A Tabela 19 mostra os parâmetros a e b, o coeficiente de correlação (R^2), as Tensões Cisalhante Máximas calculadas (τ_{max}) e medidas (τ_{med}), e o Erro de ajuste.

Figura 48 - Curvas Deformação Específica Axial x Tensão Desviatória(Formulação Hiperbólica)



Fonte: O Autor (2019).

Tabela 19 - Parâmetros de ajustes da formulação hiperbólica para a curva Deformação Específica Axial x Tensão Desviatória

Parâmetros	Pressão de Consolidação (kPa)			
	50	100	150	200
a	0,05	0,03	0,001	0,002
b	0,08	0,005	0,004	0,003
Coeficiente de correlação (R^2)	0,997	0,999	0,999	0,998
τ_{max} (kPa)	125,00	196,08	232,56	285,71
τ_{med} (kPa)	121,21	190,48	228,83	275,48
Erro (%)	3,13	2,94	1,63	3,71

*Onde: a = valor do coeficiente linear da linearização da função = Inverso do Módulo Tangente Inicial; b = valor do coeficiente angular da linearização da função = Inverso da Tensão Desviatória Máxima calculada; τ_{max} = Tensão Desviatória Máxima Calculada; τ_{med} =Tensão Desviatória Máxima Medida; Erro = Erro final entre as tensões Desviatória calculada e medida.

Fonte: O Autor (2019).

5 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE FISSURAS EM SOLO

O aparecimento de fissuras em solo está intimamente relacionado a perda de água/aumento da sucção da massa de solo. Esse fenômeno, mais comum em solos argilosos, afeta diretamente as propriedades hidráulicas e mecânicas, podendo comprometer a segurança, estabilidade e funcionalidade das obras e edificações sobrejacentes a eles. Fatores como: composição mineralógica e quantidade de argila na massa de solo; variação da sucção; umidade relativa do ar; temperatura e espessura da camada, também exercem influência no processo de fissuras.

A ocorrência de fissuras em solo pode comprometer, inclusive, a funcionalidade e segurança das obras. Silva (2017) relata problemas relacionados ao surgimento de fissuras no âmbito da pavimentação e em camadas de coberturas de aterros sanitários.

Em pavimentação, as fissuras, em geral, se originam no revestimento e são transmitidas para as camadas de base e sub-base. Essas fissuras acabam formando caminhos preferencias de fluxo de água, permitindo o carreamento de finos e, consequentemente, perda da resistência.

Nas camadas de coberturas em aterros sanitários, a formação de fissuras normalmente é provocada fatores diversos, tais como: ressecamento, erosão por água ou vento, recalques causados pela decomposição dos resíduos ou por fatores antrópicos como movimento de veículos durante a operação do aterro, entre outros. Essas fissuras provocam um aumento da permeabilidade (ao ar e a água) da camada de cobertura, comprometendo assim a segurança e funcionalidade do aterro visto que principal função dessa camada de cobertura é servir como camada impermeável.

Stirling (2018), em pesquisa realizada no Reino Unido, relata a importância do monitoramento e instrumentação de fissuras em grandes obras de infraestrutura, como barragens, ao longo dos anos. Fatores sazonais e mudanças do padrão climático da região, como um verão mais quente que o normal ou estação chuvosa mais intensa, podem influenciar no surgimento das fissuras e em suas dinâmicas de formação, podendo vir a comprometer a segurança e/ou funcionalidade das obras em questão.

Apesar da importância no contexto geotécnico, não foi verificada nenhuma norma ou diretriz, nacionais e internacionais, que estabeleçam rotinas de ensaios e métodos de análises, tanto em campo quanto em laboratório. Mesmo diante dessa dificuldade, observa-se que, de modo geral, as pesquisas relacionadas a esse tema tendem a seguir certa padronização nas metodologias de ensaios de laboratório e nos parâmetros de análises.

Sendo assim, esta secção do trabalho tem por objetivo expor toda a metodologia desenvolvida e utilizada, desde a montagem dos equipamentos até chegar na análise da imagem, além de apresentar e analisar os resultados obtidos.

5.1 MATÉRIAS E MÉTODOS

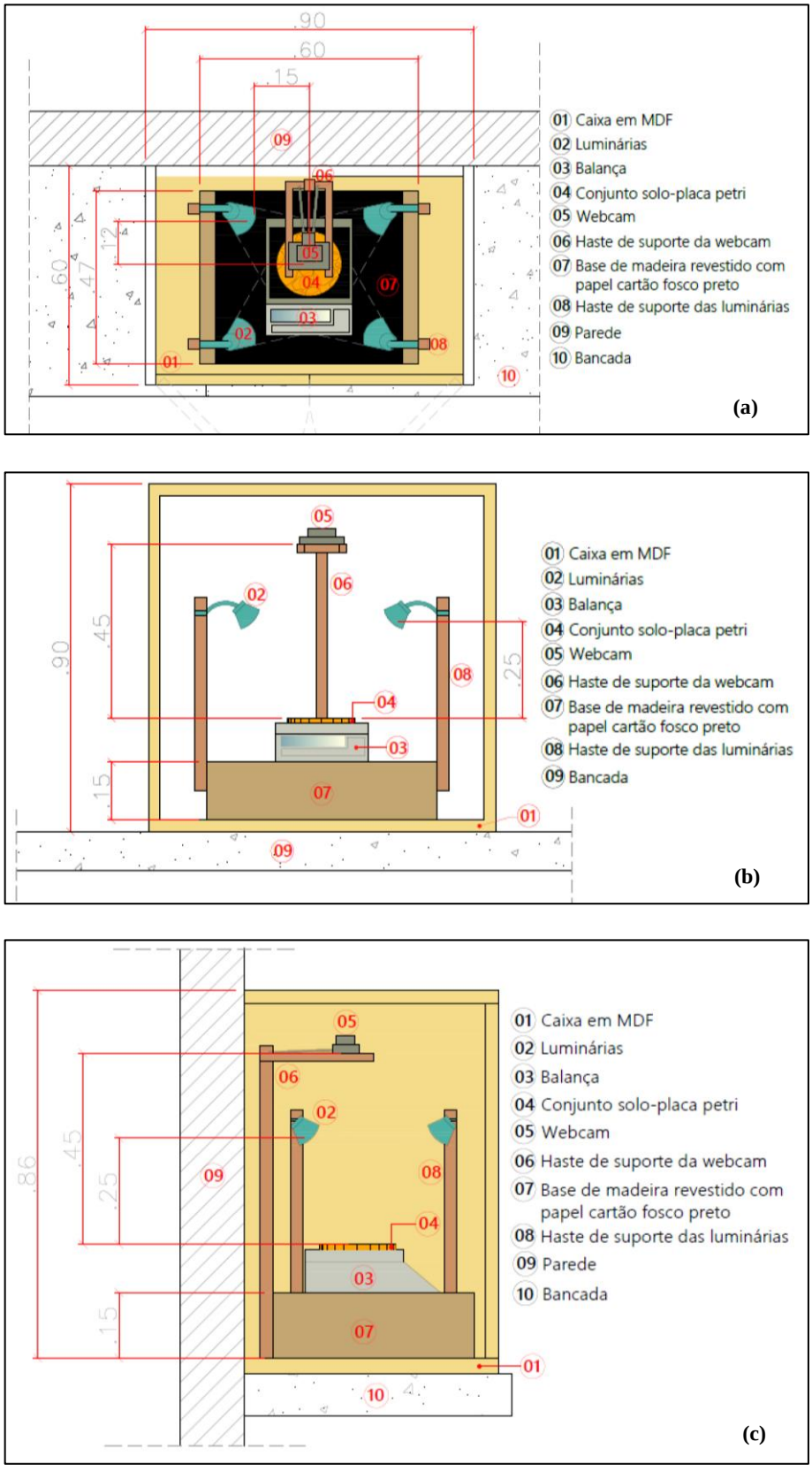
Para a avaliação do processo e propagação de fissuras foi projetado, elaborado e desenvolvido um aparato específico. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica do Solos Não Saturados, da Universidade Federal de Pernambuco. A seguir será apresentada, de forma detalhada, todo procedimento utilizado durante a pesquisa. Toda a metodologia aqui descrita para a construção do aparato foi fruto de um trabalho conjunto dos alunos do Grupo de Pesquisa de Solos Não Saturados (GÑSat). A definição de algumas das etapas e ponderações desta metodologia só foi possível após realização e observação dos resultados de teste preliminares (Anexo 01).

5.1.1 Montagem dos Equipamentos e Procedimentos Adotados

Para a realização dos ensaios de fissuras, foi necessário idealizar uma logística e equipamentos capazes de fornecer um controle das variáveis ambientais do local (Temperatura e Umidade Relativa do Ar), além de garantir um apoio adequado para a instalações dos acessórios utilizados (balança, luminárias e webcam). Para isso, foi utilizado um aparato de madeira, o qual possui uma base e 05 (cinco) hastes, servindo assim de apoio para a balança, luminárias e webcam.

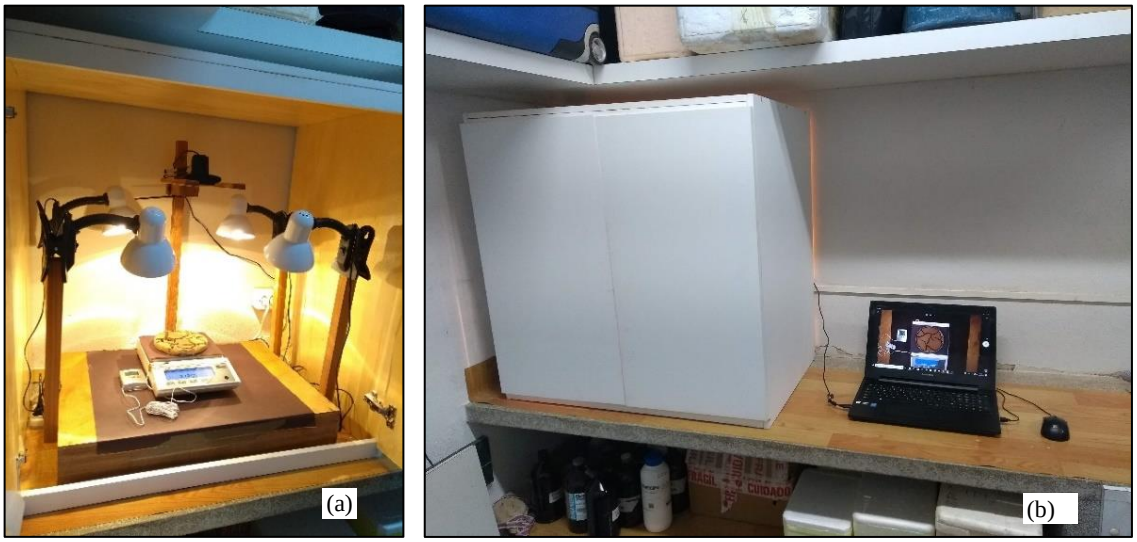
Foi confeccionada ainda uma caixa de madeira na qual o aparato foi posicionado em seu interior. Esta caixa teve por objetivo estabilizar ao máximo a temperatura do ensaio ao longo do tempo. As Figuras 49 e 50 ilustram o aparato de madeira e o posicionamento dos equipamentos utilizados.

Figura 49 - Aparato de madeira utilizado – Ilustração (dimensões em metros) Vista Superior (a); Frontal (b) e Lateral (c)



Fonte: Ferreira *et al.* (2019).

Figura 50 - Aparato desenvolvido para realização dos testes de fissuras.



Fonte: Ferreira *et al.* (2019).

Durante todo o ensaio, o condicionador de ar do laboratório ficou ligado, evitando assim variações bruscas de temperatura. Foi utilizado ainda um termo higrômetro digital dentro caixa, com o sensor posicionado em cima da balança/próximo ao CP, a fim de medir a variação de temperatura e umidade relativa do ar do ambiente ao longo do tempo.

Os ensaios foram realizados de maneira aquecida, para isso utilizaram-se 4 lâmpadas incandescentes de 40 w cada, posicionadas a uma altura de 0,25 m da amostra de solo, todas com inclinação padrão, direcionada para a balança/amostra de solo. Todos os ensaios foram monitorados ao longo do tempo, para isso posicionou-se uma webcam no aparato de madeira, de modo centralizado à amostra, a uma altura de 45 cm.

5.1.2 Preparação da Amostra e Ensaios de Fissuras

Foram realizados 02 ensaios para analisar a propagação de fissuras. Ambos seguiram o mesmo processo de preparação e moldagem, diferenciando-se pela umidade inicial adotada, índice de vazios inicial e pelos ciclos de secagem e umedecimentos realizados. As amostras de solo foram utilizadas sem secagem prévia e sem destorroamento. Esta medida visou evitar uma maior perturbação da estrutura do solo, devido a uma variação volumétrica, durante o processo de secagem ao ar.

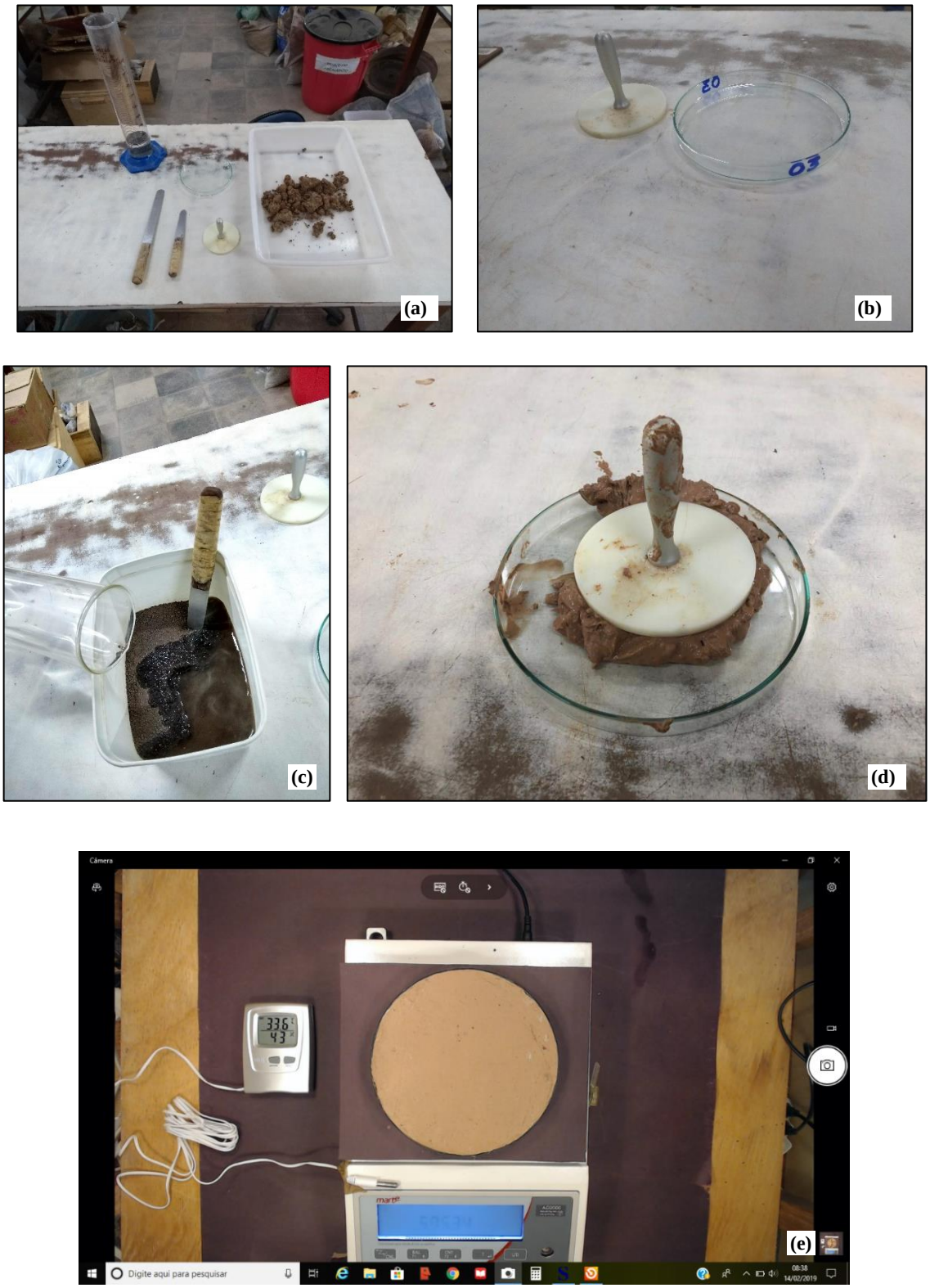
A seguir será descrito todo o procedimento adotado durante este trabalho, desde o armazenamento das amostras, processo de preparação e moldagem, até o ensaio propriamente dito:

- As amostras amolgadas do solo foram armazenadas, desde a coleta em campo, em recipientes plásticos com tampa vedadas. Tal procedimento permitiu a conservação de umidade ao longo do tempo;
- 24 h antes do início do ensaio, eram retiradas amostras de solo dos baldes a fim de verificar, com exatidão, a umidade de solo naquela data. Constatou-se pouquíssima variação de umidade ao longo do tempo;
- Após a obtenção da umidade da amostra separava-se 1 kg de solo e calculava-se a quantidade de água necessária para que esta massa de solo chegasse à umidade desejada. Foi utilizada água destilada;
- Antes da adição de água e mistura era realizada, de forma manual, a quebra dos grumos do solo;
- A mistura/adição da água no solo era realizada de forma manual, em potes plásticos ou bandejas plásticas, utilizando de espátulas metálicas e, por muitas vezes, a própria mão. A água era adicionada de forma gradual. O fim do processo de mistura e homogeneização era encerrado após perceber que toda a água adicionada era absorvida pelo solo. A partir daí iniciava-se o processo de moldagem;
- Os moldes utilizados foram placas petri de vidro de formato circular, com 150 mm de diâmetro e 15 mm de altura. Não foi colocado vaselina nos moldes.
- A moldagem da amostra foi realizada de forma manual, com o auxílio de um “soquete plástico”. Este “soquete” servia, sobretudo, para espalhar o solo no molde e na retirada de bolhas de ar. Para se obter uma forma bem definida (incluindo altura da amostra), todo o volume do molde era preenchido. Sempre que necessário realizava-se o arrasamento do topo do molde utilizando-se de uma espátula/régua metálica. Para verificar a umidade inicial do solo era separada uma pequena quantidade para obtenção da umidade pelo método da estufa;
- Após o fim da moldagem, o conjunto placa+solo era limpo e colocado em cima da balança de precisão, de sensibilidade 0,01g, anotando-se o peso inicial. O conjunto permanecia sobre a balança durante todo o ensaio. Este procedimento permitia a obtenção do peso do conjunto em tempo real, possibilitando assim o cálculo de umidade do solo para aquele instante.
- As luzes incandescentes e o condicionador de ar do laboratório eram ligados antes do início da moldagem (aproximadamente 2h antes do início do ensaio propriamente dito) de modo a estabilizar a temperatura inicial do ambiente.

- Ao fim do ensaio, após o último ciclo de secagem, parte da amostra de solo ensaiada era destinada a obtenção da umidade pelo método da estufa;
- No Ensaio 02, os ciclos de inundação eram iniciados com a umidade da amostra próxima ao LP. Estes ciclos consistiam em adicionar água destilada, com auxílio de uma pisseta, até atingir o peso inicial do ensaio. O período de inundação, tempo entre a primeira e última colocação de água, durava em torno de 70 h. Foram realizados 02 ciclos de inundação.
- No Ensaio 02, o início dos ciclos de secagem pós-inundação era considerado após 24h da última colocação de água quando era verificado que toda a água livre já havia sido evaporada.

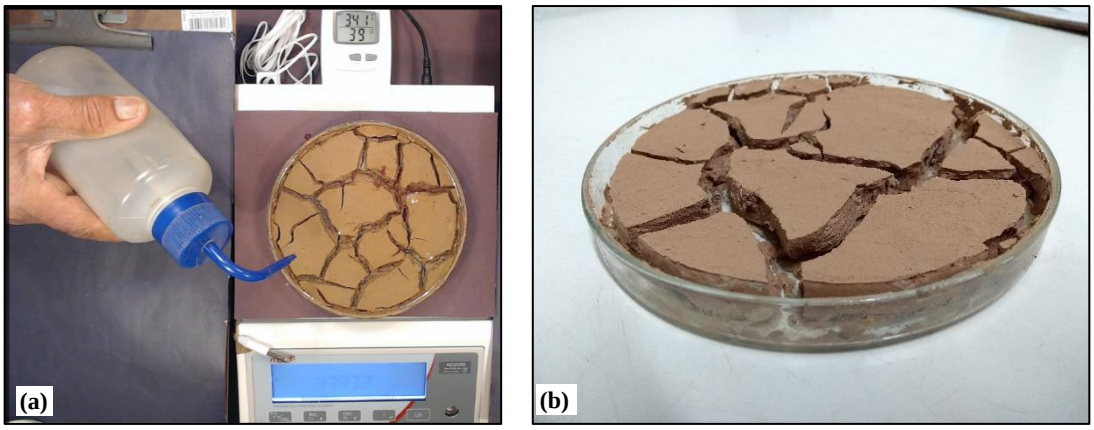
As Figuras 51 e 52 ilustram, de forma didática, as principais etapas adotadas nesta pesquisa.

Figura 51 - Materiais utilizados nos processos de homogeneização, mistura e moldagem (a); detalhe do molde de vidro e "soquete" de plástico utilizados(b); processo de e mistura (c) e moldagem (d) das amostras; e padrão para o início dos ensaios (e).



Fonte: O Autor (2019).

Figura 52 - Detalhe para o processo de inundação das amostras – Ensaio 02 (a) e amostra ao termino do Ensaio 01 (b).

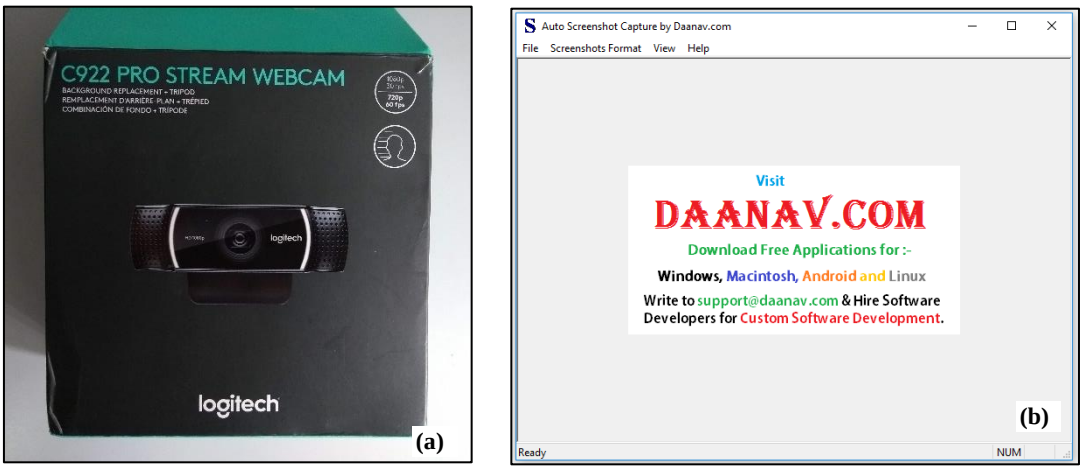


Fonte: O Autor (2019).

5.1.3 Captura, Seleção e Preparação das Imagens

Para acompanhar a dinâmica de fissuração do solo ao longo do tempo utilizou-se uma webcam (modelo Logitech C922 PRO STREAM) ligada a um notebook. A captura das imagens ocorria a cada 10 min (600 s), para isso foi utilizado o software livre Auto Screenshot Capture. A Figura 53 mostra a webcam utilizada (a) e o software empregado para aquisição das imagens (b).

Figura 53 - Modelo da Webcam utilizada (a) e vista do software Auto Screenshot Capture - empregado para aquisição de imagens (b)



Fonte: O Autor (2019).

Após o fim do ensaio e com todas as imagens disponíveis, iniciava-se o processo de seleção das imagens correspondente as umidades e/ou tempos desejados. Foi desenvolvida

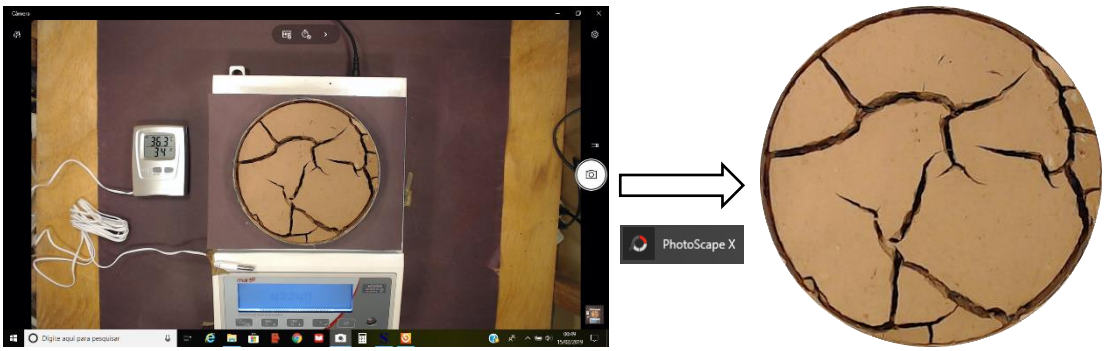
planilha eletrônica para auxiliar nos cálculos necessários para a escolha da imagem, além de anotar dados como Temperatura e Umidade Relativa do Ar ao longo do ensaio.

Para os ciclos de secagem, foi adotado como padrão a escolha das imagens correspondente a uma variação aproximada de 5% de umidade. Para os períodos de inundação realizou-se a separação das imagens por tempo de inundação, sendo adotados como tempos de referências: 1 h, 12 h, 24 h, 36h, 48 h e 70 h. Além do tempo, a escolha da imagem levava em consideração se a amostra de solo estava totalmente submersa ou não, otimizando assim a análise das imagens.

O início dos ciclos de secagem pós-inundação e, consequentemente, a escolha da primeira imagem ocorria somente após 24 h da última reposição de água. Após esse tempo, era verificado que toda a água livre já havia sido evaporada do molde, sendo possível calcular, de forma mais precisa, a umidade do solo naquele momento.

Após a seleção das imagens realizava-se o processo de corte. As imagens eram recortadas em formato circular, de modo a visualizar exclusivamente a amostra de solo. Nesta etapa, foi utilizado o software livre PhotoScape X**.** Este programa permite, além do corte e de outras ferramentas de uso gráfico, salvar as imagens em diferentes extensões de arquivos (salvar as imagens em .tif, .bmp, .png, .jpeg e .gif). A Figura 54 ilustra o padrão de corte adotado.

Figura 54 - Processo de seleção e corte das imagens.



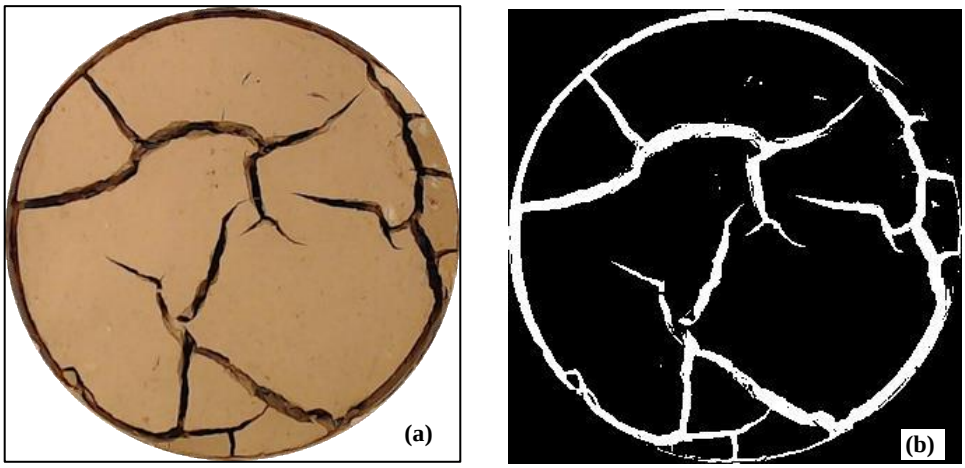
Fonte: O Autor (2019).

5.1.4 Análise das Imagens

Após a seleção e corte das imagens era iniciado o procedimento de análise. Esta etapa consiste em obter o parâmetro CIF da amostra solo nas imagens selecionadas, correlacionando-as com a umidade e/ou sucção para aquele instante. Para uma melhor precisão na determinação do CIF, realizava-se o processo de binarização, ou seja, transformar as cores da imagem original em preto e branco. A Figura 55 apresenta o comparativo entre uma imagem original colorida

(a) e binarizada (b). Observa-se na imagem binarizada um melhor contraste entre a massa de solo e as fissuras se comparada a imagem original.

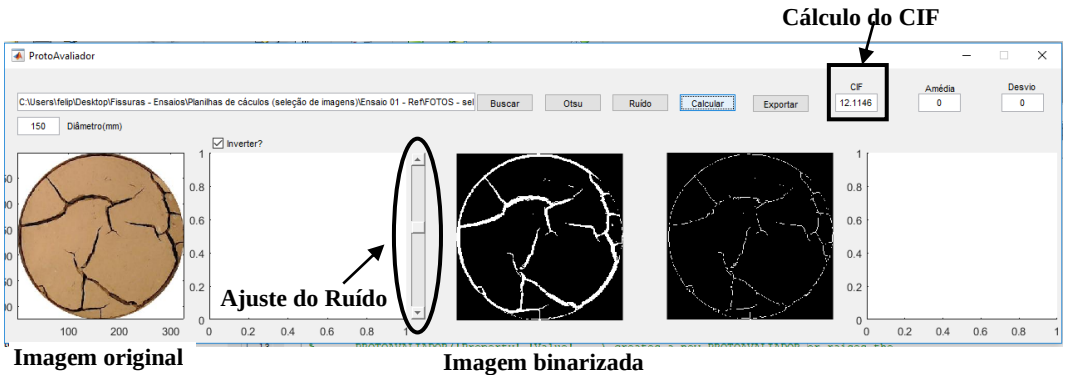
Figura 55 - Comparativo entre a imagem original colorida (a) e binarizada (b).



Fonte: O Autor (2019).

Para realização da binariação da imagem e do cálculo do fator CIF, utilizou-se uma rotina de programação desenvolvida por Silva (2017). O processo de binarização das imagens foi realizado de forma manual, utilizando-se da ferramenta Ruído. Foi utilizado o mesmo padrão de Ruído para todas as imagens analisadas, em todas as condições. O programa computacional utilizado para rodar a rotina foi o software proprietário MATLAB® versão R2016b. A Figura 56 mostra a interface do programa de análise de imagens.

Figura 56 - Interface do programa de análise de imagens.



Fonte: O Autor (2019).

5.2 RESULTADOS E ANÁLISES

A seguir, serão apresentados os resultados e discussões do processo de propagação de fissuras através da análise de imagens. Para isso, foram realizados dois ensaios, ambos moldados da mesma forma, diferenciando-se apenas pela umidade inicial adotada e pelos ciclos de secagem e umedecimentos realizados.

O primeiro ensaio foi realizado com a umidade inicial da amostra próxima ao Limite de Liquidez, sendo realizado apenas um ciclo de secagem, com duração aproximada de 49 h. Já o segundo ensaio foi moldado partindo da umidade de 94,2%, correspondente a 1,25 do Limite de Liquidez do solo, sendo realizados ainda ciclos de secagem e umedecimento, totalizando cerca de 250 h de ensaio. Foram realizadas três etapas de secagem e duas de molhagem/inundação.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos. Para uma melhor análise, as avaliações dos resultados serão divididas duas partes. Na primeira, serão consideradas as secagens apenas do primeiro e segundo ensaio, e na segunda os ciclos de secagem e umedecimento do segundo ensaio. Os dados referentes as dimensões do molde (placa petri de vidro) e da moldagem do solo estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Dados do molde e da amostra de solo

Ensaio	Ciclos ensaiados	Molde			Amostra de Solo		
		Volume	Diâmetro	Altura	$W_{inicial}$	Massa	e
01	Um ciclo de secagem	258 cm³	147 mm	15,2 mm	76,1 %	400,48 g	2,04
02	Três ciclos de secagem e duas inundações	258 cm³	147 mm	15,2 mm	94,2 %	363,74 g	2,68

W – Umidade, e – Índice de vazios

Fonte: O Autor (2019).

5.2.1 Propagação de Fissuras em Ciclos de Secagem

Os ensaios de Secagem foram realizados de modo a comparar a dinâmica de fissuração nas duas amostras, as quais foram diferenciadas apenas pela umidade e índices de vazios inicias. A Tabela 21 apresenta uma síntese dos principais resultados e observações dos ensaios realizados.

Tabela 21 - Resumos dos principais parâmetros e resultados

Parâmetros e Resultados		Ensaio	
		01	02
Umidade Inicial (%)		76,1	94,2
Índices de Vazios Inicial (e_0)		2,04	2,68
Dados iniciais da amostra	Altura (mm)	15,2	15,2
	Diâmetro (mm)	147	147
	Volume (mm)	258	258
Quantidade de lâmpadas*		04	04
Tempo total da dessecação (h)		48,8	32,8
Temperatura	Média ± D.P.	36,1± 0,83 ºC	33,9 ± 0,59 ºC
	Coef. de Variação	0,02	0,02
Umidade Relativa do Ar (URA)	Média ± D.P.	36 ± 2,38%	40 ± 2,47%
	Coef. de Variação	0,07	0,06
Aparecimento das primeiras fissuras	Tempo (h)	4,80	8,80
	Umidade (%)	69,90	80,10
Taxa de Evaporação (% / h)		1,44 – de 00h até 11h 2,18 – de 11h até 29,5h 0,59 – de 29,5h até 48,8h	1,78 – de 00h até 19,2h 2,78 – de 19,5h até 32,8h
Formato das fissuras		X ou T	X ou T
Comportamento do processo de fissuração		Fissuração no interior da amostra + contração (descolamento do molde)	Fissuração no interior da amostra + contração (descolamento do molde)
CIF Final (%)		28,1	26,0
Umidade Final (%)		08,3	20,6

*Lâmpadas incandescente – 40 w cada.

Fonte: O Autor (2019).

O primeiro ensaio partiu da umidade próxima ao Limite de Liquidez (76,1%), e foi desenvolvido com uma temperatura média de 36,1± 0,83 ºC, com o coeficiente de variação de 0,02. A Umidade Relativa do Ar teve média de 36 ± 2,38%, com o coeficiente de variação de 0,07.

Ao observar a sequência de imagens do ensaio (Figura 57) nota-se que o processo de fissura se inicia no interior da amostra juntamente com a contração do solo (descolamento do solo com as bordas do molde) radiando para a parte interior com maior intensidade. Neste ensaio o aparecimento das primeiras fissuras, de forma mais significativa, ocorreu após 4,8 horas de dessecação quando a umidade foi de 69,90%, apresentado o fator CIF para este

momento de 0,06%. O descolamento do solo junto ao molde foi evidenciado a partir da umidade de 65,20%, registrando um CIF de 3,80%.

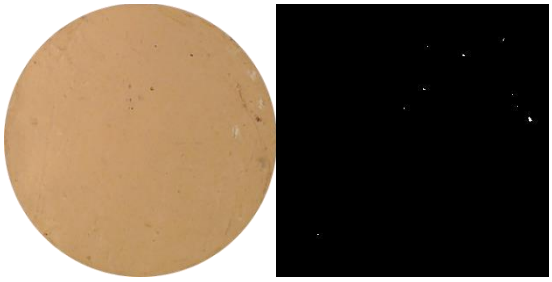
É interessante observar que o padrão sequencial das fissuras não se deu de maneira ortogonal e ocorreu simultaneamente em toda a superfície do solo, provocando assim à subdivisão da área inicial em células menores. As formas dos traçados das trincas na intersecção são predominantes em forma de “X” ou “T” formando elementos geométricos com o avanço da propagação das fissuras.

De maneira geral nota-se um aumento gradual do fator CIF ao longo do tempo, sendo observado que o avanço das fissuras, em extensão, se deu até 23 horas de dessecação, para umidade de 34,20% e um CIF de 25,90%. Após esse momento não houve aparecimento de novas fissuras, apenas o aumento de espessuras das fissuras já existentes, verificando inclusive uma quase estabilização do fator CIF (%) no restante do ensaio. Neste ponto verificou-se ainda o início de mudança de cor na amostra de solo, devido à perda de umidade. A cor do solo variou de 5YR 8/4 (“Pink”) a 7YR 5/4 (“Browm”) segundo a escala de cor de Munsell (1992). É importante destacar que identificação das cores foi realizada na luz do laboratório e considerando as imagens obtidas.

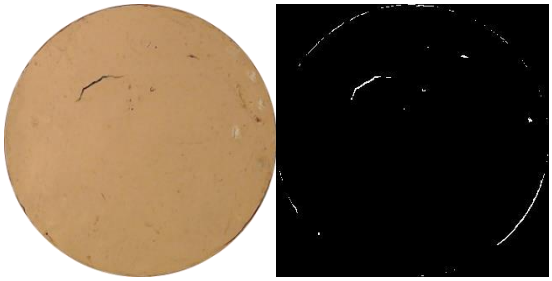
A Figura 57 apresenta o desenvolvimento do processo de secagem e fissuração da amostra ensaiada, associando a imagem com os dados para aquele instante (Tempo; Umidade da Amostra; Crack Intensity Factor – CIF; Temperatura e Umidade Relativa do Ar – URA.

Figura 57 - Desenvolvimento do processo de secagem e fissuração – Wi : 76,1%

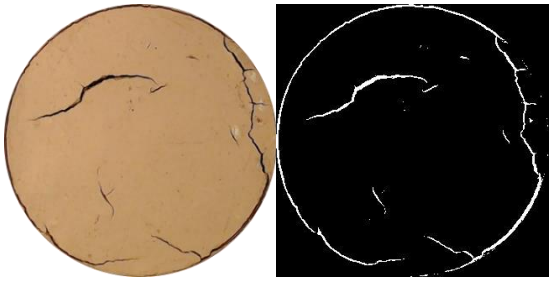
Tempo: 00 h
W: 76,1 % | CIF: 00,0 %
Temp.: 33,6 ºC | URA: 43 %



Tempo: 01,0 h
W: 75,1 % | CIF: 00,0 %
Temp.: 34,9 ºC | URA: 40 %

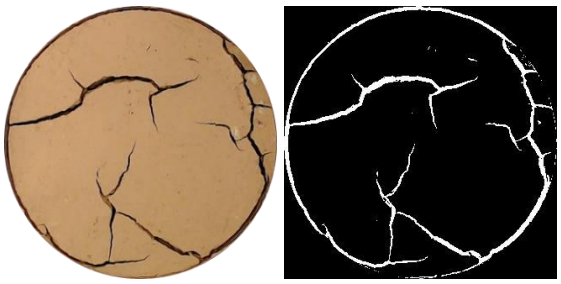


Tempo: 04,8 h
W: 69,9 % | CIF: 00,6%
Temp.: 35,9 ºC | URA: 36 %

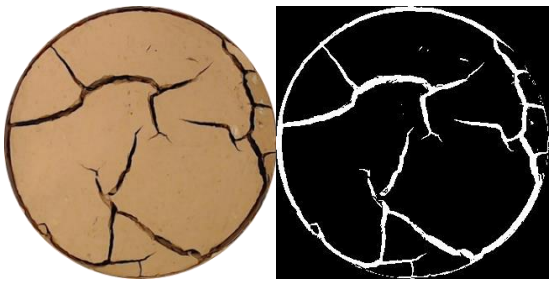


Tempo: 08,0 h
W: 65,2% | CIF: 03,8%
Temp.: 36,1 ºC | URA: 36 %

Figura 57 - Desenvolvimento do processo de secagem e fissuração – Wi : 76,1%. (Continuação).



Tempo: 11,0 h
W: 60,2 % | CIF: 08,0 %
Temp.: 36,4 ºC | URA: 35 %



Tempo: 13,8 h
W: 54,8 % | CIF: 12,1 %
Temp.: 36,4 ºC | URA: 36 %

Tempo: 16,2 h
W: 50,0 % | CIF: 15,4 %
Temp.: 36,3ºC | URA: 34 %

Tempo: 18,5 h
W: 45,0 % | CIF: 19,1 %
Temp.: 36,3 ºC | URA: 34 %

Tempo: 20,3 min
W: 40,6 % | CIF: 22,0%
Temp.: 36,3 ºC | URA: 34 %

Tempo: 23,0 h
W: 34,2 % | CIF: 23,5 %
Temp.: 36,4 ºC | URA: 36 %

Tempo: 24,7 h
W: 30,2 % | CIF: 25,9 %
Temp.: 36,1 ºC | URA: 36 %

Tempo: 26,9 h
W: 25,1 % | CIF: 26,7 %
Temp.: 35,9 ºC | URA: 35 %

Figura 57 - Desenvolvimento do processo de secagem e fissuração – Wi : 76,1%. (Continuação).

Tempo: 29,5 h
W: 19,8 % | CIF: 26,9 %
Temp.: 36,1 ºC | URA: 36 %

Tempo: 33,0 h
W: 15,0 % | CIF: 27,3 %
Temp.: 36,6 ºC | URA: 35 %

Tempo: 41,2 h
W: 10,0 % | CIF: 27,7 %
Temp.: 36,9 ºC | URA: 35 %

Tempo: 48,8 h
W: 08,3 % | CIF: 28,1 %
Temp.: 37,2 ºC | URA: 34 %

Fonte: O Autor (2019).

Figura 58 - Vídeo acelerado do ensaio (QR Code).

Fonte: O Autor (2019).

Para o ensaio realizado com uma umidade inicial correspondente a 94,2% (equivalente a 1,25 do Limite de Liquidez do solo), a temperatura média foi de 33,9 ± 0,59 ºC, com o coeficiente de variação de 0,02. A Umidade Relativa do Ar teve média de 40 ± 2,47%, com o coeficiente de variação de 0,06. Este ciclo de secagem foi encerrado após 32,8h de ensaio, em uma umidade de 20,6%.

Analisando a sequência de imagens (Figura 59) observa-se que o processo de fissuração se dá de maneira análoga ao ensaio anterior, sendo iniciado no interior da amostra juntamente

com a contração do solo (descolamento do solo com as bordas do molde) radiando para a parte interior com maior intensidade.

O aparecimento da primeira fissura, de forma significativa, se deu passadas 8,8 h de ensaio, quando a umidade da amostra estava em 80,1 %, apresentado um o fator CIF para este momento de 1,1%. Neste momento já se nota um leve descolamento da amostra junto ao molde (contração).

O padrão sequencial das fissuras foi semelhante ao ensaio anterior, ocorrendo de forma simultânea em toda a superfície e em forma de “X” e “T” formando elementos geométricos quadriláteros. Entretanto, observa-se neste caso uma maior quantidade de placas de fissuras, se comparada a primeira situação.

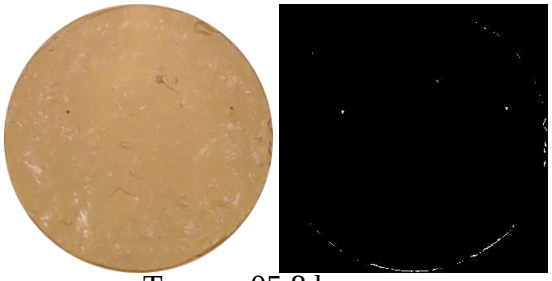
O aumento do fator CIF ocorreu de forma gradual ao longo do ensaio, obtendo seu valor máximo ao fim desse ciclo.

A Figura 59 apresenta o desenvolvimento do processo de secagem e fissuração dessa amostra, associando a imagem com os dados para aquele instante (Tempo; Umidade da Amostra; Crack Intensity Factor – CIF; Temperatura e Umidade Relativa do Ar – URA).

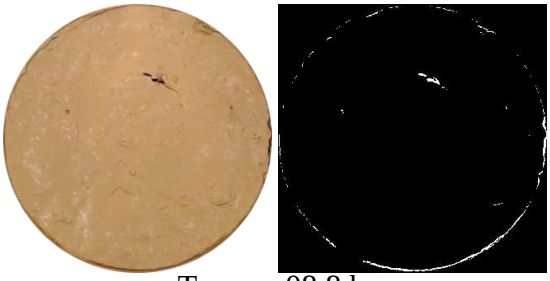
Figura 59 - Desenvolvimento do processo de secagem e fissuração – Wi : 94,2%.

Tempo: 0 h
W: 94,2 % | CIF: 00,0 %
Temp.: 32,2 ºC | URA: 48 %

Tempo: 2,5 h
W: 90,1 % | CIF: 00,0 %
Temp.: 32,8 ºC | URA: 42 %

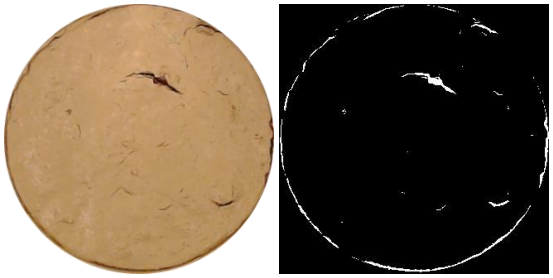


Tempo: 05,8 h
W: 85,2 % | CIF: 00,3 %
Temp.: 33,4 ºC | URA: 41 %



Tempo: 08,8 h
W: 80,1 % | CIF: 01,1 %
Temp.: 34,2 ºC | URA: 41 %

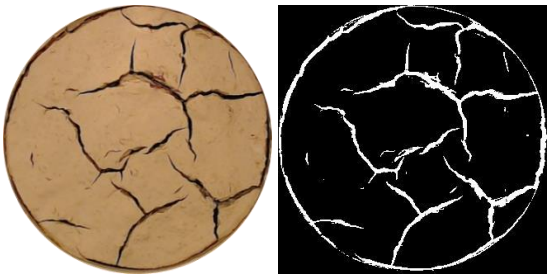
Figura 59 - Desenvolvimento do processo de secagem e fissuração – Wi : 94,2% (Continuação).



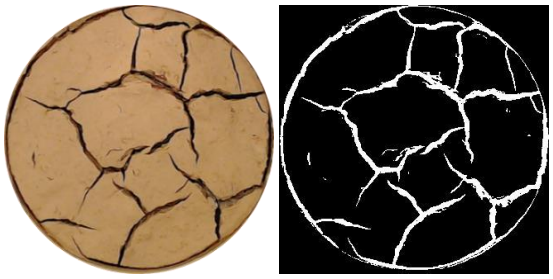
Tempo: 11,7 h
W: 75,1 % | CIF: 02,2 %
Temp.: 33,9 ºC | URA: 41 %

Tempo: 14,3 h
W: 70,1 % | CIF: 04,0 %
Temp.: 33,9 ºC | URA: 40 %

Tempo: 16,8 h
W: 65,2 % | CIF: 06,9 %
Temp.: 34,1 ºC | URA: 40 %



Tempo: 19,2 h
W: 60,0 % | CIF: 10,7 %
Temp.: 34,2 ºC | URA: 40 %



Tempo: 21,2 h
W: 55,1 % | CIF: 13,3 %
Temp.: 33,9 ºC | URA: 39 %

Tempo: 23,2 h
W: 50,3 % | CIF: 17,3 %
Temp.: 33,8 ºC | URA: 38 %

Tempo: 25,3 h
W: 44,7 % | CIF: 20,0 %
Temp.: 34,1 ºC | URA: 40 %

Tempo: 27,0 h
W: 40,0 % | CIF: 21,1 %
Temp.: 34,2 ºC | URA: 39 %

Figura 59 - Desenvolvimento do processo de secagem e fissuração – Wi : 94,2% (Continuação).

Tempo: 28,5 h
W: 35,3 % | CIF: 22,1 %
Temp.: 34,1 ºC | URA: 39 %

Tempo: 30,2 h
W: 30,2 % | CIF: 25,1 %
Temp.: 34,3 ºC | URA: 39 %

Tempo: 31,6 h
W: 24,7 % | CIF: 25,6 %
Temp.: 34,3 ºC | URA: 37 %

Tempo: 32,8 h
W: 20,6 % | CIF: 26,0 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 38 %

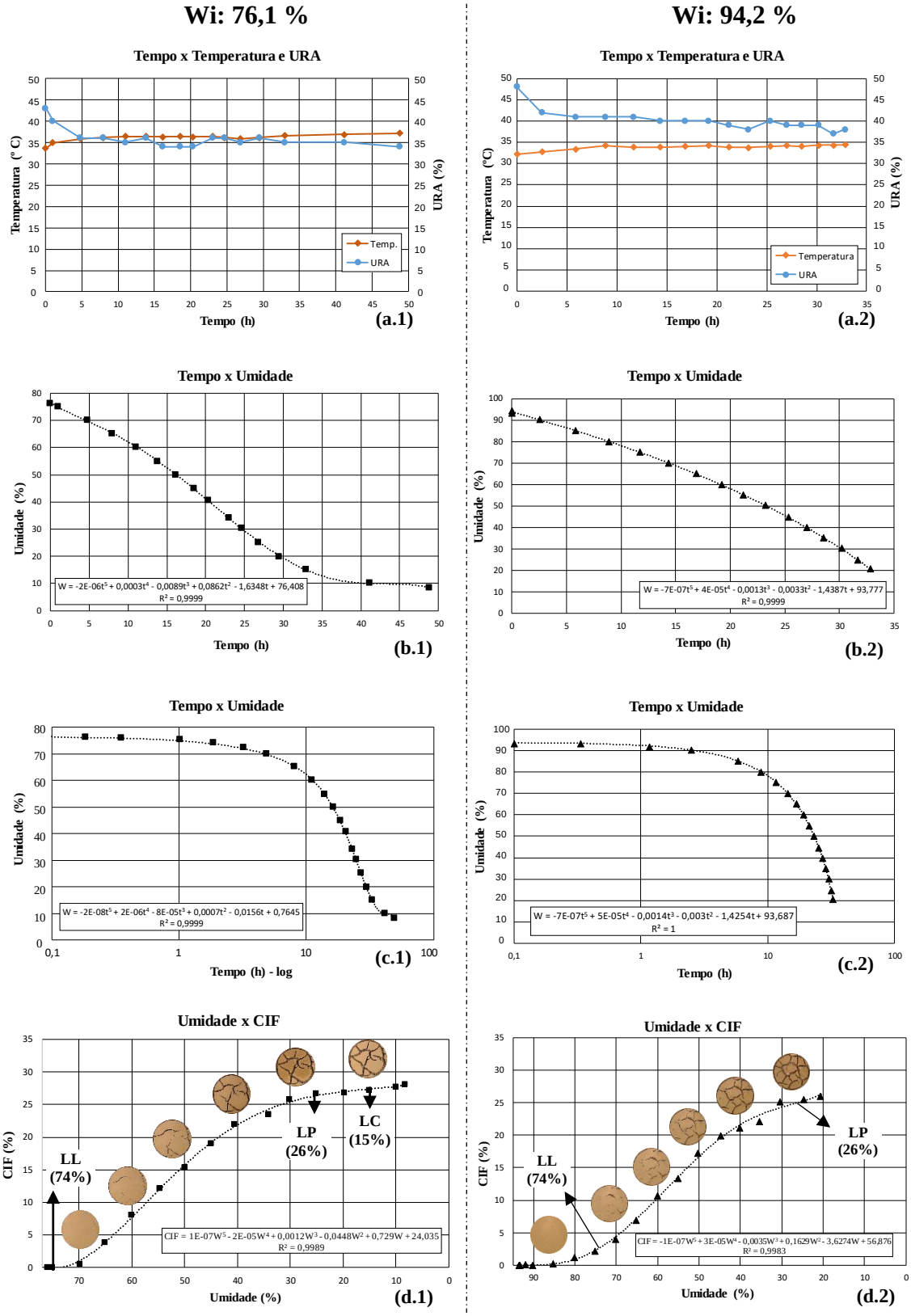
Fonte: O Autor (2019).

A Figura 60 apresenta gráficos comparativos entre as amostras ensaiadas constando: Variação de Temperatura e URA ao longo do tempo (a); relação Tempo x Umidade da Amostra (c) e (d); e da relação Umidade x CIF. Ao comparar as duas situações de secagem verifica-se que a dinâmica de fissuração se deu de forma bastante semelhante em ambos os casos, tanto em termo visual quanto em parâmetros calculados.

Nota-se que a temperatura e umidade relativa do ar ficaram bem próximas nos dois ensaios. A diferença entre os valores de médias e desvios padrões desses parâmetros foram de 2,2 ºC e 0,24 ºC e 4% e 0,1%, respectivamente.

A curva Tempo x Umidade dos ensaios seguiram as mesmas tendências, sendo verificado em ambos os casos que o processo de abertura de fissura favorece a perda de água no solo. A umidade de 60%, nos dois casos, surge como ponto de inflexão da taxa de perda de umidade.

Figura 60 - Comparativo dos parâmetros e resultados obtidos nos dois ensaios. Variação de Temperatura e URA ao longo do tempo (a); Relação Tempo x Umidade da Amostra (b) e (c); e Relação Umidade x CIF (d).



Fonte: O Autor (2019).

A curva Tempo x Umidade do ensaio cuja umidade inicial foi 76,1 % (no qual durou aproximadamente 49 h) ficou bem delimitada, sendo visível três trechos equivalentes a diferentes taxas de perda de umidade ao longo do tempo. O primeiro trecho inicia-se no começo do ensaio e vai até 11 h, para uma umidade de 60,2 %, apresentando uma taxa de perda de umidade de 1,44% / h. O segundo trecho se inicia ao fim do primeiro e vai até 29,5 h de ensaio, para uma umidade de 19,8%, no qual verifica-se uma taxa de perda de umidade correspondente a 2,18% / h. Já o terceiro e último trecho, que começa ao término do segundo e se prolonga até o fim do ensaio, possui uma taxa de perda de umidade é de 0,59 %/h. No último trecho nota-se uma tendência a umidade residual.

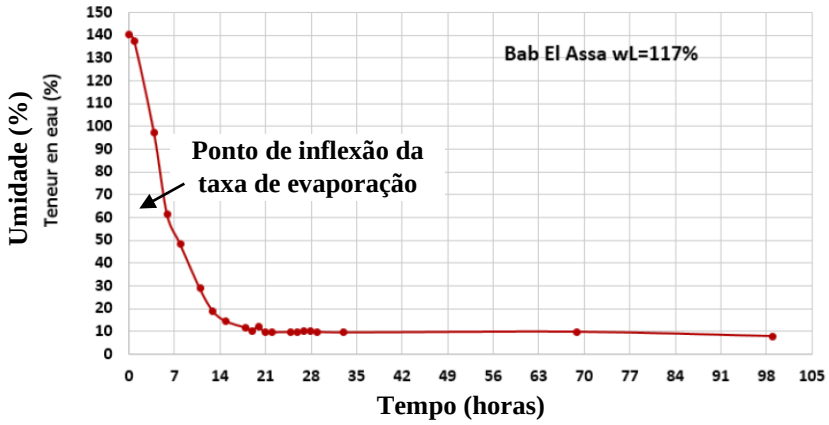
No segundo ensaio, observa-se que não houve indícios de umidade residual, fato que pode ser explicado devido ao ciclo de secagem ter sido encerrado com 20,6 % de umidade para começar a inundação. Sendo assim, este ensaio apresentou somente dois trechos equivalentes a diferentes taxas de perda de umidade ao longo do tempo. O primeiro trecho começa no início do ensaio e vai até passadas 19,2 h, para uma umidade de 60,0 %, apresentando uma taxa de perda de umidade de 1,78% / h. O segundo trecho, que se inicia ao fim do primeiro e vai até o fim do ciclo, possui uma taxa de perda de umidade correspondente a 2,87% / h.

Resultados obtidos por Asma e Bahya (2016) para um solo argiloso (LL = 117% e IP = 76%), utilizando-se de um molde circular (98 mm de diâmetro e 10 mm de altura) revelaram uma curva Tempo x Umidade (Figura 61) com formato semelhante ao obtido neste trabalho, porém com valores de taxas de evaporação bem superiores, sendo o primeiro trecho partindo do início do ensaio com duração de 6h (taxa de 13,33% / h), e o segundo trecho iniciando-se no fim do primeiro e encerrado com, aproximadamente, 16 h de ensaio (taxa de 5,0% / h). Após o fim do segundo trecho de evaporação, observa-se uma umidade residual equivalente a 10%. Nota-se que a umidade de 60% surge como ponto de inflexão da taxa de evaporação durante o ciclo de secagem.

Vale lembrar que variáveis como geometria do molde, volume e altura da amostra; composição granulométrica do solo, e condições de ensaios (temperatura e umidade relativa do ar), influenciam diretamente na taxa de evaporação e no comportamento do solo durante os ensaios de dessecação (ATIQUE E SANCHEZ ,2011).

No que diz respeito as curvas Umidade x CIF nota-se, nos dois ensaios, um aumento gradual, porém não linear, do fator CIF com a perda de umidade tendendo a uma estabilização após ultrapassada a umidade de 20%. Nestes gráficos observa-se que uma equação polinomial de 5ºgrau possui um ajuste de alta precisão com os dados experimentais.

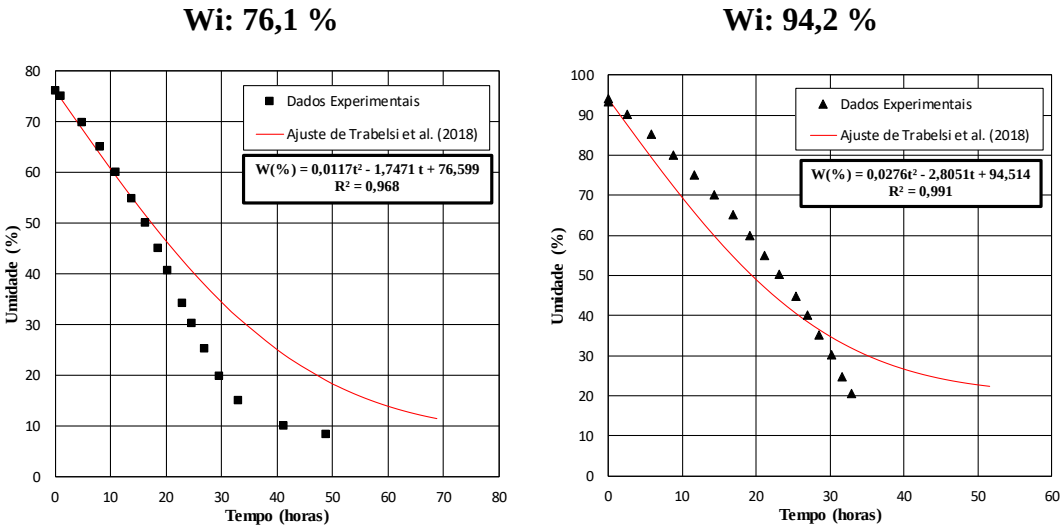
Figura 61 - Curva Tempo x Umidade obtida por Asma e Bahya (2016).



Fonte: Asma; Bahya (2016).

Utilizando-se do modelo analítico proposto por Trabelsi *et al.* (2018), verificou-se que as curvas geradas por este modelo possuem bons ajustes aos dados experimentais, demonstrando um fator de ajuste de curva (R^2) acima de 0,96 para ambos casos. A Figura 62 apresenta as curvas para os dois ensaios realizados.

Figura 62 - Modelo analítico proposto por Trabelsi *et al.* (2018) aplicado aos dados experimentais obtidos.



Fonte: O Autor (2019).

5.2.2 Propagação de Fissuras em Ciclos de Secagem e Inundação

Para o ensaio cuja umidade inicial foi de 94,2% foram realizados 3 secagens e 2 umedecimentos/inundações, de maneira alternada. A sequência de imagens completa deste

ensaio está presente no Anexo 02 deste trabalho. A Figura 63 apresenta uma comparação da amostra no fim dos períodos de secagem e com 1h de inundação.

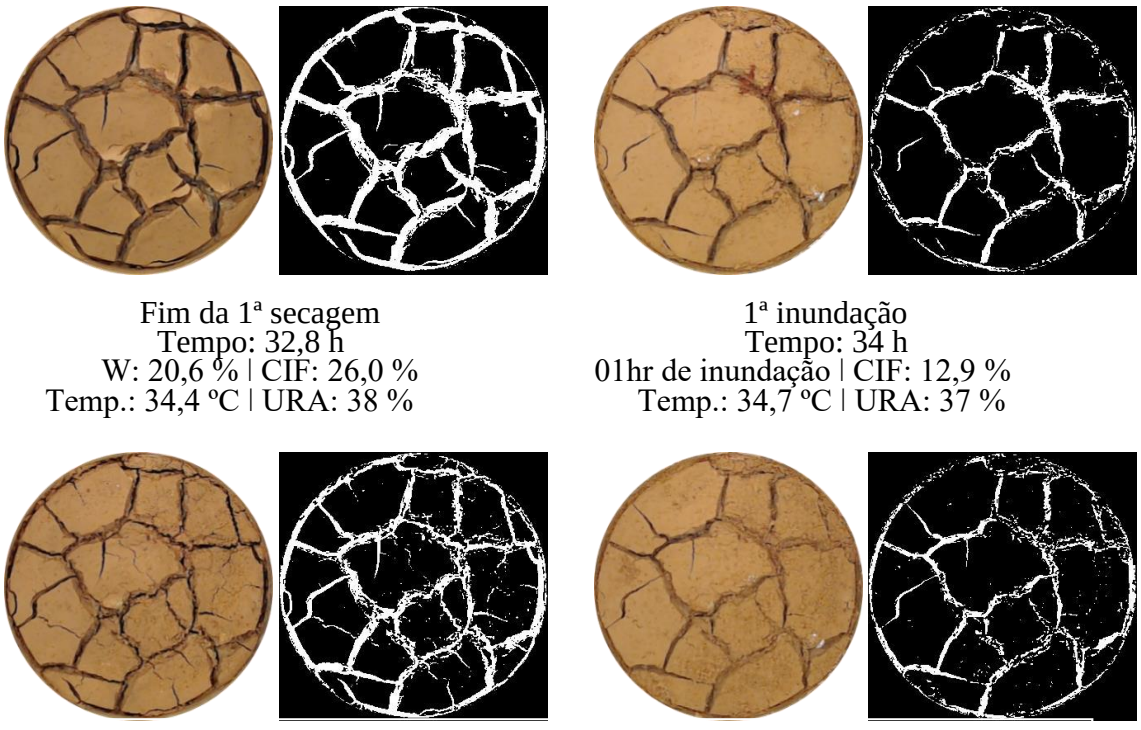
A temperatura média deste ensaio foi de 34,3 ± 0,58 ºC, com o coeficiente de variação de 0,02. Já a Umidade Relativa do Ar teve média de 38 ± 2,52%, com o coeficiente de variação de 0,07.

De modo geral, observa-se que o ensaio seguiu certa padronização ao decorrer dos ciclos de secagem e inundação. Para os períodos de inundação, nota-se que as fissuras tendem a se fechar de forma parcial, sendo possível observar inclusive o fechamento total de algumas fissuras de menor expressão. Também foi verificada uma forte redução do CIF com apenas 1h de inundação, sofrendo ainda uma leve queda ao longo do tempo, sendo praticamente estabilizado após 48h.

A 1ª inundação obteve resultados de CIF de: 12,9% após 1hr de inundação; 11,8% após 13hrs; 11,3% após 20hrs; 10,9% após 37hrs; 10,3% após 41hrs e 10,4% após 70hrs de inundação (última reposição de água).

Já a 2ª inundação obteve resultados de CIF de: 13,6 % após 1hr de inundação; 13,2 após 11hrs; 12,1 % após 21hrs de inundação; 11,6% após 39hrs; 10,3% após 48hrs de inundação e 10,5% após 69hrs de inundação (última reposição de água).

Figura 63 - Comparativo entre as amostras no fim dos períodos de secagem e com 1h de inundação.



Fim da 1ª secagem
Tempo: 32,8 h
W: 20,6 % | CIF: 26,0 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 38 %

1ª inundação
Tempo: 34 h
01hr de inundação | CIF: 12,9 %
Temp.: 34,7 ºC | URA: 37 %

Fim 2ª secagem
Tempo: 131 h
W: 26,3 % | CIF: 22,4 %
Temp.: 35,0 ºC | URA: 36 %

2ª inundação
Tempo: 132,2 h
01 hr de inundação | CIF: 13,6 %
Temp.: 34,9 ºC | URA: 36 %

Fonte: O Autor (2019).

Com relação aos ciclos de secagem pós-inundação, nota-se o aparecimento de novas microfissuras para cada novo ciclo. Essas novas microfissuras surgiam a partir das fissuras já existentes, interligando umas às outras.

Os valores obtidos nessas situações se deram de forma parecidas entre si. O 2º ciclo de secagem (1ª secagem pós-inundação) começou com uma umidade de 39,6% e um CIF de 14,6%. Ao passar do tempo a umidade foi sendo reduzida e o CIF foi aumentando, chegando ao valor máximo de 22,4% de CIF para uma umidade de 26,3% (fim deste clico de secagem e início da 2ª inundação).

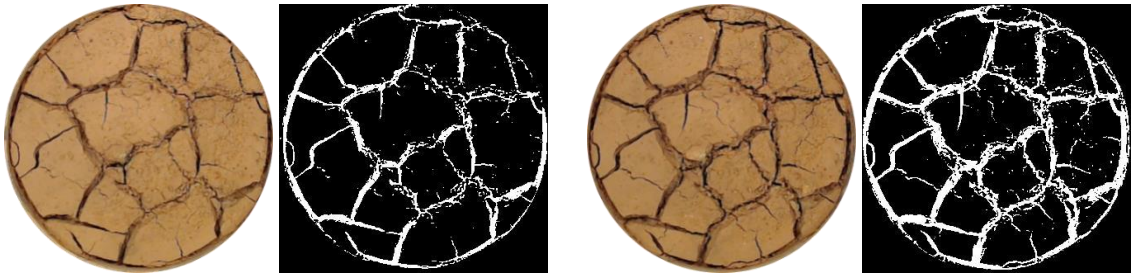
O 3º ciclo de secagem (2º secagem pós-inundação) iniciou-se com uma umidade de 39,5% e um CIF de 14,7%. Ao decorrer do tempo o CIF foi aumentando de forma gradual até atingir seu valor máximo de 24,9% na umidade de 24,6%. Após esse ponto nota-se uma tendência a estabilização deste parâmetro mesmo com a perda de umidade da amostra. A umidade residual da amostra foi de Wr: 3,3 %, para um CIF de 26,3%.

No último ciclo de secagem nota-se uma mudança de coloração do solo devido à perda de água, ficando bastante evidente após o solo atingir a umidade de 15% até o fim do ensaio. A Figura 64 mostra o início e fim de cada ciclo de secagem. A Figura 64 apresenta os gráficos de: Variação de Temperatura e URA ao longo do tempo (a); relação Tempo x CIF (c) e (d); e relação Umidade x CIF.

Figura 64 - Comparativo entre as amostras no início e fim de cada ciclo de secagem.

Início da 1ª secagem
Tempo: 0 h
W: 94,2 % | CIF: 00,0 %
Temp.: 32,2 ºC | URA: 48 %

Fim da 1ª secagem
Tempo: 32,8 h
W: 20,6 % | CIF: 26,0 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 38 %



Início da 2ª secagem
Tempo: 127 h
W: 39,6 % | CIF: 14,6 %
Temp.: 35,0 ºC | URA: 37 %

Fim da 2ª secagem
Tempo: 131 h
W: 26,3 % | CIF: 22,4 %
Temp.: 35,0 ºC | URA: 36 %

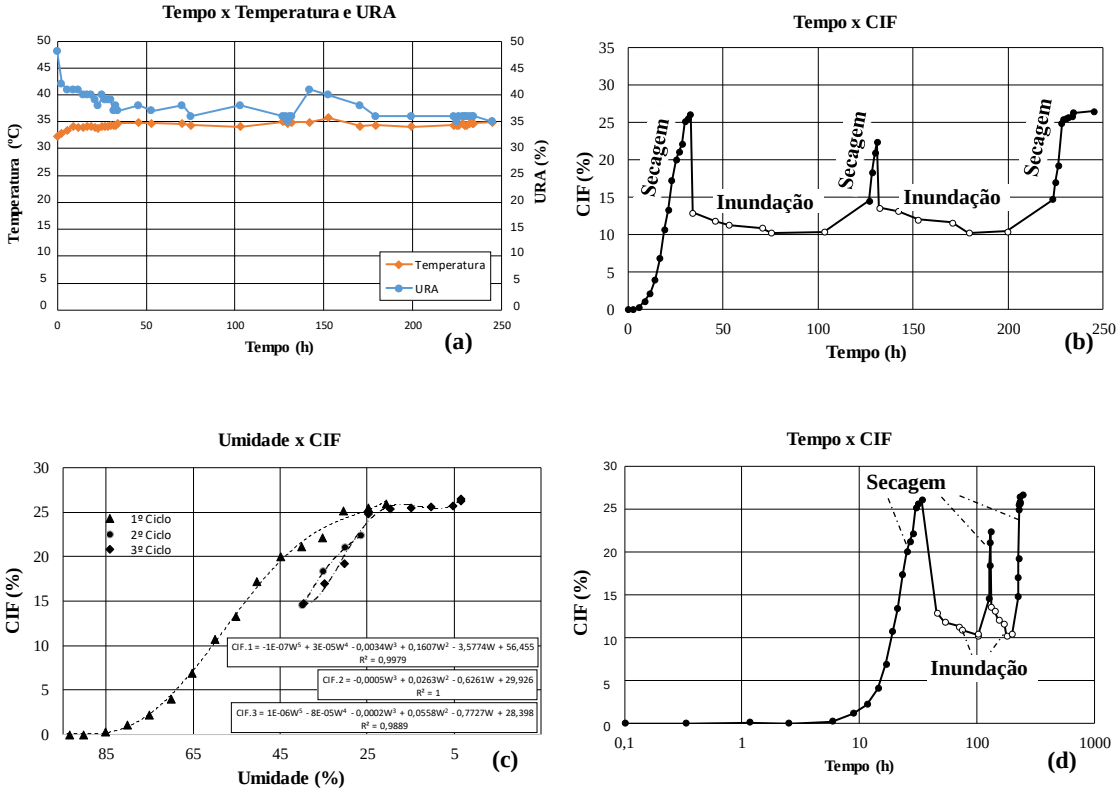
Figura 64 - Comparativo entre as amostras no início e fim de cada ciclo de secagem (Continuação).

Início da 3ª secagem
Tempo: 223,5 h
W: 39,5 % | CIF: 14,7 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 36 %

Fim da 3ª secagem
Tempo: 245,2 h
W: 03,3 % | CIF: 26,5 %
Temp.: 34,9 ºC | URA: 35 %

Fonte: O Autor (2019).

Figura 65 - Variação de Temperatura e URA ao longo do tempo (a); Relação Tempo x Umidade da Amostra (b) e (d); e Relação Umidade x CIF (c).



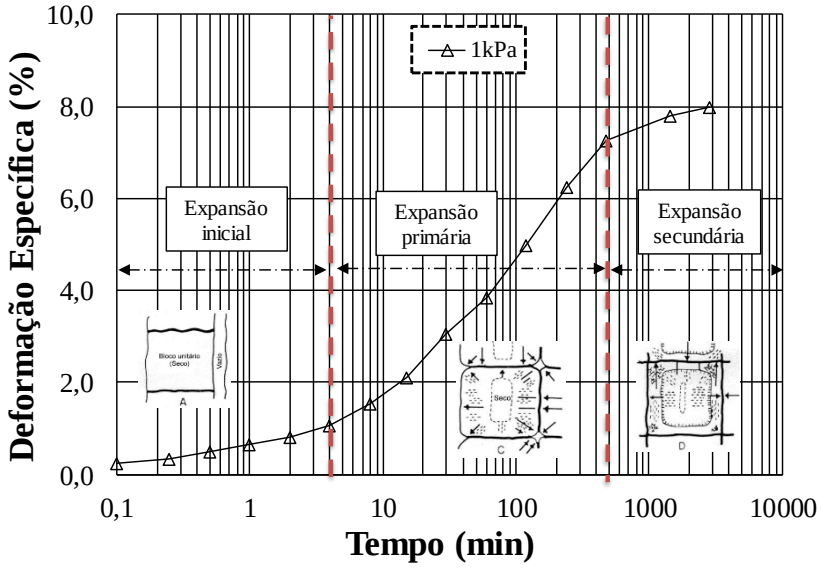
Fonte: O Autor (2019).

5.2.3 Comparativo entre curvas de expansão e fissuração ao longo do tempo

Ao analisar a relação Tempo (log) x Deformação Específica de um solo expansivo durante o processo de expansão é possível observar três trechos bem definidos: Expansão Inicial, Expansão Primária, e Expansão Secundária (Figura 66). De maneira análoga a este comportamento, observou-se que a curva Tempo x CIF possui formato similar, possuindo também a definição de três trechos, classificando-os como: Início da Fissuração; Fissuração Primária; e Fissuração Secundaria (Figura 67).

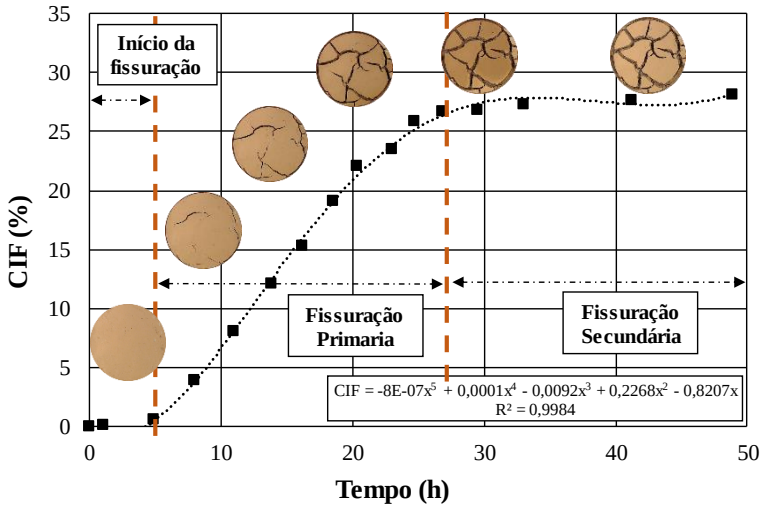
No primeiro trecho observa-se que, apesar da perda de umidade, as amostras ainda não apresentam fissuras de maneira significativa. A taxa de evaporação neste trecho é constante ao longo do tempo. O Segundo trecho (Fissuração Inicial) inicia-se com o aparecimento das primeiras fissuras prolongando-se até o início da tendência à estabilização do CIF. Neste intervalo nota-se uma mudança na taxa de evaporação da amostra devido ao surgimento de novas fissuras. O último trecho (Fissuração Secundária) corresponde a tendência da estabilização das fissuras. Nele observa-se que mesmo a amostra perdendo umidade ao longo do tempo, as fissuras não sofrem mais variação.

Figura 66 - Comportamento do solo durante a expansão



Fonte: O Autor (2019).

Figura 67 - Comportamento do solo durante a propagação de fissuras.



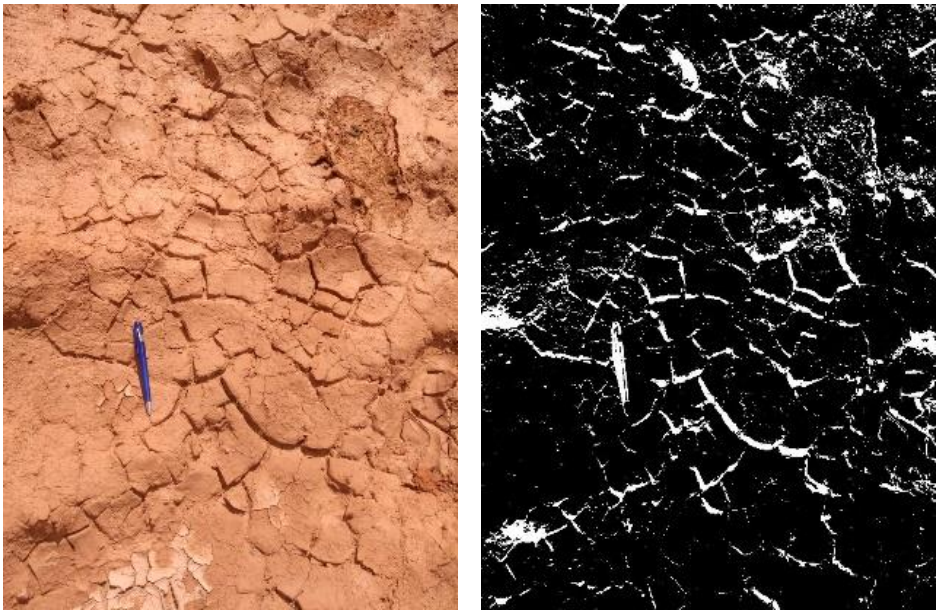
Fonte: O Autor (2019).

5.2.4 Observações de Fissuras em Campo

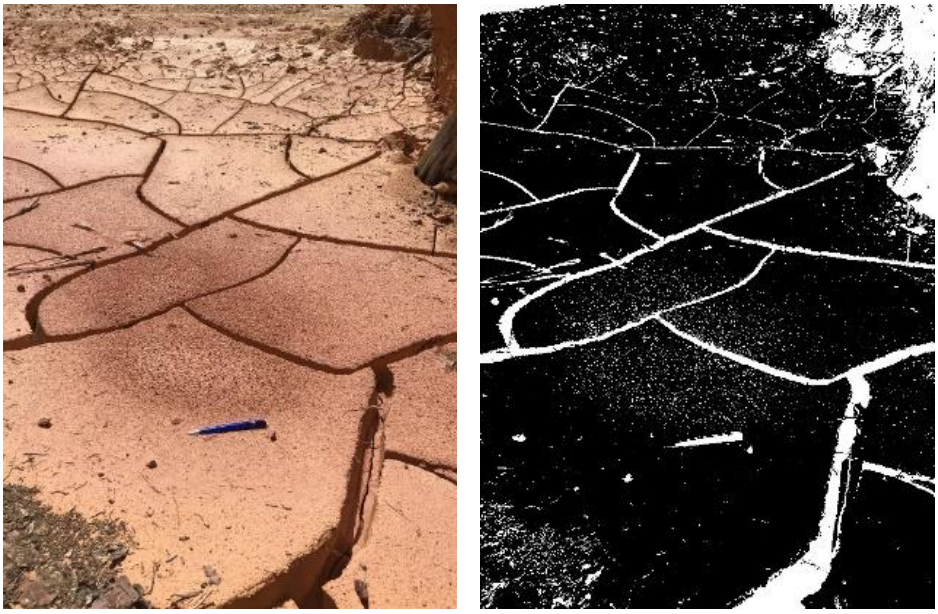
A utilização de metodologias de análise por imagem realizadas em campo surge como uma maneira rápida e prática no que diz respeito aos estudos de propagação de fissuras. Em Paulista-PE, em local diferente da coleta das amostras, foi observada a ocorrência de fissuras em campo, formando mosaicos de pequenas e grandes dimensões. Este comportamento chamou atenção pela diferença de tamanho dos mosaicos e por apresentarem um formato semelhantes aos observados em laboratório (elementos geométricos quadriláteros e fissuras em forma de “X” ou “T”).

Buscando uma comparação entre processo de fissuração em campo com os de laboratório foram realizadas fotografias da área e posterior análise de seu CIF (Figura 68), na qual foram obtidos valores entre 9 a 13%.

Figura 68 - Fissuras em solo no campo.



Fissura em solo - CIF: 9,6%



Fissura em solo - CIF: 12,8%
Fonte: O Autor (2019).

Nota-se que o padrão de fissuração em campo ocorre de maneira semelhante aos ensaios de laboratório. Entretanto para uma melhor análise e entendimento da dinâmica de fissuração em campo se faz necessário um bom controle e/ou conhecimento das variáveis ambientais do local (Temperatura e Umidade Relativa do Ar); além de informações relativas ao solo, como a umidade inicial da amostra e tempo de exposição. O cuidado com técnicas de fotografia e na qualidade da imagem também surgem como ponto chave para uma melhor análise.

6 CONCLUSÃO

O local do estudo, situado na Formação Maria Farinha, possui um perfil geotécnico, até a profundidade investigada, composto por 5 camadas sendo verificado caraterísticas de solos coesivos em todas elas. Todas as Camadas foram classificadas como CH ou CL, no SUCS, e A-7-6 ou A-6 no HRB.

O potencial de expansão do solo, de acordo com os métodos de Skempton (1953) e Williams (1957); Daksanamurthy e Raman (1973); e Seed *et al.* (1962), variou entre médio a muito alto, sendo as Camadas II* e V as que apresentaram maior suscetibilidade a expansão.

Ensaios de Limite de Consistência e Compactação realizados com e sem preparação prévia, na Camada II (de -0,10 a -2,00 m), revelaram mudança de comportamento do solo.

As determinações químicas obtidas revelaram que a Camada II é distrófica, moderadamente ácida, propensa a expansividade (CTC > 20 cmolc/Kg).

As análises por tomografia permitiram comparar, de forma visual, a influência da inundação na macroposidade do solo, incluindo na morfologia e interligações dos vazios.

Ensaios edométricos realizados com e sem inundação revelaram alteração do comportamento do solo de modo que se verificou, inclusive, alterações nos índices de compressão (C_c) e descompressão (C_s). O percentual de expansão obtidos nos ensaios com inundação variou de 8,00% (no ensaio inundado em 1 kPa) a - 1,04% (colapso - ensaio inundado em 640 kPa). Segundo o critério de Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), para valores de expansão “livre” a 10kPa, a amostra possui um grau de expansividade médio. A umidade inicial das amostras variou de 21,1% a 24,9%.

Os ensaios de tensão de expansão a volume constante com umidades iniciais conhecidas (entre 16,0% a 7,7%) obtiveram valores variando de 168 a 488 kPa, sendo classificados, ainda de acordo com Vijayvergiya e Ghazzaly (1973), com um potencial de expansão variando de alto a muito alto.

Os ensaios de Cisalhamento Direto mostraram uma queda substancial nos valores de coesão e ângulo de atrito para as condições natural e previamente inundada, sendo observada também alteração de um comportamento de pico para um comportamento plástico.

As formulações hiperbólicas utilizadas nesta pesquisa possuíram bons ajustes aos dados experimentais obtidos, tantos nos ensaios de compressibilidade e expansividade (edométricos com inundação) quanto nos ensaios de resistência (cisalhamento direto e compressão triaxial).

A montagem do aparato de fissuras permitiu um bom suporte logístico para equipamentos utilizados, propiciando ainda um bom isolamento térmico ao longo do ensaio (baixa variação de temperatura e Umidade Relativa do Ar).

Os procedimentos adotados de homogeneização e moldagem das amostras foram eficazes. A metodologia de análise de imagens utilizada possibilitou o cálculo do fator CIF (razão entre a área de fissuras e área inicial da amostra) com precisão, além da obtenção da imagem binarizada.

O processo de propagação de fissuras foi desenvolvido de forma bastante semelhante em ambos os ensaios, tanto em termo visual quanto em parâmetros calculados. A dinâmica de fissuração se deu de forma de “X” e “T”, na superfície da amostra, juntamente com sua contração (descolamento do solo com o molde). O fator CIF cresce de maneira progressiva, porém não linear, até atingir uma tendência a estabilização mesmo com perda de umidade.

Numa análise de ciclos de secagem e inundação foi possível verificar que as fissuras do solo sofrem considerável redução com apenas 1h de inundação, sendo estabilizadas por completo após 48h de inundação. Ciclos de secagem pós-inundação possuíram valores e comportamento semelhantes entre si, com o aparecimento de novas microfissuras para cada novo ciclo de secagem.

6.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

De modo aprimorar cada vez mais o conhecimento sobre o comportamento de solos expansivos, em especial sobre o processo de ocorrência de fissuras, deixaremos aqui algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Aperfeiçoar as etapas de mistura, homogeneização e moldagem, de modo a melhorar ainda mais a qualidade da amostra ensaiada, posto que processos manuais não conseguem fornecer exata padronização entre os ensaios realizados;
- Realizar uma maior quantidade de ensaios de modo a verificar apenas a influência da umidade e/ou índice de vazio iniciais das amostras na dinâmica de fissuração;
- Realizar ensaios de contração (colocação de vaselina nos moldes) sendo possível realizar uma comparação entre a contração e fissuração do solo, além de um estudo mais detalhado sobre esse fenômeno;
- Realizar ensaios com variação de altura e volume das amostras, mantendo as mesmas condições de umidade e/ou índices de vazios entre eles, de modo a analisar exclusivamente a influência desses fatores no processo de fissuração;

- Realizar ensaios, mantendo as mesmas condições de umidade e/ou índices de vazios entre eles, de forma a verificar, exclusivamente, a influência da intensidade do aquecimento no processo de fissuração;
- Realizar ensaios comparativos com ciclos de secagem e inundação, com variação de umidade e/ou índices de vazios, verificando assim a influência desses fatores;
- Realizar ensaios comparativos entre amostras com e sem reforço, de forma a observar a influência de adições de fibras ou outro material de reforço no processo de fissuração;
- Propor metodologia de análise 2D que possibilite a verificação das deformações das amostras nos ciclos de secagem e inundação;
- Propor metodologia em laboratório, capaz de realizar uma análise 3D do processo de fissuração do solo, que possibilite a determinação do comprimento e profundidade das fissuras;
- Propor metodologia em campo para análise do processo de fissuração do solo.

REFERÊNCIAS

AGROSMART (2018). Disponível em: https://agrosmart.com.br/blog/irrigacao/3-formas-de-fazer-o-manejo-da-irrigacao-na-lavoura/. Acesso em: 07 de março de 2019.

ALBRECHT, B. A.; BENSON, C. H**.** Effect of desiccation on compacted natural clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 127, n. 1, p. 67–75. 2001.

ALONSO, E.E.; GENS, A & JOSA, A**.** A constitutive model for partially saturated soil. **Geotechnique**, 40(3): 405-430. 1990**.**

ASMA, B; BAHYA, B. (2016). **CONTRIBUTION A L'ETUDEDE LA FISSURATION DES ARGILES**. Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Tlemcen, Argélia, 96 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995

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 TÉCNICA. **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 7182**: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 7183**:
Solo – Determinação do limite e relação de contração. Rio de Janeiro: ABNT, 1983.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12001 – MB 3336**: Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

ATIQUE, A. e SANCHEZ, M. (2011). **Analysis of Cracking Behavior of Drying Soil.** 2nd International Conference on Environmental Science and Technology. Singapore.

BASTOS, E. G. (1994). **Variação Volumétrica de uma Argila Expansiva do Litoral Norte de Pernambuco**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal da Paraíba, CCT, Campina Grande. Paraíba, 153p.

BURGOS, P. C.; CONCIANI, W. (2015). **Índices físicos, textura, consistência e classificação de solos**. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G.F.N; MACHADO, S.L.; MASCARENHA, M.M.A.; SILVA FILHO, F.C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1ª ed., São Paulo, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cap. 8, p 181 – 204.

CAVALCANTE, A. L. B.; BORGES, L. P. F.; CARVALHO, J. C. (2015). **Tomografias computadorizadas e análises numéricas aplicadas à caracterização da estrutura porosa de solos não saturados**. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G.F.N; MACHADO, S.L.; MASCARENHA, M.M.A.; SILVA FILHO, F.C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1ª ed., São Paulo, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cap. 19, p 531 – 553.

CAVALCANTI, L. C. (2017). **Estabilização granulométrica de uma argila expansiva de Paulista-PE.** Taralho de conclusão de curso. Universidade Católica de Pernambuco

CHANDLER, R.J.; CRILLEY, M.S. e MONTGOMERY-SMITH, G. (1992). **A low-cost method of assessing clay desiccation for low rise buildings**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 92: 82-89.

CLIMA-DATA.ORG. Disponível em: https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/pernambuco/paulista-4450/ . Acesso em: 10 de abril de 2019.

COSTA, C. M. C. (2015). **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-108/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 163 p.

COSTA NUNES, A. J.; VASCONCELOS, E. M. e PANDOLFI, R. L. M. (1982). **Ocorrência de propriedades de Engenharia de Solos Expansivos na Área do Grande Recife**. C.B.M.S.E.F. 7, Recife/Olinda, Vol. V. 193-209

COSTA, L. F. (2016). **Tomografia computadorizada de raios-X aplicada à caracterização do espaço poroso do solo**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Pernambuco, CTG, 71p.

CONSTANTINO, C. S. (2018). **Estabilização de um Solo Expansivo do Município de Paulista com uso de Cinza de casca de Arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco.

DAKSANAMURTY, V.; RAMAN. V. A simple method of identifying an expansive soil. **Soils and Foundation**. v.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.

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

FERREIRA, S. R. M; ARAÚJO, A.G. D; BARBOSA, F. A. S.; SILVA, T. C. R.; BEZERRA, I. M. L. Analysis of Changes in Volume and Propagation of Cracks in Expansive Soil Due to Changes in Water Content. **In.: Revista Brasileira de Ciência do Solo** (no prelo). 2019.

FERREIRA, S. R. M; OLIVEIRA, J. T. R.; GONZALEZ, Y. V. (2015). **Técnicas de amostragem e preparação de amostras.** In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G.F.N; MACHADO, S.L.; MASCARENHA, M.M.A.; SILVA FILHO, F.C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1ª ed., São Paulo, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cap. 7 p 145 – 179.

FLEUREAU, Jean-Marie; WEI, Xin; IGHIL-AMEUR, Lamine; HATTAB, Mahdia; BICALHO, Katia Vanessa (2015). **Experimental Study of the Cracking Mechanisms of Clay During Drying**. 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 15-18 November 2015, Buenos Aires, Argentina. pg. 2101-2108.

FREDLUND, D.G. e RAHARDJO, H. (1993). **Soil mechanics for unsaturated soil**. Jonh Wiley e Sons, New York, 517 p.

GURGEL, J. G. B.; SANTOS JR., O. F. Avaliação do potencial expansivo de sedimentos da Bacia do Jatobá localizados no município de Floresta/PE. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 18., 2016. **Anais [...]**. Belo Horizonte: COBRAMSEG 2016.

GUIMARÃES, J. E. P. (2002). **A Cal** – Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil. 2ª ed. Recife: Editora Universitária da UFPE.

GUIMARÃES, L. N.; GENS, A.; SÁNCHEZ, M.; OLIVELLA, S. (2011). **Modelagem acoplada THMQ de argilas expansivas submetidas a aquecimento e hidratação**. In: VII Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Pirenópolis; Goiânia-GO; vol. 2. p. 29-43.

GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; MARINHO, F. A. M.; SOTO. M. A. A. A curva de retenção de água de materiais porosos. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G.F.N; MACHADO, S.L.; MASCARENHA, M.M.A.; SILVA FILHO, F.C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed., São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cap. 9, p. 205–229.

HOUSECROFT, C. E.; SHARPE, A. G. **Química inorgânica**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2013. 624 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE (2018). Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/paulista.html. Acesso em 30 de abril de 2019

JONES, D.E. e HOLTZ, W.G. Expansive soils – the hidden disaster. **ASCE**, New York, NY pp 87-89, Aug. 1973.

JUCÁ, J. F. T.; GUSMÃO FILHO, J. A.; JUSTINO da SILVA, J. M. Laboratory and field tests on an expansive soil in Brazil. In: International Conference on Expansive Soils. 7., 1992. **Proceedings [...]**. Dallas: ICES, 1992. p. 337-34.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R. V. **Soil mechanics**. New York: Jonh Wiley and Sons, 1969. p. 553.

KONDER, R. L. Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils. **Journal of the soil mechanics and foundations division.** v. 89, n. 1, 1963. p. 115-144.

MARINHO, F. A. M. (1995). **A técnica do papel filtro para medição de sucção.** Encontro Sobre Solos Não Saturados. Rio Grande do Sul, 18 a 20 de outubro de 1995.

MARINHO, F.; PEREIRA, J. H. F. Apostila do mini-curso de solos não saturados. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11., Brasília. **Anais [...]**. Brasília: CBMSEG, 1998.

MARINHO, F. A. M.; SOTO. M. A. A.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N. Instrumentação de laboratório e campo e a medição da curva de retenção. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G.F.N; MACHADO, S.L.; MASCARENHA, M.M.A.; SILVA FILHO, F.C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed., São Paulo, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Cap. 10, 2015. p. 231–256.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil behaivor**. 1. ed., New York: Jonh Willey, 1976.

MORAIS, J. J. O. **Caracterização Geotécnica da Expansividade de um Solo Argiloso do Município de Paulista/PE**. 2017. 127 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

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. 168 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

PETH, S.; NELLESEN, J.; FISCHER, G. & HORN, R. (2010). **Dynamics of soil por espace structure investigated by X-ray microtomography.** 19thWorld Congress os Soil Science, Soil Solutions for a Changing Worl. Brisbane, Australia, 2010.

SANTOS, G. M. **Estudo do comportamento histerético de uma argila expansiva não-saturada.** 2008. 119 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SEED, H.B. WOODWARD, R.J., LUNDGREN, R. Prediction of swelling potencial for compacted clays. **Journal Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**. v. 88, SM3, pp. 53-87. 1962.

SHI, BEI-XIAO; CHEN, S. S.; HAN, H. Q.; ZHENG, C. F. Expansive Soil Crack Depth under Cumulative Damage. **The Scientific World Journal**. Londres, p. 1-10. 4 mar. 2013.

SIMÕES, P. R. M.; COSTA FILHO, L. M. Características mineralógicas de solos expansivos do Recôncavo Baiano. In: Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais, Rio de Janeiro, 1981. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBST, 1981. p. 569-588.

SILVA, J. M. J. da. **Variação volumétrica de uma argila contráctil-expansiva não saturada submetida a diferentes condições climáticas**. 2001. 249 f. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

SILVA, I. M. P. **Estudo do comportamento e processo de formação de fissuras em um solo devido ao ressecamento**. 2018. 126 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SILVA, T. J. L. **Avaliação do impacto de fissuras na condutividade hidráulica e aplicações de camada fina por meio de análise de imagens**. 2017. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília,

SKEMPTON, A. W. The collodial activity of clays. In: International Conference On Soil Mechanics And Foundations. 3., 1953 Zurich, **Proceeding [...]**. Zurich: ICSMF, 1953. p. 57–61.

STIRLING, R.A.; GLENDINNING, S.; DAVIE, C. T.; HEN-JONES, R. M.; HUGHES, P. N. The behaviour and influence of desiccation cracking on a full-scale, vegetated infrastructure embankment. In: International Conference on Unsaturated Soils, 7., 2018, Hong Kong. **Proceedings [...]**. Hong Kong: ICUS, 2018.

TANG, C. J.; CUI, Y.J.; SHI, B.; TANG, A. M.; LIU,C. Desiccation and craking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles. **Geoderma**, v. 166, p. 111-118. 2011.

TRABELSI, H.;. CHEBBI, M.; GUIRAS, H.; JAMEI, M.; ROMERO, E. Stabilization of clayey soil using fibre reinforcement. In: International Conference on Unsaturated Soils, 7., 2018. **Proceedings [...]**. Hong Kong: ICUS, 2018.

TRAN, K. M.; BUI, H. H.; KODIKARA, J.; SÁNCHEZ, M. Numerical simulation of soil curling during desiccation process. In: International Conference on Unsaturated Soils, 7., 2018, Hong Kong. **Proceedings [...]**. Hong Kong: ICUS. 2018.

UFPE – LGGM. **Macrozoneamento costeiro do litoral norte de Pernambuco**, Folha de Itamaracá (SB.25-Y-C-VII). 1992.

UMA CHADUVULA; VISWANADHAM, B. V. S.; KODIKARA J. (2016). **Desiccation cracking behaviour of geofiber-reinforced expansive clay**. In *Geo-Chicago 2016*, Geotechnical Special Publication 271, 368–77.

UMA CHADUVULA; MANOGARAN, I.; VISWANADHAM, B. V. S.; KODIKARA J. **Some studies on desiccation cracking of fiber-reinforced expansive clay subjected to drying and wetting cycles**. PanAm Unsaturated Soils. 2017. p. 361–370.

VARGAS, M. Structurally unstable soils in Southern Brazil. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 8., 1973, Moscow. **Proceedings [...]**. Moscow: ICSMF. 1973. p. 239–246.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society os America Journal**, v. 44, p. 892-898.

VARSEI, M.; ASCE, S. M.; BOURASSE, C. M.; MILLER, G. A. Laboratory investigation of desiccation cracking. Geo-Congress 2014. **Technical Papers.**

VIJAYVERGIYA, V. N.; GHAZZALY, O. I. **Predicton of swelling potencial for natural clays**. International Conference on Expansive Solis, 3., 1973, Hayfa. p. 227-236. 1973.

VILAR, O. M; FERREIRA, S. R. M. Solos colapsíveis e expansivos. In: CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JR, G.F.N; MACHADO, S.L.; MASCARENHA, M.M.A.; SILVA FILHO, F.C. (Org.). **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, p. 416–440.

WILLIAMS, A. A. B. **Studies of shear strength and bearing capacity of some partially saturated sands**. Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, 4., 1957, London. **Proceedings [...].** p. 453-456.

APÊNDICE A - ENSAIOS PRELIMINARES E SUGESTÕES DE APRIMORAMENTO DA METODOLOGIA

Este apêndice está dividido, didaticamente, em duas partes. A primeira delas corresponde as observações realizadas e resultados obtidos durante a fase preliminar de testes. As análises durante essa fase serviram de base para algumas das decisões tomadas ao longo da pesquisa. A segunda parte representa sugestões de melhorias na atual metodologia utilizada.

1 TESES PRELIMINARES E TOMADAS DE DECISÕES

Durante a elaboração da metodologia utilizada nesta pesquisa, realizou-se uma bateria de teses preliminares a fim de esclarecer, de maneira experimental, eventuais dúvidas, obtendo assim respaldo técnico nas decisões adotadas. Vale lembra que todos os ensaios foram realizados de forma aquecida, ou seja, com a utilização de lâmpadas que emitissem calor (ex: incandescentes, halógenas ou infravermelho). Os fatores observados durante esta fase serão apresentados a seguir.

- Material do Molde

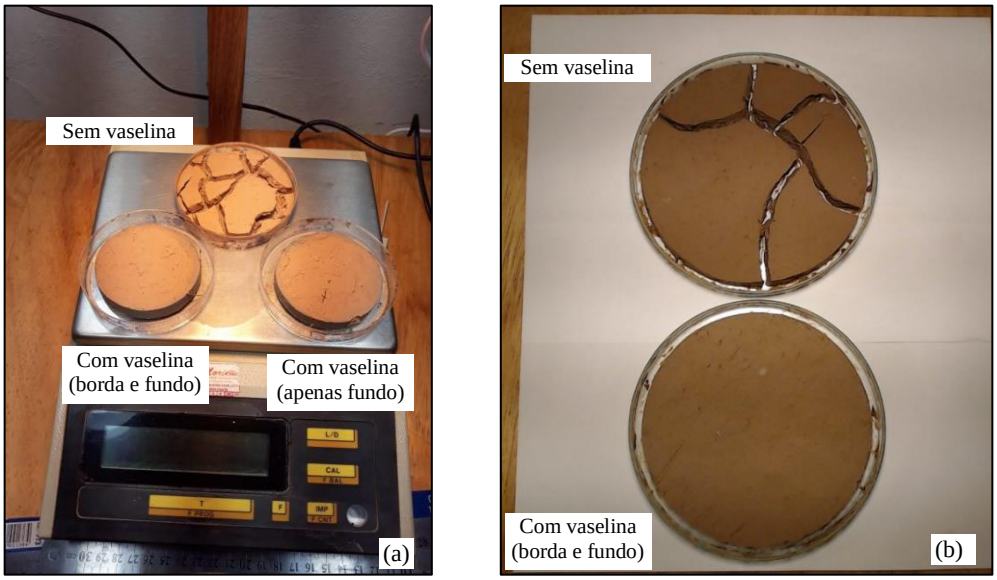
Realizou-se ensaios de fissura com moldes circulares de plásticos e de vidro, sendo constatado que, ao longo do ensaio, o molde de plástico sofria deformações consideráveis devido ao aquecimento. Dessa forma optou-se por utilizar moldes de vidro.

- Colocação de Vaselina

Foram realizados ensaios de modo a verificar a influência da vaselina no molde durante o processo de fissuração. A ideia inicial era colocar vaselina nos moldes de modo mitigar a influência do atrito entre o solo e o substrato (superfície molde).

Após a realização de vários ensaios, tanto em molde de plástico quanto moldes de vidro, foi verificado que a colocação de vaselina influenciava de maneira significativa no processo de fissuração. Amostra moldadas em moldes com vaselina não apresentavam fissuras ao longo do tempo, apenas contração. Já as amostras moldadas em moldes sem vaselina apresentavam processo de fissuração e contração. Dessa forma foi estabelecido que não iria ser utilizada vaselina para realização dos ensaios. A Figura 69 apresenta as condições das amostras nos testes com vaselina.

Figura 1 - Efeito da vaselina no processo de fissuração.

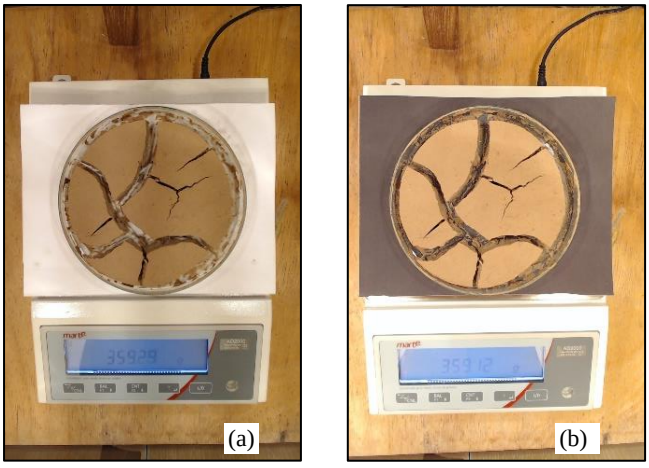


Fonte: O Autor (2019).

- Cor de Fundo

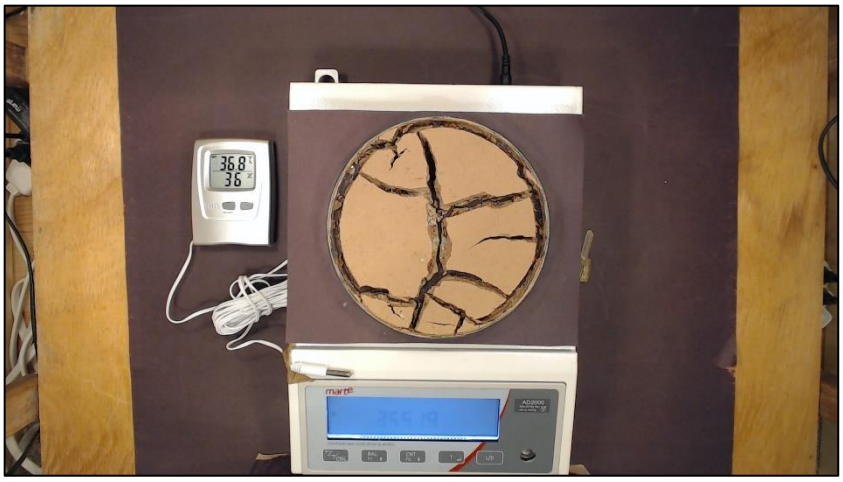
De modo a melhorar a observação do processo de fissuração ao longo de tempo, optou-se por colocar um papel no fundo do Corpo de Prova (em cima do prato da balança), já que o prato da balança era cromado e refletia a luz. Incialmente foram utilizados papéis de cor branco, entretanto foi verificado que, para a coloração do nosso solo, papéis de cor escura (de preferência preto fosco) melhoravam a percepção das fissuras além de ajudar nas interferências visuais provocadas reflexos das lâmpadas. Dessa forma, utilizou-se papéis de cor preta em baixo dos Corpos de Prova (em cima do prato da balança), em baixo da balança e nas suas laterais. A Figura 70 apresenta o comparativo entre a utilização de papel branco e preto, e a Figura 71 apresenta a conFiguração final adotada (com papel preto em baixo da balança).

Figura 2 - Comparação entre a cor de fundo branco (a) e preto (b).



Fonte: O Autor (2019).

Figura 3 - Configuração final adotada para o ensaio.



Fonte: O Autor (2019).

Obs.: A cor do fundo pode variar a depender da coloração do solo. Cores claras, como o branco, podem ser utilizados desde que o solo ensaiado seja de cor escura.

- Iluminação e aquecimento

Os ensaios aqui realizados foram feitos de forma aquecida, ou seja, com a utilização de lâmpadas que emitissem calor. Foram utilizadas 4 lâmpadas incandescentes, posicionadas nas extremidades, de maneira que o Corpo de Prova (posicionado no centro das luminárias) recebesse de forma igualitária o aquecimento em todos os lados.

Todas as lâmpadas utilizadas devem ser do mesmo fabricante e do mesmo modelo. Não utilizar, ao mesmo tempo, lâmpadas que possuem cor luz diferente entre si (ex: Luz de led de cor branca e luz incandescente de cor amarelada), pois é verificado grande interferência visual na captura de imagens. Em geral, a coloração da luz das lâmpadas incandescentes é amarelada, todavia, não foi observada nenhuma interferência na captura das imagens.

Outro fato importantíssimo a ser observado é a presença de sombra no Corpo de Prova. A presença de sombras pode dificultar, ou até mesmo mascarar a obtenção de resultados de fissuras, visto que programas computacionais não conseguem ler com precisão as áreas sombreadas.

- Posicionamento da Câmera

A câmera para captura das imagens deve ser posicionada de maneira centralizada a amostra, sem inclinações. Esta medida deve ser adotada de forma a otimizar ao máximo o processo de análise de imagens.

- Velocidade de Perda de Umidade da Amostra

Foi observado que a velocidade de perda de umidade da amostra, ao longo do ensaio de fissuras, sofria um leve aumento durante o ensaio. Inicialmente, esta informação contradizia o que era esperado, uma vez que se observava uma redução de área superficial da amostra ao longo do ensaio, logo imaginava-se que a velocidade de perda de água iria diminuir ao longo do tempo. Ao inspecionar os Corpos de Prova verificou-se que a área lateral, ou seja, as laterais das fissuras, também contribuíam como área de evaporação. Sendo assim o entendimento deste fenômeno foi perfeitamente compreendido. A Figura 72 ilustra a evaporação pela área lateral da amostra.

Figura 4 - Evaporação pela área lateral da fissura.

Fonte: O Autor (2019).

2 SUGESTÕES DE APRIMORAMENTO DA METODOLOGIA

Com o andamento dos ensaios, verificou-se ainda a necessidade de aprimorar alguns aspectos da metodologia, em especial durante as etapas de homogeneização, mistura e moldagem das amostras.

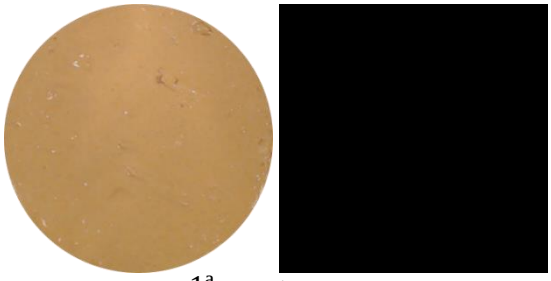
Todos os procedimentos dos ensaios foram realizados de maneira manual. Dessa forma, foram constatadas variações a depender da pessoa que executa estas etapas.

Como sugestão no processo de homogeneização e mistura, recomenda-se realizar esta etapa de forma mecanizada podendo, inclusive, utilizar de equipamentos como o copo dispersor/mixer ou outro equipamento cuja a finalidade seja análoga a estes. Já no processo de moldagem da amostra, de modo a melhorar a qualidade do Corpo de Prova ensaiado,

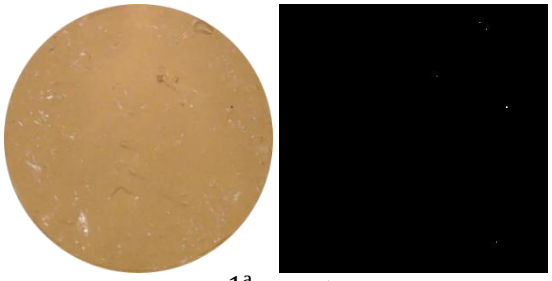
recomenda-se a realização de ações que reduzam a quantidade de bolhas de ar. Para isso, recomenda-se a utilização de bombas de vácuo ou equipamentos que provoquem vibrações, como uma mesa vibratória, por exemplo.

Lembrando ainda que a metodologia aqui apresentada é apenas uma diretriz para a realização de pesquisas futuras e que, ao longo dos ensaios, novas observações poderão ser feitas de modo a aprimorar ainda mais a metodologia inicial. Vale salientar também as experiências acadêmicas das metodologias propostas por autores nacionais e internacionais que podem vir a contribuir durante a execução dos ensaios e nas análises dos resultados.

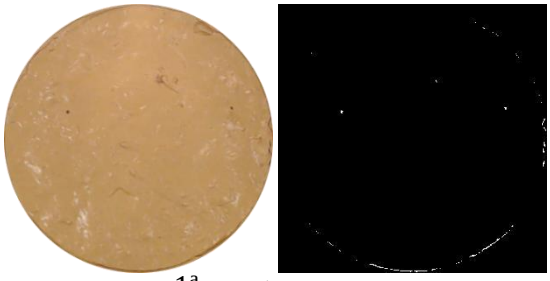
APÊNDICE B - DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE FISSURAÇÃO PARA CICLOS DE SECAGEM E UMEDECIMENTO – Wi : 94,2%



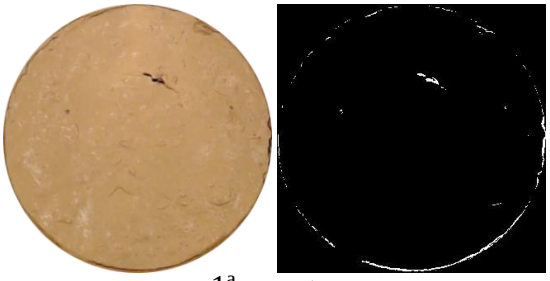
1ªsecagem
Tempo: 0 h
W: 94,2 % | CIF: 00,0 %
Temp.: 32,2 ºC | URA: 48 %



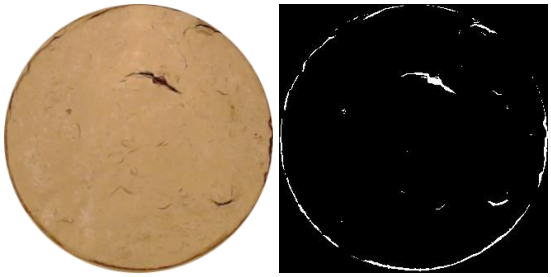
1ª secagem
Tempo: 2,5 h
W: 90,1 % | CIF: 00,0 %
Temp.: 32,8 ºC | URA: 42 %



1ªsecagem
Tempo: 5,8 h
W: 85,2 % | CIF: 00,3 %
Temp.: 33,4 ºC | URA: 41 %



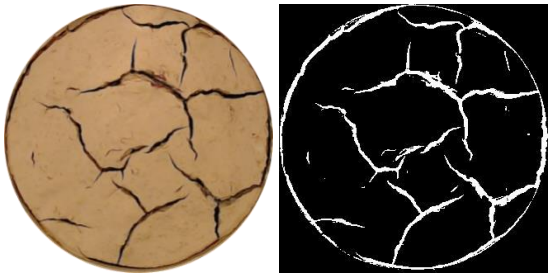
1ª secagem
Tempo: 8,8 h
W: 80,1 % | CIF: 01,1 %
Temp.: 34,2 ºC | URA: 41 %



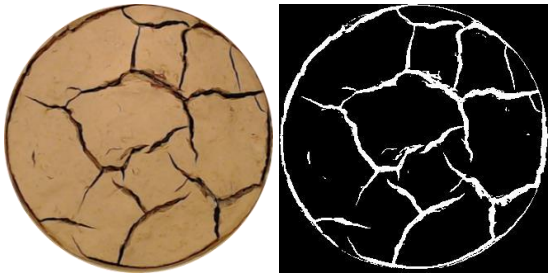
1ªsecagem
Tempo: 11,7 h
W: 75,1 % | CIF: 02,2 %
Temp.: 33,9 ºC | URA: 41 %

1ª secagem
Tempo: 14,3 h
W: 70,1 % | CIF: 04,0 %
Temp.: 33,9 ºC | URA: 40 %

1ª secagem
Tempo: 16,8 h
W: 65,2 % | CIF: 06,9 %
Temp.: 34,1 ºC | URA: 40 %



1ª secagem
Tempo: 19,2 h
W: 60,0 % | CIF: 10,7 %
Temp.: 34,2 ºC | URA: 40 %



1ª secagem
Tempo: 21,2 h
W: 55,1 % | CIF: 13,3 %
Temp.: 33,9 ºC | URA: 39 %

1ª secagem
Tempo: 23,2 h
W: 50,3 % | CIF: 17,3 %
Temp.: 33,8 ºC | URA: 38 %

1ª secagem
Tempo: 25,3 h
W: 44,7 % | CIF: 20,0 %
Temp.: 34,1 ºC | URA: 40 %

1ª secagem
Tempo: 27 h
W: 40,0 % | CIF: 21,1 %
Temp.: 34,2 ºC | URA: 39 %

1ª secagem
Tempo: 28,5 h
W: 35,3 % | CIF: 22,1 %
Temp.: 34,1 ºC | URA: 39 %

1ª secagem
Tempo: 30,2 h
W: 30,2 % | CIF: 25,1 %
Temp.: 34,3 ºC | URA: 39 %

1ª secagem
Tempo: 31,7 h
W: 24,7 % | CIF: 25,6 %
Temp.: 34,3 ºC | URA: 37 %

1ª secagem
Tempo: 32,8 h
W: 20,6 % | CIF: 26,0 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 38 %

1ª inundação
Tempo: 34 h
1hr de inundação | CIF: 12,9 %
Temp.: 34,7 ºC | URA: 37 %

1ª inundação
Tempo: 45,8 h
13hrs de inundação | CIF: 11,8 %
Temp.: 34,8 ºC | URA: 38 %

1ª inundação
Tempo: 53,2 h
20hrs de inundação | CIF: 11,3 %
Temp.: 34,7 ºC | URA: 37 %

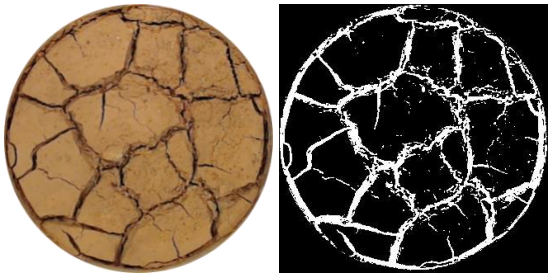
1ª inundação
Tempo: 70,5 h
37,6hrs de inundação | CIF: 10,9 %
Temp.: 34,6 ºC | URA: 38 %

1ª inundação
Tempo: 75,3 h
42,5hrs de inundação | CIF: 10,3 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 36 %

1ª inundação
Tempo: 103 h
70hrs de inundação | CIF: 10,4 %
Temp.: 34,1 ºC | URA: 38 %

2ª secagem
Tempo: 127 h
W: 39,6 % | CIF: 14,6 %
Temp.: 35,0 ºC | URA: 37 %

2ª secagem
Tempo: 128,5 h
W: 34,9 % | CIF: 18,4 %
Temp.: 34,7 ºC | URA: 37 %



2ª secagem
Tempo: 130 h
W: 30,0 % | CIF: 21,0 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 36 %

2ª secagem
Tempo: 131 h
W: 26,3 % | CIF: 22,4 %
Temp.: 35,0 ºC | URA: 36 %

2ª inundação
Tempo: 132,2 h
01hr de inundação | CIF: 10,3 %
Temp.: 34,9 ºC | URA: 36 %

2ª inundação
Tempo: 142,2 h
21hrs de inundação | CIF: 12,1 %
Temp.: 34,9 ºC | URA: 41 %

2ª inundação
Tempo: 152,7 h
21hrs de inundação | CIF: 10,3 %
Temp.: 34,9 ºC | URA: 36 %

2ª inundação
Tempo: 170,5 h
21hrs de inundação | CIF: 12,1 %
Temp.: 34,2 ºC | URA: 38 %

2ª inundação
Tempo: 179,3 h
48hrs de inundação | CIF: 10,3 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 36 %

2ª inundação
Tempo: 199,5 h
68hrs de inundação | CIF: 10,5 %
Temp.: 34,1 ºC | URA: 36 %

3ª secagem
Tempo: 223,5 h
W: 39,5 % | CIF: 14,7 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 36 %

3ª secagem
Tempo: 225 h
W: 34,7 % | CIF: 17,0 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 35 %

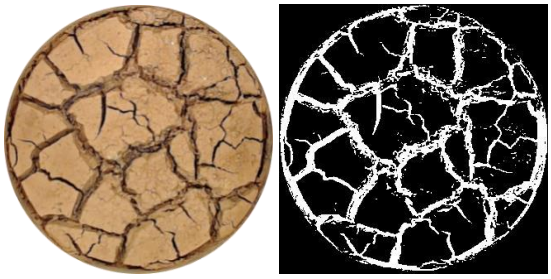
3ª secagem
Tempo: 226,3 h
W: 30,2 % | CIF: 19,2 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 36 %

3ª secagem
Tempo: 228,2 h
W: 24,6 % | CIF: 24,9 %
Temp.: 34,6 ºC | URA: 36 %

3ª secagem
Tempo: 229,3 h
W: 19,6 % | CIF: 25,4 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 36 %

3ª secagem
Tempo: 230,7 h
W: 14,8 % | CIF: 25,5 %
Temp.: 34,4 ºC | URA: 36 %

3ª secagem
Tempo: 232 h
W: 10,2 % | CIF: 25,7 %
Temp.: 34,7 ºC | URA: 36 %



3ª secagem
Tempo: 233,7 h
W: 05,2 % | CIF: 25,8 %
Temp.: 34,7 ºC | URA: 36 %

3ª secagem
Tempo: 234,5 h
W: 03,3 % | CIF: 26,3 %
Temp.: 34,7 ºC | URA: 36 %

3ª secagem
Tempo: 245,2 h
W: 03,3 % | CIF: 26,5 %
Temp.: 34,9 ºC | URA: 35 %