

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

ISABEL MENDES PEREIRA DA SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO E PROCESSO DE FORMAÇÃO DE FISSURAS EM UM  
SOLO DEVIDO AO RESSECAMENTO**

Recife  
2018

VIRTUS IMPAVIDA

ISABEL MENDES PEREIRA DA SILVA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO E PROCESSO DE FORMAÇÃO DE FISSURAS  
EM UM SOLO DEVIDO AO RESSECAMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Geotecnia

**Orientador:** Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães.

**Coorientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Analice França Lima Amorim.

Recife  
2018

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586e Silva, Isabel Mendes Pereira da.  
Estudo do comportamento e processo de formação de fissuras em um solo devido ao ressecamento / Isabel Mendes Pereira da Silva. – 2018.  
127 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães.  
Coorientadora: Profa. Dra. Analice França Lima Amorim.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.  
Inclui Referências e Anexo.

1. Engenharia Civil. 2. Fissuras. 3. Ressecamento. 4. Processamento de imagem. I. Guimarães, Leonardo José do Nascimento. (Orientador). II. Amorim, Analice França Lima. (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-237

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO E PROCESSO DE FORMAÇÃO DE  
FISSURAS EM UM SOLO DEVIDO AO RESSECAMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Geotecnia

**Orientador:** Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães.

**Coorientadora:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Analice França Lima Amorim.

defendida por

Isabel Mendes Pereira da Silva

**Aprovada em: 14/03/2018**

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Analice França Lima Amorim (Coorientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leila Brunet de Sá Bezerra (Examinadora externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lícia Mouta da Costa (Examinadora externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo seu infinito e inefável amor, por meio de seu filho Jesus que pela graça me deu a salvação. Pela providência para que este projeto tivesse êxito. Dedico não apenas este trabalho, mas a minha vida. “A quem tenho nos céus senão a ti? E na terra, nada mais desejo além de estar junto a ti. O meu corpo e o meu coração poderão fraquejar, mas Deus é a força do meu coração e a minha herança para sempre. Mas para mim, bom é estar perto de Deus; fiz do Soberano SENHOR o meu refúgio; proclamarei todos os seus feitos.” (Salmos 73:25-26,28- versão NVI).

Aos meus pais, Edson e Jane, por todo o esforço e sacrifício realizados em prol da educação não apenas da minha, como também da de meus irmãos. Pela incansável luta em nos conduzir aos caminhos planos e valorosos da verdade, do respeito e da ética.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leonardo Guimarães e à Prof.<sup>a</sup> coorientadora Dr.<sup>a</sup>. Analice Amorim, por seu exemplo profissional, paciência, disposição e acessibilidade quanto ao esclarecimento de dúvidas oriundas do desenvolvimento do presente trabalho.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a todos que formam o respeitado Laboratório de Métodos Computacionais e Geomecânica (LMCG) por sempre terem me apoiado com seus ensinamentos e orientações, pela atenção, carinho e amizade formada. Grupo este que tenho orgulho de participar.

Aos técnicos do Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE em especial Antônio Brito e Gutemberg, pela dedicação, apoio oferecido e pela uma contribuição no processo de ensaios.

À Prof.<sup>a</sup> Me. Renata Freire do IFPE Pela acessibilidade, apoio, dedicação e disponibilidade no desenvolvimento dos trabalhos com processamento de imagens.

À Prof.<sup>a</sup> Me. Daniela Silva e ao Prof.. Dr. Inaldo da Silva por todo apoio, carinho, estarem sempre juntos na caminhada acadêmica e na vida.

Aos meus tios Ednaldo Pereira, Rosângela, Rosemary e Ronaldo Maçal, e a minha avó Tereza por todo amor, carinho e força nesta caminhada.

Ao meu namorado Fernando Cavalcanti pelo companheirismo, paciência, dedicação, carinho e pelas inúmeras atitudes que facilitaram esta minha caminhada.

A Tecomat Engenharia por todo apoio e amizade. Em especial ao Professor Joaquim Correia, Tibério Andrade, Ângelo, Melquisedequei, Neto, Gustavo, João Ribeiro, Edson, Pedro e Jairo.

À Impac Comercial e à Connect no apoio à elaboração dos sensores e transmissores de dados do equipamento. Em especial ao técnico Laerte pelo apoio, disponibilidade e atenção nos vários testes realizados.

Aos irmãos na fé, colegas, amigos e familiares que tanto me apoiaram e incentivaram, sejam com palavras e/ou orações, para que eu não desistisse de meus sonhos, independentemente dos obstáculos que se apresentassem diante de mim, ensinando-me, assim, que estes são transponíveis. Aos queridos Gimilson, Márcia, Danielly, Lays, Jane, Eliane, família Manga, Geraldo, Elisângela, Carlos, Ketyma, Paulo, Kalina, Lenice, Manuela, Philipe, Iane, Priscila, Tereza e Andreza obrigada.

Aos amigos que me ajudaram a tornar esta dissertação realidade, transmitindo-me conhecimentos técnicos e apoio nesta caminhada: À Cleto, Katia Cristina, Lucíolo, Ricardo, Tarcísio, Bruno, Nina, Myckelle, Fernando, Fabiano, Sávio, Esley, João Ricardo, Agostinho.

A todos aqueles que injustamente não foram mencionados aqui, mas que acreditaram e me apoiaram nessa conquista de mais uma etapa alcançada.

## RESUMO

A presença de fissuras na massa de solo gera um impacto nas estruturas de solo de forma que provoca alterações em suas principais propriedades mecânicas e hidráulicas. Em locais em que ocorrem períodos de secas por tempo prolongado, as fissuras verticais formadas alcançam profundidades maiores, expõem os solos mais profundos a prolongadas e intensas correntes de ar, aumentam a capacidade de infiltração do solo mobilizando a retração ou expansão potencial de solos mais profundos, afetando, o desempenho de elementos estruturais de casas, edifícios verticais, reservatórios, pavimentos, aterros e taludes de corte, podendo ocasionar a ruptura dessas estruturas. Este trabalho teve como objetivo analisar o processo de formação e propagação das fissuras dos solos, permitindo que a amostra de solo secasse ao ar e assim verificar as consequências desses efeitos no solo. O material selecionado para realizar as análises foi uma mistura entre agregado miúdo e bentonita. Com esta finalidade, foi projetado um equipamento capaz de monitorar amostras de solo submetidas à secagem ao ar, onde a temperatura e umidade do ambiente e a temperatura da amostra, foram monitoradas através de sensores e o peso da amostra registrado através de célula de carga. Os dados são registrados automaticamente através de um programa desenhado para este equipamento, permitindo a visualização de todos os sensores. As imagens são obtidas por meio de uma *webcam*, são capturadas automaticamente por meio de intervalo de tempo predeterminado e armazenadas no computador. Através das imagens obtidas foi possível verificar a formação das fissuras sobre a superfície de cada amostra, sendo possível estudar o comportamento do solo. Desta forma, foi utilizado o processamento de imagens para obter dados como área das células fissuradas e área das fissuras e posteriormente correlacionar os parâmetros geométricos com as propriedades da amostra de solo. O método de processamento de imagens consiste em aplicar sobre as imagens as ferramentas de transformação binária, segmentação por rótulos e análise dos rótulos para, obter a relação entre a área de superfície das fendas e a área total da superfície analisada e correlacionar os parâmetros geométricos obtidos da imagem com as propriedades da amostra de solo analisado. Os resultados mostram a queda da umidade ao longo do tempo e desta forma é possível calcular a taxa de perda de umidade. Para determinados intervalos de tempo, as análises foram realizadas sobre cada amostra e revelou a influência das dimensões das amostras sobre a espessura das fendas abertas, quantidade de células fissuradas e taxa de perda de umidade. Desta forma, a aplicação dessa metodologia mostrou-se apropriada para análise do processo de formação e comportamento das fissuras do solo em processo de ressecamento ao ar com ambiente controlado.

**Palavras-chave:** Fissuras. Ressecamento. Processamento de imagem.

## ABSTRACT

The presence of cracks in the soil mass generates an impact on the soil structures in a way that causes changes in its main mechanical and hydraulic properties. In places where long periods of drought occur, vertical cracks formed reach deeper depths, expose deeper soil to prolonged and intense air currents, increase soil infiltration capacity by mobilizing the retraction or potential expansion of deeper soil, affecting the performance of structural elements of houses, vertical buildings, reservoirs, pavements, embankments and cutting slopes, which may lead to the rupture of these structures. The objective of this work was to analyze the formation and propagation of soil cracks, allowing the soil sample to air dry and to verify the consequences of these effects on the soil. The material selected for the analysis was a mixture of small aggregate and bentonite. For this purpose, an equipment capable of monitoring soil samples subjected to air drying was designed, where the temperature and humidity of the environment and the temperature of the sample were monitored through sensors and the weight of the sample recorded through the load cell. The data is automatically registered through a program designed for this equipment, allowing the visualization of all the sensors. The images are obtained through a webcam, are captured automatically by means of predetermined time interval and stored on the computer. Through the obtained images it was possible to verify the formation of cracks on the surface of each sample, being possible to study the behavior of the soil. In this way, the image processing was used to obtain data as the area of the cracked cells and area of the cracks and later to correlate the geometric parameters with the properties of the soil sample. The image processing method consists of applying the binary transformation tools, label segmentation and label analysis to the images to obtain the relation between the surface area of the slits and the total area of the analyzed surface and to correlate the obtained geometric parameters of the image with the properties of the analyzed soil sample. The results show the decrease of humidity over time and in this way it is possible to calculate the rate of moisture loss. For certain time intervals, the analyzes were performed on each sample and revealed the influence of the sample dimensions on the thickness of the open slits, amount of cracked cells and rate of moisture loss. In this way, the application of this methodology proved to be appropriate for the analysis of the formation process and the behavior of soil cracks in the air drying process with controlled environment.

**Keywords:** Fissures. Dryness. Image processing

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de fissuração de argilas descrito por Li et al (2012). .....	25
Figura 2 - Desenho esquemático do processo de formação de fissuras. (a) solo inicialmente saturado; (b) menisco da interface água-ar desenvolvido entre as partículas de solo; (c) sucção capilar entre as partículas do solo; (d) tensão de tração desenvolvida na camada superior; e (e) início da fissuração .....	27
Figura 3 - Variação da umidade e da velocidade de evaporação com o tempo de ressecamento.....	28
Figura 4 - Estágios de desenvolvimento das fissuras, segundo Li e Zhang (2011). (a) Estágio inicial; (b) Estágio primário; (c) Estágio estacionário.....	30
Figura 5 - a) Histograma do número de lados (preto) e o número de vizinhos (branco) de domínios em um padrão de fissuração cerâmico; b) Célula de seis lados em espuma; c) Célula de quatro lados em um padrão de fissuração.....	32
Figura 6 - Fissuração final de uma amostra. ....	33
Figura 7 - Evolução temporal da área delimitada na Figura 6 .....	34
Figura 8 - Três fissuras formadas de um mesmo ponto de partida. ....	35
Figura 9 - Detalhes das fissuras em uma porção de uma amostra de solo ensaiada. a) Superfície superior de uma porção; b) Superfície inferior da amostra; c) superfícies laterais de uma porção.....	38
Figura 10 - Detalhe com zoom das fissuras na parte inferior de uma amostra .....	38
Figura 11 - Fissuras com forma de espiral na parte inferior da amostra .....	39
Figura 12 – Imagem do CIF de 37% .....	40
Figura 13 - Representação geométrica de uma fissura.....	41
Figura 14 - Elemento de solo não saturado com fase ar contínua (modificado de Fredlund e Rahardjo, 1993).....	43
Figura 15 Modelo rigoroso e simplificado das fases de um solo não saturado, conforme proposição de Fredlund e Rahardjo (1993) .....	43
Figura 16 - Métodos de identificação de solos expansivos .....	48
Figura 17 – Passos fundamentais para processamento de imagens .....	53
Figura 18 – Representação de uma imagem digital .....	54
Figura 19 – Digitalização de uma imagem .....	55
Figura 20 - Histograma de 8 bits (256 níveis de cinza) com escolha de um limiar (ou threshold “Th”)......	57

Figura 21 - Representação de como um limite separa logicamente um sinal em duas	58
Figura 22 – Imagem da Câmara Ambiental Kantha .....	60
Figura 23 - Configuração experimental de Sanchez et al (2012) .....	61
Figura 24 – Aparato-piloto de ressecamento de solos .....	63
Figura 25 - Aparelho desenvolvido por Costa (2015) .....	63
Figura 26 – Fluxograma utilizado na metodologia experimental. ....	65
Figura 27- Célula de carga IMPAC M5X0,8 .....	66
Figura 28 - Vista da célula de carga instalada.....	66
Figura 29 - Suportes de alumínio para ajustes de nível .....	67
Figura 30 – Localização da célula de carga e seus componentes.....	67
Figura 31 - Webcam Logitech Pro HD C920 15MP .....	68
Figura 32 – Localização da haste de alumínio e caixa de proteção da webcam .....	69
Figura 33 – Caixa de proteção da webcam .....	70
Figura 34 – Vista frontal da lâmpada LED JL-678.....	70
Figura 35 - Sensores de temperatura tipo PT-100 .....	71
Figura 36 – Sensor de umidade e temperatura do ar .....	72
Figura 37 - Vista da caixa do transmissor de dados.....	72
Figura 38 - O software IMPACLOG08.....	73
Figura 39 – Sistema de aquisição de dados.....	74
Figura 40: (a) Seleção de mistura entre amostra de areia; (b) homogeneização com água .....	74
Figura 41 - Curva granulométrica do solo de Petrolina(A1).....	75
Figura 42 - Curva granulométrica do solo de Ipojuca(A2) .....	75
Figura 43 – Verificação da formação das fissuras. (a) amostras A1 e A2 na umidade do Limite de Lliquidez sobre placa de vidro com altura de 3 mm; (b) Comportamento da amostra A1 após 24 horas; (c) Comportamento da amostra A2. ....	76
Figura 44 – Marcação da altura da amostra na placa de Petri com auxílio de uma placa de alumínio .....	77
Figura 45 - Procedimento da preparação da amostra na placa de Petri. a) colocação da amostra, b) espalhamento da amostra e c) acomodação da amostra ao longo da altura marcada, através de pequenas batidas.....	78
Figura 46 – Nivelamento e retirada do excesso da amostra a) aplicação de vaselina no fundo da cápsula de alumínio, b) nivelamento da amostra c) retirado do excesso de amostra nas bordas da placa de Petri d) amostra pronta.....	78

Figura 47 - Imagem resultante (bin1). .....	83
Figura 48 – Rotulação .....	85
Figura 49 – Área de fissura .....	86
Figura 50 – Curva granulométrica da mistura entre o solo de Ipojuca(A2) e bentonita	88
Figura 51 – Gráfico do ensaio do Limite de liquidez realizado da mistura entre a areia Ipojuca(A2) e bentonita .....	88
Figura 52 - Imagem da primeira fissura da amostra 5 .....	91
Figura 53 – Imagem da fissura primária de topo da amostra 5 .....	91
Figura 54 – Evolução do peso com o tempo da amostra 5 .....	92
Figura 55 – Evolução da umidade ambiente com o tempo da amostra 5 .....	92
Figura 56 – Evolução da temperatura ambiente com o tempo da amostra 5 .....	93
Figura 57- Evolução da variação da umidade do solo com o tempo da amostra 5 ...	93
Figura 58 – Sequência de imagens referentes à amostra 5 .....	94
Figura 59 - Imagem da primeira fissura da amostra 10 .....	95
Figura 60 – Evolução do peso com o tempo da amostra 10 .....	96
Figura 61 - Evolução da umidade ambiente com o tempo da amostra 10 .....	96
Figura 62 - Evolução da temperatura ambiente com o tempo da amostra 10 .....	97
Figura 63- Evolução da variação da umidade do solo com o tempo da amostra 10 .	97
Figura 64 – Sequência de imagens referentes à amostra 10 .....	97
Figura 65 - Imagem da fissura primária da amostra 13 .....	99
Figura 66 – Evolução do peso com o tempo da amostra 13 .....	100
Figura 67 - Evolução da umidade ambiente com o tempo da amostra 13 .....	100
Figura 68 - Evolução temperatura ambiente com o tempo da amostra 13 .....	101
Figura 69- Evolução da variação da umidade do solo com o tempo da amostra 13	101
Figura 70 – Sequência de imagens referentes à amostra 13 .....	101
Figura 71 - Imagem da fissura primária da amostra 15 .....	103
Figura 72 - Imagem da fissura primária de topo da amostra 15 .....	103
Figura 73 – Evolução do peso com o tempo da amostra 15 .....	104
Figura 74 – Evolução da umidade ambiente com o tempo da amostra 15 .....	104
Figura 75 - Evolução da temperatura ambiente com o tempo da amostra 15 .....	105
Figura 76 – Evolução variação da umidade do solo com o tempo da amostra 15 ..	105
Figura 77 – Sequência de imagens referentes à amostra 15 .....	105
Figura 78 - Imagem da fissura primária da amostra 16 .....	107
Figura 79 - Evolução do peso com o tempo da amostra 16 .....	108

Figura 80 – Evolução da umidade ambiente com o tempo da amostra 16.....	108
Figura 81 - Evolução da temperatura ambiente com o tempo da amostra 16 .....	109
Figura 82- Evolução da variação da umidade do solo durante o ensaio da amostra 16 .....	109
Figura 83 – Sequência de imagens referentes à amostra 16 .....	109
Figura 84 – Variação de umidade com tempo entre todas as amostras.....	111
Figura 85 – Variação de umidade com o tempo entre amostras de diâmetro de 55,50 mm .....	111
Figura 86 - Evolução da temperatura ambiente com o tempo entre amostras de diâmetro de 55,50 mm.....	111
Figura 87 – Variação de umidade com o tempo entre amostras de altura de 4 mm	112
Figura 88 - Evolução da temperatura ambiente com o tempo entre amostras de altura de 4 mm .....	112
Figura 89 – Imagens de todas as amostras de acordo com o intervalo de tempo ..	114
Figura 90 – Sequencia de imagens da amostra 19 .....	115
Figura 91 – Resultado de imagens binarizadas: a) 6h; b) 18h; c) 24h; d)48h; e) 72h e f) 90h .....	115
Figura 92 – Resultado de imagens da binarizadas: a) 6h; b) 18h; c) 24h; d)48h; e) 72h e f) 90h .....	116
Figura 93 – Relação do CIF ao longo do tempo.....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificações do grau de expansão relacionada ao Limite de Liquidez (LL) e ao Índice de Plasticidade (IP). .....	50
Tabela 2 – Amostras elaboradas.....	89
Tabela 3 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 5 .....	91
Tabela 4 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 10 .....	95
Tabela 5 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 13 .....	99
Tabela 6 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 15 .....	103
Tabela 7 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 16 .....	107
Tabela 8 – Resumo dos parâmetros obtidos através das imagens .....	116

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
<b>1.2.1</b>	<b>Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Específico.....</b>	<b>17</b>
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
2.1	DEFINIÇÃO .....	20
2.2	CLASSIFICAÇÃO .....	21
2.3	CAUSAS .....	22
<b>2.3.1</b>	<b>Composição do Solo</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Compactação</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Teor de umidade e condutividade hidráulica</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Resistência à tração</b> .....	<b>24</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Sucção</b> .....	<b>25</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Vegetação</b> .....	<b>26</b>
2.4	PROCESSO DE RESSECAMENTO DO SOLO .....	26
2.5	PROCESSOS DE FISSURAS .....	30
<b>2.5.1</b>	<b>O Padrão hierárquico da fissuração</b> .....	<b>31</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Hierarquia específica da fissuração do solo</b> .....	<b>32</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Ângulo de interseção das fissuras</b> .....	<b>34</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Formação de juntas durante a fissuração</b> .....	<b>34</b>
<b>2.5.5</b>	<b>Fissuras por contração: ressecamento sinérese</b> .....	<b>35</b>
<b>2.5.6</b>	<b>Morfologia de polígonos rachados</b> .....	<b>36</b>
2.6	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E QUANTIFICAÇÃO DAS FISSURAS .....	39
2.7	SOLOS NÃO SATURADOS .....	41

2.7.1	Solos Expansivos .....	44
2.7.2	Características gerais e propriedade dos solos expansivos .....	44
2.7.3	Mecanismos de expansão.....	45
2.7.4	Fatores condicionantes.....	47
2.7.5	Métodos de identificação dos solos expansivos .....	47
2.8	PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS .....	52
2.8.1	IMAGEM DIGITAL.....	54
2.8.2	PRÉ-PROCESSAMENTO .....	55
2.8.3	Segmentação .....	56
2.8.4	Limiarização .....	56
2.8.5	Método de Otsu.....	58
2.8.6	Morfologia matemática.....	58
2.8.7	Rotulação .....	59
2.8.8	Representação, reconhecimento e interpretação .....	59
2.9	EQUIPAMENTOS ANTECEDENTES UTILIZADOS PARA ANÁLISES.....	59
3	EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS .....	64
3.1	INTRODUÇÃO.....	64
3.2	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	65
3.2.1	Descrição da célula de carga.....	65
3.2.2	Sistema de aquisição de imagens (webcam) .....	68
3.2.3	Fonte de iluminação para webcam.....	70
3.2.4	Sensor de temperatura.....	71
3.2.5	Sensor de umidade e temperatura .....	71
3.2.6	Caixa de proteção do transmissor de dados .....	72
3.2.7	Programa para aquisição de dados .....	72
3.2.8	Sistema de aquisição de dados.....	73
3.3	SELEÇÃO DA MISTURA DE SOLO PARA PREPARAÇÃO DA AMOSTRA..	74

3.4	PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO AMOSTRA.....	76
3.5	PROCEDIMENTO PARA VERIFICAÇÃO DA FORMAÇÃO DAS FISSURAS	79
3.6	PROCESSAMENTO DE IMAGENS E MEDIÇÃO .....	80
3.6.1	<b>Aquisição de imagens .....</b>	<b>81</b>
3.6.2	<b>Pre-processamento .....</b>	<b>81</b>
3.6.3	<b>Segmentação .....</b>	<b>82</b>
3.6.4	<b>Representação ou seleção de características .....</b>	<b>83</b>
3.6.5	<b>Reconhecimento ou interpretação:.....</b>	<b>85</b>
4	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>87</b>
4.1	INTRODUÇÃO.....	87
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA.....	87
4.3	AMOSTRAS ANALISADAS .....	89
4.3.1	<b>Amostra 5 (Diâmetro 97,70 mm e altura de 4,0 mm) .....</b>	<b>90</b>
4.3.2	<b>Amostra 10 (Diâmetro 55,50 mm e altura de 4,0 mm) .....</b>	<b>94</b>
4.3.3	<b>Amostra 13 (Diâmetro 95,30 mm e altura de 4,0 mm) .....</b>	<b>98</b>
4.3.4	<b>Amostra 15 (Diâmetro 72,20 mm e altura de 3,0 mm) .....</b>	<b>102</b>
4.3.5	<b>Amostra 16 (Diâmetro 55,50 mm e altura de 3,0 mm) .....</b>	<b>106</b>
4.4	VARIAÇÃO DE UMIDADE .....	110
4.5	PROCESSAMENTO DE IMAGENS .....	112
4.5.1	<b>PADRÃO DE FISSURAS .....</b>	<b>113</b>
4.5.2	<b>OBTENÇÃO DOS DADOS GEOMÉTRICOS .....</b>	<b>114</b>
5	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>118</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	119
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>120</b>
	<b>ANEXO A – CÓDIGO DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....</b>	<b>125</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A formação de fissuras no solo ocorre naturalmente devido ao ressecamento do solo. Esse ressecamento é decorrente de variações sazonais no ambiente, que submete o solo a alternâncias de períodos secos e úmidos. Durante os períodos secos, o solo se retrai e forma fissuras que influenciam negativamente nas propriedades mecânicas e hidráulicas deste.

Em obras de terraplanagem um sistema de cobertura eficiente é o que apresenta resistência aos esforços mecânicos, resistência aos processos erosivos e baixa permeabilidade. Tais estruturas são submetidas aos processos de secagem e umedecimento que podem gerar fissuras e trincas, formando redes de fendas e, portanto, caminhos preferenciais para infiltração de água ou transporte de poluentes para o subsolo, comprometendo suas características iniciais.

A formação de fissuras no solo pode trazer como consequências danos para as estruturas de terras. Alguns danos podem ser o comprometimento da condutividade hidráulica dos solos argilosos utilizados em coberturas de aterros, outro exemplo, é a contaminação de águas subterrâneas através da percolação de materiais nocivos por meio de camadas impermeabilizantes que sofreram fissuração do solo, ou, citando outro exemplo, sua presença em pavimentos poderá destruir o revestimento desde a camada até sua base.

Em aterros sanitários a proliferação de vetores é evitada por um conjunto de células de resíduos recobertos diariamente por uma camada de solo. A boa qualidade desses aterros depende da eficiência dos sistemas de impermeabilização de fundo das células e dos sistemas de cobertura intermediários ou final. A função das camadas de fundo é reduzir o fluxo de percolados para o ambiente hidro geológico subjacente. As camadas de cobertura têm as seguintes finalidades: o controle da entrada de água e oxigênio para o interior do aterro; redução de odores e vetores de doenças, e por fim, proporcionar uma paisagem adequada (COSTA, 2015).

Devido a um grande número de solicitações como variações de temperatura, ciclos de umedecimento e secagem, recalques causados pela decomposição dos

resíduos, movimento de veículos, erosão por água ou vento, presença de raízes e animais, o sistema de cobertura pode ser comprometido ocasionando a perda de estanqueidade e o surgimento de fissuras e trincas, que criam caminhos preferenciais de fluxo e aumentam a permeabilidade das camadas de cobertura (COSTA, 2015; BOSCOV, 2008).

Outro exemplo é o bombeamento de finos, que é um dos fenômenos deletérios presentes em estruturas de pavimento, que é diretamente vinculado ao estado de fissuração de um material. O fenômeno ocorre quando o material do leito sobe para a camada de lastro devido ao efeito das cargas de serviço associadas à presença de água no subleito, então este material fino é alojado entre os vazios da camada de lastro alterando a rigidez da estrutura. Como consequência ocorre a intensificação do bombeamento e a via entra em um ciclo acelerado de deterioração e fissuração (SILVA, 2017; PORTO, 1984).

Devido à importância do fenômeno e seus impactos, faz-se necessário a melhor compreensão da influência da natureza e propriedades do solo, como por exemplo, o conteúdo de argilominerais expansíveis, estrutura e grau de compactação, para o processo de formação e propagação das fissuras dos solos e desta forma ampliar os conhecimentos sobre às variações em seu desempenho.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Geral

Este trabalho teve como objetivo principal analisar o processo de formação e propagação das fissuras no solo, através de um equipamento projetado e construído na Universidade Federal de Pernambuco, usando como referência a Câmara Ambiental Kantha, de forma que fosse permitida a secagem da amostra ao ar e assim, verificar as consequências desses efeitos sobre o solo após secagem.

### 1.2.2 Específico

Esta pesquisa tem por objetivos específicos:

- Projetar e construir um equipamento com capacidade de monitorar amostras de solos secas ao ar, através da captura de imagens, aquisição da temperatura e umidade do ambiente, e a temperatura na amostra;
- Selecionar uma amostra de solo e propor uma metodologia para preparação que permita monitorar a formação de fissuras durante secagem ao ar;
- Aplicar métodos de processamento de imagens durante a secagem da amostra com a finalidade de obter dados das fissuras que são de difícil aquisição;
- Propor uma metodologia para caracterizar padrão de fissuras;
- Avaliar influências geométricas de amostras de solos na formação de fissuras.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada em 5 capítulos, que são apresentados na seguinte ordem:

**CAPÍTULO 1:** Apresentam-se neste capítulo a introdução, além dos principais pontos do tema em estudo a serem abordados com mais detalhes no Capítulo 2 (revisão bibliográfica) e discutido ao longo da dissertação. Além da apresentação dos objetivos, geral e específico.

**CAPÍTULO 2:** Compreende uma revisão bibliográfica sobre os temas diretamente relacionados com esta pesquisa, principais aspectos sobre formação de fissuras relatando definição, classificação, causas, processos de fissuras, influência da secagem sobre o comportamento do solo, parâmetros geométricos e de quantificação de fissuras e modelos de equipamento utilizados em pesquisas anteriores.

**CAPÍTULO 3:** Apresenta-se a metodologia experimental utilizada nesta pesquisa. São descritos os aspectos referentes ao desenvolvimento e montagem e

detalhamento do equipamento e sensores utilizados na pesquisa, escolha dos materiais e dosagem da mistura utilizados nas sínteses das amostras, preparação das amostras, processamento de imagens digitais e os ensaios realizados para o estudo.

CAPÍTULO 4: Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais dos ensaios de secagem ao ar e das análises realizadas com imagens.

CAPÍTULO 5: São apresentadas as principais conclusões obtidas através da análise dos resultados e as recomendações para futuras pesquisas sobre este tema.

Finalizando a dissertação, segue a lista de referências bibliográficas utilizadas para o embasamento teórico desta pesquisa, assim como de Anexo A.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DEFINIÇÃO

A formação de fissuras por ressecamento na superfície do solo ocasionado pela perda de umidade é um fenômeno natural e pode afetar significativamente suas propriedades hidráulicas. Devido à complexidade dos materiais, esse fenômeno é influenciado por muitas variáveis dentre elas a composição mineralógica, quantidade de argila, variação da sucção, umidade relativa do ar e temperatura, espessura das camadas, condições de contorno, dentre outros (COSTA, 2015; TANG et al., 2011 b).

Prat et al. (2002) explica 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.

Morris et al. (1994) diz que o fluxo de água e as propriedades do solo, como módulo de compressão, coeficiente de Poisson, resistência ao cisalhamento, resistência à tração e superfície específica do solo são os influenciadores para a ocorrência de fissuras em solos submetidos ao ressecamento.

Essas fissuras atuam como caminho preferencial para o fluxo de água e com isso, ocorre o transporte de materiais reduzindo assim a resistência do solo. Desta forma, devido às consequências das implicações das fissuras produzidas no solo são importantes os estudos detalhados sobre esse tema visando buscar soluções que diminuam seus efeitos.

O surgimento de fissuras em um solo submetido às condições de ressecamento é iniciado quando é excedida a resistência à tração do solo pelas forças de tensão. As características do solo que interferem na resistência à tração são a sucção e teor de umidade. Após o surgimento da fissuração, é o estado de tensões existente no interior do solo e sua capacidade de dissipar as energias, que estarão governando a propagação das fissuras. Portanto, apesar da resistência à tração determinar o início da fissuração, é a mecânica da fratura que tende a conduzir a propagação das trincas. (COSTA, 2015; LAKSHMIKANTA, 2009).

Portanto, fissura em solos é um fenômeno complexo que envolve física, química, mecânica, parâmetros hidráulicos do solo em relação às situações climáticas e ambientais.

Algumas terminologias básicas são definidas a seguir, no que se referem aos estudos que tratam sobre fissuras em solos.

Teor de umidade da fissura é o teor de umidade do conteúdo do solo no momento em que a fissura inicia. Isto é obtido por amostragem do solo, quando a fissura é primeira observada ou interpolada numa curva a dessecação (LAKSHMIKANTA, 2009).

O primeiro conjunto de fissuras que surgem na superfície do solo antes da geração de outras derivações são as fissuras primárias, ou seja, aquelas que não são originadas de outras fissuras. O conjunto de fissuras provindas entre duas fissuras primárias, são denominadas de fissuras secundárias. Sendo provenientes de uma fissura primária e outra secundária ou sendo originada entre duas fissuras secundárias, a este conjunto denomina-se de fissuras terciárias (NAHLAWI E KODIKARA, 2006).

Células são os fragmentos de solo separados pelas fissuras que se cruzam entre si. Tamanho da célula é a área de cada célula que geralmente é a área após o solo fissurado ser completamente seco, a menos que seja mencionado que a mudança de tamanho durante a secagem foi considerada. Área de fissuras é igual à área de contêiner, que é o recipiente na qual os testes são realizados, menos a área total de células. Comprimento de fissuras é a dimensão linear total que é medido ao longo das fissuras (LAKSHMIKANTA, 2009; CORTE E HIGASHI, 1960)

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO

As discontinuidades em argilas são classificadas baseando-se em seu tamanho, geometria da superfície, rugosidade da superfície e a intensidade e o espaçamento das fissuras (FROOKES E DENNESS, 1969; LAKSHMIKANTA, 2009)

As fissuras são classificadas quanto à origem em quatro tipos: efeitos de retração, variações térmicas, esforços de tração e faturamento (FANG, 1997; LAKSHMIKANTA, 2009).

As fissuras mais frequentes causadas pela variação volumétrica de retração na superfície das camadas e que ocorrem pela evaporação da água, provocam tensões que ao serem liberadas geram a fissuração da superfície.

As fissuras causadas por varrições térmicas se desenvolvem quando o material sofre variações bruscas de temperatura, como rápido aquecimento e repentino esfriamento, descongelamento de um material congelado ou uma secagem de solo após seu umedecimento.

Fissuras de tração são causadas principalmente, devido ao acréscimo de sobrecargas como, carga estrutural, chuvas, gelo, neve, vegetação e cargas de fluência sazonais. Podendo haver associação com variações de umidade, tensões térmicas e fraturas causadas pela sobrecarga.

As fissuras por faturamento são causadas pela sobrecarga, ocorrida sobre o solo, mediante a combinação das tensões de retração, tensões térmicas e da variação da poro-pressão (água que preenche as fissuras e os vazios do solo, ocasiona a diminuição de tensão efetiva). Essa variação unida às mudanças das condições ambientais, resultam num aumento de tensões internas e uma correspondente elevação das forças de compressão no interior da estrutura do solo.

## 2.3 CAUSAS

O desenvolvimento de fissuras em solos argilosos aparece em situações como ao longo do processo de consolidação das argilas, durante a expansão das argilas como consequência do alívio de tensão de sobrecarga, fenômenos coloidais, distorções de volume das fissuras devido à indução promovida pelas reações químicas, consequências de tensões tectônicas, processos de secagem da argila, herança das rochas e grandes tensões laterais aos solo (VALLEJO, 1994).

Embora a localização e as condições meteorológicas sejam fatores variáveis, as propriedades dos solos (mineralogia, tamanho de grão, etc.) são de importância significativa. O subitem a seguir explica o efeito da composição do solo na ressecagem.

### 2.3.1 Composição do Solo

O conteúdo de argila presente no solo e seu índice de plasticidade influenciam diretamente na variação volumétrica e no aumento do potencial para expansão (GUSMÃO et al., 2005). A variação volumétrica do solo aumenta à medida que se tem maior teor de argila com alto índice de plasticidade, refletindo assim numa maior capacidade de reter a água, portanto, tendo conseqüente diminuição do peso específico seco máximo (LAKSHMIKANTA, 2009).

Quanto à mineralogia da argila, os solos podem ser mineralogicamente expansivos, ou seja, existe presença de argilo-minerais expansivos, que embora possam expandir por alívio das tensões externas, geralmente aumentam de volume com a elevação do teor de água. No fenômeno da expansibilidade, os argilominerais atraem a água para o espaço entre as camadas, aumentando a distância interplanar basal, estando o aumento de volume atrelado ao aumento de volume do próprio mineral. O tipo de mineral de argila presente é o que define a característica de expansão de um solo, pois nem todos os minerais argilosos experimentam modificações volumétricas, com variação de umidade. Argilominerais, como a illita e a clorita, podem ou não ser expansivos, porém a instabilidade é importante para as argilas como a vermiculita e, em especial, a montmorilonita (CARVALHO et al., 2012).

Um das relações da estrutura do solo como fator que promove a formação de fissuras, se trata da ocasião onde solos dispersivos na situação em que seus poros estejam preenchidos com diferentes fluidos e submetidos ao ressecamento, tendem a gerar diferentes tipos de padrões de fissuras (FANG, 1997).

### **2.3.2 Compactação**

O processo de ressecamento passa por uma etapa primária e residual. Na exposição do solo úmido ao ar, a água é retirada do solo sem a entrada de ar, sendo esta o processo definido como o ressecamento primário. Considerando a conservação da massa do sistema fechado e a não entrada do ar, temos, portanto, que a variação de volume do material é igual ao volume de água que é excluída do solo, tendo nesta fase inicial a maior variação de volume que ocorre no processo completo do ressecamento.

Desta forma, ocorre uma reaproximação entre as partículas de solo ao longo do tempo ao ponto de se tocarem, já que o espaço entre essas era preenchido pela

água que saiu do sistema. Neste contato entre os grãos após o rearranjo das partículas de solo, é o início da etapa de ressecamento residual, quando a estrutura do solo começa a resistir às variações de volume, portanto é um processo mais lento e de menor variação de volume. Nesta fase ocorre o preenchimento dos espaços vazios pelo ar, antes preenchidos pela água.

No início do ressecamento a variação de volume total está relacionada aos volumes de água e sólidos. Desta forma, independente da energia de compactação, um maior volume de partículas sólidas e menor volume de água por unidade de volume de solo é observado em solos compactados na umidade ótima, portanto, no ressecamento será menor a variação volumétrica.

Na situação oposta, sendo a compactação do solo promovida na umidade acima ou abaixo da umidade ótima, haverá maior presença de água do que partículas sólidas por unidade de volume de solo, portanto ocorrerá uma redução da massa unitária seca. O que indica maior espaço entre os grãos de solos, que, estando submetido ao ressecamento e após a saída de água, haverá maior retração volumétrica. Deixando evidente a relação proporcional entre retração e umidade volumétrica e a relação inversamente proporcional entre retração e a massa unitária seca (COSTA, 2015; ALBRECHT E BENSON, 2001).

### **2.3.3 Teor de umidade e condutividade hidráulica**

Através da análise da submissão a cinco ciclos de ressecamento de quatro amostras distintas, foi verificado que a umidade de fissuração, que é o teor de umidade da amostra no momento em que surgem as primeiras fissuras, cresceu rapidamente nos três primeiros ciclos de secagem e estabilizaram nos ciclos seguintes (COSTA, 2015; TANG et al 2011b).

A condutividade hidráulica foi analisada através de oito amostras distintas de solos compactados submetidas à vários ciclos de secagem e umedecimento. Foi verificado que os ensaios de condutividade hidráulica indicaram que a fissuração de algumas amostras aumentou em até 3 vezes a magnitude do coeficiente de permeabilidade (COSTA, 2015; ALBRECHT E BENSON, 2001)

### **2.3.4 Resistência à tração**

A resistência à tração é considerada como um parâmetro do material ou parte da resistência ao cisalhamento em solos secos ou totalmente saturados. Em solos não saturados, a resistência à tração é condicionada ao valor de sucção do solo, sendo, portanto, variável em relação ao grau de saturação (RESTREPO, 2015; CUADRADO, 2013).

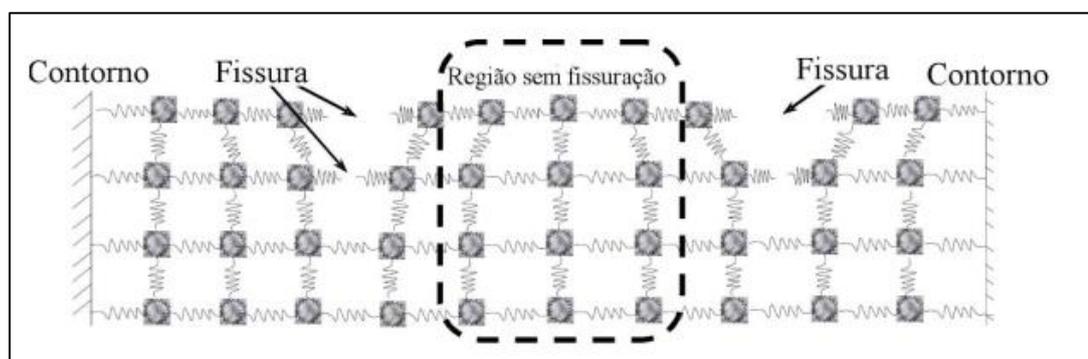
É a resistência à tração dos solos que determina o início da fissuração quando o solo é submetido às condições de ressecamento. Desta forma, quando as forças de tensão excedem a resistência à tração do solo, a propagação das fissuras é regida por sua capacidade de dissipar as energias e pelo estado de tensão existente no interior do solo (SILVA, 2017; TOWNER, 1987).

### 2.3.5 Sucção

As causas de fissuras provenientes de materiais argilosos expostos ao ressecamento têm como mecanismo o próprio ressecamento e a sucção mátrica. Essas geram fissuras na região aonde possui a maior taxa de perda de água que é a área do solo argiloso exposto à superfície.

Diante da exposição ao ressecamento, há uma alteração nos valores de sucção do solo associada ao grau de saturação do solo e que conseqüentemente varia a tensão na película contráctil, provocando a fissuração do solo adjacente devido ao tracionamento deste solo, conforme representado na Figura 1 (SILVA, 2017; LI et al, 2012).

Figura 1 - Modelo de fissuração de argilas descrito por Li et al (2012).



Fonte 1 – Silva (2017)

### 2.3.6 Vegetação

A transferência de água do solo para a atmosfera a partir de copos vegetais em solos com cobertura vegetal é denominado de transpiração. Geralmente em ambiente secos um gradiente de pressão de vapor entre as células de folhas normalmente saturadas de água é causa do fenômeno da transpiração.

A extração da água é realizada pelas raízes e transmitida para as folhas por meio das hastes de forma contínua. Desta forma, há uma predisposição ao ressecamento do solo mais rapidamente em relação a solos sem cobertura vegetal, promovendo, portanto, um aumento na retração e fissuração do solo. (LAKSHMIKANTA, 2009; RAVINA, 1983).

## 2.4 PROCESSO DE RESSECAMENTO DO SOLO

As camadas de argila mais próximas da atmosfera estão propensas a sofrer os danos causados pelo ressecamento (COSTA, 2015; DANIEL e WU, 1993). Entretanto, as camadas de cobertura de argila compactada também sofrem mudanças sazonais no teor de umidade, mesmo estando a uma profundidade significativa. Tais mudanças são ocasionadas pelas variações sazonais de precipitação e evapotranspiração, sendo que, o ressecamento causado pode induzir a formação de fissuras que afetarão de forma irreversível o comportamento das camadas (COSTA, 2015; KHIRE et al., 1997)

O processo de formação das fissuras, ver Figura 2, pode ser descrito quando uma argila homogênea e completamente saturada é submetida ao ressecamento, dando início a evaporação da água superficial, onde normalmente ocorre a evaporação da água que forma um filme sobre superfície. Nesta fase inicial não ocorre o comprometimento da estrutura e dos estados de tensão x deformação do solo (Figura 2a).

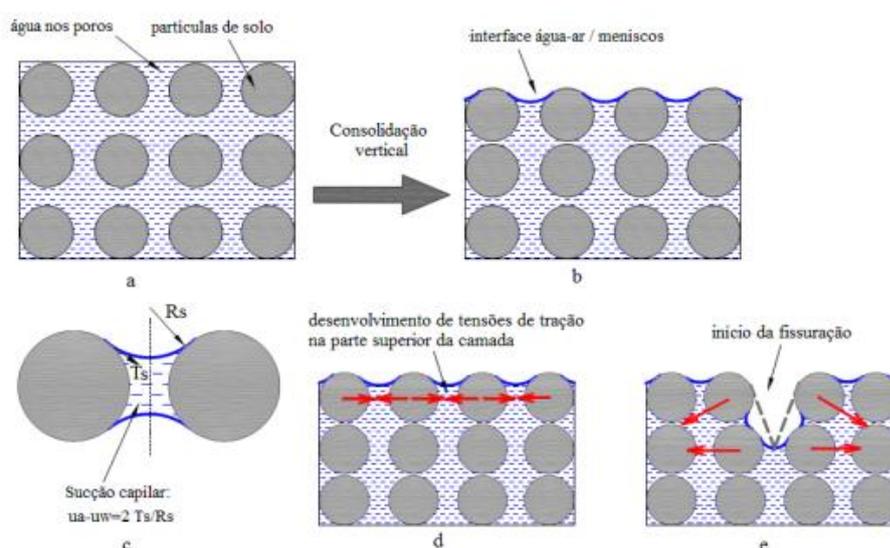
Com o andamento do processo, um menisco é formado no momento em que a interface água-ar alcança a superfície (Figura 2b). Dessa forma, a sucção capilar começa a se desenvolver na parte superior da camada entre essa interface e as partículas de solo (Figura 2c).

Persistindo a evaporação, a curvatura do menisco capilar aumenta sendo acompanhada pelo acréscimo da sucção capilar e da tensão efetiva entre as

partículas de argila, e que como consequência, a camada de argila acaba se consolidando e retraindo.

Para um melhor entendimento, pode-se imaginar que cada partícula que compõe a camada superficial, sofre a ação de uma força de tração induzida pela sucção capilar desenvolvida entre as partículas vizinhas (Figura 2c), o que cria um “campo” de tensões de tração na superfície da camada (Figura 2d). No momento em que essas tensões ultrapassam a resistência à tração do solo surgem as primeiras fissuras (Figura 2e) (COSTA, 2015; TANG et al., 2011a).

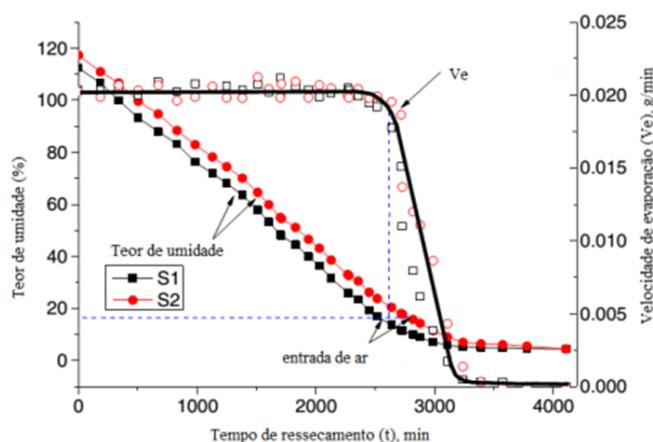
Figura 2 - Desenho esquemático do processo de formação de fissuras. (a) solo inicialmente saturado; (b) menisco da interface água-ar desenvolvido entre as partículas de solo; (c) sucção capilar entre as partículas do solo; (d) tensão de tração desenvolvida na camada superior; e (e) início da fissuração



Fonte 2 – Costa 2015

Adicionalmente, os resultados obtidos por Tang et al. (2011 a) indicam que a evaporação da água presente nas amostras analisadas é composta de três estágios, sendo a primeira uma zona inicial em que se verifica que a perda de água ocorre com uma velocidade constante, a segunda uma zona com velocidade decrescente e a terceira uma zona final estabilizada, onde qualquer ressecamento adicional não acarreta mais perda de água, conforme apresenta a Figura 3.

Figura 3 - Variação da umidade e da velocidade de evaporação com o tempo de ressecamento.



Fonte 3 - (COSTA, 2015; TANG et al., 2011a)

Estes resultados corroboram com outros estudos que realizaram ensaios de evaporação em três diferentes amostras de solo e atribuíram a velocidade decrescente da evaporação aos seguintes fatores (COSTA, 2015; WILSON et al., 1997):

- (a) a quantidade de água disponível nas amostras de solo que diminui ao longo do tempo;
- (b) o aumento da sucção que produz o aumento da aderência às moléculas de água impedindo sua saída para atmosfera;
- (c) a variação da pressão do vapor de água na interface solo-ar diminui com a secagem.

Além disso, a redução do tamanho dos poros e da condutividade hidráulica resultante da retração do solo também reduz a velocidade de evaporação. Geralmente é enquanto as amostras se encontram saturadas que a zona de velocidade de evaporação é constante. Quando o teor de umidade chega próximo ao valor de entrada de ar (início da dessaturação), é finalizada a zona de evaporação com velocidade constante conforme representado na Figura 3.

Os poros maiores próximos à superfície se abrem e as bolhas de ar entram, resultando em uma redistribuição da umidade no sistema de poros. Durante a continuidade da secagem, tanto os poros maiores da camada inferior como os poros superficiais mais finos, também são esvaziados até que ocorra o rompimento do fluxo capilar (que leva a água das camadas mais internas até a superfície de evaporação) pelas bolhas de ar.

De forma complementar, Li e Zhang (2011) realizaram novos ensaios de campo em duas argilas siltosas, de média e baixa expansividade, para avaliar o processo de formação e desenvolvimento de fissuras por ressecamento. Com base nos ensaios de campo, nos ensaios de sucção e nas propriedades de retração do solo obtidas em laboratório, foram quantificados os parâmetros geométricos das fissuras em função do teor de umidade e do tempo de ressecamento.

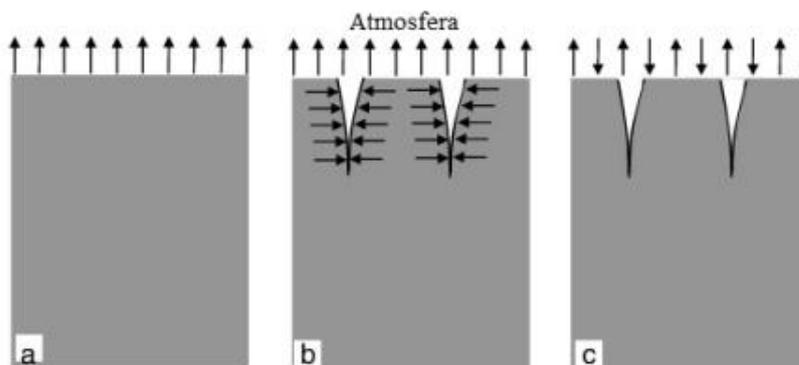
Como resultado, foi verificado que as fissuras se desenvolvem em três estágios, conforme representado na Figura 4. No estágio inicial as poucas fissuras aparecem de forma aleatória, com sua localização governada pela heterogeneidade das propriedades dos solos de forma que surgem lentamente a partir da evaporação da água ocorrendo unidirecionalmente no sentido vertical e com uma pequena taxa de evaporação (Figura 4a). Posteriormente ao aparecimento das primeiras fissuras, através das paredes das fissuras a água passa a evaporar também no sentido horizontal (Figura 4b).

Nesta etapa, devido à ocorrência da evaporação em duas direções, conseqüentemente o processo de ressecamento será acelerado e inicia o estágio primário do desenvolvimento das fissuras (fissuras primárias) sendo as primeiras fissuras formadas neste estágio. Ainda nesta situação, ocorre a formação de uma rede de polígonos provenientes dessas fissuras primárias. Novos ramos são formados ainda nessa etapa e surgem nas extremidades e nas descontinuidades das fissuras existentes com direção aproximadamente perpendicular.

Em função do gradiente de concentração do vapor de água, é no último estágio do ressecamento que sobrevém troca de umidade entre o solo e a atmosfera circundante.

A condição de equilíbrio é alcançada quando o gradiente de concentração de vapor de água zera, de forma que é encerrada a troca de umidade, estando a umidade relativa do ar nivelada a do solo (Figura 4c). Nesta fase ocorre a redução da taxa de evaporação dos solos e o desenvolvimento das fissuras até estabilizar-se (COSTA, 2015, LI E ZHANG, 2011).

Figura 4 - Estágios de desenvolvimento das fissuras, segundo Li e Zhang (2011). (a) Estágio inicial; (b) Estágio primário; (c) Estágio estacionário.



Fonte 4: COSTA, 2015

Em seu trabalho Tang et al. (2011 a) compararam a formação das fissuras com os estágios de evaporação e concluíram que as fissuras aparecem durante o período em que a velocidade de evaporação é constante e durante o período com velocidade de evaporação decrescente. É na fase de evaporação constante que 90% das fissuras ocorreram, quando as amostras ainda estavam completamente saturadas.

Conforme Li e Zhang (2011) a relação entre o volume de vazios e o teor de umidade foi avaliada e foi constatado que inicialmente a mudança do índice de vazios é relativamente pequena, quando o grau de saturação do solo está alto. Com o decréscimo da umidade, o índice de vazios decresce mais rapidamente. A alteração do índice de vazios volta a ficar lenta, até estabilizar-se para um determinado teor umidade (COSTA, 2015, LI E ZHANG, 2011).

O processo de ressecamento também é descrito em duas etapas, onde após exposição ao ar, a água é retirada da amostra úmida sem a entrada de ar, sendo esta a etapa primária do processo. É nesta etapa primária onde ocorre a maior variação de volume e perda de água, mas a uma taxa decrescente. Nesta fase, com a conservação de massa e sistema fechado, a variação de volume do material é igual à perda de água. Na fase secundária do processo de ressecamento é onde ocorre um ajuste entre os grãos e uma reaproximação dos grãos até ao ponto de haver contato, devido à exclusão da água que inicialmente os envolvia (SILVA, 2017; ALBRECHT E BENSON, 2001).

## 2.5 PROCESSOS DE FISSURAS

### 2.5.1 O Padrão hierárquico da fissuração

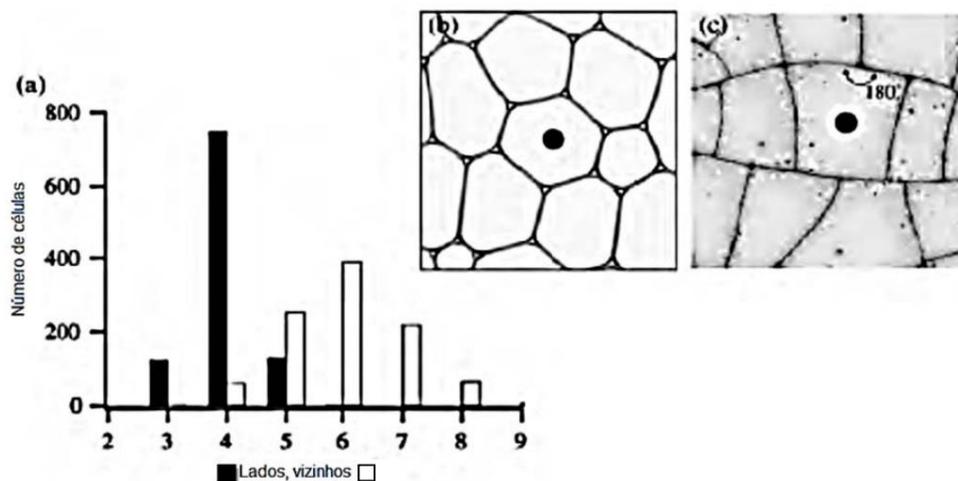
Há uma variedade de padrões de fissuração na natureza. Em muitos casos, fissuras ou juntas formam uma rede fechada e, portanto, faz com que ocorra a divisão de uma superfície bidimensional em domínios diferentes. Diversos processos matemáticos, biológicos, físicos ou sociais dão origem à divisão espacial em padrões bidimensionais. Tais processos tem como exemplo o retículo formado pelas fissuras em camadas finas, a estrutura celular de tecidos vivos de duas dimensões e ventilação de folhas. Uma propriedade comum expressa pelo teorema de Euler, para estas redes diz que “no nível de cada domínio há, em média, seis vizinhos”. Para muitas redes celulares, sugere-se que o número médio de lados por célula é também seis (BOHN, 2004; BOHN et al., 2005a; CUADRADO, 2013).

Em relação ao espaço, há um subconjunto daquelas divisões, com a divisão da rede em duas dimensões, onde a geometria, em média, requer que os domínios sejam de quatro lados. A média de quatro lados é o indicador da hierarquia, conforme o teorema de Euler. A sucessiva divisão dos domínios e a ausência de qualquer reorganização é o fruto de um processo de formação (BOHN et al., 2005b; BOHN et al., 2005c; CUADRADO, 2013).

Algumas formas/padrões mostram uma semelhança com a espuma de sabão em duas dimensões que muitas vezes tem sido considerada como o sistema de modelo para os padrões da divisão dos espaços. A estrutura geométrica da espuma de sabão é dada pelo fenômeno de reorganização, onde os padrões formados pelas bolhas de sabão são relativamente dinâmicos e instantâneos. Em condições bidimensionais, as linhas relacionadas com as películas que se formam na espuma são arcos de círculos e as interseções dos ângulos que formam são de  $120^\circ$  (leis de Plateau). Estes ângulos são o resultado de um equilíbrio de força quase instantânea sobre os contatos de borda (BOHN, 2004; CUADRADO, 2013).

A característica mais marcante de um padrão hierárquico de uma fissura em comparação com um padrão de espuma de sabão está representada na Figura 5. Pelo histograma representado, é possível verificar que a maioria das células danificadas têm quatro lados, mas a maioria destes polígonos têm seis vizinhos (típica de padrões hierárquicos). Mostra-se também uma comparação pictórica entre as células da espuma hexagonal com seis vizinhos e um padrão hierárquico típico de fissuração.

Figura 5 - a) Histograma do número de lados (preto) e o número de vizinhos (branco) de domínios em um padrão de fissuração cerâmico; b) Célula de seis lados em espuma; c) Célula de quatro lados em um padrão de fissuração.



Fonte 5: LAKSHMIKANTHA (2009).

## 2.5.2 Hierarquia específica da fissuração do solo

Padrões hierárquicos são um fenômeno natural na secagem dos solos onde são formados e evoluem por alterações na resistência do material devido à sua heterogeneidade ou por serem submetidos a ciclos de aumento e diminuição de tensão causada por alterações ambientais sazonais (RESTREPO, 2015; CUADRADO, 2013).

Os padrões de fissuras formados na secagem do solo não são dinâmicos, já que é impossível a reordenação do domínio e normalmente o tamanho dos domínios permanece fixo no tempo. Esses, alcançam o equilíbrio relativamente devagar dependendo da velocidade de secagem, o que difere dos domínios formados em bolhas de sabão que alcançam o equilíbrio em um período de tempo muito curto e está em constante redistribuição para manter o equilíbrio (RESTREPO, 2015; CUADRADO, 2013).

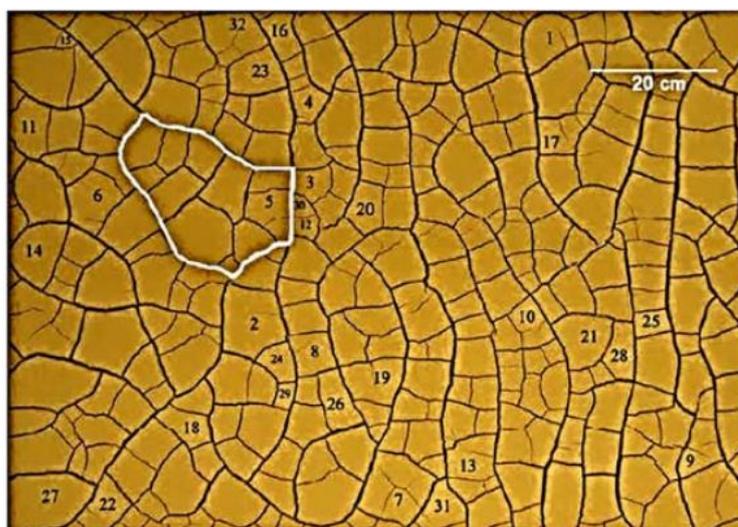
O processo de dividir domínios normalmente segue um padrão que sugere a existência de uma hierarquia que pode ser explicada por três importantes processos, sendo o primeiro a geração de tensões acima da resistência do material; o segundo a orientação da geração de tensão e terceiro a redistribuição de tensões nas proximidades ou no interior do novo domínio formado. Todos estes processos

podem ocorrer simultaneamente em diferentes domínios gerados (CUADRADO, 2013).

A principal causa da geração de tensões no interior do solo é sua natureza granular. Os sistemas de dois ou três fases que constituem o solo, o torna um sistema complexo, no qual os pontos de fraqueza para possíveis pontos de fratura são distribuídos aleatoriamente em uma massa de solo e, por sua vez, a resistência nestes pontos varia de acordo com a evolução das fissuras ao longo do tempo. A direção destas tensões, geradas quando o solo seca e contrai em pontos aleatórios de fraqueza, rege a direção do crescimento da fissura (RESTREPO, 2015; CUADRADO, 2013).

Não há estudos para mostrar o padrão de fissuração de argilas anteriores aos de Lakshmikantha (2009), no qual foram usadas amostras dos testes usados no equipamento da Escola Técnica Superior de Engenheiros de Estradas, Canais e Portos de Barcelona da Universidade Politécnica de Barcelona, Espanha (DETCG da UPC.). Na Figura 6 está representado um exemplo do sistema de fissuras estudado.

Figura 6 - Fissuração final de uma amostra.



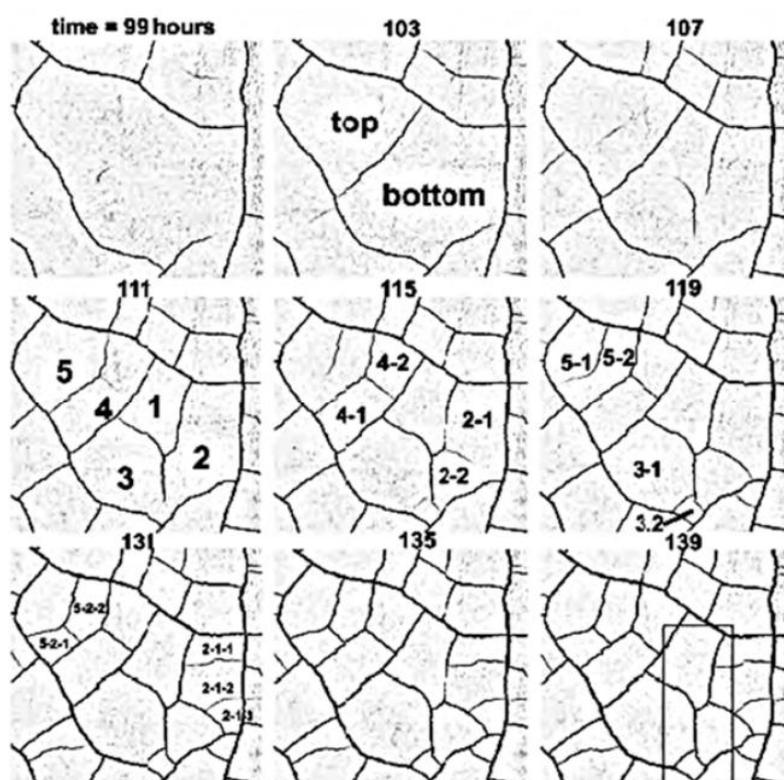
Fonte 6: LAKSHMIKANTHA (2009)

Com o objetivo de retratar os processos de divisão que sucediam em suas amostras, Lakshmikantha (2009) realizou um acompanhamento temporário de algumas das células resultantes da divisão fissurada. Desta forma, baseado em

seus ensaios, apresentou que o padrão de fissuras observado difere em tamanho, espessura e em diferentes moldagens.

A partir de uma pequena porção da amostra apresentada na Figura 6, é possível verificar um exemplo da descrição do padrão de fissura analisado por Lakshmikantha (2009), conforme Figura 7.

Figura 7 - Evolução temporal da área delimitada na Figura 6



Fonte 7: : LAKSHMIKANTHA (2009).

### 2.5.3 Ângulo de interseção das fissuras

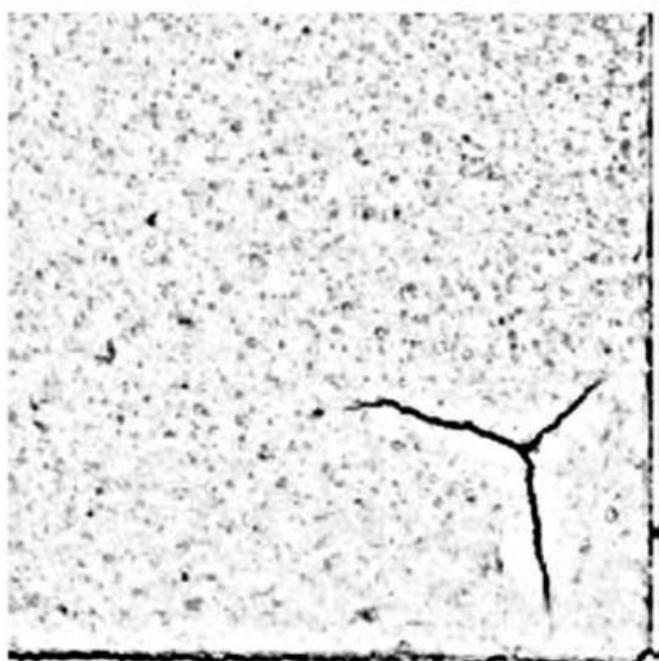
O ângulo de interseção das fissuras dá subsídio para compreender o padrão de fissuração no conjunto, pois fornece informações sobre a direção das tensões principais durante a formação e propagação da fissura individual (RESTREPO, 2015; LAKSHMIKANTHA, 2009; CUADRADO, 2013).

### 2.5.4 Formação de juntas durante a fissuração

Durante fissuração por ressecamento três tipos de juntas podem se formar, sendo o primeiro tipo, formado quando a propagação de uma fissura intercepta uma

fenda existente, o segundo formado quando uma fissura é iniciada ou bifurca de uma fissura existente e o terceiro tipo, ocorre quando a partir do ponto inicial de fissuração, começam a ocorrer duas ou mais fissuras ao mesmo tempo. No primeiro e segundo caso, o ângulo de interseção é aproximadamente  $90^\circ$ , desde que o relaxamento de tensões seja produzido na direção perpendicular à direção das fissuras e a tensão paralela à direção da fissuração só pode contribuir para a formação de uma fissura na direção perpendicular à fissura existente. No terceiro caso, não seria mais um ângulo de  $90^\circ$  (Figura 8), alguns estudos mostram a predominância de ângulos de  $120^\circ$  (RESTREPO, 2015; CUADRADO, 2013; LAKSHMIKANTHA, 2009; TOGA e ALACA, 2006).

Figura 8 - Três fissuras formadas de um mesmo ponto de partida.



Fonte 8: LAKSHMIKANTHA (2009)

### **2.5.5 Fissuras por contração: ressecamento sinérese**

Formadas a partir da perda de água presente na lama, as fissuras por contração apresentam, pelo menos, três tipos de características: subaérea, subaquosa e sub-estratigraficassão (RESTREPO, 2015; CUADRADO, 2013; LAKSHMIKANTHA, 2009).

Subaéria são fissuras formadas ao se evaporar a água do material, são muito comuns em poças de lama seca (fissuras de ressecamento), resultam em fissuras com padrão poligonal e apresentam tipicamente forma de V na sua secção transversal de até 15 m de profundidade. Além disso, podem formar ondulações na lama acima ou abaixo das fissuras, podendo aparecer ou desaparecer se a superfície fosse inundada.

Sub-aquosas são fissuras na lama formadas embaixo da água. As fissuras por sinérese, que é um termo usado pelos químicos para descrever a separação do líquido de um gel, são formadas no fundo de alguns lagos, lagoas de sedimentação e mesmo na lama de cal em águas marinhas rasas nas Bahamas. Ocorrendo notadamente em lagos salinos, a perda de água é transportada por osmose. Essas fissuras são extremamente difíceis de distinguir das fissuras por ressecamento, a menos que sejam observadas ondas de lama.

Sub-estratificação são as fissuras que se formam nas lamas quando estão enterradas, são geradas quando uma lama perde a água em estado enterrado. A água pode ser pressionada a partir da camada de lama lentamente devido à compactação que recebe da parte superior, ou é lançada rapidamente, como resultado de um terremoto. Elas podem penetrar para cima, descer ou ocorrer as duas situações ao mesmo tempo. Há uma tendência dessas fissuras resultantes, formarem um modelo poligonal com uma forma de lente ou de lados retos na sua secção transversal.

Distinguir in situ as fissuras formadas por dessecação não é simples e sua formação poderá ocorrer em uma variedade de ambientes. Já é conhecido que em épocas de inundação certas fissuras podem se formar, desta forma não é correto afirmar que, por padrão, devido aos períodos de secas as fissuras que se formam na antiga lama ou nas camadas de lodo são devidas aos períodos de secas (RESTREPO, 2015; CUADRADO, 2013; LAKSHMIKANTHA, 2009).

### **2.5.6 Morfologia de polígonos rachados**

Diferentes dos padrões de quebra outros tipos de fissuras foram observadas nas amostras analisadas por Lakshmikantha (2009). A Figura 9 representa alguns detalhes de uma porção extraída de um volume de solo testado. A Figura 9a é a parte superior da superfície da amostra que foi exposta ao ar durante o teste por

secagem. Nenhuma quebra foi verificada na parte superior, além disso, houve forte aderência entre a porção do solo e o fundo do recipiente no momento da remoção e foram verificadas fissuras mais ou menos circulares que acompanharam o contorno dos relevos do molde. As fissuras desta porção foram definidas como primárias e secundárias.

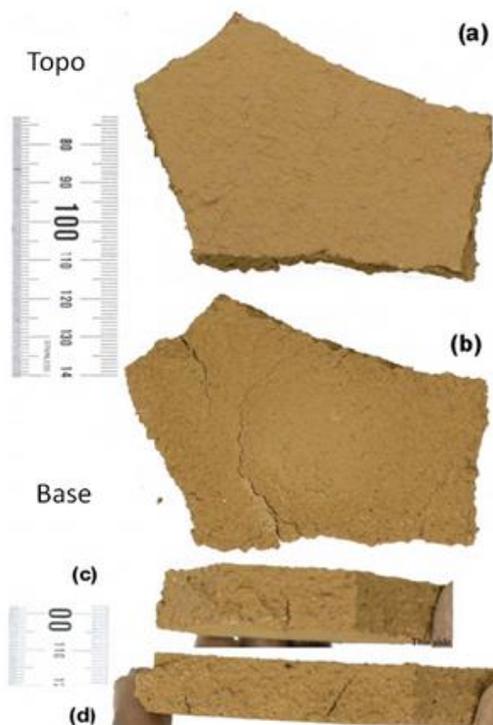
Contudo, conforme a Figura 9b, as duas fissuras presentes não têm continuidade, sendo adverso aos relevos marcados pelas fendas do molde e há indícios de terem surgido em etapas diferentes. Além disso, há a presença de numerosas fissuras de tamanhos menores ao longo dos limites da porção.

No entanto, as duas fissuras principais observadas na Figura 9b, ao contrário dos relevos marcados pelas fendas do molde, não têm continuidade e até parecem ter se formado em diferentes estágios. Além disso, numerosas fissuras de tamanho menor podem ser observadas ao longo dos limites da porção.

Conforme verificado nas Figura 9c e Figura 9d as duas fissuras laterais não são perpendiculares à horizontal, apesar de iniciarem progredindo verticalmente, porém, num determinado momento, sofrem um desvio e não atingem a superfície. Ambas não progridem em sua totalidade na direção vertical, constatando que as fissuras podem começar tanto na superfície quanto no fundo das amostras (CUADRADO, 2013).

Uma fissura encontrada no fundo de uma das amostras e que é repetida frequentemente no conjunto de amostras testadas, representada na Figura 10, mostra que o padrão de fissuramento formado não corresponde aos padrões descritos nas seções anteriores, mas que os ângulos de interseção das rachaduras secundárias com a fenda primária não estão a  $90^{\circ}$ , mesmo que sejam apenas juntas formadas por duas rachaduras. Semelhante à imagem de um rio com seus afluentes, assim é este padrão de fissuramento. Na Figura 11 está representada uma fenda com uma forma de espiral clara e da mesma forma que as anteriores, foram observadas na parte inferior de inúmeras amostras, além das fissuras mais ou menos circulares observadas na Figura 9b (CUADRADO, 2013).

Figura 9 - Detalhes das fissuras em uma porção de uma amostra de solo ensaiada. a) Superfície superior de uma porção; b) Superfície inferior da amostra; c) superfícies laterais de uma porção.



Fonte 9: LAKSHMIKANTHA (2009)

Figura 10 - Detalhe com zoom das fissuras na parte inferior de uma amostra



Fonte 10: LAKSHMIKANTHA (2009)

Figura 11 - Fissuras com forma de espiral na parte inferior da amostra



Fonte 11: LAKSHMIKANTHA (2009)

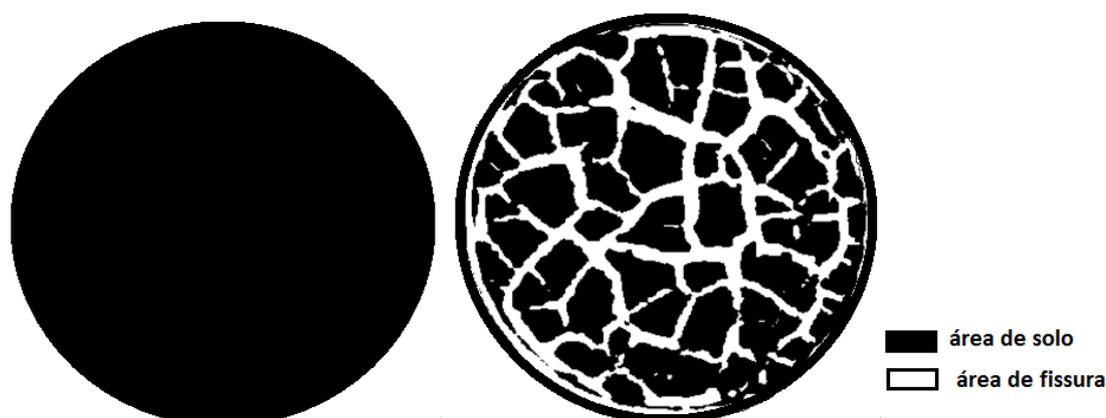
Desta forma é possível concluir que, assim como acontece com as fissuras por ressecamento, os padrões de fissuras observados por sinérese formam células mais ou menos poligonais. Tendo como implicações, as fissuras com formas circulares ou espirais não parecem coincidir com os padrões feitos pela sinérese, embora seja difícil estabelecer se essas fissuras são os resultados do efeito da sinérese ou efeito de encurvamento do solo por ressecamento (CUADRADO, 2013).

## 2.6 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E QUANTIFICAÇÃO DAS FISSURAS

CIF, ou *Crack Intensity Factor*, é um parâmetro importante quando se avalia a fissuração e representa a intensidade do estado de fissuração da amostra, associando a área que sofreu ruptura com a área original. Como parâmetro, o CIF, determina a relação entre a área de superfície das fendas e a área total inicial da superfície da amostra, podendo ser calculado em função do tempo e utilizado para descrever o processo de desenvolvimento das fissuras. Entretanto, carrega poucas informações sobre a geometria das fissuras, pois não representa valores de abertura, comprimento ou profundidade fissura (SILVA, 2017; COSTA, 2015; MILLER et al., 1998).

Novas pesquisas têm utilizado métodos diretos baseados em análises de imagens para determinar os parâmetros geométricos das fissuras. Através de imagens tratada com utilização de programas é possível obter o CIF, aonde a superfície total é dividida em “fissurada” e “não fissurada”. Desta forma, o parâmetro é obtido através da relação entre a área fissurada e a área total da amostra, conforme Figura 12.

Figura 12 – Imagem do CIF de 37%



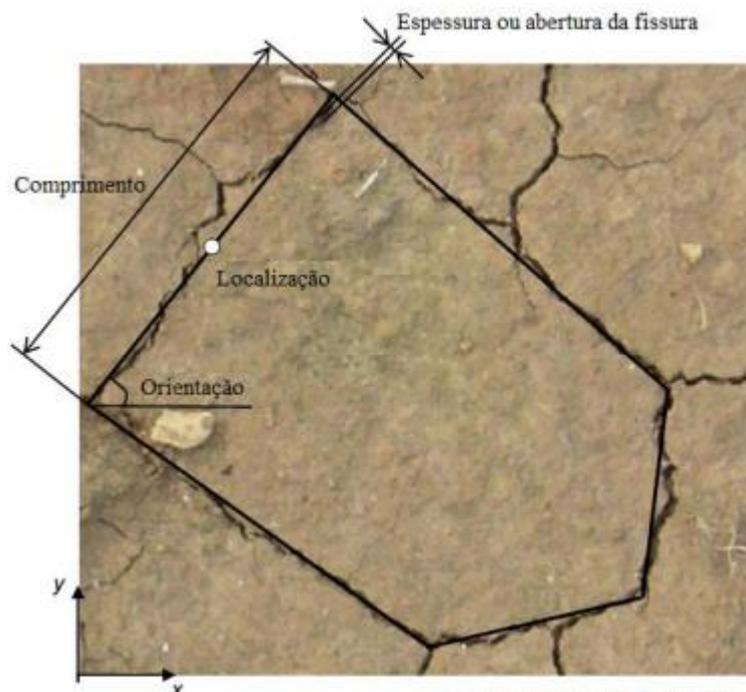
Fonte 12: A autora

O comportamento mecânico e hidrológico dos solos fissurados são diretamente influenciados pela geometria e a rede de fissuras formadas durante o ressecamento, de forma que faz-se necessário a caracterização adequada dessas. O fato da não interferência no processo do ressecamento do solo e permitir a obtenção de várias informações, as imagens digitais se sobressaem na mensuração das fissuras. De forma geral, as pesquisas demonstram que o padrão de fissuração ao final do ressecamento apresenta uma rede de fissuras composta por três tipos de polígonos: triângulo, quadrado e pentágono.

Os segmentos são quase perpendiculares entre si com interseção entre as fissuras nas formas de “T” ou de “+” (COSTA, 2015; TANG et al., 2011a).

O padrão de fissuração ao final do ressecamento também podem ser avaliado com auxílio das ferramentas disponíveis de softwares de desenhos técnicos. Como exemplo está representado na Figura 13 a reprodução geométrica da fissura, a partir da determinação de seu comprimento, orientação, localização e abertura (COSTA, 2015; LI E ZHANG, 2011).

Figura 13 - Representação geométrica de uma fissura.



Fonte 13: COSTA, 2015

Ao final de cada ciclo de umedecimento e secagem, além do CIF, outros parâmetros geométricos como número de interseções por unidade de área ( $N_{int}$ ), número de segmentos por unidade de área ( $N_{seg}$ ), comprimento médio ( $L_{av}$ ), espessura média ( $W_{av}$ ) e área média dos torrões formado entre as fissuras ( $A_{av}$ ) são determinados. Com relação à variação desses parâmetros durante o ressecamento destacam que, na propagação das fissuras, o surgimento de novas interseções estabiliza primeiro, seguido pela estabilização referente ao aumento no comprimento, demorando mais a estabilizar o parâmetro referente à abertura das fissuras (COSTA, 2017; TANG et al., 2011b).

## 2.7 SOLOS NÃO SATURADOS

A condição não saturada é muito significativa nos solos localizados em regiões tropicais, com climas áridos e semiáridos, devido à diferença conceitual, teórica e experimental em relação ao enfoque da Mecânica dos Solos clássica, que foram criados para ambiente saturado ou seco. Nesta condição não saturada, a conduta dos fluidos nos vazios entre as partículas sólidas modificam os comportamentos

mecânico, volumétrico e hidráulico do solo. As propriedades e os comportamentos desses solos são influenciados por aspectos físicos, químicos e mineralógicos associados à estrutura, que é constituída por agregados que contêm grupamentos estruturais macro e microporos resultantes de sua gênese. (Camapum de Carvalho et al., 2015)

Estando parcialmente saturados ou parcialmente secos, os solos não saturados são aqueles em que seus poros não estão completamente preenchidos por água. O comportamento desses solos é influenciado pela existência de duas fases fluidas (líquida e gasosa), onde ocorre interferência no mecanismo de transmissão das forças no contato entre as partículas da fase sólida (Teixeira, 2016).

As mudanças na Mecânica dos Solos começaram a ser abordadas desde as fases que constituíam os solos. Estas fases passaram a ser estudadas interativamente e não isoladamente, como analisadas em solos com apenas duas fases (saturados e secos). Constituídos por apenas duas fases (sólida e líquida), nos solos saturados o princípio das tensões efetivas é válido de forma geral.

Os solos não saturados são compostos por três fases e seu comportamento será definido a partir da quantidade relativa destas fases. Sendo sistema trifásico formado por uma fase sólida, onde é caracterizada pela presença de grãos, partículas sólidas e água adsorvida; uma fase líquida, caracterizada pela presença de água livre; e uma fase gasosa, caracterizada pela presença de ar (TEIXEIRA, 2016; CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015).

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), ainda existe uma quarta fase, denominada membrana ou película contráctil. Esta membrana teria espessura da ordem de algumas camadas de molécula e estaria disposta entre as fases líquida e gasosa dentro da massa de solo (Figura 14).

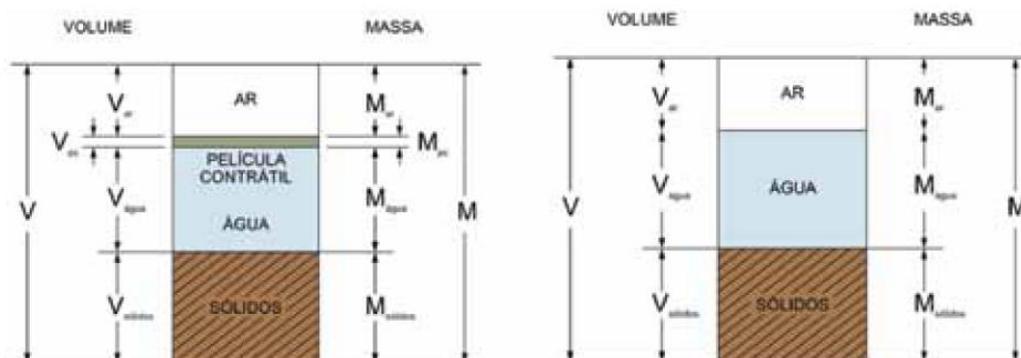
Figura 14 - Elemento de solo não saturado com fase ar contínua (modificado de Fredlund e Rahardjo, 1993)



Fonte 14 : Camapum de Carvalho et al., 2015

Dessa forma, o solo é visto como uma mistura de duas fases sendo a primeira fase de partículas sólidas e membrana contrátil e a segunda fase de água e ar, que fluem e que chegam ao equilíbrio sob ação dos gradientes de tensões aplicadas. Como parcela da membrana contrátil é desprezível levando em consideração a relação peso-volume e que sua espessura é da ordem de algumas camadas de moléculas, no campo qualificado como solo não saturado, o solo é considerado como um sistema trifásico (Figura 15), no âmbito das relações peso-volume, quando a parcela da membrana contrátil é comparada com as parcelas correspondentes às demais fases, de forma que o peso da membrana é compreendido como parte do peso da água e não considerando seu volume, por isso, a maioria dos autores desconsidera esta fase (TEIXEIRA, 2016; CAMAPUM DE CARVALHO et al., 2015).

Figura 15 Modelo rigoroso e simplificado das fases de um solo não saturado, conforme proposição de Fredlund e Rahardjo (1993)



Fonte 15 Camapum de Carvalho et al., 2015)

Solos colapsíveis são solos não saturados que apresentam uma considerável e rápida compressão quando submetidos a um aumento de umidade sem que varie a tensão total. De forma antagônica os chamados solos expansivos, são solos não saturados que, quando submetidos à saturação, apresentam expansão. Um mesmo solo pode apresentar colapso ou expansão quando inundado a depender do nível de carga ao qual está submetido (AMORIM, 2004).

### **2.7.1 Solos Expansivos**

Solo potencialmente expansivo é aquele que apresenta aumento ou redução de volume quando sofre variação na umidade ou na sucção, ou por ser constituído na fração argila, especialmente na dispersão coloidal, por minerais expansivos, segundo GUSMÃO, et al. (2005).

Dois requisitos básicos para um solo exibir expansividade foram definidos conforme Ferreira (1995). O primeiro, fatores intrínsecos, estão relacionados com a instabilidade volumétrica devido à influência de mecanismos em nível microescalar, tais quais composição mineralógica, textura e estrutura. O segundo, fatores extrínsecos, relacionado à fenômenos externas capazes de transferir a umidade de um ponto a outro do solo, como climatologia, hidrogeologia, vegetação e ocupação antrópica.

### **2.7.2 Características gerais e propriedade dos solos expansivos**

Camapum de Carvalho, J. (2012) apresenta algumas características dos solos potencialmente expansivos onde são solos geralmente não saturados; são solos argilosos ou argilo-siltosos; nos solos mineralogicamente expansivos, há a presença de argilo-minerais expansivos; podem ser solos derivados de certas rochas ígneas, como basaltos, diabásios e gabros, e de certas rochas sedimentares, como folhelhos e calcários; apresentam expansão em presença de água, o que pode gerar a obstrução de canais de fluxo, dificultando a passagem de água; quando o fenômeno está ligado a variações de umidade, são regidos pela sazonalidade,

expandido sob aumento de umidade (redução da sucção) e contraindo com a elevação da sucção.

O mesmo autor afirma que devido aos níveis de tensões mais baixos nas camadas mais rasas do solo, é verificado uma maior intensidade do fenômeno da expansibilidade. Por outro lado estes solos podem se encontrar recobertos por camadas de solo não expansivo, devido ao processo de intemperismo.

Algumas características dos solos expansivos na Espanha que podem ser de grande auxílio na sua identificação, sendo aqui mostradas as características comuns a estes solos no Brasil: a) Cores primárias do solo (cinzentas, esverdeadas ou azuladas); b) Fendas poligonais amplas, profundas e por vezes de bordas irregulares, na superfície do terreno, durante a estação de seca; c) Fácil modelagem do solo quando umedecidos, manchando os dedos; d) Lama pegajosa que adere fortemente ao calçado e a maquinaria; e) Os torrões de solo e deformações produzidas no terreno molhado (pegadas de calçados, rodas de veículo etc.) são muito persistentes quando secos; f) Quando seco o solo é resistente, sendo difícil rompê-lo com instrumentos manuais; g) Cortes efetuados no solo úmido adquirem, ao secar, o aspecto das superfícies de ruptura produzidas em estado seco; h) Os taludes se apresentam bem desagregados com aberturas de junções prismáticas na superfície, com queda de pequenos blocos e torrões de argila ao pé do talude; i) Os Vertissolos podem apresentar um microrelevo característico devido aos movimentos verticais do solo ocasionado pelos ciclos de umedecimento e secagem das argilas (AYALA et al,1986; AMORIM, 2004).

### **2.7.3 Mecanismos de expansão**

GUSMÃO, et al. (2005), afirma que o mecanismo de expansão em argilas é complexo e resulta da mudança no sistema solo-água no qual ocasiona o desequilíbrio das tensões internas. Dessa forma, ocorrendo mudanças na propriedade da água do solo, seja devido à variação da quantidade ou da composição química, resultará numa mudança da força entre partículas.

Com a alteração do estado de tensões, caso a resultante das forças internas não seja balanceada, tem-se como consequência uma reorganização das partículas

até que seja alcançado um novo ponto de equilíbrio. Tal resultado será a manifestação do aumento ou redução do volume.

O acréscimo do volume dos solos expansivos é ocasionado de forma mais efetiva pela adsorção de água pela superfície externa do mineral argila produzida por vários mecanismos que podem atuar em conjunto. Entre eles, destacam-se, conforme Mitchell (1993):

**Hidratação das partículas de argilas** – A carga elétrica negativa da superfície da partícula de argila origina forças atrativas que atraem cátions e moléculas polares (como a água) e atuam com força de fixação da água da camada dupla.

O volume da água da camada dupla aumenta, até que ocorra uma variação de volume suficiente na massa de solo, pois a força de absorção de água pela partícula diminui com a distância à superfície desta.

A atração e fixação de moléculas ocorrem através da ligação de hidrogênio das moléculas de água à superfície do mineral e da atração dipolo-dipolo das moléculas de água.

**Hidratação de cátions** - A superfície negativa da partícula de argila atrai cátions que anulam sua carga negativa. Entretanto, alguns cátions após neutralizar a carga negativa da partícula, permanecem com uma certa quantidade de carga não neutralizada. Desta maneira, atrai moléculas de água através dos polos negativos destas, que por meio dos seus polos positivos atraem outras moléculas.

Na hidratação de cátions ocorrem estas forças de atração sobre as moléculas de água e um aumento do raio iônico dos cátions, que promovem um aumento de volume da massa de solo.

**Repulsão osmótica** – A repulsão osmótica é resultante dos gradientes de pressão desenvolvida nas camadas duplas por variação na concentração iônicas nestas camadas, pois a atração de íons e moléculas de água é mais forte próximo à superfície da partícula, diminuindo com o aumento da distância a esta.

Quando o sistema argila-água-cátion é posto em contato com água de menor concentração iônica a camada dupla atua como uma membrana semi-impermeável.

A água, então, tende a passar esta membrana para igualar, por osmose, as concentrações dos dois lados da membrana. O que resulta no aumento da espessura da camada dupla e, conseqüentemente do volume da massa de solo.

#### **2.7.4 Fatores condicionantes**

Os fatores que influenciam no potencial de expansão e contração de um solo, conforme Nelson e Miller (1992), são: propriedades dos solos, como a mineralogia da argila, química da água do solo, sucção do solo, plasticidade, estrutura e textura do solo, e densidade seca; fatores ambientais como, condição de umidade inicial, variações de umidade provenientes do clima, água do subsolo, drenagem e fontes de águas superficiais, vegetação, permeabilidade e temperatura; e estado de tensões, como história de tensão; condições in-situ; carregamento, perfil do solo.

#### **2.7.5 Métodos de identificação dos solos expansivos**

Devido à importância da identificação dos solos expansivos, alguns critérios são levados em consideração para definir os métodos de identificação dos mesmos, como a classificação de amostras inalteradas baseadas no conteúdo coloidal, IP e limite de contração (HOLTZ E GIBBS, 1956; PEREIRA, 2004); como uma correlação entre a porcentagem de partículas que passam na peneira Nº200, limite de liquidez e a resistência à penetração standart (SPT) (CHEN 1965; PEREIRA, 2004); como uma classificação baseada na atividade e porcentagem da fração argila (SEED et al., 1962; PEREIRA, 2004). Entretanto, não há uma padronização na classificação de tais métodos devido às diversas condições as quais foram concebidas.

Os métodos de identificação dos solos expansivos podem ser divididos em indiretos e diretos, conforme a Figura 16. O primeiro está relacionado à identificação mineralógica, índices físicos, limites de consistência ou parâmetros ligados à textura, composição e comportamento dos solos. O segundo é baseado na medida de expansão induzida ao solo ou da tensão necessária para impedir tal expansão, através de ensaios edométricos.

Figura 16 - Métodos de identificação de solos expansivos

Métodos	Sub-divisão	Base para definição do critério	Referência Bibliográfica
INDIRETOS	Identificativos	Difração de raio-x Microscopia eletrônica de varredura Análise termo-diferencial Físico-químicos	Carcedo et all (1986)
	Qualitativos	Granulometria, índices físicos e classificação geotécnica	Skempton (1953); Van Der Merwe (1964); Chen (1965); Rodriguez Ortiz (1975)
	Orientativos	Geologia, geomorfologia, pedologia e identificação visual	Patrick e Snethen (1976); Carcedo et all (1986); Ferreira (1990 e 1993)
DIRETOS	Avaliativos	Ensaio de expansão de Lambe	Lambe (1960)
	Quantitativos	Ensaio de expansão livre e pressão de expansão Ensaios edométricos simples e duplos Ensaios edométricos com sucção controlada	Seed et all (1962); Chen (1965) Rodriguez Ortiz (1975); Cuellar (1978); Jimenez Salas (1980) Escario (1976 e 1969); Aitchison et all (1973); Johnson (1978)

Fonte 16: (SCHREINER, 1987; FERREIRA, 1995).

- **Métodos indiretos**

Os métodos indiretos estão relacionados às informações de caráter Identificativos, Orientativos e Qualitativos, obtidas por meio de ensaios de campo ou laboratório. Esses métodos não analisam o estado de tensão do solo, além disso, muitas correlações são realizadas para tipos de solos que não se aplicam a realidade de alguns países como o Brasil, e ainda não fornecem a medida do potencial de expansão, contribuindo apenas numa estimativa.

**Identificativos** – Este método está relacionado à visualização da estrutura do solo, de forma que é fundamental a identificação do mineral que constitui o solo. Para a determinação da constituição mineralógica dos materiais argilosos geralmente são realizados os ensaios de difração de raios-x, microscopia eletrônica de varredura, análise termo-diferencial e físico-químicos.

A realização de tais ensaios é de elevado custo, devido ao tempo necessário de preparação das amostras, bem como ao requinte dos equipamentos utilizados nos ensaios.

Difração de raios-X – é uma análise essencial para a identificação dos argilominerais. Esse ensaio consiste na utilização de um aparelho (difratômetro) onde há incidência de raios-X sobre uma amostra de rocha ou solo. Através desse processo são obtidos os registros gráficos (difratogramas) onde são apresentados os picos que representam as distâncias interplanares entre as bases formadas pelos planos cristalinos do mineral.

Microscopia eletrônica de varredura – Nos solos tropicais, não é possível pensar nas partículas de solo de maneira individual devido aos agrupamentos que apresentam, formando grãos agregados, que refletem no comportamento físico e mecânico do solo. Essa técnica é altamente valiosa pelo alcance que permite analisar, em relação a distância e profundidade focal, a microestrutura e detectar a presença de minerais específicos do solo, Camapum de Carvalho, J. et al (2015). Tal método permite observar amostras ampliadas em muitas vezes, desta maneira consegue identificar argilominerais que não foram observados na técnica de identificação difração de raios-X.

Análise termo-diferencial - Este método consiste na identificação dos argilominerais presentes na amostra, de forma que a análise é realizada através do aquecimento da amostra, a taxa constante, onde as medições de variação em função da temperatura, são verificadas por meio de uma balança. As informações são registradas num computador que resultam em curvas, onde a análise da posição, forma e a intensidade dos picos possibilita a identificação precisa dos argilominerais, Camapum de Carvalho, J. et al (2015).

Físico-químicos – Ensaio que determinam várias informações, dentre elas, o quantitativo de bases no solo, acidez ou alcalinidade (valor do pH) da água do solo ou simplesmente pH do solo, teor de sais, capacidade de troca catiônica e a presença de outros elementos como alumínio, hidrogênio, carbono e outros.

Através dos resultados obtidos nestes ensaios é possível correlacionar a composição química presente no solo com o grau de intemperização do mesmo e uma indicação dos possíveis argilominerais presentes na fração fina do solo.

**Qualitativo** – Utiliza-se de informações como porcentagem de argila, de silte, o limite de liquidez e o limite de plasticidade. Alguns autores formularam uma correlação entre os resultados destes ensaios com o grau de expansão.

Tabela 1 - Classificações do grau de expansão relacionada ao Limite de Liquidez (LL) e ao Índice de Plasticidade (IP).

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

Fonte 17: Camapum de Carvalho, J. et al (2015)

**Orientativo** – é um método de orientação com base na geologia, geomorfologia, pedologia e identificação visual que indicam sobre aspectos relativos à porosidade do solo, a mineralogia e o ambiente em que o solo foi formado. A análise integrada através desses dados contribui para uma indicação inicial sobre a susceptibilidade da amostra de solo apresentar expansividade.

- **Métodos diretos**

Conforme Barbosa (2013), os métodos diretos são baseados na medida da expansão induzida ao solo ou da tensão necessária para impedi esta expansão, realizando-se ensaios mecânicos do tipo edométrico onde procuramos simular, ao máximo, a condição de campo sendo por carregamento, por inundação ou percolante. Inundam-se os corpos de prova, quando as deformações decorrentes de certa pressão já se estabilizaram mede-se a expansão ocorrida. A expansão depende da pressão aplicada à amostra, sendo tanto menor quanto maior a pressão.

Existe uma pressão na qual não há expansão, pressão esta denominada de pressão de expansão. Para pressões maiores que esta, é comum ocorrer contração do solo. Para determinação da pressão de expansão, diversos corpos de prova são ensaiados, cada qual inundado com uma pressão diferente medindo-se a expansão correspondente. Obtém-se por interpolação a pressão para qual não há expansão.

Os métodos diretos estão relacionados às informações de caráter Avaliativas e Quantitativas.

**Quantitativos** – é simulado e quantificado a expansão e função do carregamento, do nível de tensão que está sendo aplicado. A simulação é feita nas duas condições mais comuns de campo: carregar e inundar, ou inundar e carregar. No laboratório pode-se fazer variação de umidade simulando diferentes tensões.

Ensaio de expansão livre - medem a variação de espessura da amostra fazendo-se uma relação entre a sua altura inicial e final, quando é colocada dentro de um recipiente com água. Para se determinar a expansão livre coloca-se a amostra de solo no edômetro e inunda-se com uma pequena tensão, permitindo a sua expansão livre.

A expansão livre é determinada em percentual após a sua estabilização. As metodologias aplicadas para este ensaio são com relação a sobrecarga aplicada nestas tensões mais utilizadas que são 1kPa, 7kPa e 10kPa, e a metodologia que utiliza a tensão de 50kPa em amostras deformadas (compactadas ou ressecadas ao ar) (CHEN, 1965; BARBOSA, 2013).

A porcentagem de expansão livre pode ser encontrada através da equação 1.

$$E1 \text{ (livre) (\%)} = DH/H \times 100 \quad (1)$$

Onde,

E1 = expansão livre, em porcentagem;

DH = altura da expansão devido à saturação;

H = altura do corpo de prova antes da inundação.

Ensaio edométricos duplos – Consiste em preparar dois corpos de prova retirados na mesma profundidade da mesma amostra para serem ensaiados. O primeiro com umidade natural e o outro inundado desde o início do ensaio. As duas amostras vão sendo carregadas progressivamente em dois edômetros distintos para obtenção de medidas de deformação axial. Com o término dos ensaios, as curvas  ndice de vazios vs logarítmo da tensão referentes aos dois ensaios são traçadas, sobrepostas e ajustadas.

Ensaio edométricos simples – neste ensaio, o corpo de prova (com umidade natural) é solicitado até uma tensão de interesse e posteriormente inundado.

No ensaio edométrico duplo, a amostra ensaiada no teor de umidade natural, se destina, exclusivamente, para a determinação do índice de vazios inicial ( $e_0$ ), sob a tensão vertical, na profundidade de retirada da amostra  $p_0$  (JENNINGS, 1973; PEREIRA 2004).

Neste caso, pode-se determinar o valor de  $e_0$  ( $p_0$ ), colocando no edômetro apenas uma amostra com teor de umidade natural até a tensão  $P_0$ , depois descarrega até a pressão inicial. Seria então adicionado água à amostra, que expandiria até a estabilização. As vantagens deste método estão na eliminação do erro de ajuste das curvas (teor natural e saturada), e na possibilidade de duplicar o número de amostras por local de estudo (HORTA DA SILVA, 1975; PEREIRA, 2004).

## 2.8 PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

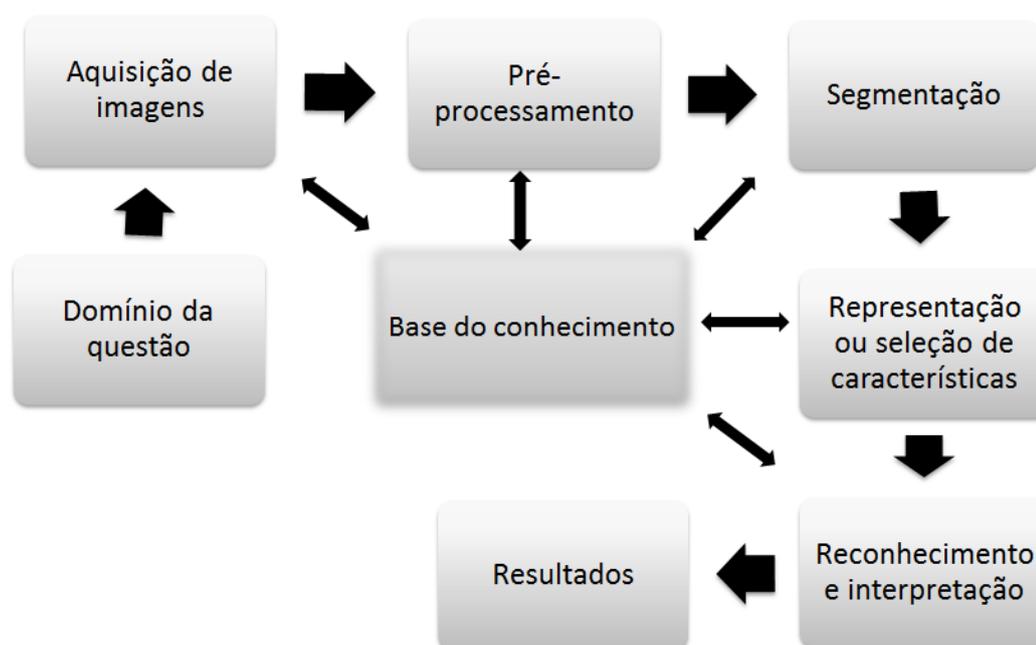
O processamento de imagens digitais é um método que tem por objetivo retirar informações específicas das imagens por meio de técnicas de processamento computacional, de forma que as técnicas aplicadas para aquisição dessas informações são particulares para cada análise. Tais técnicas estão em constante evolução devido ao desenvolvimento das tecnologias de computação digital, de hardware e de software que constantemente evoluem os algoritmos utilizados.

O método tem sido utilizado em estudos recentes para determinar parâmetros de difícil acesso sem interferir fisicamente nos experimentos. A aplicação do processamento digital tem envolvido várias áreas de conhecimento, tais quais, radiação nuclear ou técnicas de tomografia computadorizada, automação industrial, meteorologia por meio de imagens de satélite, imagens médicas por ultrassom etc. Basicamente o método transforma uma imagem original em outra, por meio do processamento da imagem, de forma que a imagem gerada como resultado permite que se evidenciem as informações desejadas para análise.

A Figura 17 representa os processos fundamentais da técnica de processamento de imagens de forma que o objetivo é chegar ao resultado a partir do domínio de determinada questão de interesse. Inicialmente por meio de

dispositivos físicos sensíveis a aspectos de energia eletromagnética, a captura de imagens é obtida e tem seu sinal elétrico convertido para um formato digital. É no pré-processamento que a imagem é destacada com a finalidade de ressaltar os atributos de interesse, bem como há a aplicação de filtros com o designo de recuperar na imagem partes que sofreram deterioração, borramento ou perda de contraste e diante da presença de ruídos, permite sua eliminação. A etapa de maior importância é a segmentação devido à extração ou identificação dos objetos de interesse contidos na imagem e aonde ocorre o isolamento de regiões pertencentes à imagem. O processo é finalizado após a classificação das características extraídas e avaliadas de forma que as informações de interesse sejam expostas (SOUZA E CORREIA, 2007; GONZALES e WOODS, 2007).

Figura 17 – Passos fundamentais para processamento de imagens



Fonte 18: Gonzales e Woods, 2007 – adaptado

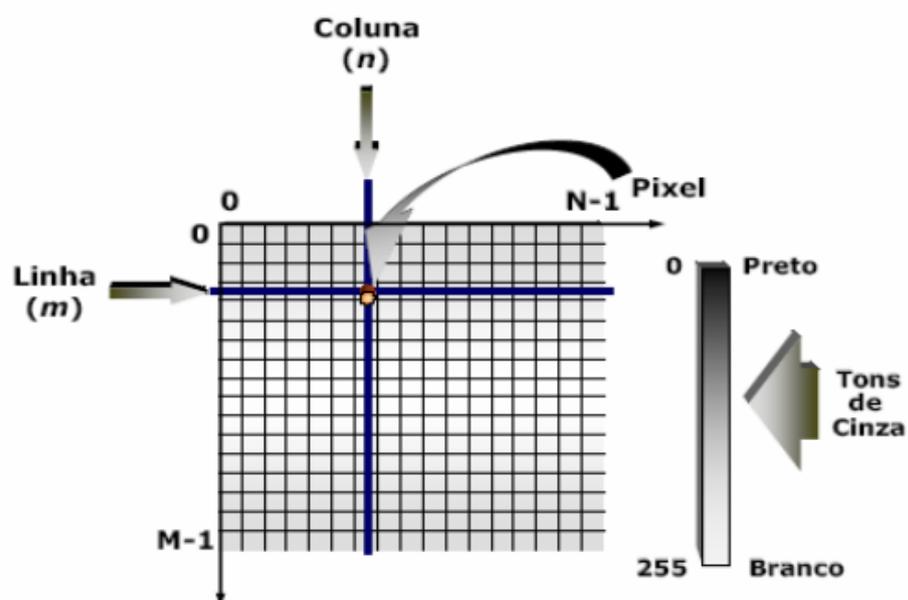
Desta forma, é possível verificar que a aplicação do processamento digital de imagens compreende várias áreas de fundamentos teóricos desde o início dos sistemas e metodologias para adquirir as imagens até os algoritmos encarregados de interpretar as informações e a tomada de decisões para procedimento futuros. A base de conhecimento é dependente da área da ciência a ser tratada, das informações de interesse que deverão ser localizadas na imagem e das várias características específicas requeridas na imagem (LOPERA, 2010).

### 2.8.1 IMAGEM DIGITAL

A imagem é definida como uma função de intensidade luminosa bidimensional denominada de  $f(x,y)$  onde seu valor ou amplitude, obtido para as coordenadas espaciais, proporciona a intensidade ou brilho da imagem neste ponto de coordenadas. É necessário que essa função bidimensional seja digitalizada tanto espacialmente quanto em intensidade para que seja possível seu processamento. A *amostragem de imagem* é a digitalização das coordenadas espaciais e *quantificação em níveis de cinza* é a digitalização da intensidade (LOPERA, 2010; GONZALES e WOODS, 2007).

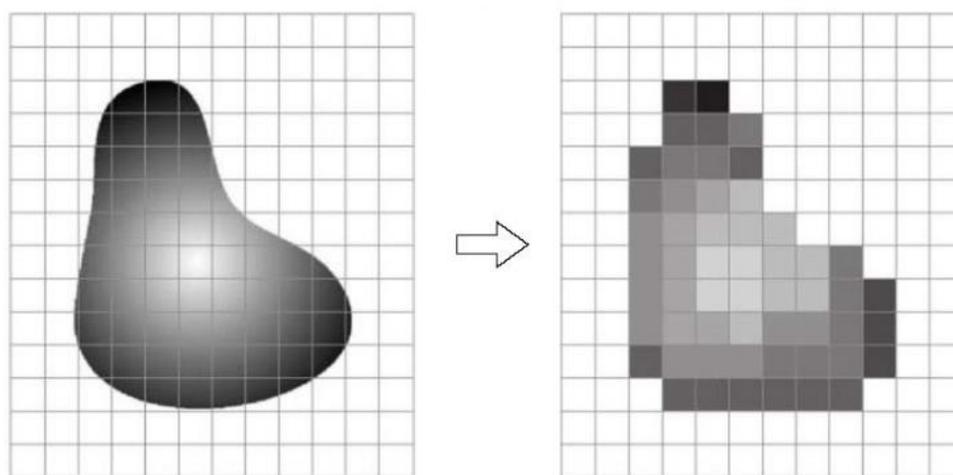
Na forma de uma matriz  $N$  por  $M$ , a imagem contínua é aproximada por amostras igualmente espaçadas e arranjadas, aonde cada elemento dessa matriz é uma quantidade discreta. *Elemento da imagem* ou *pixel* é a nomenclatura de cada elemento dessa matriz. A Figura 18 representa a amostra da imagem digital e a quantificação dos níveis de cinza, e estes são valores discretos igualmente espaçados entre “0” e “L”, aonde  $L$  é determinado pelo número de *bits* ( $m$ ) que representam a imagem da forma  $L = 2^m$  (LOPERA, 2010; GONZALES e WOODS, 2007).

Figura 18 – Representação de uma imagem digital



A resolução espacial de ( $N \times M$ ) e seu número de níveis de cinza ou *bits* é o grau de detalhes de uma imagem e que por meio do sensor ( a câmera) utilizado para captura-la, estão diretamente atrelados às características desse. A qualidade da imagem original aproximada pela matriz digitalizada será melhor, quanto maiores forem esses parâmetros e maior será o tempo de processamento e espaço de armazenamento requerido (LOPERA, 2010; GONZALES e WOODS, 2007). A Figura 19 representa a digitalização de uma imagem com uma baixa resolução espacial.

Figura 19 – Digitalização de uma imagem



Fonte 20: (LOPERA, 2010; GONZALES e WOODS, 2007)

## 2.8.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

Posteriormente a obtenção da imagem digital, segue-se para a etapa do pré-processamento de imagens que tem por finalidade principal a aplicação de técnicas para ressaltar os atributos de interesse, permitindo a sua visualização com mais detalhes, aonde são aplicados filtros com o designo de recuperar na imagem partes que sofreram deterioração, borramento ou perda de contraste e diante da presença de ruídos, permite sua eliminação, de modo que a imagem resultante seja mais apropriada para uma aplicação específica do que a imagem original.

Um dos métodos de pré-processamento é a transformação em escala de cinza que se dá por duas razões principais, sendo a primeira a redução da dimensão do vetor de matrizes que simplifica as operações sobre os dados e a

segunda, é a atribuição de um único valor para cada *pixel* da amostra da imagem analisada, que permite a transformação da imagem em uma matriz binária por meio de uma simples aplicação de um limiar. Desta forma, tendo a imagem transformada em uma matriz de uma única entrada, por meio de procedimentos lógicos, tal matriz poderá ser tornar binária, o que permite uma série de operações sobre a mesma e extraem informações relevantes para o uso dentro do programa (SILVA, 2017).

### **2.8.3 Segmentação**

Após o pré-processamento, a próxima etapa do processamento de imagens digitais é a segmentação, que, de forma geral, tem por finalidade dividir uma imagem de entrada em partes ou em objetos constituintes, de forma que permite realizar a distinção desses objetos em relação ao fundo da imagem e entre eles. A segmentação se baseia em três características sendo a primeira a similaridade, aonde cada um dos pixels tem valores parecidos para alguma propriedade, a segunda é a descontinuidade, que é a característica aonde os objetos destacam-se do entorno apresentando mudanças bruscas nos níveis de cinza e a terceira, é a conectividade, aonde os pixels que pertencem a um objeto tem que estar confinantes, ou seja, agrupados (LOPERA, 2010; ESCALERA, 2001).

### **2.8.4 Limiarização**

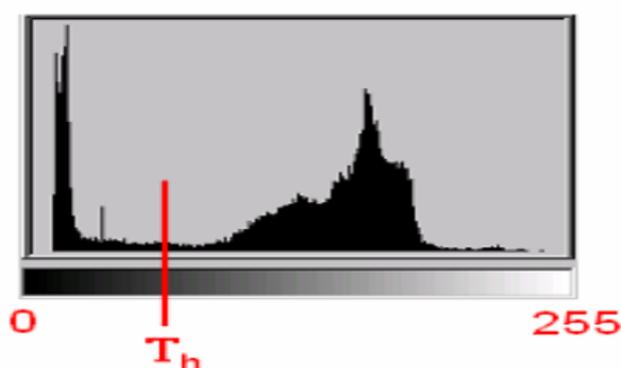
Baseado nas características de similaridade a limiarização ou binarização é o processo de segmentação de regiões homogêneas em tons de cinza. O princípio da limiarização consiste em separar as regiões de uma imagem quando esta apresenta duas classes, o fundo e o objeto. A forma mais simples de limiarização consiste em converter os pixels, cujo tom de cinza é maior ou igual a um determinado valor de limiar, em brancos e os demais em pretos (LOPERA, 2010; FILHO e NETO, 1999).

A segmentação de limiarização é de fundamental importância para a utilização da técnica de análise de imagens para caracterização estrutural de amostras em meios porosos (MOREIRA, 2011).

A importância da limiarização está no processo de caracterização, devido à definição das regiões da imagem em pretos e brancos, aonde as amostras binárias

representam a amostra na caracterização. O objetivo da aplicação deste método está em encontrar um limiar em um histograma de 256 níveis de cinza que identifica às fases em questão, ou seja, identifica os objetos na imagem a serem analisado e os separa das fases associadas no fundo da imagem. A Figura 20 apresenta um histograma de cinza hipotético (MOREIRA, 2011).

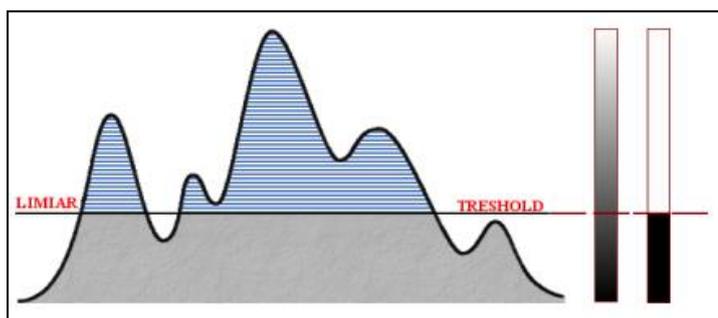
Figura 20 - Histograma de 8 bits (256 níveis de cinza) com escolha de um limiar (ou threshold “Th”).



Fonte 21: Moreira, 2011

É através de uma operação lógica que a transformação em escala de cinza é descrita por meio de uma matriz aonde os elementos da escala de cinza inferiores ao valor padrão tornam-se 0 (preto) e os valores superiores ao valor padrão tornam-se 1 (branco), conforme a representação de distribuição de valores de pixels em escala de cinza e um valor limite representada na Figura 21. *Threshold* é o valor padrão, sendo o limite cuja determinação se faz necessária para a transformação das imagens em uma matriz binária. Desta feita, estando definidas as fases de interesse nas imagens binárias, a caracterização dos parâmetros estruturais poderá ser realizada (SILVA, 2017).

Figura 21 - Representação de como um limite separa logicamente um sinal em duas categorias discretas



Fonte 22 – Silva, 2017

### 2.8.5 Método de Otsu

A limiarização é um processo importante na segmentação de imagens, porém, a determinação do limiar não é uma tarefa simples, aonde nem sempre é possível que a escolha manual seja aplicada a todas as imagens.

O método de Otsu é um processo que minimiza a variância entre classes dentro de um histograma para maximizar a variância entre classes dessa mesma distribuição. Cada classe possui suas próprias características relativas à média e desvio-padrão (SILVA, 2017; GAZZIRO, 2013). Este método oferece que a determinação do limiar não seja por meio de um operador humano por ser um método automático.

Conforme Silva (2017), o método de Otsu usa uma solução puramente matemática para extrair um valor de limiar que produza o máximo de diferença entre grupos de cinzas e ao mesmo tempo o mínimo dentro desses grupos.

### 2.8.6 Morfologia matemática

A morfologia matemática concentra seus esforços no estudo da estrutura geométrica das entidades presentes em uma imagem. A morfologia matemática pode ser aplicada em várias áreas de processamento e análise de imagens, com objetivos distintos como realce, filtragem, segmentação, detecção de bordas, esqueletização, afinamento, dentre outras (FILHO e NETO, 1999).

De forma geral, há dois tipos de morfologia matemática, a morfologia binária, aplicada sobre imagens binárias e a cinzenta, aplicada sobre imagens de níveis de cinza. Na morfologia binária, é procurada uma configuração de pontos pretos e

brancos na imediação de cada pixel da imagem original. Ao encontrar a configuração procurada é dado o rótulo de “verdadeiro” ao pixel correspondente da imagem resultante, caso contrário, receberá o rótulo de “falso”. Aplicando para morfologia cinzenta, a determinação do valor do pixel resultante é definido por meio de valores máximos e mínimos dos níveis de cinza da vizinhança. Neste trabalho foi utilizado morfologia matemática sobre imagens binárias (LOPERA, 2010).

### **2.8.7 Rotulação**

Baseado na característica da conectividade, a rotulação consiste em diferenciar os objetos já separados do fundo da imagem, de forma que todos os pixels pertencentes ao mesmo objeto terão a mesma identificação de rótulo.

A conexão existe entre dois pixels se são adjacentes e se há similaridade entre seus níveis de cinza. Após aplicada a rotulação sobre os objetos é possível determinar medidas de comprimento e área, tendo como unidade o pixel, sobre o objeto (LOPERA, 2010).

### **2.8.8 Representação, reconhecimento e interpretação**

*Representação* ou *descrição* ou *seleção de características* correspondente à etapa final do processamento de imagens (Figura 17) tem como objetivo extrair características descritivas para obter informações quantitativas de interesse ou básicas para discriminação entre classes de objetos. *Reconhecimento* é o processo de atribuição de um rótulo sobre um objeto, baseado na informação atribuída pelo seu descritor. A *interpretação* envolve a atribuição de significado a um conjunto de objetos reconhecidos (LOPERA, 2010; GOZALEZ e WOOD, 2007).

## **2.9 EQUIPAMENTOS ANTECEDENTES UTILIZADOS PARA ANÁLISES**

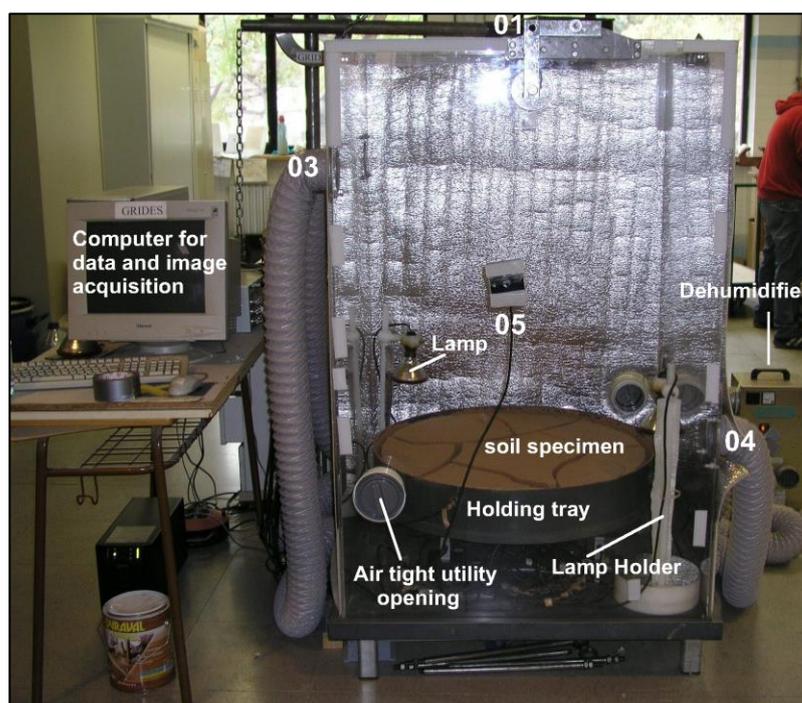
Neste item serão detalhados os modelos de alguns equipamentos que foram utilizados como parâmetros para projetar o equipamento desta pesquisa.

A Câmara Ambiental Kantha foi desenvolvida para realização de ensaio para investigação de fissuras no solo, em que propôs a criação de uma câmara

ambiental capaz de auxiliar na investigação através da imposição e controle das condições ambientais e, eventualmente, estudar o impacto do ciclo de condições ambientais. O equipamento foi capaz de monitorar as mudanças na amostra de solo, enquanto o processo de dessecação ocorria, bem como a tomada de imagens digitais da superfície de topo da amostra. Para isso foram verificadas a umidade relativa e temperatura nas amostras de solo com 800 mm e 200 mm de profundidade com sensores de medição de sucção.

Dessa forma as experiências foram realizadas para determinar o efeito das dimensões e da rugosidade da superfície inferior do recipiente que recebeu a amostra, e sobre o mecanismo de formação de fissuras. A Figura 22 mostra uma imagem da Câmara Ambiental Kantha.

Figura 22 – Imagem da Câmara Ambiental Kantha



Fonte 23: LAKSHMIKANTA (2009)

O corpo da câmara é composto por metacrilato transparente com as dimensões de 1,0m x 1,0 m x 1,5 m. Este é colocado sobre uma placa de base de PVC muito mais espessa. Um tubo de borracha especialmente concebido foi usado como garantia de estanqueidade. O corpo da câmara possui quatro aberturas circulares de cerca de 100 mm de diâmetro, sendo dois para a entrada de ar e dois para a saída do ar úmido, de forma que todas as entradas e saídas estão ligados ao

desumificador num circuito fechado. Além destas, há mais duas aberturas de utilidade herméticas, que são usadas para pequenos ajustes durante o experimento.

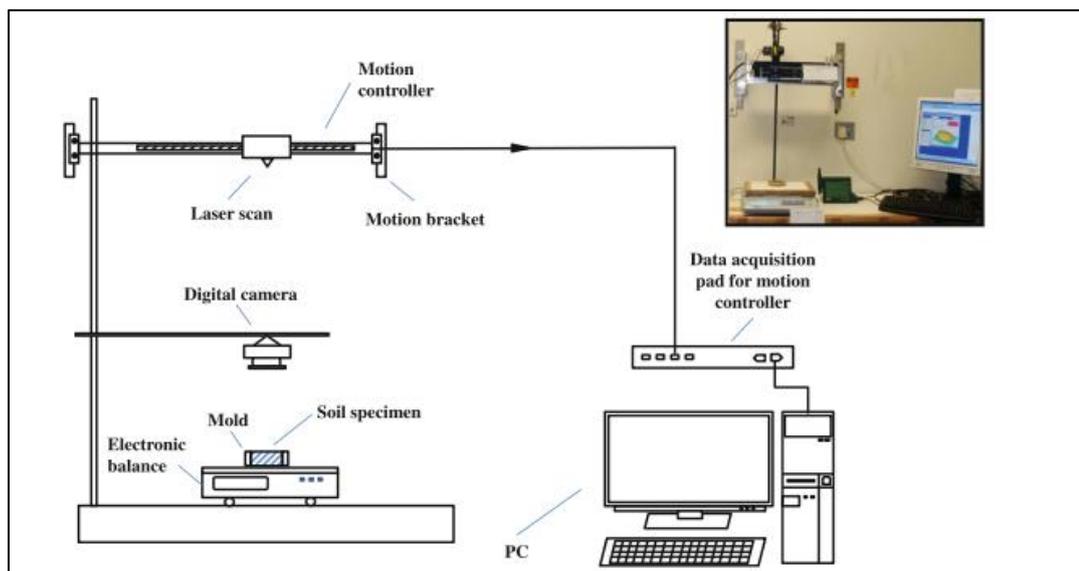
O equipamento inclui ainda: uma câmera digital para capturar o processo de formação e propagação de fissuras, que é totalmente controlado por computador para tirar fotos automaticamente em frequências de tempo prescritos, um sensor para monitorar o ar no interior da câmara de temperatura e umidade relativa e três células de carga que suportam as bandejas de secagem para monitorar constantemente a perda de peso como a amostra de solo analisada.

Todos os sensores e as células de carga estão ligados ao sistema de aquisição de dados por meio do programa de computador em Visual Basic e assim, os dados são arquivados.

A configuração proposta nesta pesquisa foi projetada para reunir informações simultâneas durante a ressecagem associada a essas duas variáveis: perda de água e mudança de volume.

A configuração experimental básica possui os componentes principais: scanner compacto 2D / 3D; controlador de movimento laser; balanço eletrônico com a amostra de solo nela; sensor de umidade relativa e temperatura; câmera digital e um computador com sistema de aquisição de dados. A Figura 23 apresenta uma representação esquemática desta configuração e os principais componentes são descritos abaixo.

Figura 23 - Configuração experimental de Sanchez et al (2012)



Fonte 24: Sanchez et al (2012)

Um scanner laser 2D / 3D ScanControl 2700-100 da Micro-Epsilon é baseado no princípio de triangulação para uma aquisição bidimensional de um perfil de altura de várias superfícies alvo. Uma linha laser é gerada por lentes especiais e projetada na superfície alvo. Um sistema óptico de alta qualidade projeta e reflete a luz desta linha laser de volta para uma matriz de sensores altamente sensível. O controlador integrado na cabeça do sensor utiliza esta imagem matriz para calcular a posição do laser ao longo do eixo dos y e a distância vertical, eixo z.

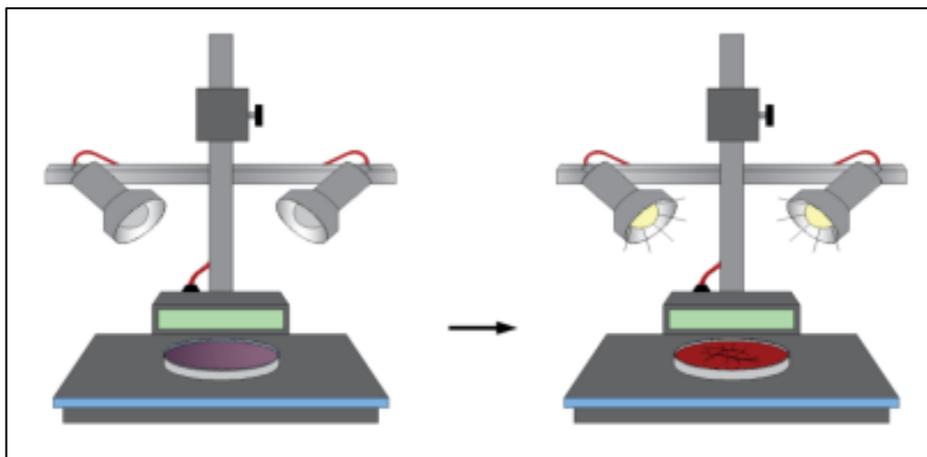
A unidade laser foi fixada à parede usando uma moldura projetada para permitir o posicionamento do laser em diferentes alturas, foi acoplado com um controlador de movimento (modelo OWIS PS-10) que se move horizontalmente (eixo dos x) a uma velocidade constante perpendicular à linha laser para obter uma representação 3D da amostra. O software OWISoft foi usado para configurar e controlar esta unidade. Os arquivos de solo foram transferidos para o computador como uma série de pontos e foram processados usando o software ICONNECT da Micro-Epsilon.

Outra configuração desenvolvida por Costa (2015), é um novo modelo para avaliação da fissuração por ressecamento aonde foi montado um aparato constituído por um suporte metálico, onde foram instaladas duas lâmpadas de secagem de 250 W e uma câmera digital, modelo GoPro Hero 3, programada para fotografar as amostras em intervalos regulares de 1 minuto, conforme Figura 24 e Figura 25. Além das lâmpadas, foi utilizado um ventilador comum para acelerar o processo de ressecamento. Um termo higrômetro digital foi instalado próximo as

amostras para monitorar a temperatura e a umidade relativa do ar durante o ensaio. O aparato permitiu o ensaio de duas amostras simultaneamente.

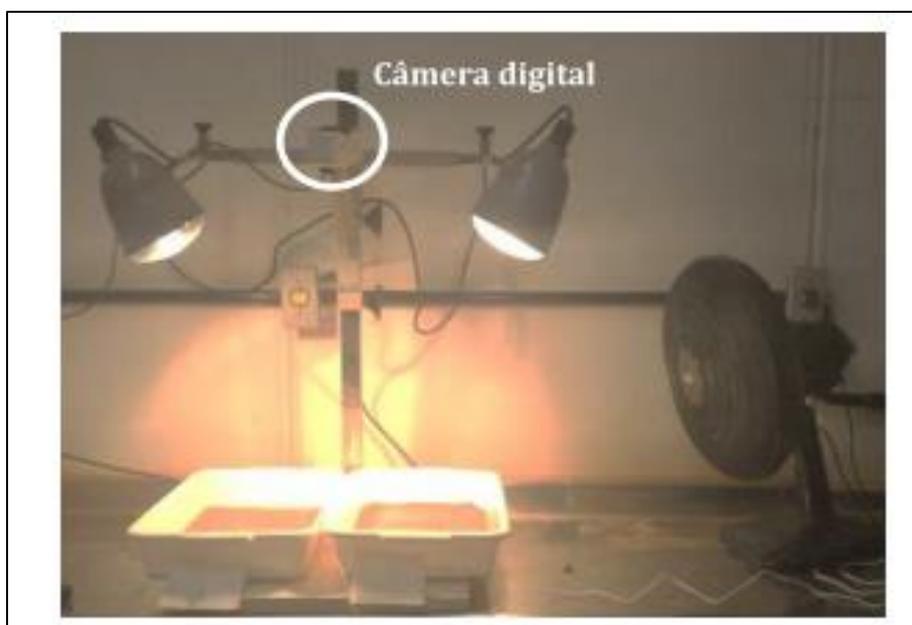
A análise das imagens permitiu realizar um comparativo dos padrões de fissuração das amostras, determinar o tempo para o surgimento das primeiras fissuras e calcular o fator de intensidade de fissura (CIF).

Figura 24 – Aparato-piloto de ressecamento de solos



Fonte 25 - Silva (2017)

Figura 25 - Aparelho desenvolvido por Costa (2015)



Fonte 26 - Costa (2015)

### 3 EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Este trabalho teve como objetivo principal analisar o processo de formação e propagação das fissuras no solo. Para tal foi desenvolvida uma pesquisa e montado, na Universidade Federal de Pernambuco, um equipamento que permitisse a secagem da amostra de solo ao ar e assim, ao término da secagem, as consequências dos efeitos do processo de formação e propagação das fissuras nas propriedades do solo pudessem ser verificadas.

O programa experimental foi desenvolvido em três etapas, sendo a primeira o desenvolvimento do projeto e montagem do equipamento a ser confeccionado para promover os ensaios, a segunda etapa consistiu na seleção dos materiais a serem utilizados na pesquisa e a terceira etapa foi aplicada uma metodologia para avaliação das fissuras do solo devido ao ressecamento ao ar, através de processamento de imagens. A Figura 26 mostra fluxograma utilizado na metodologia experimental

Mediante sugestões e resultados obtidos por Lakshmikantha (2009), foi montado um equipamento capaz de monitorar amostras de solo submetidas à secagem ao ar, onde a temperatura e umidade do ambiente além da temperatura da amostra, foram monitoradas através de sensores e o peso da amostra registrado através de célula de carga

A construção do equipamento desta pesquisa se deu pela montagem dos seguintes instrumentos a seguir: instalação de uma célula de carga para medição da perda de peso da amostra ao longo do tempo, do sensor de medição de temperatura e umidade do ar; do sensor de temperatura da amostra (PT-100), da webcam com tempo prescrito para registro de imagens da superfície da amostra e do sistema de aquisição de dados para armazenar as informações emitidas pelos sensores para o computador por meio do programa IMPACLOG08, fornecido pelo fabricante dos sensores.

A seleção do material levou em consideração uma amostra que permitisse resultados de fissuramento em tempos curtos, não provocassem colapso ou expansão em larga escala, permitisse avaliar a formação das fissuras por meio do ressecamento ao ar livre, bem como avaliação das imagens pelo método de

processamento de imagens. O material selecionado foi uma mistura de areia com bentonita.

Figura 26 – Fluxograma utilizado na metodologia experimental.



Fonte 27: A autora

### 3.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

São apresentadas neste tópico as informações a respeito dos principais itens que compõem o equipamento responsável pelo andamento das atividades experimentais.

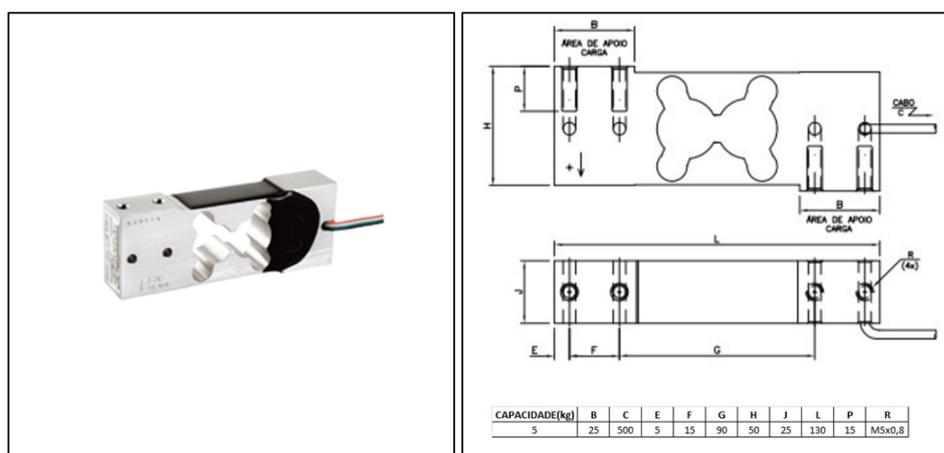
Os instrumentos de medição e software IMPACLOG08 foram fornecidos pela Impac Comercial e Tecnologia Ltda, o conversor de sinal para a célula de carga foi fornecido pela Connect-Jco Tecnologia Brasileira em Automoção Ltda. Os desenhos com os itens do equipamento foram elaborados por meio do software de desenhos técnicos.

#### 3.2.1 Descrição da célula de carga

Com o objetivo de monitorar a perda de umidade da amostra durante os ensaios foi adquirida uma célula de carga capaz de transmitir diretamente sua carga por meio de plataforma de pesagem. O objetivo da célula de carga foi obter a diferença de peso ao longo do tempo de ensaio e desta forma calcular a variação de umidade em cada amostra analisada.

A Figura 27 mostra a célula de carga IMPAC M5X0,8, constituída de alumínio, com capacidade nominal de 0 a 5kg e resolução de 5 unidades.

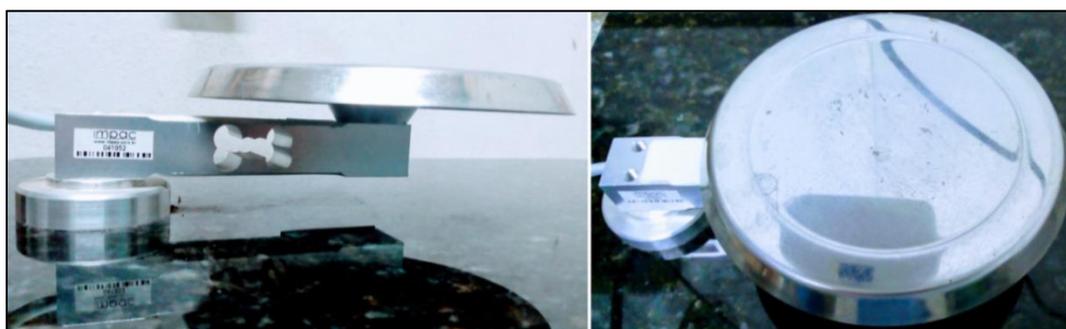
Figura 27- Célula de carga IMPAC M5X0,8



Fonte 28: Impac Comercial adaptado

A plataforma de pesagem é constituída de alumínio, com diâmetro de 150 mm e foi instalada sobre a área de apoio projetada na célula de carga, conforme a Figura 28.

Figura 28 - Vista da célula de carga instalada



Fonte 29: A autora

Para base de apoio e garantia de nivelamento em relação à bancada do laboratório, a célula de carga foi instalada sobre uma placa de granito de base retangular nas dimensões de 0,51 cm de comprimento e 0,35 cm de largura e

instalado 4(quatro) suportes de alumínio para ajustes de nível na parte inferior da placa de granito, conforme Figura 29.

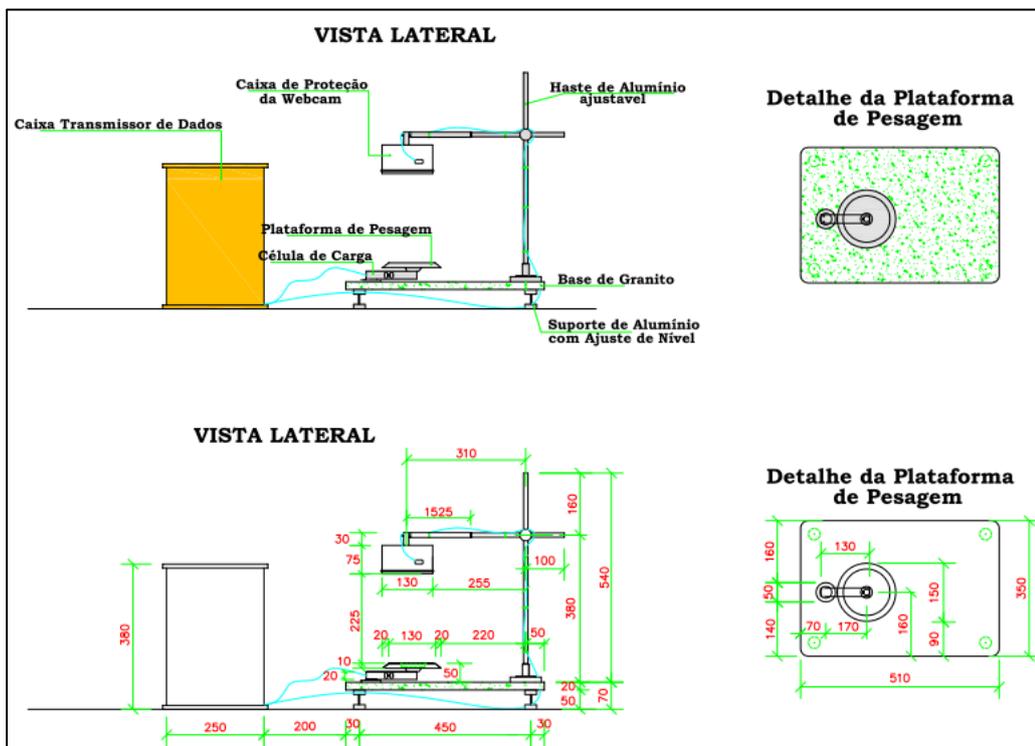
A Figura 30 apresenta a localização da balança formada pela montagem da célula de carga.

Figura 29 - Suportes de alumínio para ajustes de nível



Fonte 30: A autora

Figura 30 – Localização da célula de carga e seus componentes



Fonte 31: A autora

### 3.2.2 Sistema de aquisição de imagens (webcam)

Através da captura de imagens da superfície da amostra de solo era possível analisar as mudanças e obter informações em relação ao processo de formação e propagação das fissuras. A finalidade era obter imagens automaticamente pelo computador, em frequência de tempo prescrito.

Assim, para obter as imagens para verificação do processo de formação e propagação de fissuras, foi utilizado a Webcam Logitech Pro Full HD até 1920 x 1080 pixels com conexão através de USB 2.0, conforme Figura 31.

Figura 31 - Webcam Logitech Pro HD C920 15MP



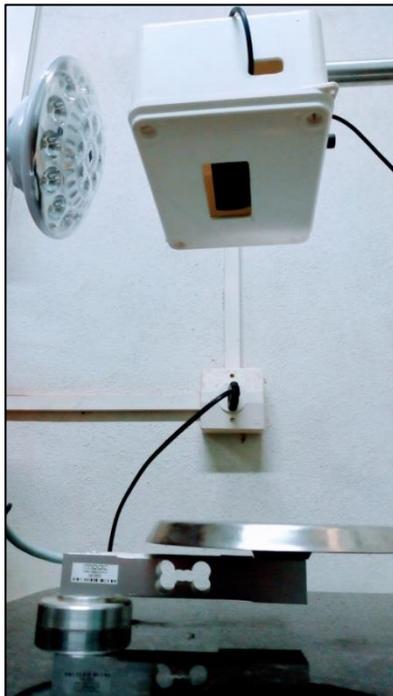
Fonte 32: <https://www.logitech.com/pt-br/product/hd-pro-webcam-c920?crd=34>

Através do aplicativo Easy WebCam Recording disponível gratuitamente na rede de internet, foi possível controlar por computador a webcam para registro automático por meio de intervalo de tempo predeterminado. Tal aplicativo armazena as imagens no computador e registra os dados de referência da imagem facilitando assim o controle dos dados.

Para um posicionamento adequado da webcam e melhor obtenção de qualidade de imagens, uma haste ajustável, que permite movimentações nas direções horizontal e vertical, constituída de alumínio em forma de “L” invertido formando um braço mecânico, foi projetada para sustentar e posicionar a webcam, acima da amostra a ser analisada, conforme Figura 32.



Figura 33 – Caixa de proteção da webcam



Fonte 34: A autora

### 3.2.3 Fonte de iluminação para webcam

Para melhorar a clareza das imagens e não interferir na temperatura ambiente do laboratório e das amostras foi utilizado a lâmpada LED JL-678 controlada por controle remoto e interruptor, conforme Figura 34.

Figura 34 – Vista frontal da lâmpada LED JL-678



Fonte 35: A autora

### 3.2.4 Sensor de temperatura

Foram adquiridos 3(três) sensores de temperatura tipo PT-100 modelo IP-49AP com número de série 041947, nas dimensões de 80mm de comprimento e 1,5 mm de diâmetro, conforme Figura 35. Com o objetivo de medir a temperatura interna do solo em diferentes pontos da amostra.

De acordo com o tipo de solo a ser analisado, faz-se necessário à verificação do comportamento da temperatura do solo para diferentes alturas da amostra a ser analisada na parte interna da placa de Petri.

Figura 35 - Sensores de temperatura tipo PT-100



Fonte 36: A autora

### 3.2.5 Sensor de umidade e temperatura

Para a medição da umidade e temperatura do ambiente foi utilizado o transmissor de temperatura e umidade modelo IP-3520 com número de série 041948, conforme Figura 36.

Figura 36 – Sensor de umidade e temperatura do ar



Fonte 37: A autora

### 3.2.6 Caixa de proteção do transmissor de dados

Para proteção e armazenamento dos sensores e transmissores de dados foi construída uma caixa de madeira com laterais de vidro e tampa removível com furos em sua aba inferior para passagem dos condutores dos sensores, conforme Figura 37.

Figura 37 - Vista da caixa do transmissor de dados



Fonte 38: A autora

### 3.2.7 Programa para aquisição de dados

O programa IMPACLOG08 foi desenvolvido pela Impac Comercial e Tecnologia Ltda especialmente para adquirir os dados emitidos pelos sensores e célula de

carga, tendo como escolha o intervalo de tempo definido para vários dias de análise da amostra, bem como o controle da calibração dos sensores.

Além disso, o programa permite a visualização simultânea de todos os pontos de entrada em forma gráfica, analógica e de tabela com salvamento automático dos valores. Os tempos prescritos disponíveis para registros são de 1, 2, 5, 10, 20 e 50 s e 1, 2, 5, 10, 20 e 50 min.

O programa disponibiliza os dados armazenados em formato de texto simples, podendo importá-los para análises futuras e a conexão com o computador ocorre por meio de porta USB.

Figura 38 - O software IMPACLOG08

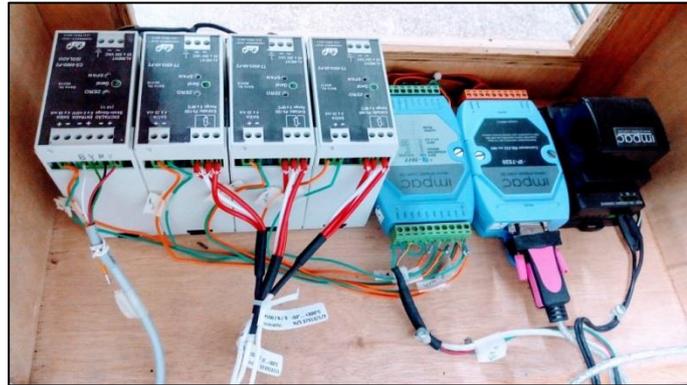


Fonte 39: A autora

### 3.2.8 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é formado pelo módulo inteligente modelo IP-7017 com 8(oito) canais de entrada de aquisição de sinais analógicos distintos protegidos contra surtos de tensão, como mostra a Figura 39.

Figura 39 – Sistema de aquisição de dados



Fonte 40: A autora

### 3.3 SELEÇÃO DA MISTURA DE SOLO PARA PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

O material escolhido para realizar os ensaios de ressecamento foi a mistura de 60% de bentonita e 40% de solo para um peso total de 500 g (Figura 40).

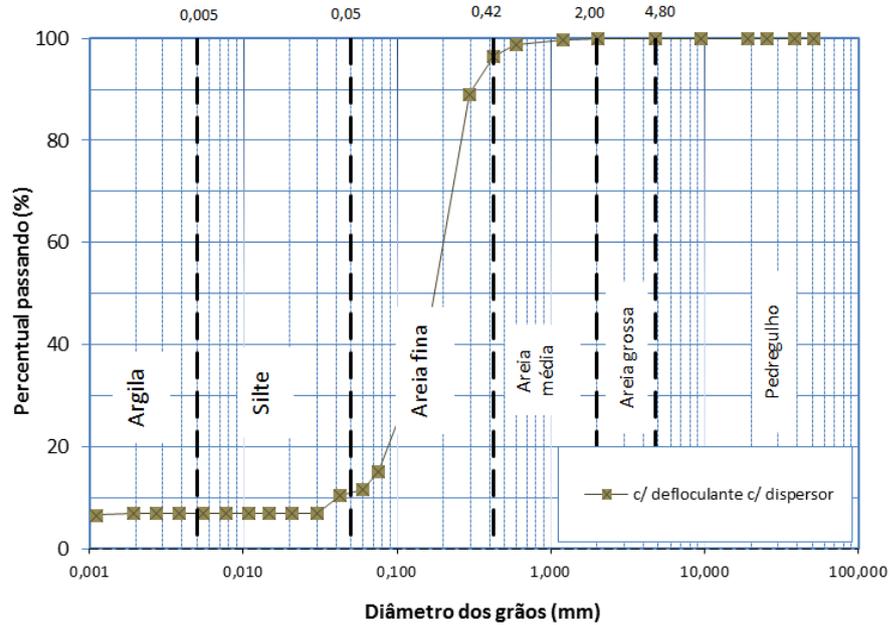
A bentonita foi fornecida pela empresa G1000 Materiais Filtrantes e Blindagem Radiológica Ltda localizada no estado de Pernambuco e duas amostras de solos foram testadas para verificação da agilidade e formas das fissuras. O solo A1 é um solo proveniente da cidade de Petrolina e o solo A2, proveniente da cidade de Ipojuca, cidades pertencentes ao estado de Pernambuco e cujas curvas granulométricas estão representadas nas Figura 41 e 40, respectivamente. Os ensaios de granulometria foram realizados conforme a NBR 7181 (ABNT, 1988).

Figura 40: (a) Seleção de mistura entre amostra de areia; (b) homogeneização com água



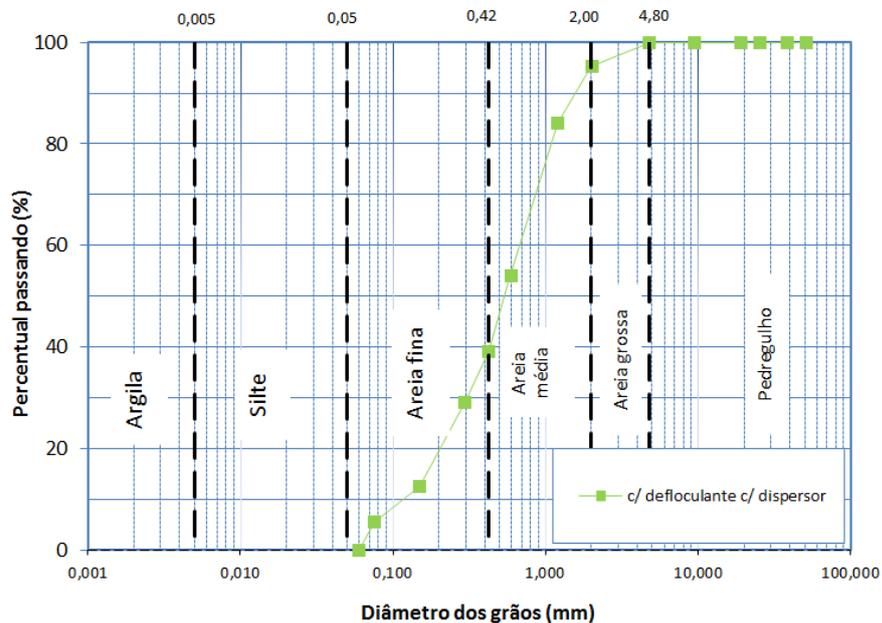
Fonte 41: A autora

Figura 41 - Curva granulométrica do solo de Petrolina(A1)



Fonte 42: A autora

Figura 42 - Curva granulométrica do solo de Ipojuca(A2)

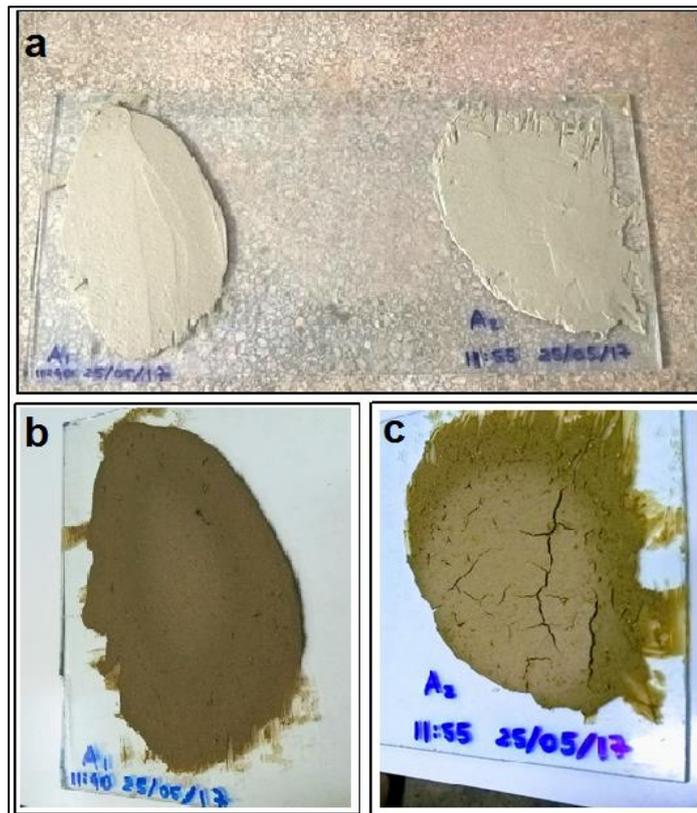


Fonte 43: A autora

O material seco foi misturado e homogeneizado com água destilada, acondicionada em bolsa plástica e armazenada em caixa de isopor no período de 24 horas. Terminado o período de 24 horas, as duas amostras foram umedecidas até alcançar seu Limite de Liquidez e posteriormente, foram retiradas pequenas quantidades das misturas para o teste da formação das fissuras.

Aplicada sobre uma placa de vidro transparente, as amostras foram espalhadas de forma a manter uma espessura mínima de 3 mm, porém livre de contenção lateral e expostas ao ar livre por um período de 24 horas. Como esperado, em menos de 12 horas foi verificada a formação de fissuras das amostras de grãos maiores (A2), desta forma, foi escolhida a proporção para mistura da bentonita e solo em 60% e 40%, respectivamente, sendo escolhido o solo A2 para este trabalho, apresentado na Figura 43. A mistura realizada entre a bentonita e o solo (A2) foi então caracterizada, sendo realizados os ensaios de granulometria, conforme a NBR 7181 (ABNT, 1988) e limites de consistência, conforme a NBR 6459 (ABNT,2016).

Figura 43 – Verificação da formação das fissuras. (a) amostras A1 e A2 na umidade do Limite de Lliquidez sobre placa de vidro com altura de 3 mm; (b) Comportamento da amostra A1 após 24 horas; (c) Comportamento da amostra A2.



Fonte 44: A autora

### 3.4 PROCEDIMENTOS DE PREPARAÇÃO AMOSTRA

#### A. Preparação da placa de Petri

Para acomodação do solo a ser analisado, foram utilizadas placas de Petri com os diâmetros de 9,77 cm, 9,53 cm, 5,55 cm disponíveis no mercado de utensílios para laboratórios. Essas placas de Petri são fornecidas com alturas normalmente entre 1,0 cm e 2,0 cm, porém as alturas utilizadas para as amostras deste trabalho são de 4 mm e 3 mm. Solicitar o corte dessas peças para a altura dos ensaios se tornou inviável, bem como a fabricação das mesmas. Portanto, foi desenvolvida uma nova forma de acomodar a amostra deixando-a na altura do ensaio, diferindo, neste item, da metodologia proposta por Lakshmikantha (2009).

Antes da colocação da amostra na placa de Petri realizou-se a marcação da altura em que a amostra deveria ser analisada. Com um paquímetro foi marcado a altura da amostra (Figura 44), o restante da marcação ao redor da placa de Petri foi realizada com auxílio de uma placa de alumínio, de forma que o limite da altura ficasse visível para acomodação da amostra.

Figura 44 – Marcação da altura da amostra na placa de Petri com auxílio de uma placa de alumínio



Fonte 45: A autora

#### B. Acomodação da amostra na placa

Após a pesagem da placa de Petri e com o apoio de espátula de ponta redonda foi introduzida uma pequena quantidade da mistura a ser analisada e aos poucos o recipiente foi preenchido em pequenas camadas até atingir a altura marcada. Para isso, utilizou-se um tecido de algodão sobre a bancada com o objetivo de amortecer as batidas da placa de Petri sobre a bancada para acomodar a amostra e retirar possíveis bolhas de ar, como mostra a Figura 45.

Figura 45 - Procedimento da preparação da amostra na placa de Petri. a) colocação da amostra, b) espalhamento da amostra e c) acomodação da amostra ao longo da altura marcada, através de pequenas batidas



Fonte 46: A autora

Para nivelar a superfície da amostra foi adicionado vaselina no fundo liso de uma placa de alumínio, conforme Figura 45a, com diâmetro inferior ao da placa de Petri e de forma que levemente a superfície da amostra foi nivelada, conforme Figura 45b. Por fim, com o apoio de uma espátula de ponta, o excesso da mistura, devido ao nivelamento da superfície, foi removido da placa de Petri, conforme Figura 45c com o cuidado para não atingir a amostra. Figura 45d representa a finalização da preparação da amostra após a pesagem do conjunto.

Figura 46 – Nivelamento e retirada do excesso da amostra a) aplicação de vaselina no fundo da cápsula de alumínio, b) nivelamento da amostra c) retirado do excesso de amostra nas bordas da placa de Petri d) amostra pronta



Fonte 47: A autora

### C. Conferência da balança, sensores e registro de dados

A amostra foi transferida para a plataforma de pesagem e antes do início dos registros de fissuras, todos os sensores de temperatura, umidade e balança foram calibrados. Posteriormente, foi selecionado o intervalo de tempo em que os dados foram registrados, logo após, foram configurados o visor da webcam e por último foi realizado a verificação da luz para que as imagens fossem focadas corretamente sobre a amostra a ser analisada. A variação de tempo para registro de imagens foi de 5s e para os sensores de temperatura, umidade e balança foi inicialmente de 5s e após 24 horas, os registros foram realizados a cada 20s.

A sala manteve uma temperatura constante numa média de 23,2°C e a umidade da sala entre 50% e 76%.

### 3.5 PROCEDIMENTO PARA VERIFICAÇÃO DA FORMAÇÃO DAS FISSURAS

Após conclusão de três dias ou 72h de registros de imagens e dados dos sensores, as informações foram acessadas diretamente pelo programa IMPACLOG08 e transferidas em formato de texto, onde os dados foram selecionados de acordo com os intervalos de tempo determinados para avaliações e agrupados em planilha, sendo esse procedimento realizado para cada amostra analisada. Temperatura e umidade do ambiente, peso da amostra foram selecionados e organizados para cada amostra.

Através das leituras do peso da amostra ao longo do tempo, é obtida a variação de umidade solo para o intervalo de tempo analisado. A partir do acesso ao banco de dados dos registros, são extraídas as leituras referentes ao peso, umidade e temperatura do ambiente para cada amostra (diâmetro  $d$  e altura  $h$ ), obtidas nos intervalos de tempo de 3, 6, 12, 24, 36, 48, 60 e 72 horas. Os valores são agrupados numa tabela e o cálculo da variação da umidade do solo é realizado para os mesmos intervalos de tempo. Têm-se uma sequência de leituras referentes ao peso da amostra  $n$ ,  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , onde a variação de umidade do solo é dada por:

$$\Delta U_{\text{mid solo}} [\%] = \frac{(P_n - P_1)}{(P_n - P_p)} \times 100\% , \text{ onde } P_p \text{ corresponde ao peso da placa de Petri.}$$

Para todas as amostras é representada graficamente a evolução do peso, umidade e temperatura ambiente e variação da umidade do solo com o tempo. A análise se dá pela verificação da influência das dimensões da amostra sobre a variação da umidade do solo, sobre o espaçamento das fissuras formadas, sobre as

dimensões das células fissuradas e quantidade de células fissuras, sendo os dois últimos dados obtidos por meio do processamento de imagens relativos ao intervalo de tempo analisado para cada amostra.

### 3.6 PROCESSAMENTO DE IMAGENS E MEDIÇÃO

Para a análise do estudo do comportamento e processo de formação de fissuras é utilizado o processamento digital de imagens para obter dados como a quantidade de células fissuradas, comprimento da abertura das fendas, área fissurada, área total da amostra e com tais informações determinar o CIF ou *Crack Intensity Factor* para obter o padrão das fissuras e posteriormente correlacionar com a geometria da amostra de solo.

A medição dessas informações é obtida por meio de algoritmos, via MATLAB que constam no Anexo A, de processamento de imagens digitais aplicados a sequencia de imagens obtidas neste trabalho. Para desenvolver essa metodologia e acompanhar a formação das fissuras a sequencia de imagens foi adquirida após a colocação da amostra de solo a ser analisada sobre a plataforma de pesagem. Os registros de imagens de cada amostra foram obtidos numa sequencia de 5 e 20 segundos durante 72h.

Para obter os dados por meio das imagens, para a metodologia aplicada após o registro das imagens utilizou-se as seguintes etapas de processamento de imagens digitais:

- Aquisição de imagens;
- Pre-processamento de imagem;
- Segmentação;
- Representação ou seleção de características;
- Reconhecimento ou interpretação.

O objetivo do método é segmentar as fissuras e áreas de fendas, bem como, calcular suas respectivas áreas automaticamente. Para isso foi criado um algoritmo que é aplicado sobre as imagens escolhidas de acordo com um determinado intervalo de tempo de formação das fissuras. Ao final foi feita uma análise comparativa entre quantidade de pixels de uma imagem com a área de superfície

das fendas e a área total da superfície analisada, finalizando com a correlação entre os parâmetros geométricos obtidos da imagem com as propriedades da amostra de solo analisado.

### 3.6.1 Aquisição de imagens

As imagens originais foram capturadas conforme descrito no item 3.2.2. Com o objetivo de aumentar o contraste entre a plataforma de pesagem e o solo analisado foi utilizado um papel color set na cor azul sobre a plataforma. Desta forma quando fossem formadas as fissuras as áreas de separação teriam uma cor de maior destaque ajudando na etapa seguinte.

### 3.6.2 Pre-processamento

No pré-processamento, a imagem é importada do banco de dados, onde foram inseridas as imagens referentes aos intervalos de tempo para serem analisados. Posteriormente, aplicou-se a transformação em escala de cinza de forma que é promovida a simplificar as imagens para as etapas posteriores de processamento.

Uma imagem colorida pode ser representada em vários sistemas de cores. O mais comum é o RGB, também conhecido como método aditivo. Ele funciona similar ao sistema de cores em artes onde somando um pouco de cada cor é criada uma nova cor. De forma simples, pode-se dizer que uma imagem RBG, possui 3(três) matrizes uma representando a cor vermelha (R), outra a azul(B) e outra a verde(G). Um tom de um pixel é representado pela soma da intensidade dessas 3(três) cores.

Como foi utilizado papel color set na cor azul na plataforma de pesagem e o solo normalmente tem a cor avermelhada, as matrizes que representam a cor vermelha, por exemplo, tendem a ter valores altos na região do solo e valores próximo a 0 na região das fissuras (placa de Petri). Por isso foi escolhido apenas a matriz de tons vermelhos para se trabalhar. Dessa forma se tem uma imagem em tons de cinza com alto contraste nas regiões que precisarão ser segmentadas.

O comando para leitura da imagem segue abaixo:

```
// comando de leitura da imagem
imgori = imread('I_23_43_31__22987.jpg');
// separando apenas a matriz vermelha para ser trabalhada
```

```
img = imgori(:,:,1);
```

### 3.6.3 Segmentação

O primeiro passo da segmentação é a separação da placa de Petri, onde está o solo em análise, do restante da imagem. A Figura 47 representa o resultado da imagem após a aplicação desta etapa. Para isso o seguinte algoritmo foi elaborado:

1. Aplicar algoritmo de binarização pelo método de Otsu.

```
bin = im2bw(img, graythresh(uint8(img)));
```

2. Dilatar a imagem binarizada com um elemento estruturante grande para conectar as partes desses componentes. Nesse caso o objetivo é tornar a placa de Petri um objeto grande dentro da imagem.

```
dil = imdilate(bin, ones(10,10));
```

3. Rotular os objetos, onde se entende por objetos as regiões de branco. Cada região de branco separada recebe um valor (rótulo).

```
label = bwlabel(dil);
```

4. Para cada rótulo encontrado:

- 4.1. É analisada a quantidade de pixel existente no rótulo, ou seja, é realizado o cálculo do tamanho do rótulo.

- 4.2. Caso o rótulo seja maior do que 40.000 pixels (rótulo grande), deverá permanecer branco. Caso contrário passa a ser preto.

```
final = zeros(alt,larg);
tam = max(max(label));
for i = 1: tam
    sel = label == i;
    soma = sum(sum(sel));
    if(soma > 40000 )
        final(sel) = 255;
    else
        final(sel) = 0;
    end
end
```

end

Ao final espera-se que apenas a borda da placa de Petri fique na imagem, dessa forma pode-se delimitar a região onde o solo encontra-se para ser analisado do restante da imagem.

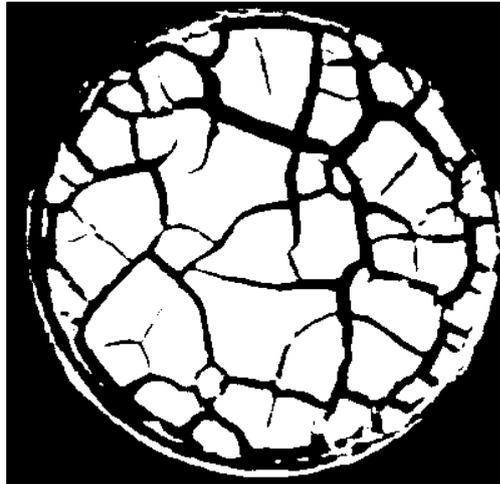
#### 5. Busca dos limites da placa de Petri e corte da imagem.

```

pos = sum(final,1);
j = larg;
inicioX =1;
fimX = larg;
for i=1:larg
    if( pos(i) > 100 && inicioX == 0)
        inicioX = i;
    end
    if( pos(j) > 100 && fimX == larg)
        fimX = j;
    end
    j=j-1;
    if(inicioX ~= 1 && fimX ~= larg)
        break;
    end
end
end

```

Figura 47 - Imagem resultante (bin1).



Fonte 48: A autora

#### 3.6.4 Representação ou seleção de características

A partir da imagem apresentada na Figura 47 é obtida uma nova rotulação dos objetos brancos onde para cada objeto branco identificado é feita uma contagem de

pixel para identificação de área. Além disso, também é possível identificar outras medidas como distância máxima entre os pixels em altura ou largura de cada região e assim extrair características das áreas em branco.

```

bin1 = bin(inicioY:fimY, inicioX:fimX);
imwrite(bin1, 'bin1.bmp');
label = bwlabel(bin1);
%fim= zeros(size(bin1));
tam = max(max(label));
%sel = label == 1
%final(sel) = 255;

arq = fopen('area.txt', 'w');
fprintf(arq, 'Rot \t Soma \n');

```

Para as áreas pretas que delimitam as fissuras, é feito um histograma da quantidade de carreiras de preto. Um histograma é a quantidade de vezes que uma determinada marcação acontece. No caso em questão, o objetivo é determinar o tamanho e área das fissuras, desta forma é contabilizada a quantidade de vezes em que aparece uma sequência de tamanho N de pixels pretos. Desta forma, podem-se tirar informações estatísticas como a moda que indicará o tamanho aproximado da fissura em pixels.

```

%histograma fissura
if(fissuras(i,j) == 1)
    temp = temp+1;
elseif (temp >0)
    carreiras(temp)= carreiras(temp)+1;

    temp = 0;
end
end
%histograma fissuras
if (temp >0)
    carreiras(temp)= carreiras(temp)+1;

end

%diametro
if (aux > diametro )
    diametro = aux;
end
end

[freq, largFissuraMedia] = max(carreiras)

diametro = diametro
end

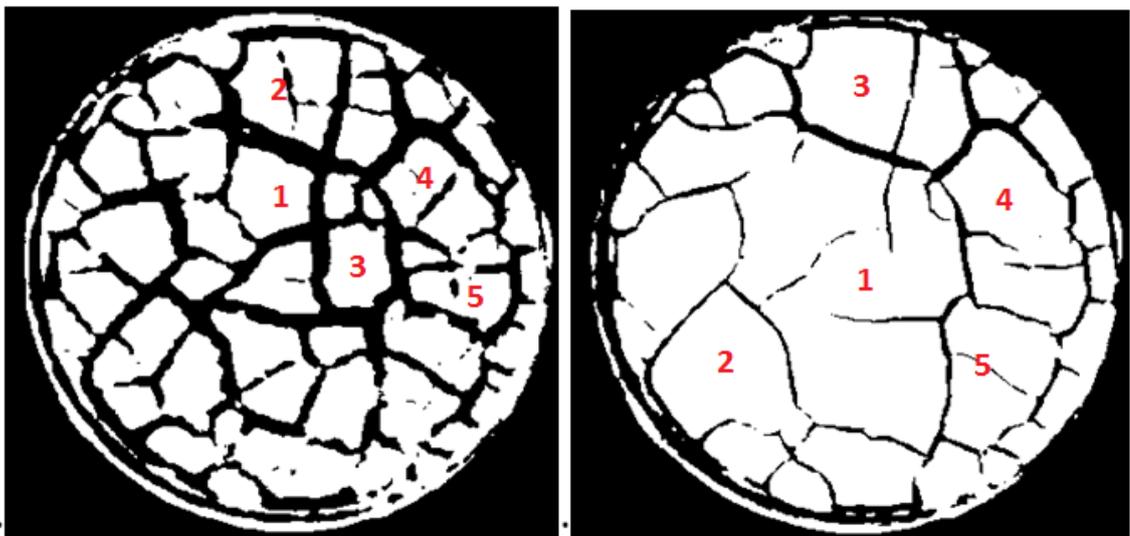
```

### 3.6.5 Reconhecimento ou interpretação:

Cada região de branco é rotulada, ou seja, recebe uma numeração. Desta forma, cada rótulo de tamanho inferior a 40.000 pixels (rótulo grande – ao anel que limita a amostra) equivale a uma célula rachada, que é um dos dados a serem obtidos. Para cada intervalo de tempo é contabilizada a quantidade de células formadas ou rachadas.

Além da informação da quantidade de células formadas ou rachadas, é dada a soma da área dessas células. A Figura 48 representa a primeira rotulação aplicada onde o objeto evidenciado é a célula de solo rachado.

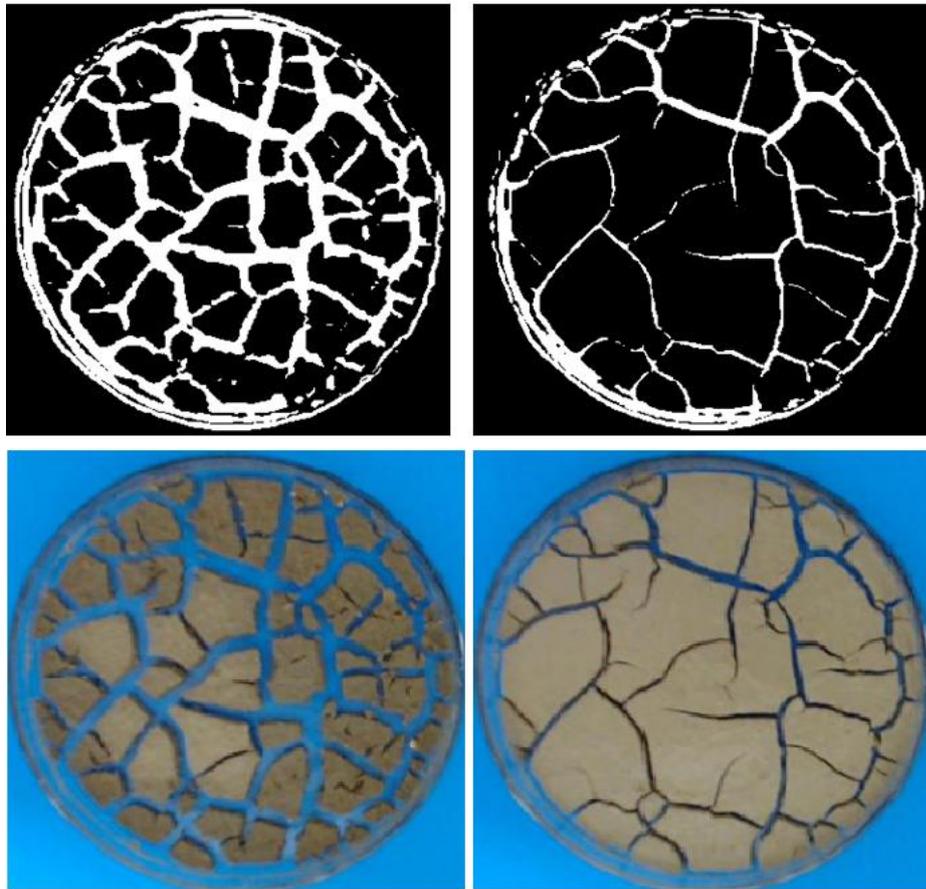
Figura 48 – Rotulação



Fonte 49: A autora

Ao analisar as fissuras, é feita uma nova rotulação, o que evidencia em branco as fissuras para medir a espessura entre as fendas e fornecer a área total das mesmas. A Figura 49 representa a nova rotulação aplicada na imagem onde o objeto avaliado é a fissura.

Figura 49 – Área de fissura



Fonte 50: A autora

Com essas informações é possível calcular o CIF ou Crack Intensity Factor, que determina a relação entre a área de superfície das fendas e a área total inicial da superfície da amostra, podendo ser calculado em função do tempo e utilizado para descrever o processo de desenvolvimento das fissuras.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 INTRODUÇÃO

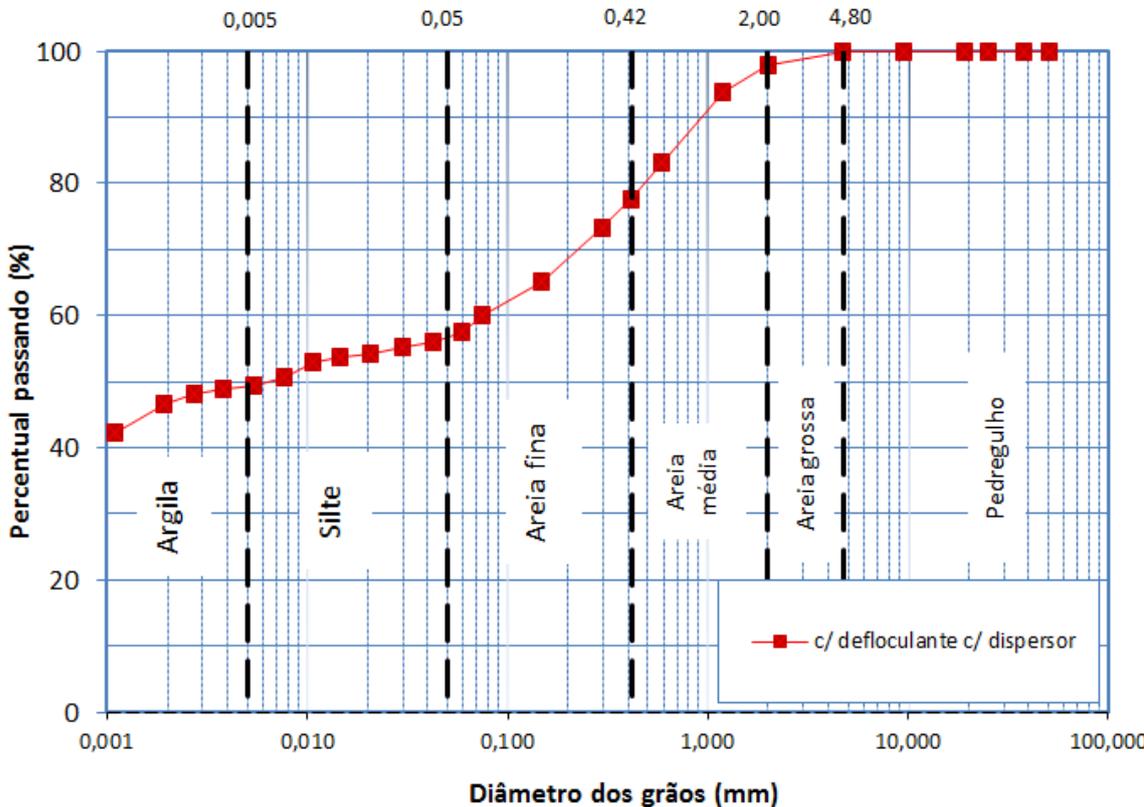
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados no laboratório. Serão verificados os efeitos relativos às condições de altura e área da superfície das amostras no processo de iniciação, propagação e padrão das fissuras. Neste capítulo serão mostrados os resultados de seis amostras, sendo cinco com dados obtidos pelos sensores e uma com imagens obtidas para aplicação de processamento de imagens.

### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA

Para a mistura de solo utilizada na análise deste trabalho, foi realizada a caracterização cujos ensaios realizados foram os ensaios de granulometria, por peneiramento e sedimentação, e limites de consistência, que estão apresentados na Figura 50 e Figura 51. Os resultados dos ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade são 210,3%, 35,1% e 175,2%, respectivamente.

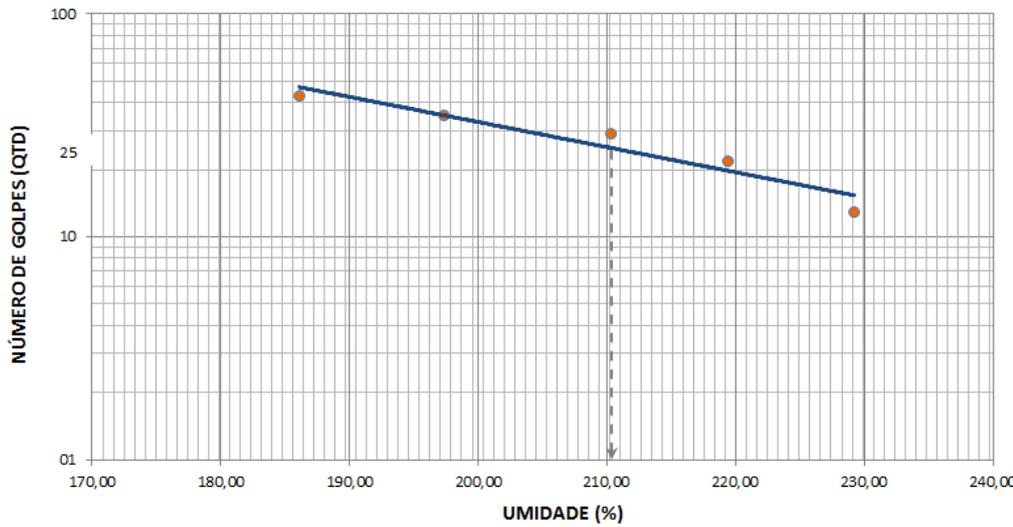
A partir desses ensaios, foi possível identificar que a amostra é classificada pelo sistema SUCS como sendo o solo tipo CH, identificado como argila de alta plasticidade, com alto limite de liquidez, sujeito à elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido. Essa característica peculiar de apresentar elevada mudança de volume ao ser umedecido e depois seco foi facilmente identificada durante os ensaios.

Figura 50 – Curva granulométrica da mistura entre o solo de Ipojuca(A2) e bentonita



Fonte 51: A autora

Figura 51 – Gráfico do ensaio do Limite de liquidez realizado da mistura entre a areia Ipojuca(A2) e bentonita



Fonte 52: A autora

### 4.3 AMOSTRAS ANALISADAS

Cinco amostras tiveram seus dados completos registrados e suas dimensões estão na Tabela 2. A temperatura máxima da sala foi de 24,7°C e a temperatura mínima foi de 20,62°C. A máxima umidade da sala foi de 76,0% e a menor de 50,5%. A duração dos testes foi de 72 horas com imagens da superfície das amostras registradas constantemente, desta maneira foi possível acompanhar a evolução das fissuras.

Para a aplicação do trabalho de processamento de imagens, foi verificado que as amostras de imagens disponíveis apresentaram um excesso de ruídos que não permitiram que o método fosse executado. Os ruídos mais evidentes nas imagens foram o excesso de luz branca sobre as amostras e a mesma coloração entre a amostra de solo e a plataforma de pesagem da célula de carga. Neste caso, não se distinguia a amostra de solo, da plataforma de pesagem, quando aplicada a binarização nas imagens. Desta forma, a amostra 19 foi elaborada com o intuito de dirimir tais ruídos apresentados nas imagens anteriores e deste modo, permitir a aplicação do método. As soluções para redução dos ruídos nas imagens foi a correção da iluminação do ambiente, na qual se encontravam as amostras em análise e a inserção de um papel color set na cor azul, sobre a plataforma de pesagem e abaixo da amostra, afim de não haver a interferência entre as cores dos objetos.

Tabela 2 – Amostras elaboradas

Ensaio	Amostra	Diâm. (mm)	ALT. (mm)	Duração do ensaio(h)	Umid. Amb. (%)	Amostras registradas
1	-	55,50	4,5	72	-	Não
2	-	72,20	4,5	72	-	Não
3	-	84,80	4,5	72	-	Não
4	-	97,70	4,0	-	-	Não
5	5	97,70	4,0	72	66,36	Sim
6	-	97,70	4,0	72	66,36	Apenas visual
7	-	85,60	3,0	72	-	Não
8	-	93,50	3,0	72	-	Não
9	-	65,00	4,0	72	-	Não
10	10	55,50	4,0	74	69,72	Sim

11	-	55,50	4,0	74	69,72	Não
12	-	55,50	4,0	74	69,72	Não
13	13	95,30	4,0	72	65,02	Sim
14	-	9,050	4,0	72	-	Não
15	15	72,20	3,0	36	63,88	Sim
16	16	55,50	3,0	50	50,98	Sim
17	-	103,30	4,0	72	-	Não
18	-	134,50	3,0	72	-	Não
19	19	95,30	4,0	132	65,02	Não

Fonte 53: A autora

#### 4.3.1 Amostra 5 (Diâmetro 97,70 mm e altura de 4,0 mm)

A amostra 5 foi ensaiada entre os dias 02/06/17 a 05/06/17 e a primeira fissura surgiu após 7 horas e 29 minutos desde o início do ensaio, ver Figura 52. As fendas primárias são originadas a partir das bordas da placa de petri e após 19 horas, do início do ensaio, verificou-se uma fissura primária originada no centro da superfície, como mostra Figura 53. Na Tabela 3 é apresentado o resumo dos dados obtidos. A Figura 54 mostra a evolução da perda de peso com tempo. As Figura 55 e 52 apresentam a evolução com o tempo da umidade ambiente e da temperatura, respectivamente.

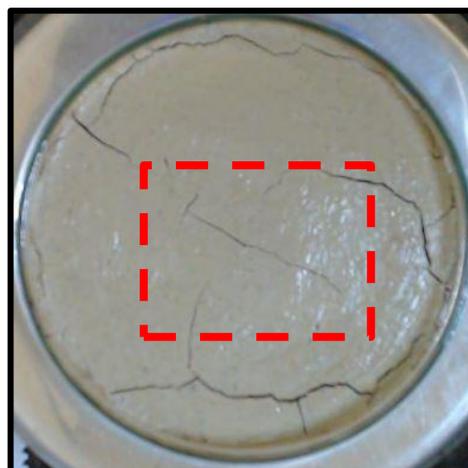
A evolução da variação da umidade do solo com o tempo pode ser acompanhada na Figura 57. A Figura 58 é exibida a sequência das imagens da superfície da amostra para os intervalos de tempo de 6, 12, 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

Figura 52 - Imagem da primeira fissura da amostra 5



Fonte 54: A autora

Figura 53 – Imagem da fissura primária de topo da amostra 5



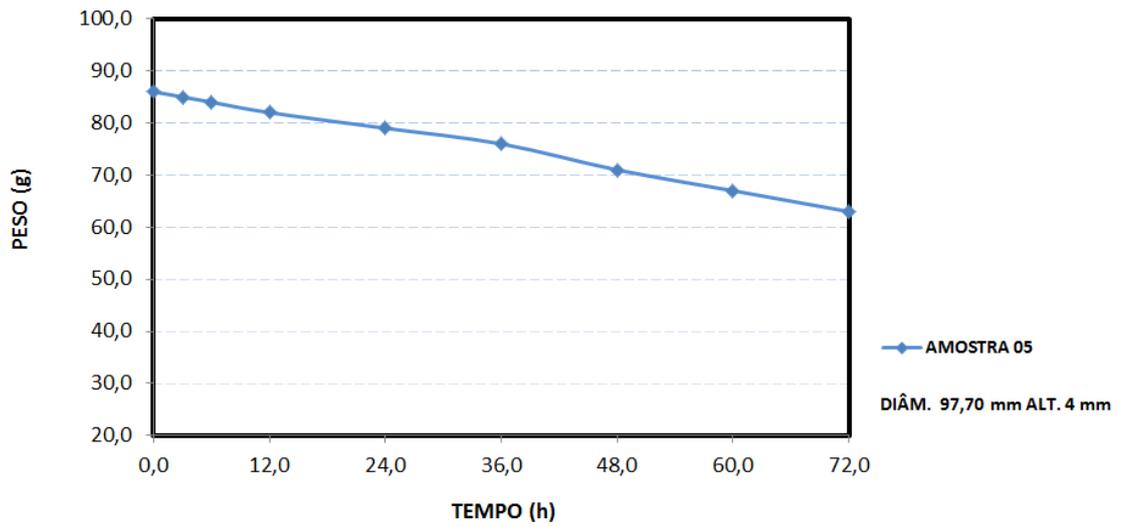
Fonte 55: A autora

Tabela 3 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 5

<b>INTERVALO TEMPO (h)</b>	<b>PESO PLACA PÉTRI (g)</b>	<b>UMIDADE AMBIENTE (%)</b>	<b>TEMPERATURA AMBIENTE (°C)</b>	<b>PESO AMOSTRA (g)</b>	<b>VARIAÇÃO UMID. DO SOLO</b>
0,0	40,0	66,4	24,3	86,0	0,00%
3,0		68,8	24,3	85,0	2,22%
6,0		69,8	24,4	84,0	4,55%
12,0		73,7	24,5	82,0	9,52%
24,0		71,5	24,4	79,0	17,95%
36,0		61,7	23,5	76,0	27,78%

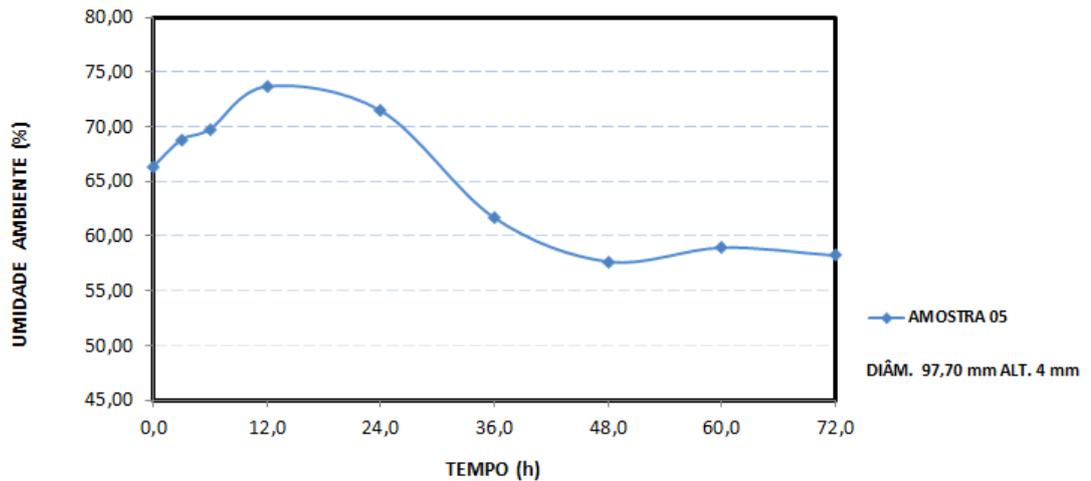
48,0	57,7	22,1	71,0	48,39%
60,0	58,9	21,0	67,0	70,37%
72,0	58,2	20,6	63,0	100,00%

Figura 54 – Evolução do peso com o tempo da amostra 5



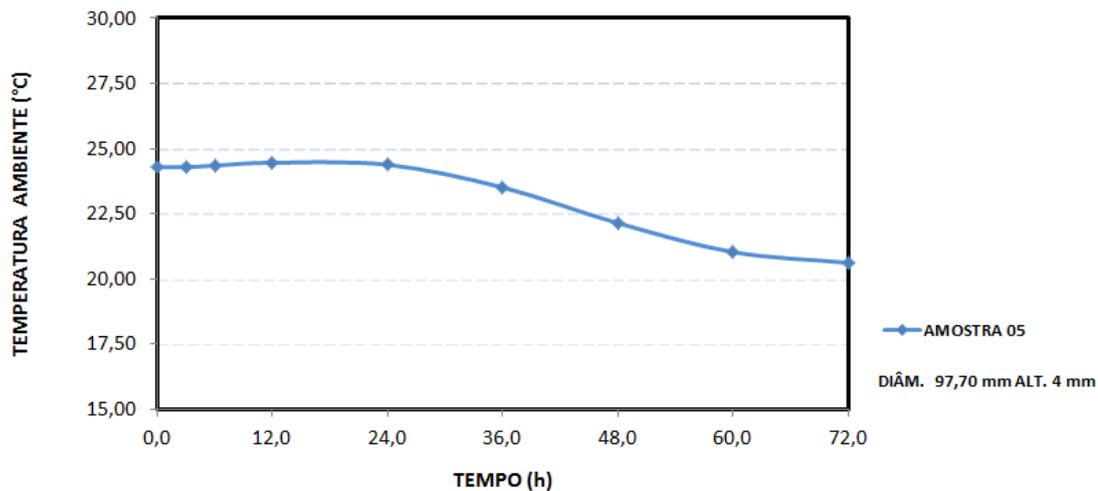
Fonte 56: A autora

Figura 55 – Evolução da umidade ambiente com o tempo da amostra 5



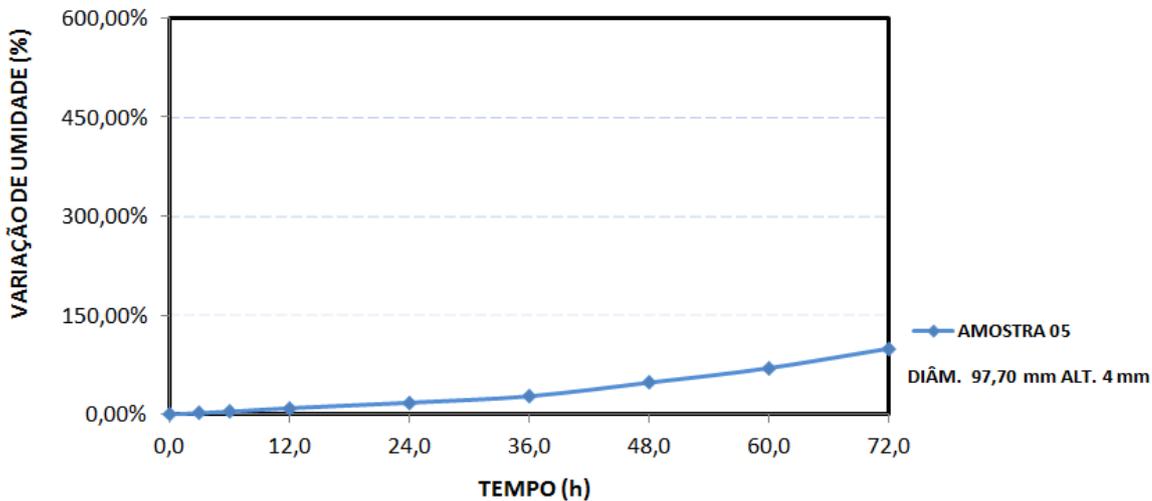
Fonte 57: A autora

Figura 56 – Evolução da temperatura ambiente com o tempo da amostra 5



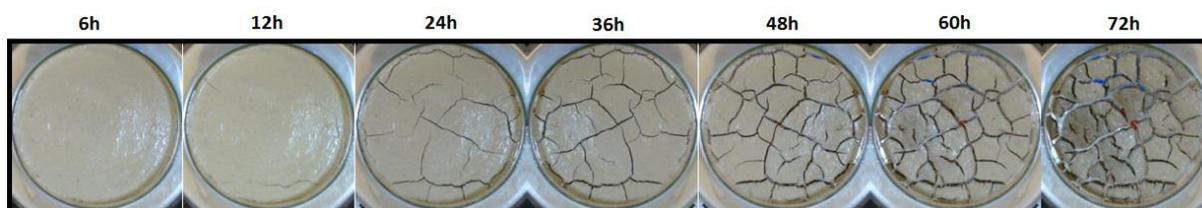
Fonte 58: A autora

Figura 57- Evolução da variação da umidade do solo com o tempo da amostra 5



Fonte 59: A autora

Figura 58 – Sequência de imagens referentes à amostra 5



Fonte 60: A autora

Observou-se que a amostra começou a apresentar fissuras após 7 horas e 29 minutos e seu peso variou de 86,0g a 63,0g em um período de 72 horas. Foi observado que a temperatura ambiente mínima registrada foi de 20,6°C e máxima 24,5°C e a umidade ambiente mínima registrada foi de 57,7% e máxima de 73,7%. A variação da umidade do solo foi de até 100,0% em relação ao peso da amostra após 72 horas.

#### 4.3.2 Amostra 10 (Diâmetro 55,50 mm e altura de 4,0 mm)

Tendo sido iniciado o ensaio da amostra 10 no dia 21/06/17 e encerrado no dia 24/06/17, o aparecimento da primeira fissura ocorreu após 6 horas e 27 minutos do início do ensaio e as fendas primárias são originadas a partir das bordas da placa de petri. Os dados registrados estão resumidos na Tabela 4. A evolução da perda de peso está representada na

Figura 60. Os dados referentes ao laboratório são representados nas Figura 61 e Figura 62, sendo a evolução com o tempo da umidade ambiente e da temperatura, respectivamente. A evolução da variação da umidade do solo com o tempo pode ser acompanhada na Figura 57. A sequência das imagens da superfície da amostra está representada na Figura 64 para os intervalos de tempo de 6, 12, 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

Figura 59 - Imagem da primeira fissura da amostra 10

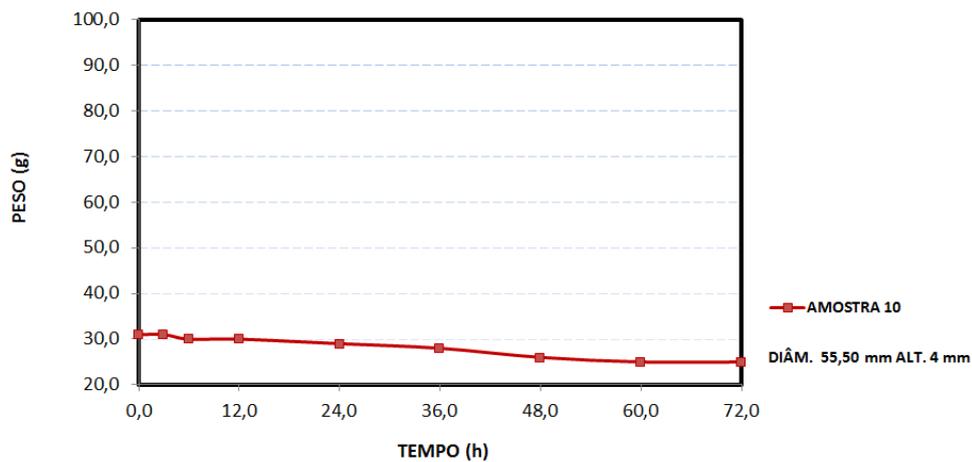


Fonte 61: A autora

Tabela 4 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 10

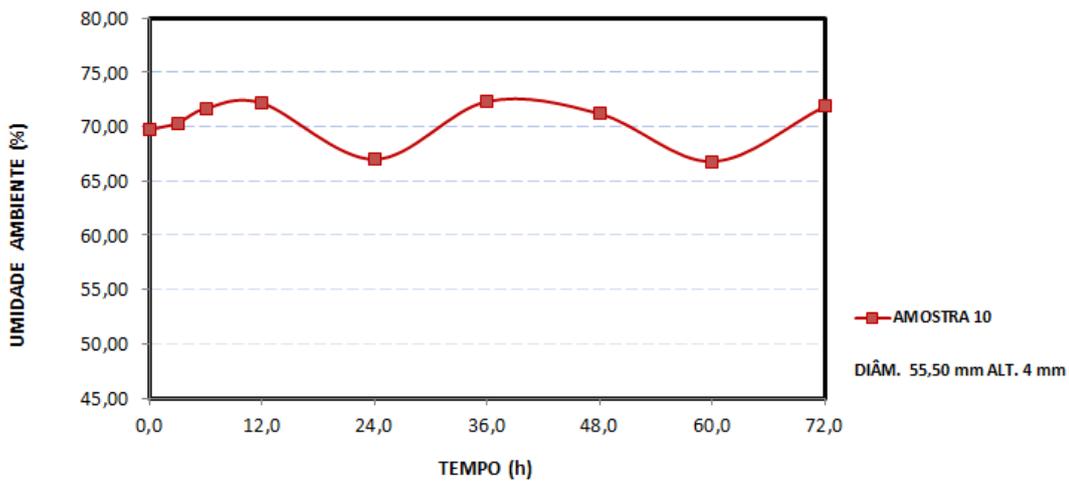
INTERVALO TEMPO (h)	PESO PLACA PÉTRI (g)	UMIDADE AMBIENTE (%)	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	PESO AMOSTRA (g)	VARIAÇÃO UMID. DO SOLO
0,0	20,0	69,7	23,6	31,0	0,00%
3,0		70,3	24,1	31,0	0,00%
6,0		71,7	24,1	30,0	10,00%
12,0		72,2	23,9	30,0	10,00%
24,0		67,0	23,4	29,0	22,22%
36,0		72,3	24,1	28,0	37,50%
48,0		71,2	24,0	26,0	83,33%
60,0		66,8	23,2	25,0	120,00%
72,0		71,9	24,1	25,0	120,00%

Figura 60 – Evolução do peso com o tempo da amostra 10



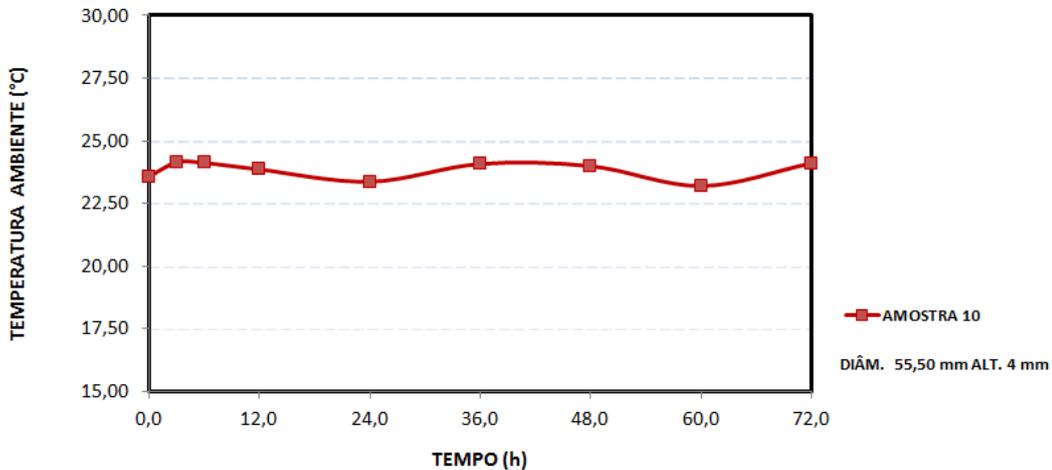
Fonte 62: A autora

Figura 61 - Evolução da umidade ambiente com o tempo da amostra 10



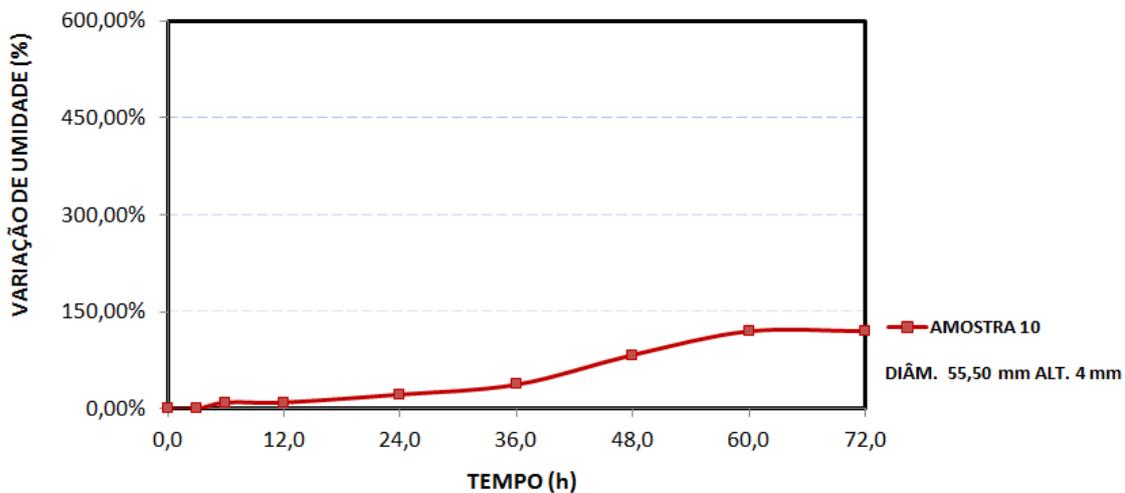
Fonte 63: A autora

Figura 62 - Evolução da temperatura ambiente com o tempo da amostra 10



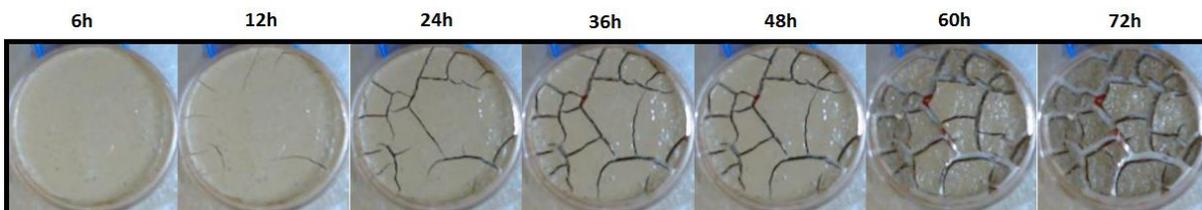
Fonte 64: A autora

Figura 63- Evolução da variação da umidade do solo com o tempo da amostra 10



Fonte 65: A autora

Figura 64 – Sequência de imagens referentes à amostra 10



Fonte 66: A autora

Foi verificado que a amostra começou a apresentar fissuras após 6 horas e 27 minutos do início do ensaio. Durante o período de registro da amostra, seu peso variou de 31,0g a 25,0g. Ao longo do ensaio, houve uma alteração mínima entre a temperatura ambiente e umidade do ar, em relação às outras amostras, provavelmente devido ao período do ensaio ter sido realizado na primeira semana da época de inverno. Os registros referentes à temperatura e umidade do ambiente foram os seguintes valores: temperatura mínima de 23,2°C e máxima de 24,1°C e umidade mínima 66,8% e máxima de 72,3%. Após a conclusão das 72 horas de registros, a variação da umidade do solo foi de 120,0% em relação ao peso da amostra.

#### **4.3.3 Amostra 13 (Diâmetro 95,30 mm e altura de 4,0 mm)**

Durante o período de 25/07/17 à 28/07/17 foi realizado o ensaio da amostra 13, cujos dados estão resumidos na Tabela 5. Após 5 horas e 57 minutos, do início do ensaio, surgiram às primeiras fissuras originadas das bordas da placa de petri, conforme Figura 65. A Figura 66 mostra a evolução da perda de peso da amostra com tempo. Os dados do laboratório estão representados na Figura 67 e a Figura 68 que apresentam a evolução com o tempo da umidade ambiente e da temperatura, respectivamente.

A evolução da variação da umidade do solo com o tempo está representada na Figura 69. Na Figura 70 é exibida a sequência das imagens da superfície da amostra 13 para os intervalos de tempo 6, 12, 24, 36, 48, 60 e 72 horas.

Figura 65 - Imagem da fissura primária da amostra 13

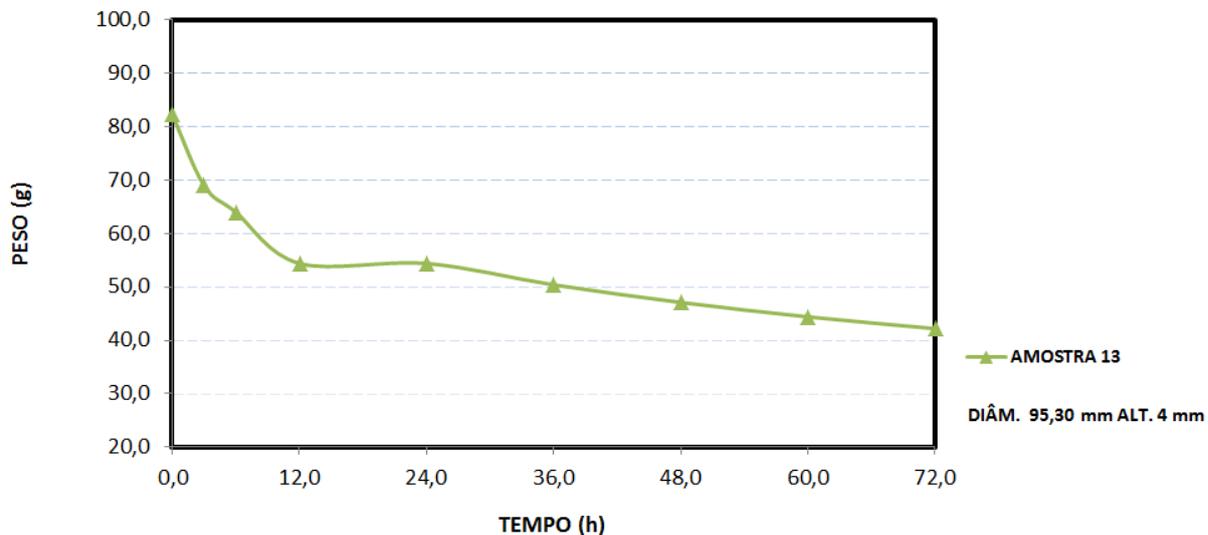


Fonte 67: A autora

Tabela 5 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 13

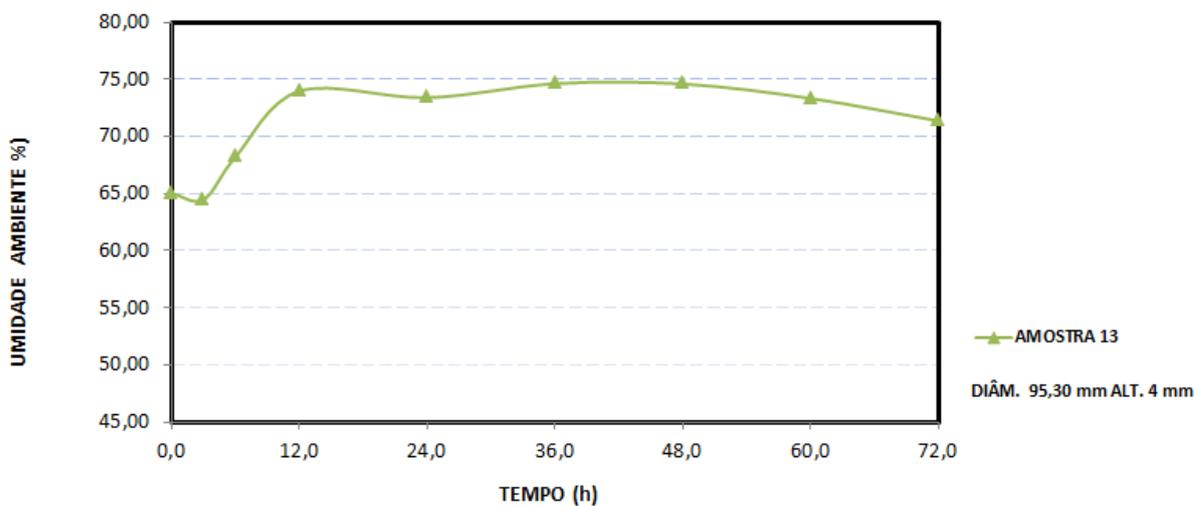
<b>INTERVALO TEMPO (h)</b>	<b>PESO PLACA PÉTRI (g)</b>	<b>UMIDADE AMBIENTE (%)</b>	<b>TEMPERATURA AMBIENTE (°C)</b>	<b>PESO AMOSTRA (g)</b>	<b>VARIAÇÃO UMID. DO SOLO</b>
0,0	35,0	65,0	22,7	82,3	0,00%
3,0		64,5	22,3	69,0	39,12%
6,0		68,2	22,9	64,0	63,10%
7,5		68,1	22,9	62,5	72,00%
9,0		71,5	22,5	61,7	77,15%
12,0		74,0	23,3	54,4	143,81%
24,0		73,4	22,3	54,4	143,81%
36,0		74,6	22,8	50,4	207,14%
48,0		74,6	22,3	47,1	290,91%
60,0		73,3	22,7	44,4	403,19%
72,0		71,4	22,3	42,2	556,94%

Figura 66 – Evolução do peso com o tempo da amostra 13



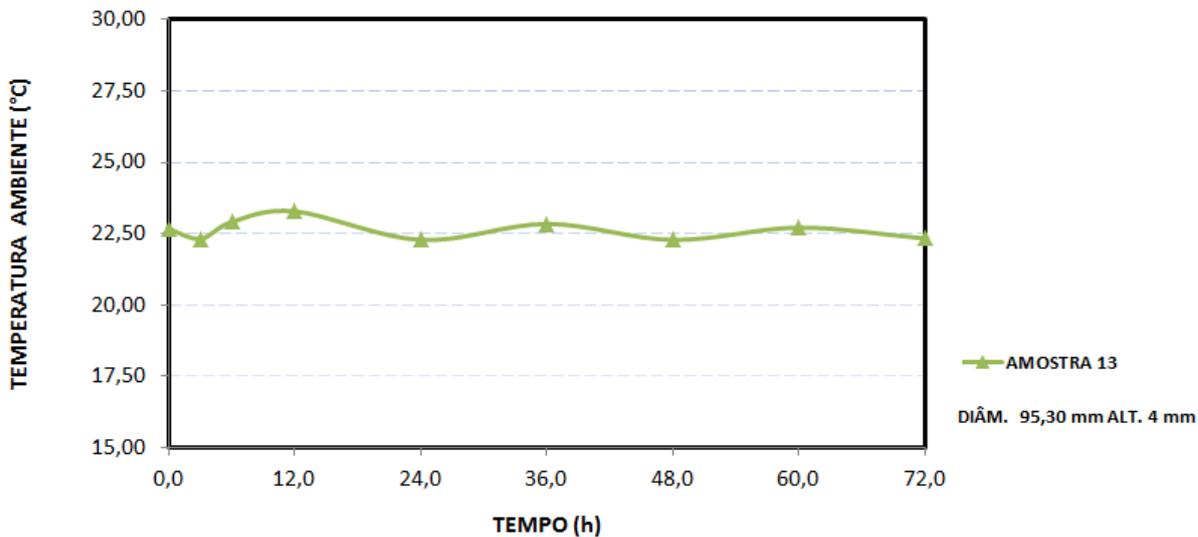
Fonte 68: A autora

Figura 67 - Evolução da umidade ambiente com o tempo da amostra 13



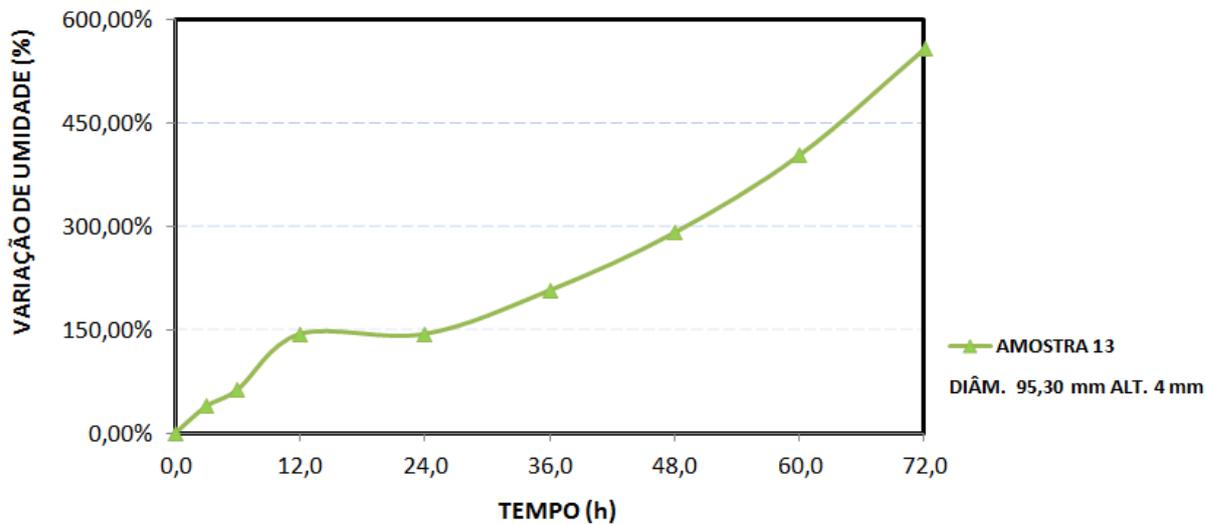
Fonte 69: A autora

Figura 68 - Evolução temperatura ambiente com o tempo da amostra 13



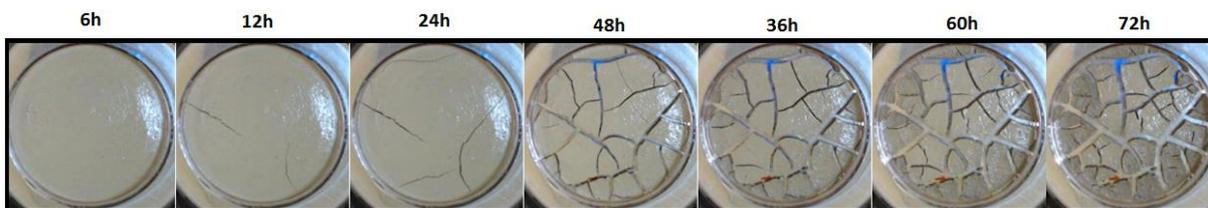
Fonte 70: A autora

Figura 69- Evolução da variação da umidade do solo com o tempo da amostra 13



Fonte 71: A autora

Figura 70 – Sequência de imagens referentes à amostra 13



Fonte 72: A autora

A amostra começou a apresentar fissuras após 5 horas e 57 minutos do início do ensaio. O peso variou de 82,3g a 42,2g ao longo do período de registro do ensaio. A temperatura e umidade do ambiente apresentaram uma variação menor, ao longo do ensaio, possivelmente devido a época do registro dos dados ter ocorrido no inverno. A temperatura ambiente variou entre 22,3°C e de 23,3°C e a umidade mínima variou entre 64,5% e 74,6%. Após 72 horas a variação da umidade do solo foi de 556,94% em relação ao peso da amostra, sendo um valor inexistente na literatura. Desta forma, por apresentar incoerência para o valor da variação da umidade do solo, é possível a presença de falhas ao longo do ensaio desta amostra.

#### **4.3.4 Amostra 15 (Diâmetro 72,20 mm e altura de 3,0 mm)**

Tendo sido iniciados os registros da amostra em 29/09/17 e finalizados em 30/09/17, os dados foram agrupados e organizados na Tabela 6 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 15 Tabela 6. A amostra apresentou sua primeira fissura após 4 horas e 45 minutos do início do ensaio, conforme Figura 71. Assim como as amostras anteriores, a amostra em questão teve suas fissuras sendo originadas das bordas da placa de petri, porém após 4 horas e 51 minutos surgiu uma fissura primária de topo, conforme pode ser visto na Figura 72.

O acompanhamento da evolução da perda de peso da amostra com o tempo está representado na Figura 73. A representação da evolução da umidade ambiente com o tempo está representada na Figura 74 e o andamento da temperatura ambiente com o tempo está representado na Figura 75.

Na Figura 76 está apresentado o aspecto da variação da umidade do solo com o tempo. As imagens da superfície da amostra foram registrada, agrupadas para os intervalos de tempo de 3, 6, 12, 24, 36 horas para o acompanhamento da formação das fissuras e está representada na Figura 77.

Figura 71 - Imagem da fissura primária da amostra 15



Figura 72 - Imagem da fissura primária de topo da amostra 15

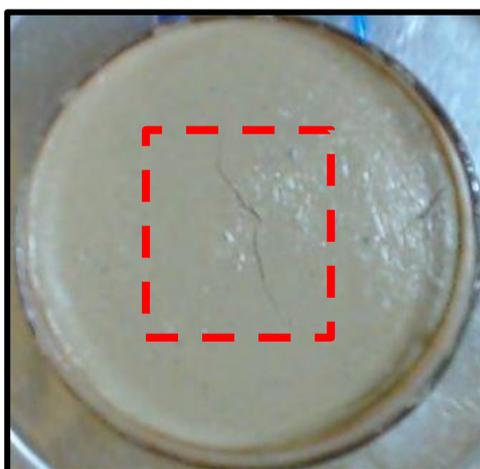
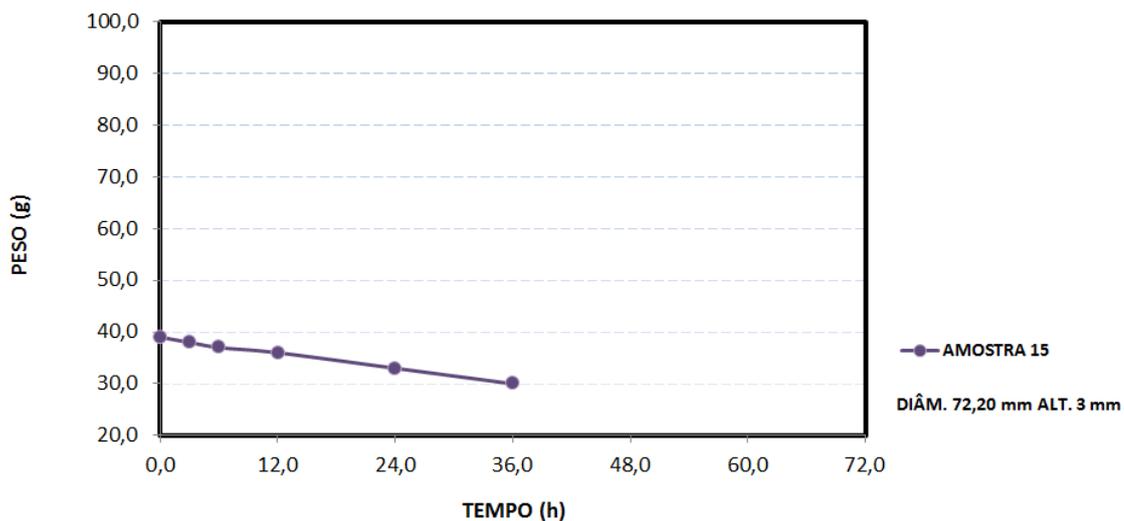


Tabela 6 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 15

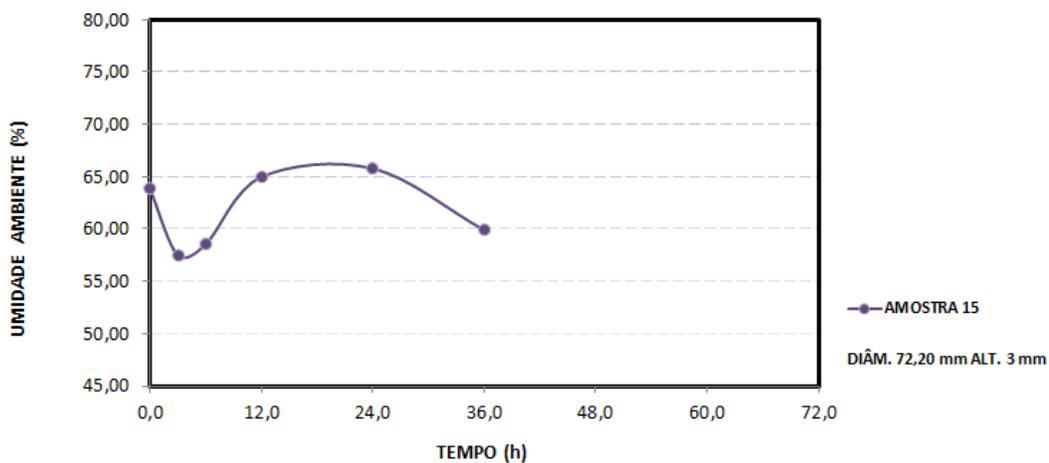
<b>INTERVALO TEMPO (h)</b>	<b>PESO PLACA PÉTRI (g)</b>	<b>UMIDADE AMBIENTE (%)</b>	<b>TEMPERATURA AMBIENTE (°C)</b>	<b>PESO AMOSTRA (g)</b>	<b>VARIAÇÃO UMID. DO SOLO</b>
0,0	20,0	51,0	24,7	39,0	0,00%
3,0		50,5	24,7	38,0	5,56%
6,0		52,3	23,8	37,0	11,76%
12,0		57,6	23,4	36,0	18,75%
24,0		58,7	23,1	33,0	46,15%
36,0		59,4	23,2	30,0	90,00%

Figura 73 – Evolução do peso com o tempo da amostra 15



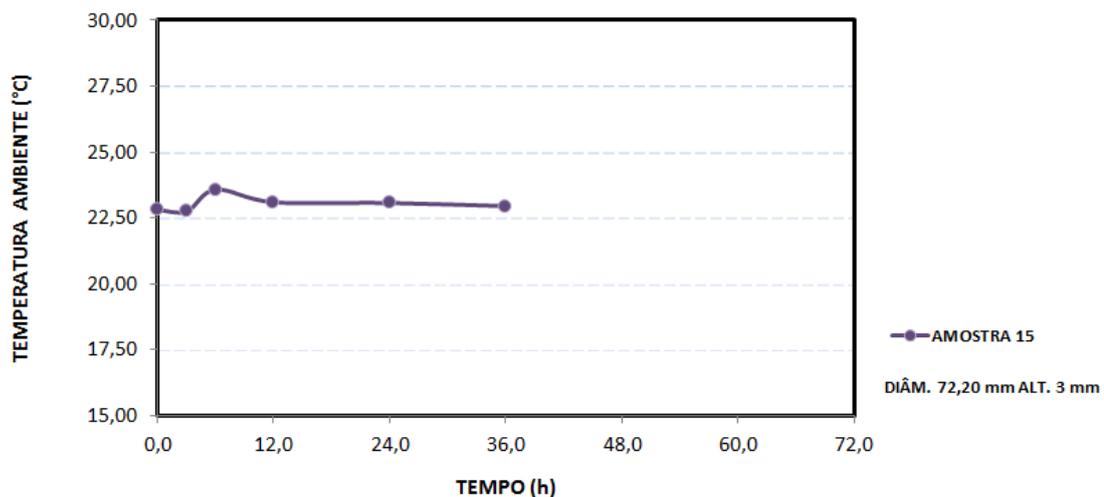
Fonte 73: A autora

Figura 74 – Evolução da umidade ambiente com o tempo da amostra 15



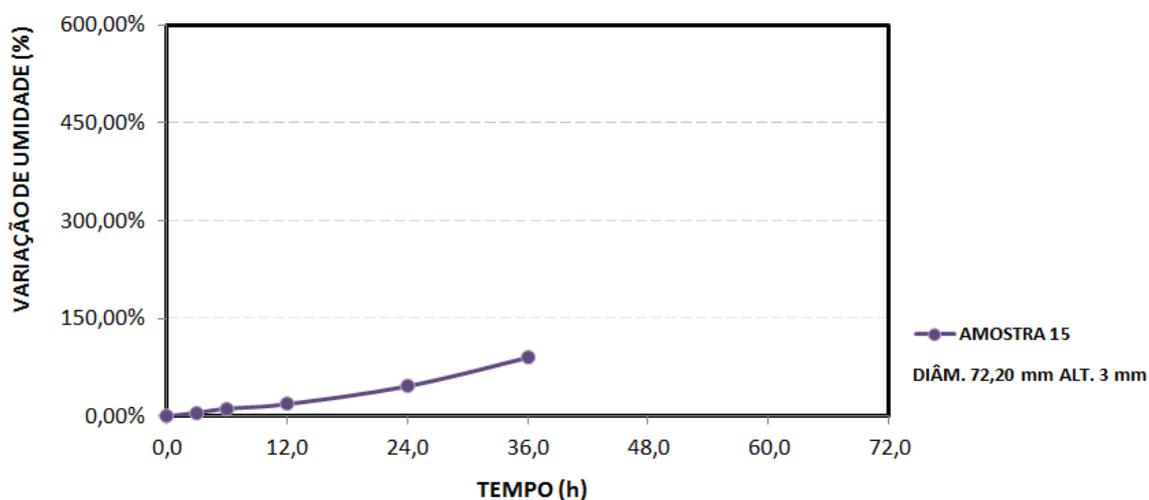
Fonte 74: A autora

Figura 75 - Evolução da temperatura ambiente com o tempo da amostra 15



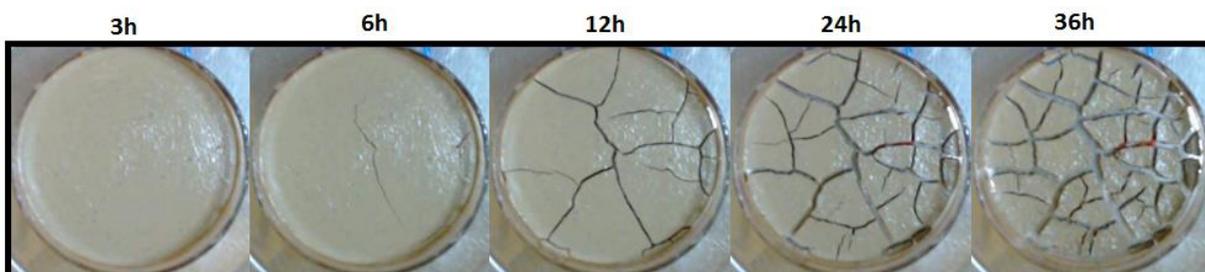
Fonte 75: A autora

Figura 76 – Evolução variação da umidade do solo com o tempo da amostra 15



Fonte 76: A autora

Figura 77 – Sequência de imagens referentes à amostra 15



Fonte 77: A autora

O surgimento da fissura ocorreu após 4 horas e 45 minutos do início dos registros. Variação do peso foi de 39,0g a 30,0g, a temperatura ambiente variou entre 23,1°C e de 24,7°C e a umidade de 50,5% e 59,4%. O registro foi encerrado após 36 horas, com a variação da umidade do solo no valor de 90,0% em relação ao peso da amostra.

#### **4.3.5 Amostra 16 (Diâmetro 55,50 mm e altura de 3,0 mm)**

O período de registro da amostra ocorreu entre os dias 18/10/17 a 21/10/17 e o resumo dos dados consta na Tabela 7. É da borda da placa de pretri que as fendas primárias surgem, sendo a primeira aparição após 3 horas e 51 minutos do início dos registros, ver Figura 78.

Para verificar o andamento da evolução da perda de peso com o tempo foi elaborado o gráfico representado na Figura 79. O gráfico apresentado na Figura 80 exhibe o andamento da umidade ambiente e o gráfico na Figura 81, mostra a evolução da temperatura ambiente ao longo do tempo.

A representação da variação da umidade do solo está exposta na Figura 82. Para os intervalos de tempo de 3, 6, 12, 24, 36 e 48 horas foram separadas as imagens e agrupadas na Figura 83 para exibir a sequência da formação das fissuras na superfície da amostra.

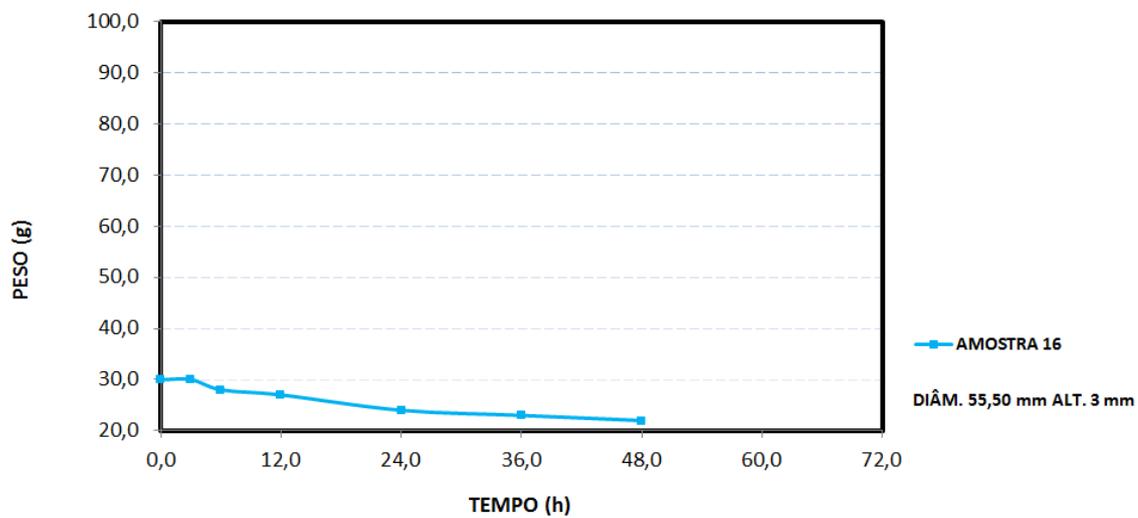
Figura 78 - Imagem da fissura primária da amostra 16



Tabela 7 – Resumo dos dados obtidos a partir da amostra 16

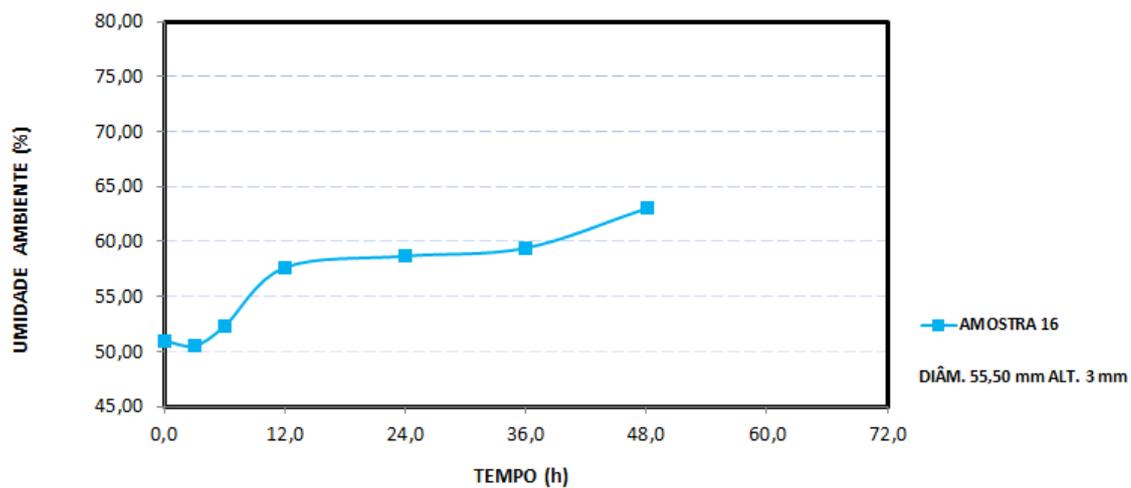
<b>INTERVALO TEMPO (h)</b>	<b>PESO PLACA PÉTRI (g)</b>	<b>UMIDADE AMBIENTE (%)</b>	<b>TEMPERATURA AMBIENTE (°C)</b>	<b>PESO AMOSTRA (g)</b>	<b>VARIAÇÃO UMID. DO SOLO</b>
0,0	18,0	51,0	24,7	30,0	0,00%
3,0		50,5	24,7	30,0	0,00%
6,0		52,3	23,8	28,0	20,00%
12,0		57,6	23,4	27,0	33,33%
24,0		58,7	23,1	24,0	100,00%
36,0		59,4	23,2	23,0	140,00%
48,0		63,0	22,6	22,0	200,00%

Figura 79 - Evolução do peso com o tempo da amostra 16



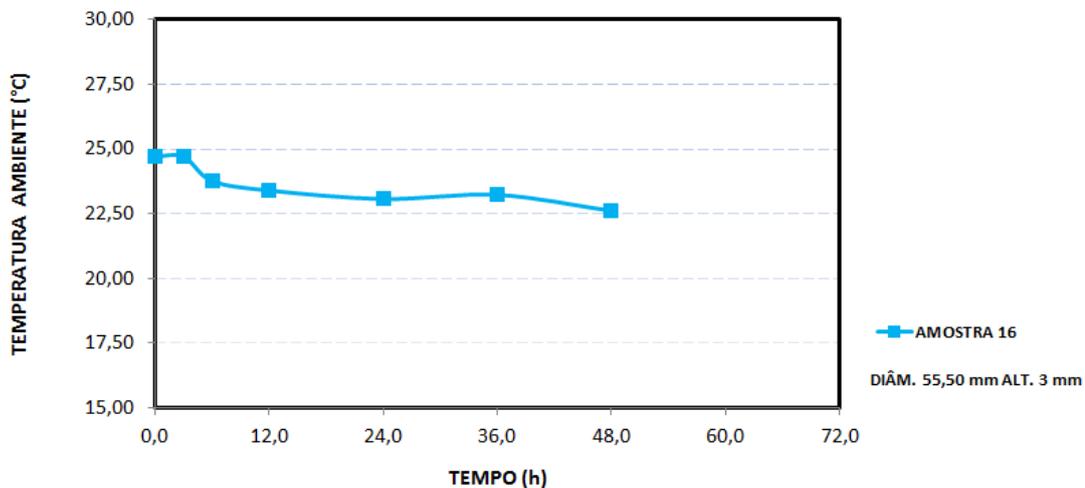
Fonte 78: A autora

Figura 80 – Evolução da umidade ambiente com o tempo da amostra 16



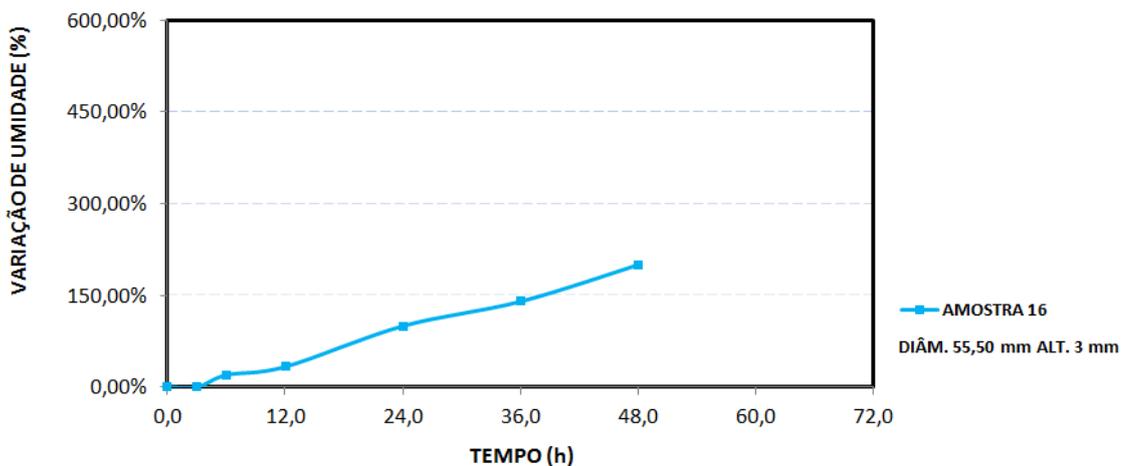
Fonte 79: A autora

Figura 81 - Evolução da temperatura ambiente com o tempo da amostra 16



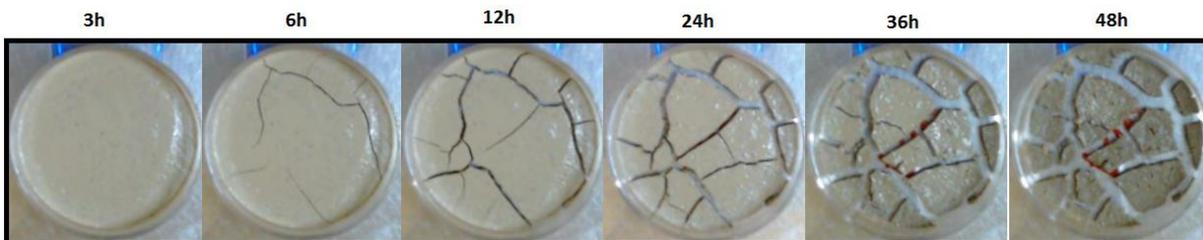
Fonte 80: A autora

Figura 82- Evolução da variação da umidade do solo durante o ensaio da amostra 16



Fonte 81: A autora

Figura 83 – Sequência de imagens referentes à amostra 16



Fonte 82: A autora

Após 3 horas e 51 minutos do início dos registros surgiu a primeira fissura na amostra. Variação do peso foi de 30,0g a 22,0g, a temperatura ambiente variou entre 22,6°C a 24,7°C e a umidade ambiente entre 50,5% a 63,0%. O registro foi encerrado após 48 horas, sendo a variação da umidade do solo ao término no valor de 200,0% em relação ao peso da amostra.

#### 4.4 VARIAÇÃO DE UMIDADE

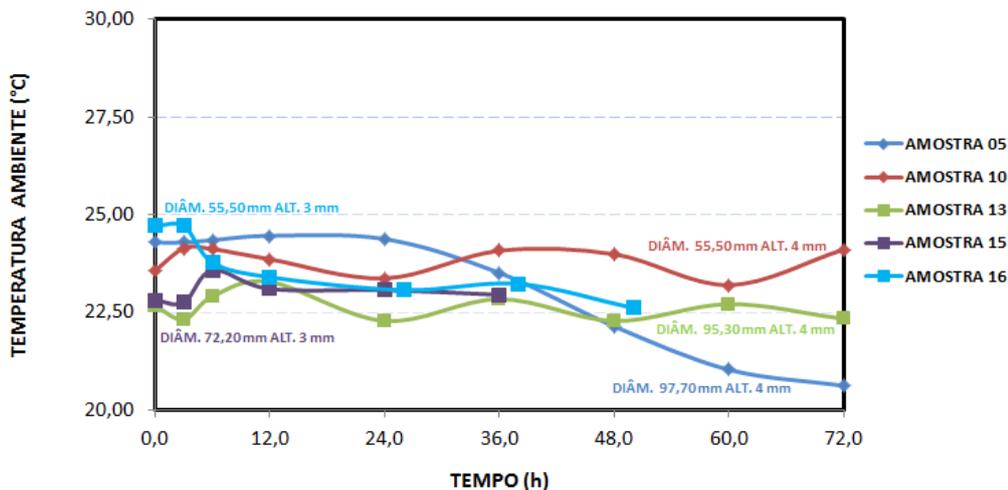
As variações da umidade durante o ressecamento é um parâmetro importante sobre a mecânica de fraturas em solos. O teor de umidade da fissura é considerado como o teor de umidade no momento do aparecimento da primeira fissura (LAKSHMIKANTA, 2009). O monitoramento da variação de umidade do solo durante os ensaios foi alcançado mediante dedução relacionada ao peso das amostras através da célula de carga.

A Figura 84 mostra a variação de umidade do solo ao longo do tempo para todas as amostras analisadas.

A Figura 85 representa a variação de umidade do solo ao longo do tempo para amostras de mesmo diâmetro com alturas diferentes, sendo 3 mm (amostra 16) e 4 mm (amostra 10). Verificou-se uma variação de umidade do solo maior para a amostra com altura menor, de 3 mm (amostra 16), exatamente devido a espessura do solo ser menor. A secagem nos estágios iniciais ocorre predominantemente por meio da superfície do solo. Portanto, na medida em que a altura da amostra em análise é aumentada, o teor de água da amostra também é elevado devido ao maior tempo de permanência da água no solo. A Figura 86 mostra que a temperatura ambiente entre as amostras 10 e 16 foram registradas com valores próximos e não sofreram grandes variações.

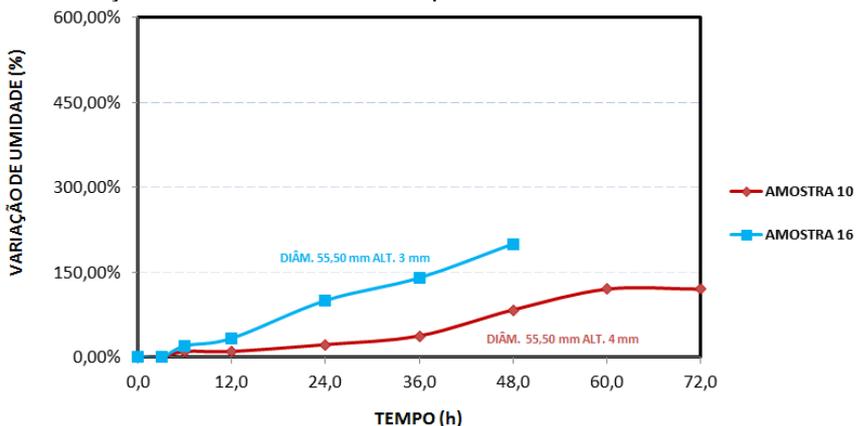
A Figura 87, apresenta a comparação da variação de umidade do solo entre as amostras 5, 10 e 13 de mesma altura de 4 mm e diâmetros diferentes, sendo 97,70 mm, 55,5 mm e 95,3 mm respectivamente. A amostra 13 não será considerada por apresentar falhas durante o processo. Ainda na mesma figura é possível verificar valores próximos de variação de umidade do solo entre as amostras 5 e 10, o que sugere que outras análises geométricas deverão ser verificadas.

Figura 84 – Variação de umidade com tempo entre todas as amostras.



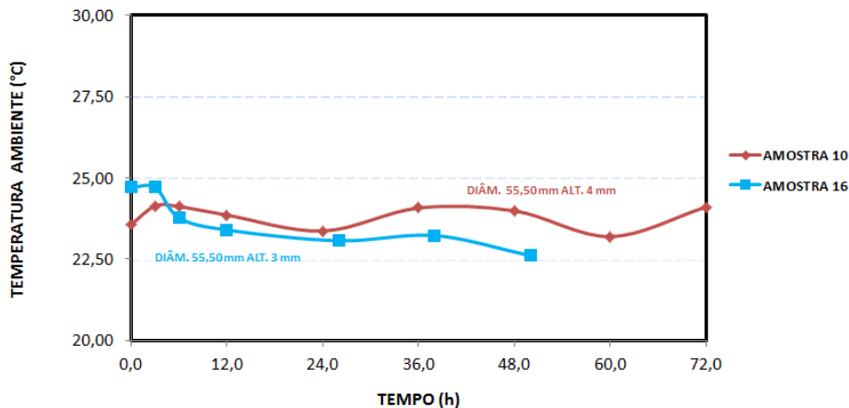
Fonte 83: A autora

Figura 85 – Variação de umidade com o tempo entre amostras de diâmetro de 55,50 mm



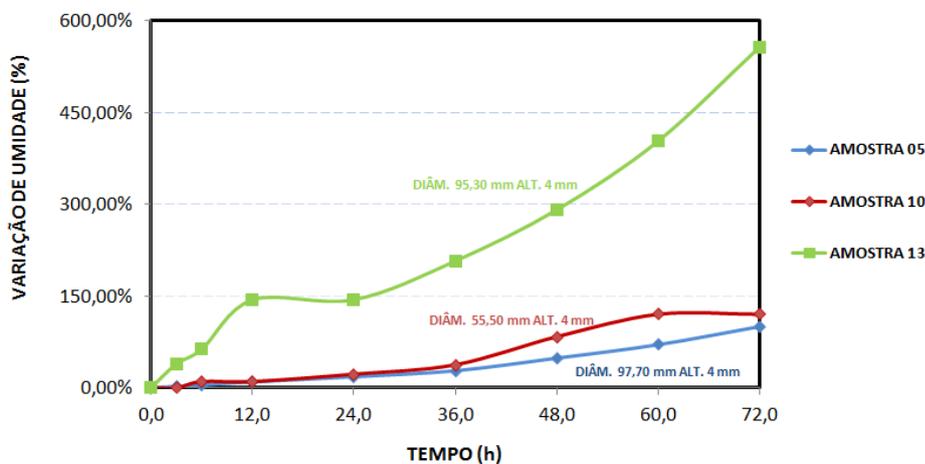
Fonte 84: A autora

Figura 86 - Evolução da temperatura ambiente com o tempo entre amostras de diâmetro de 55,50 mm



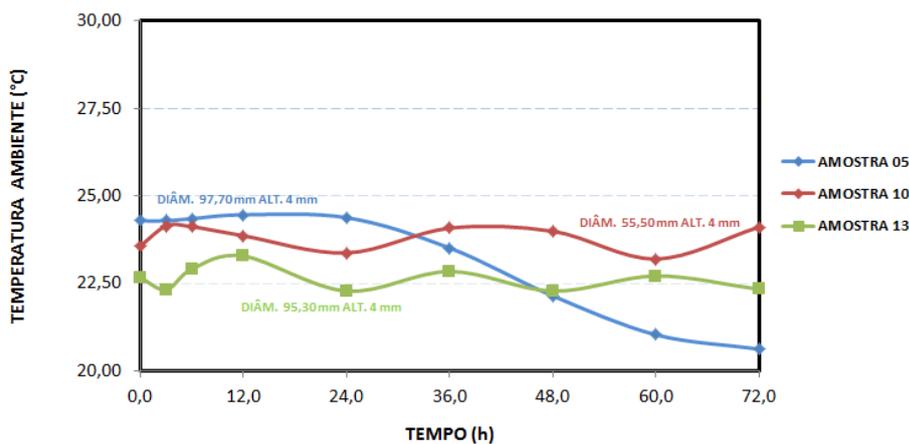
Fonte 85: A autora

Figura 87 – Variação de umidade com o tempo entre amostras de altura de 4 mm



Fonte 86: A autora

Figura 88 - Evolução da temperatura ambiente com o tempo entre amostras de altura de 4 mm



Fonte 87: A autora

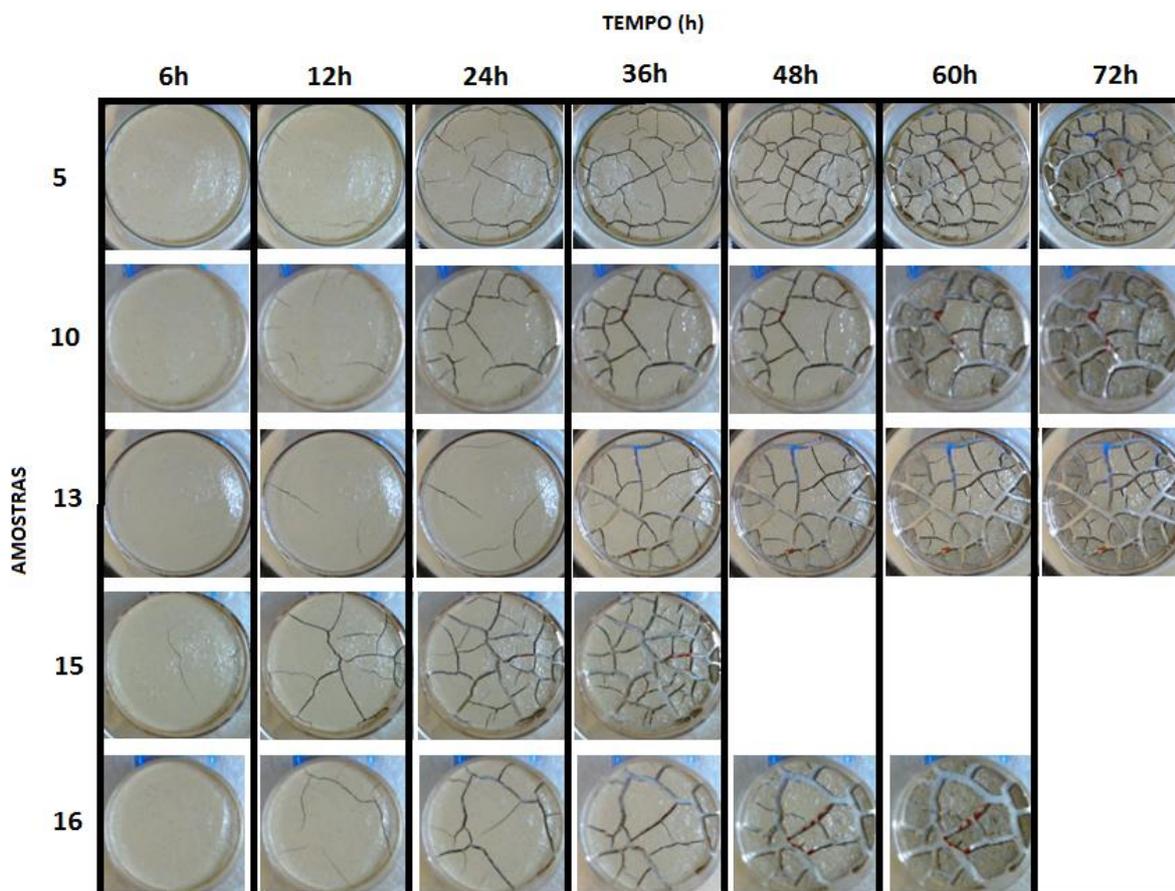
#### 4.5 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Apesar das amostras iniciais de imagens obtidas durante os ensaios não estarem aptas para aplicação da binarização sem que houvesse perda de informações importantes, é possível realizar uma avaliação visual dessas imagens de forma preliminar. Assim, foi realizado uma amostra (amostra 19), com as correções necessárias para aplicação desta metodologia na análise das imagens.

#### 4.5.1 PADRÃO DE FISSURAS

Os testes foram monitorados pela webcam sem interrupção desde seu início. Desta maneira foi possível analisar o padrão de fissuras final em relação às dimensões das amostras. A duração dos testes foi de 72 horas. A Figura 89 mostra o desenvolvimento das fissuras de todas as amostras ensaiadas evidenciando o efeito da altura da amostra sem a aplicação de processamento de imagens. Essa evidência está exposta nas imagens relativas à formação de fissuras das amostras de número 10 e 16 com diâmetros iguais de 55,5 mm e alturas de 4 e 3mm respectivamente. Pelas imagens na Figura 89 é possível constatar que a largura das fendas apresentou um espaçamento de valor maior para a amostra 10 em relação ao apresentado na amostra 16. Na mesma amostra 10, é possível verificar um valor menor de quantidade de células fissuradas e, portanto, células de tamanhos maiores são exibidas para a amostra 10. Esses dois itens eram esperados devido à altura da amostra 10 ser superior à altura da amostra 16. Além disso, na mesma figura, é possível visualizar a hierarquia no padrão de formação das fissuras, onde é constatado o início das fissuras primárias e posteriormente as fissuras secundárias identificadas nas amostras 10, 13, 15 e 16.

Figura 89 – Imagens de todas as amostras de acordo com o intervalo de tempo



Fonte 88: A autora

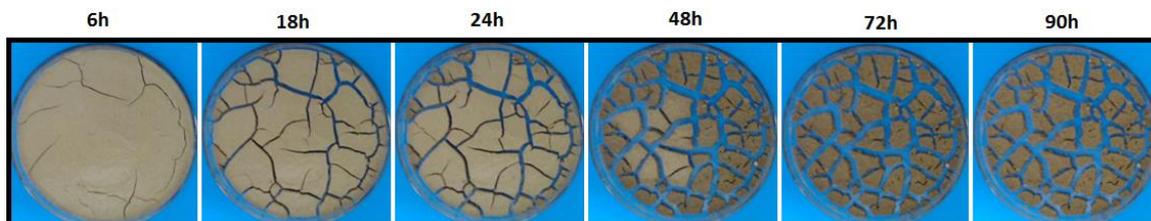
#### 4.5.2 OBTENÇÃO DOS DADOS GEOMÉTRICOS

A amostra 19 foi elaborada com diâmetro de 95,3mm e altura de 4mm .As imagens estão representadas na Figura 90 conforme os intervalos de tempo determinados para obtenção dos parâmetros. Tais imagens receberam tratamento e foram aplicadas ao método da binarização nas cores preto e branco, conforme a Figura 91 e a Figura 92. A evolução das fissuras foi acompanhada pelas mesmas imagens selecionadas e a partir delas foram determinados a quantidade de células fissuradas, comprimento da abertura das fendas, área fissurada, área total da amostra e CIF, como mostra a Tabela 8.

As imagens originais já configuram uma divergência de cores entre o estado inicial e final da secagem da amostra. Também é perceptível visualmente, através

da sequencia de imagens que as fissuras primárias surgem a partir das bordas da placa de petri.

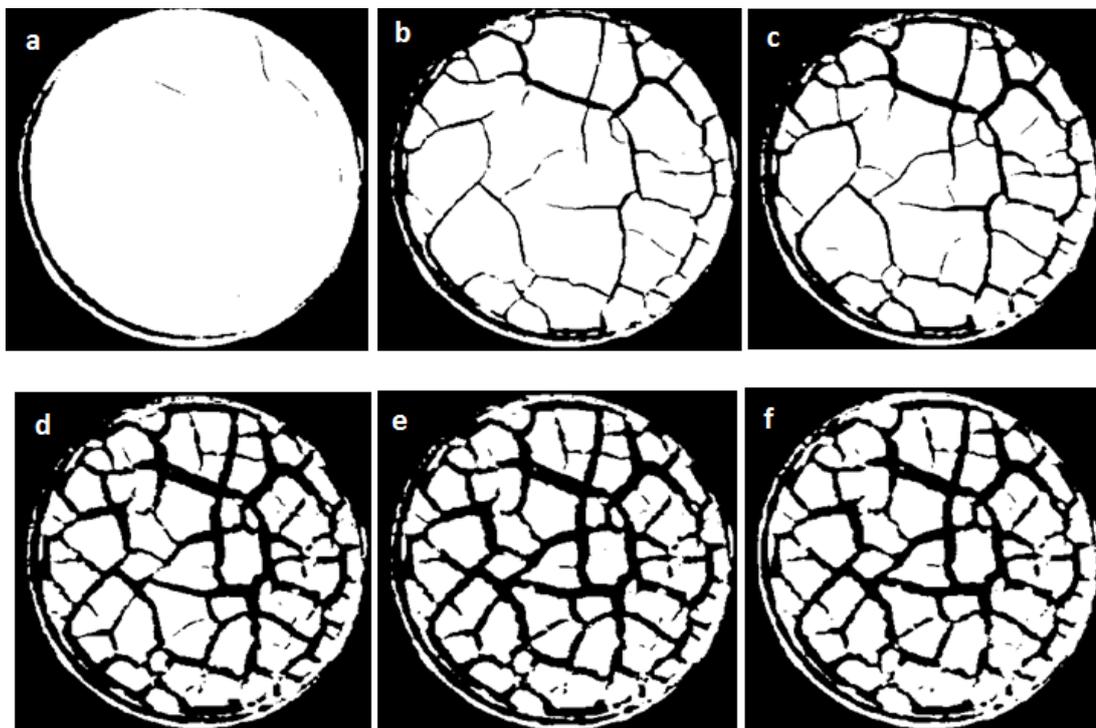
Figura 90 – Sequencia de imagens da amostra 19



Fonte 89: A autora

Para a determinação dos parâmetros necessários, após aplicar a binarização, os resultados são contabilizados através das imagens em preto e branco, onde o branco evidencia o objeto a ser avaliado. A Figura 91 apresenta os resultados das imagens para o cálculo das células (branco) e área da superfície dessas.

Figura 91 – Resultado de imagens binarizadas: a) 6h; b) 18h; c) 24h; d)48h; e) 72h e f) 90h

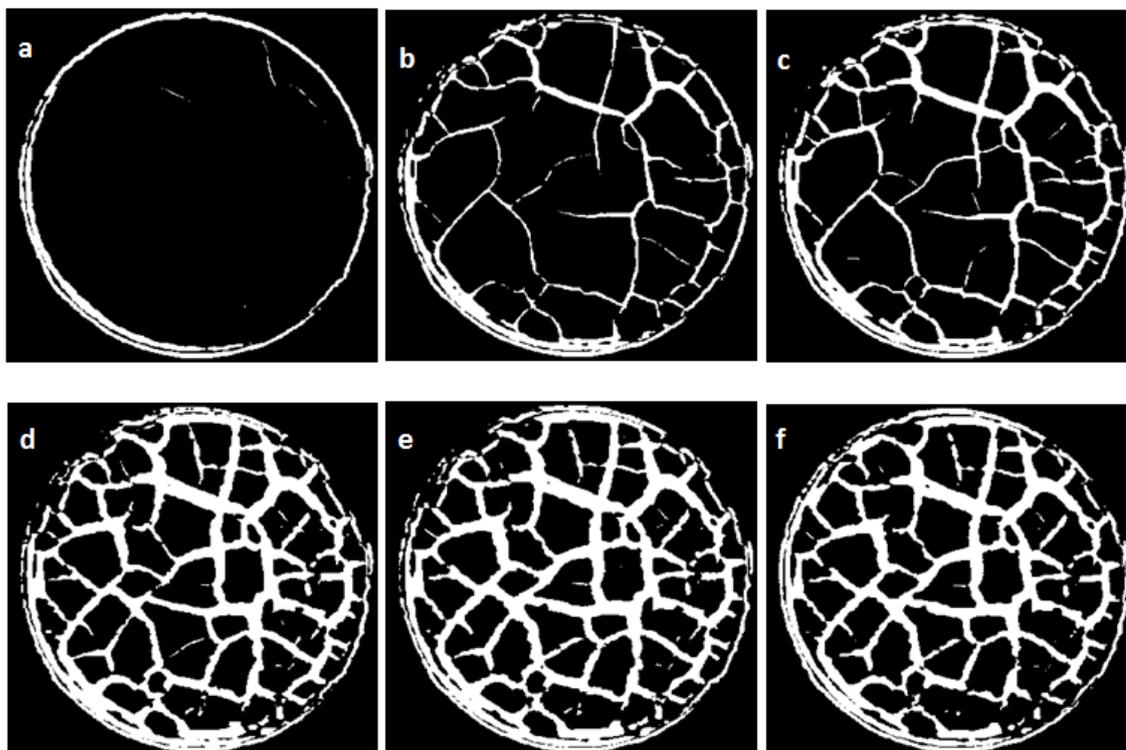


Fonte 90: A autora

A Figura 92 refere-se ao resultado das imagens para o cálculo de área fissurada. Essa imagem permite avaliar o processo de fissuração desde seu início

até finalização. Os dados contabilizados após aplicação do método estão resumidos na Tabela 8.

Figura 92 – Resultado de imagens da binarizadas: a) 6h; b) 18h; c) 24h; d)48h; e) 72h e f) 90h



Fonte 91: A autora

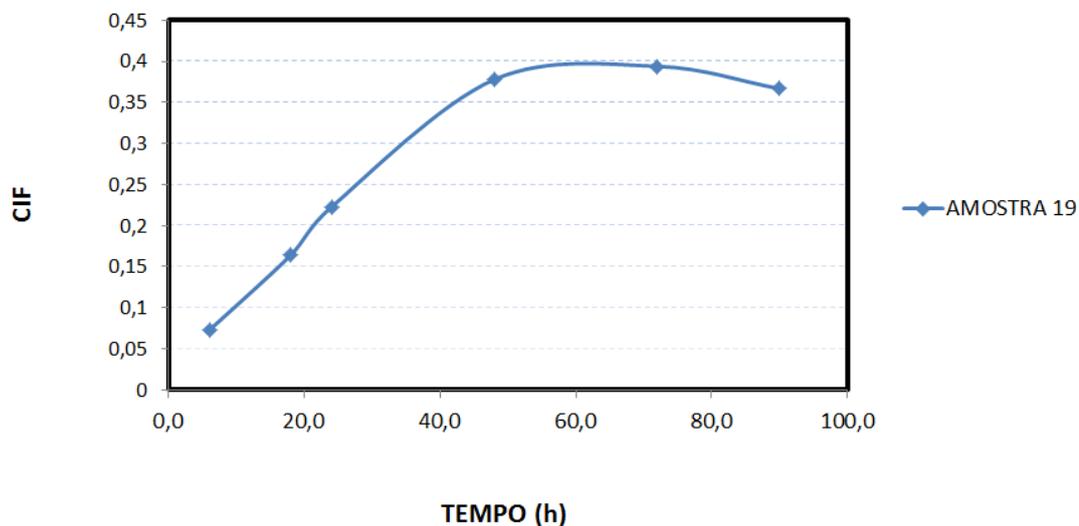
Tabela 8 – Resumo dos parâmetros obtidos através das imagens

TEMPO (h)	QTE DE CÉLULAS FISSURADAS	ÁREA DE CÉLULAS FISSURADAS (PIXELS)	ÁREA DE FISSURAS (PIXELS)	ABERTURA DAS FENDAS (PIXELS)	ÁREA CIRC(PIXEL)	CIF = AF/A. TOTAL
6,0	2,0	107.964,0	7.858,0	5	108.048,19	0,07
18,0	27,0	94.257,0	17.728,0	4	108.048,19	0,16
24,0	31,0	85.257,0	24.041,0	5	108.048,19	0,22
48,0	29,0	47.753,0	40.617,0	5	107.466,50	0,38
72,0	25,0	43.246,0	42.106,0	4	106.886,39	0,39
90,0	32,0	76.218,0	39.632,0	5	108.048,19	0,37

Fonte 92: A autora

Através do acompanhamento da variação do CIF ao longo do tempo, que é a relação entre área fissurada pela área total de amostra, é possível verificar o aumento das fissuras em relação à área total de amostra, conforme Figura 93. É verificado um crescimento da quantidade de fissuras no início do tempo até um valor máximo e posteriormente estabiliza que é a situação em que ocorre um equilíbrio entre a umidade do solo e o ambiente.

Figura 93 – Relação do CIF ao longo do tempo



Fonte 93: A autora

## 5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões resultantes deste trabalho que teve principal objetivo analisar o processo de formação e propagação das fissuras dos solos, permitindo que a amostra de solo secasse ao ar, e posteriormente verificar as consequências desses efeitos nas propriedades do solo. Os resultados experimentais, ainda que preliminares, dão subsídios para acrescentar maiores conhecimentos no fenômeno de formação e propagação das fissuras.

Este trabalho foi desenvolvido em três etapas, sendo a primeira o desenvolvimento do equipamento, montagem e testes do equipamento a ser confeccionado para promover as análises, a segunda etapa consistiu na seleção dos materiais a serem utilizados na pesquisa e a terceira etapa foi aplicada uma metodologia para avaliação da fissuração por secagem ao ar através de processamento de imagens.

A partir dos dados obtidos pelos sensores de temperatura e umidade do ar, e o peso da amostra registrado através de célula de carga verificou-se a variação da umidade do solo ao longo do tempo para todas as amostras analisadas. Amostras de mesma área de superfície e alturas diferentes permitiu a confirmação de que a variação de umidade do solo é menor para a amostra de maior altura devido ao maior percurso que a água precisa se deslocar para chegar à superfície.

A partir das imagens monitoradas da superfície das amostras foi possível analisar o padrão de fissuras final em relação às dimensões das amostras. Ficou evidente o efeito da altura da amostra sem a aplicação de processamento de imagens. Amostras de mesma área de superfície e alturas diferentes permitiu a confirmação de que maiores espaçamentos entre fendas, menor quantidade de células fissuradas e maiores áreas de superfície para as células fissuradas são apresentados para camadas de solo com maiores alturas. Além disso, por meio das imagens foi possível constatar o início das fissuras primárias e posteriormente as fissuras secundárias.

Foi utilizada uma metodologia de processamento de imagens digitais para aquisição de dados que permitissem o cálculo das informações geométricas dos solos após secagem ao ar. Através da aplicação algoritmos computacionais utilizando as ferramentas de segmentação por binarização das imagens foi possível obter o comprimento da abertura das fendas, quantidade e áreas de superfície de

células fissuradas, área total da amostra e área fissurada. Com essas informações que foram obtidas para intervalos de tempo distintos, foi possível verificar a evolução do CIF (*Crack Intensity Factor*) com o tempo e acompanhar o processo de desenvolvimento das fissuras.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a manutenção e correção da falha elétrica entre a célula e o seu conversor de sinais do sistema de aquisição de dados, bem como realizar calibração de todo o conjunto;
- Realizar mais ensaios, com repetição de tamanhos, para avaliar melhor os resultados obtidos e ampliar a discussão do tema;
- Ampliar os estudos por meio de ensaios utilizando outros tipos de solo e misturas para verificar o comportamento e seus efeitos;
- Aprimorar a estrutura do equipamento a fim de obter outros parâmetros do solo, como por exemplo a sucção, colocando para isso mais sensores.
- Aprimorar a avaliação dos ensaios, após secagem, através do uso de equipamentos de ultrassom, raios x ou tomografia computadorizada.

## REFERÊNCIAS

- ABNT (1988). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1988). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, RJ.
- Albrecht, B. A., Benson, C. H. (2001). Effect of desiccation on compacted natural clays. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1, 67–75
- Amorim, S. F. (2004). Tese de doutorado. Contribuição à Cartas Geotécnicas: Sistema de Informações Geográficas dos solos expansivos e colapsíveis do estado de Pernambuco (SIGSEC-PE). Recife, Pernambuco, Brasil: Universidade Federal de Pernambuco.
- Ayala, J. F., Gijon, M. F., Mozo, C. O. & Rodriguez J. L. S. (1986). Mapa Previsor de Riesgos por Expansividad de Argillas En España a Escala 1:1.000.000. Série: Geologia Ambiental. Instituto Geologico y Minero de España. Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Publicas. España, Madrid.
- Barbosa, V. (2013). Dissertação de mestrado. Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de Cabrobó, potencialmente expansivo, estabilizado com cal. Recife, Pernambuco, Brasil: Universidade Federal de Pernambuco.
- Bohn, S. (2004). Hierarchical crack patterns: a comparison with two dimensional soap foams. *Colloids and surfaces A*, 263: 46-51.
- Bohn, S., Douady, S., And Couder, Y. (2005a). Four sided domains in hierarchical space dividing patterns. *Physical Review Letters*, 94: 054503: 1-4.
- Bohn, S., Pauchard, L., And Couder, Y. (2005b). Hierarchical crack pattern as formed by successive domain divisions. I. temporal and geometrical hierarchy. *Physical Review E*, 71: 046214: 1-7.
- Bohn, S., Platkiewicz, J., Andreotti, B., Adda-Bedia, M., And Couder, Y. (2005c). Hierarchical crack pattern as formed by successive domain divisions. ii. Form disordered to deterministic behavior. *Physical Review E*, 71:046215: 1-7.
- Boscov, M. E. G. (2008). *Geotecnia Ambiental*. Oficina de Textos, São Paulo, SP, pp. 248.
- Camapum de Carvalho, Gitirana Jr., G. F. N, Carvalho, E. T. L. (2012). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Brasília: Universidade de Brasília, pp. 173.

Camapum de Carvalho, J., Gitirana JR., G. F. N., Machado, S. M., Mascarenhas, M. M. A., Silva Filho, F. C. (2015). Solos Não Saturados no Contexto Geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, pp. 181-184.

Carvalho, J. C., JUNIOR, G. F. N. G., Carvalho, E. T. L. (2012). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Volume 4. Brasília: Editora: Programa de Pós-graduação em geotcnia, pp. 173-174.

Chen, F. H. (1965). The use of piers to prevent the uplifting of lightly loaded structures founded on expansives soul. Proc. Eng. Effects of Moistures Changes in Soils, Int. Res. Eng. Conf. Expansive Clay Soils. Supplementing the Symposium in Print, Texas, A & M Press., pp. 152-171.

Corte, A. and Higashi, A. (1960). Experimental research on desiccation cracks in soil. U. S. Army Snow Ice and Premafrost Research Establishment, Report No. 66:Corps of Engineers Wilmette Illinois U. S. A.

Costa, C. d. (2015). Tese de doutorado. Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Universidade de Brasília.

Cuadrado, C. A. (2013). Detección de grietas por desecación en arcillas mediante GPR. Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, pp. 133.

Daniel, D.E.; Wu, Y. K. (1993). Compacted clay liners and cover for arid sites. In:Journal of Geotechnical Engineering, 119 (2): pp. 223-237.

, A.(2001). Visión por computador Fundamentos y métodos. Pearson Prentice Hall, Madrid, España, pp. 303.

Fang, H. Y. (1997). Introduction to Environmental Geotechnology, volume 14 of New Directions in Civil Engineering. CRC Press. (document), 2.1.

Ferreira, S. R. M. (1995). Tese de doutorado. Colapso e expansão em solos naturais não saturados devido à inundação. Rio de Janeiro, VI, 381 (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil).

Filho, O. M. & Neto, H. V. (1999). Processo digital de imagens. Rio de Janeiro, Brasil. Brasport, pp71-148.

Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. John-Wiley and Sons, New York, pp. 486.

Frookes, P. G. and Denness, B. (1969). Observational studies of fissure paterrens in cretaceous sediments of south-east England. Geotechnique, 19:pp. 453–477.

Gazziro, M. (2013). Quadro Segmentação de Imagens: Método de Otsu. USP, São Carlos, Processamento de Imagens. Disponível em:

<[http://wiki.icmc.usp.br/images/b/bb/Otsu\\_e\\_derivadas.pdf](http://wiki.icmc.usp.br/images/b/bb/Otsu_e_derivadas.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2016.

Gonzalez, Rafael C.; Woods, Richard E. (2007). *Processamento de Imagens Digitais*. Edgard Blücher. 1. ed. São Paulo, Brasil, pp. 509.

Gusmão Filho, A. D., Gusmão, A. D., Oliveira, J. T., Maia, G. B. (2005). *Geotecnia no Nordeste*. 2 ed. Recife, Pernambuco, Brasil. Editora Universitária, pp. 397-418.

Holtz, W. G. & Gibbs, H. J. (1956). Engineering properties of expansive clays. *Transact. ASCE*, 121, pp. 641-677.

Horta da Silva, J. A. (1975). Solos expansivos – Comportamento, identificação, quantificação da instabilidade volumétrica e projetos de fundações (Parte I). *Geotecnia*, nº 13, pp. 29-63.

Jennings, J. E. (1973). The Engineering significance of construction on dry subsoils. *Proceedings of the Third International Conference on Expansive Soils*, Haifa, Vo. II, pp. 27-32.

Khire, M. V., Benson, C. H., & Bosscher, P. J. (1997). Water balance modeling of earthen landfill covers. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 123(8), pp. 744–754.

Lakshmikantha, M. R. (2009). Tese de doutorado. Experimental and theoretical analysis of cracking in drying soils. Barcelona, Espanha: Universitat Politècnica de Catalunya.

Li, J.H., Zhang, L.M. (2011). Study of desiccation crack initiation and development at ground surface. *Engineering Geology*, 123(21): pp. 347–358.

Li, X., Wang, Y. Yu, J., Wang, Y. (2012). Unsaturated expansive soil fissure characteristics combined with engineering behaviors. *Journal of Central South University*, Changsha, China. Caderno pp. 3564–3571.

Lopera, J. E. (2010). Dissertação de mestrado. Modelagem empírica da transferência gôticula projetada em processos de soldagem gwaw baseada em técnicas de processamento de imagens digitais e superfícies de resposta. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Universidade de Brasília.

Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*. John Willey & Sons, Inc., Segunda edição, pp. 437.

Miller, C. J.; Mi, H., Yesiller, N. (1998). Experimental analysis of desiccation crack propagation in clay liners. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (3), pp. 677–686.

Moreira, A. C. (2011). Método para segmentação binária para imagens em tons de cinza. LFNATEC-Publicação Técnica do Laboratório de Física Nuclear. Universidade Estadual de Londrina, Paraná, pp. 1-8.

Morris, P. H., Graham, J., and Williams, D. J. (1994). Crack depths in drying clays using fracture mechanics. *Fracture Mechanics Applied to Geotechnical Engineering ASCE Geotechnical Special Publication*, pp. 40–53.

Nahlawi, H., & Kodikara, J. K. (2006). Laboratory experiments on desiccation cracking of thin soil layers. *Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 1641-1664.

Nelson, J. D. & e Miller, D. J. (1992). *Expansive soils – Problems and practice in foundation and pavement engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 259.

Pereira, E. M. (2004). Tese de doutorado. Estudo do comportamento à expansão de materiais sedimentares da Formação Guabirotuba em ensaios com sucção controlada. São Carlos, São Paulo, Brasil. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Porto, T. G. A. (1984). Dissertação Mestrado. Infra-estrutura da via férrea. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, pp. 122.

Prat, P. C., Ledesma, A., and Cabeza, L. (2002). Drying and cracking of soils: numerical modeling. In 8th Int. Conference on Numerical Models in Geomechanics NUMOG VIII, Rome, Italy, pp. 705–711.

Ravina, I. (1983). The influence of vegetation on moisture and volume changes. *Geotechnique*, 33-2:151–157.

Restrepo, D. A. (2015). Dissertação de mestrado. Análise do processo de ressecamento em misturas de resíduos de construção civil (rcc) e bentonita para aplicação em camadas de cobertura de aterros em resíduos sólidos. Universidade de Brasília.

Seed H. B., WoodWard, R. J., Jr., & Lundgreen, R. (1962). Prediction of swelling potential for compacted clays. *Journal Soil. Mech. Found. Div., Am. Soc. Civil Eng.*, 88, SM3, pp. 53-87.

Silva, T. J. (2017). Dissertação de mestrado. Avaliação do impacto de fissuras na condutividade hidráulica em aplicações de camada fina por meio de análises de imagens. Brasília, Distrito Federal, Brasil: Universidade de Brasília.

Souza, T., & Suzete, C. (2007). Estudo de técnicas de realce de imagens digitais e suas aplicações. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Nordeste de Educação Tecnológica.

Tang, C., Shi, B., Liu, C., Suo, W., Gao, L. (2011a). Experimental characterization of shrinkage and desiccation cracking in thin clay layer. In: *Applied Clay Science*, 52, p. 69–77.

Tang, C. J., Cui, Y.J., Shi, B., Tang, A.M., Liu, C. (2011b). Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting-drying cycles. *Geoderma*, 166, pp. 111-118.

Teixeira, M. M. C. A. D. (2006). Dissertação de mestrado. Modelagem Hidro-Mecânica dos Solos Colapsíveis de Petrolândia. Recife, Pernambuco, Brasil: Universidade Federal de Pernambuco.

Toga, K. B. & Alaca, B. E. (2006). Junction formation during desiccation cracking. *Physical Review E (Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics)*, 74(2):021405. (document), 8.18, 8.4.1.

Towner, G. D. (1987). The mechanics of cracking of drying clay. *J.agric. Engrg. Res*, 36:115–124.

Vallejo, L. E. (1994). Application of fracture mechanics to soils: An overview. *Fracture Mechanics Applied to Geotechnical Engineering ASCE Geotechnical Special Publication*, 43:1–20.

Wilson, G.W., Fredlund, D.G., Barbour, S.L. (1997). The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 34, pp. 145–155.

## ANEXO A – CÓDIGO DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS

```

function opc = main()
    %imgori = imread('I_23_43_31__22987.jpg');
    imgori = imread('I_17_37_46__01389.jpg');
    img = imgori(:,:,1);
    [alt,larg] = size(img);

    bin = im2bw(img, graythresh(uint8(img)));
    imwrite(bin, 'binaria.bmp');
    dil = imdilate(bin, ones(10,10));
    imwrite(dil, 'dilatada.bmp');
    label = bwlabel(dil);
    final = zeros(alt,larg);
    tam = max(max(label));
    %sel = label == 1;
    %final(sel) = 255;
    for i = 1: tam
        sel = label == i;
        % imshow(sel)
        soma = sum(sum(sel));
        if(soma > 40000 )
            final(sel) = 255;
        else
            final(sel) = 0;
        end
    end

    % encontra as bordas para recortar a imagem
    pos = sum(final,1);
    j = larg;
    inicioX =1;
    fimX = larg;
    for i=1:larg
        if( pos(i) > 100 && inicioX == 0)
            inicioX = i;
        end
        if( pos(j) > 100 && fimX == larg)
            fimX = j;
        end
        j=j-1;
        if(inicioX ~= 1 && fimX ~= larg)
            break;
        end
    end
    pos = sum(final,2);

    j = alt;
    inicioY =1;
    fimY = alt;
    for i=1:alt
        if( pos(i) > 100 && inicioY == 1)
            inicioY = i;
        end
        if( pos(j) > 100 && fimY == alt)
            fimY = j;
        end
        j=j-1;
        if(inicioY ~= 1 && fimY ~= alt)
            break;
        end
    end
end

```

```

        end
    end

    %analise dos rotulos
    %img2 = img(inicioY:fimY, inicioX:fimX);
    bin1 = bin(inicioY:fimY, inicioX:fimX);
    imwrite(bin1, 'bin1.bmp');
    label = bwlabel(bin1);
    %fim= zeros(size(bin1));
    tam = max(max(label));
    %sel = label == 1
    %final(sel) = 255;

    arq = fopen('area.txt', 'w');
    fprintf(arq, 'Rot \t Soma \n');

    for i = 1: tam
        sel = label == i;
        %imshow(sel)
        %fim(sel) = rot;
        %rot = rot +3;
        soma = sum(sum(sel));
        fprintf(arq, '%d \t %d\n', i, soma);

    end

    fclose(arq);

    %fissuras
    mascara = (imerode(imfill(dil, 'holes'), fspecial('disk',10)> 0 ));
    mascara = mascara(inicioY:fimY, inicioX:fimX);
    imwrite(mascara, 'mascara.bmp');

    temp1 = mascara == 1;
    temp2 = bin1 == 0;
    fissuras = (temp1 == temp2);
    % disp('AreaFissuras: ');
    areafissura = sum(sum(fissuras))

    imwrite(fissuras, 'fissuras.bmp');

    [alt1, larg1] = size(fissuras);
    carreiras = zeros(larg1,1);

    diametro = 0;

    for i=1:alt1
        temp = 0;
        aux = 0;
        for j=1:larg1
            %diametro
            if(mascara(i,j) == 1)
                aux = aux +1;
            elseif (aux > diametro )
                diametro = aux;
                aux =0;
            else
                aux = 0;
            end
        end
    end

```

```
    %histograma fissura
    if(fissuras(i,j) == 1)
        temp = temp+1;
    elseif (temp >0)
        carreiras(temp)= carreiras(temp)+1;

        temp = 0;
    end
end
%histograma fissuras
if (temp >0)
    carreiras(temp)= carreiras(temp)+1;

end

%diametro
if (aux > diametro )
    diametro = aux;
end
end

[freq, largFissuraMedia] = max(carreiras)

diametro = diametro

end
```